



Investigation the Sidesway Collapse and Seismic Fragility Analysis of Frames with BRB Equipped with SMAs

S. V. Hashemi¹, M. Miri¹, M. Rashki², S. Etedali³

¹ Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

² Department of Architectural Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

³ Department of Civil Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

Review History:

Received: Oct. 03, 2020

Revised: Feb. 16, 2021

Accepted: May, 14, 2021

Available Online: May, 17, 2021

Keywords:

Buckling restrained brace

Shape memory alloy

Nonlinear incremental dynamic analysis

Seismic fragility analysis

Collapse duration

ABSTRACT: Although Buckling-Restrained Braces (BRBs) can dissipate a large amount of the seismic input energy. However, they need to be repaired or replaced due to large permanent deformation after a severe earthquake. To overcome this issue, the use of Shape Memory Alloys (SMAs) in the braces has recently received attention. These alloys are able to return to their original state after loading. The present study aims to analyze the fragility curves and to investigate the sidesway collapse of the BRB frames equipped with SMA during near-field earthquakes in comparison with those given for the case without SMA. For the purposes, two 5 and 15-story BRB and BRB-SMA frames subjected to 7-pair of near-fault earthquake records are studied. Nonlinear Incremental Dynamic Analyses (IDAs) are carried out using OpenSees software. On average, the simulation results showed that the collapse capacity and collapse duration of the BRB-SMA frames are about 30% and 35% more than those given for the BRB frames, respectively. For instance, a collapse probability of 38% for the 5-story BRB-SMA frame and a collapse probability of 60% for the BRB frame is given for 3g spectral acceleration. Furthermore, at the performance level of 50% for the 15-story frame, the collapse duration of the BRB-SMA frame is obtained 25.6 seconds, while it is given about 10 seconds for the BRB frame. In addition, the use of a memory alloy for spectral accelerations of 1 to 4 g resulted in a reduction of 50% to reach the collapse performance level of the frames.

1- Introduction

Today, frames with buckling restrained brace (BRB) are considered as a lateral load-resistant system. Due to the lack of buckling in the compression, their hysteresis curve is stable, but these braces also have disadvantages. These disadvantages include permanent deformation of the structure after loading, as well as the cost of replacing these members after failure and leakage of the steel core of these braces. To fix these defects, shape memory alloy (SMA) is used. Its two important properties are the shape memory effect and their super-elastic properties. Shape memory alloys are a type of intelligent material that have significant potential for controlling the responses of structures with BRB [1-4]. Nowadays, it is important to study the sidesway collapse of structures and the development of fragility curves to evaluate the seismic behavior of structures. Researchers have presented some research in the field of steel moment frame structures [5-7], but limited research has been done on structures equipped with bracing systems. Considering that the implementation of steel structures with various bracing systems is common in our country, the study and compare the probability of their behavior by considering appropriate earthquakes can give a new perspective on the behavior of these systems. Therefore, in this study, considering 5 and 15-story steel structures with BRB system, expect a more

*Corresponding author's email: mmiri@eng.usb.ac.ir

accurate assessment of the role of using shape memory alloy in the collapse potential of structures under 7 pairs of near fault earthquakes. In addition, investigating the role of shape memory alloys in the collapse capacity of steel frames, probabilistic evaluation and comparison of frame behavior with the development of fragility curves at different performance levels of FEMA P695 [8] has been performed. Also, by examining the collapse duration of structures in both cases with and without shape memory alloy, the effectiveness of shape memory alloys in improving the collapse duration and seismic system resilience can be studied.

2- Methodology

The step-by-step research method is presented as follows:

- 1- Design of regular steel frames with BRB with and without shape memory alloy.
- 2- Preparing nonlinear models of the studied frames and selecting 7 pairs of near fault earthquakes based on FEMA P695 instruction.
- 3- Performing incremental nonlinear dynamic analyses of the studied frames under selected earthquakes.
- 4- Estimation of sidesway collapse capacity and collapse duration of steel frames with BRB with and without shape memory alloy.
- 5- Development of seismic fragility curves at the collapse performance level.



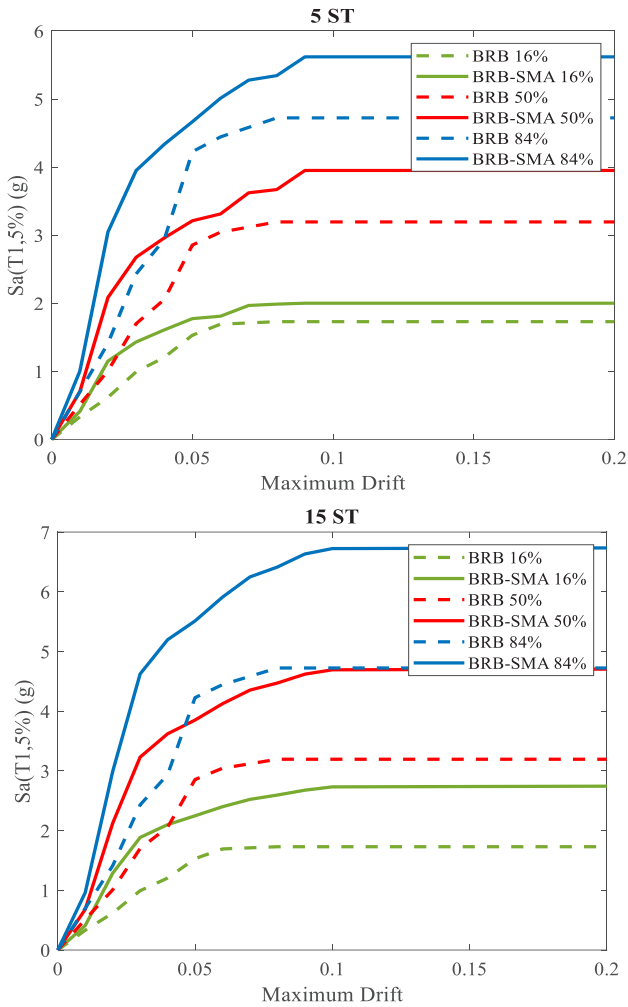


Fig. 1. The summarized results of incremental dynamic analysis of 5 and 15-story frames with BRB in two modes with and without SMA

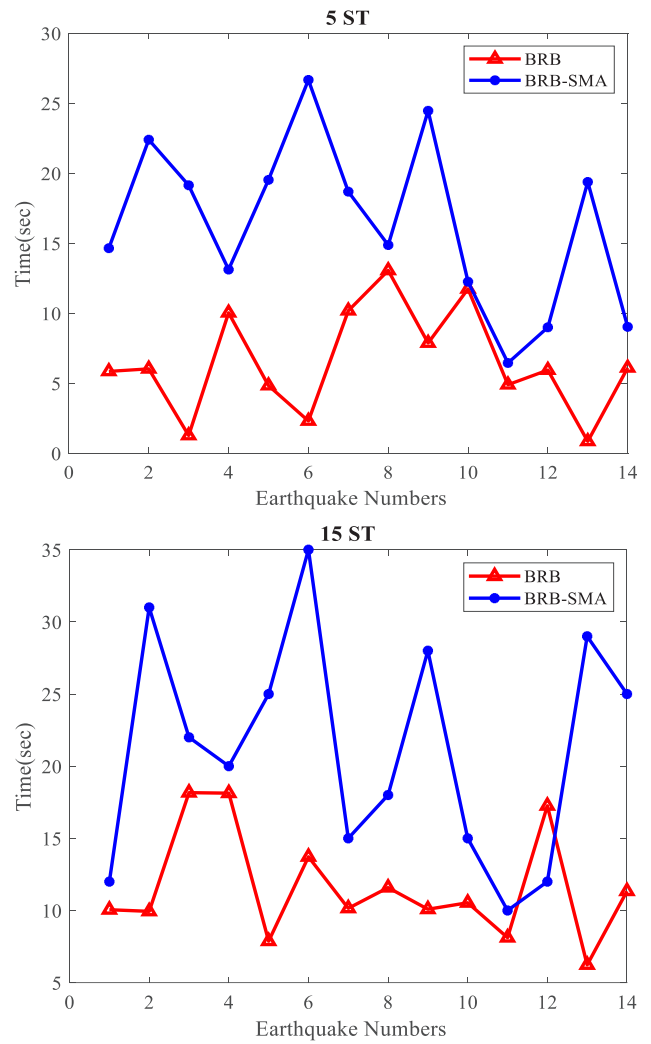


Fig. 2. Comparison of the collapse duration of the studied frames due to near fault earthquakes

3- Results and Discussion

In this study, in order to evaluate the performance of steel frames with BRBs equipped with shape memory alloys, nonlinear incremental dynamic analysis (IDA) has been used under 7 pairs of near fault earthquakes. The outputs of this analysis include IDA and fragility curves. Fragility curves can be summarized for 16, 50 and 84% probability levels in terms of the probability distribution of the normal log, which is also presented in the PEER report [9]. In this study, based on code 361 [10], drift values of 0.7, 2.5 and 5% have been considered as performance levels of immediate occupancy (IO), life safety (LS) and collapse prevention (CP). Nonlinear incremental dynamic analysis is applied to each record with spectral acceleration steps of 0.1 g. The collapse capacity of each frame is the largest spectral acceleration that the frame has withstood.

In this study, IDA curves were summarized at three levels of 16%, 50% and 84%. As shown in Figure 1, the summarized curves of the IDA analyses correspond to both

frame modes. It is clear that the sideways collapse capacity of the BRB-SMA frame is higher than other frames. According to this figure, as an example, in a 5-story frame, the level of 84% of the BRB frame corresponds well with the level of 50% of the BRB-SMA frame with the level of 16% of the BRB-SMA frame.

According to Figure 2, a comparison of the collapse duration of the considered frames under the effects of the studied earthquakes is presented. It is known that the collapse duration is maximum under the second component of the Irpinia earthquake and minimum during the first component of the Cape Mendocino earthquake. The reason for this difference is due to the nature of near fault earthquakes. It is also observed that the collapse duration of the BRB-SMA frame is longer than the time required for the BRB frame collapse for most earthquakes. The BRB frame provides the minimum time required for sideways collapse. As shown in Figure 3, the BRB-SMA frame has shown a longer collapse duration than other frames. In a 15-story frame, for example, at the level of 16% of the input

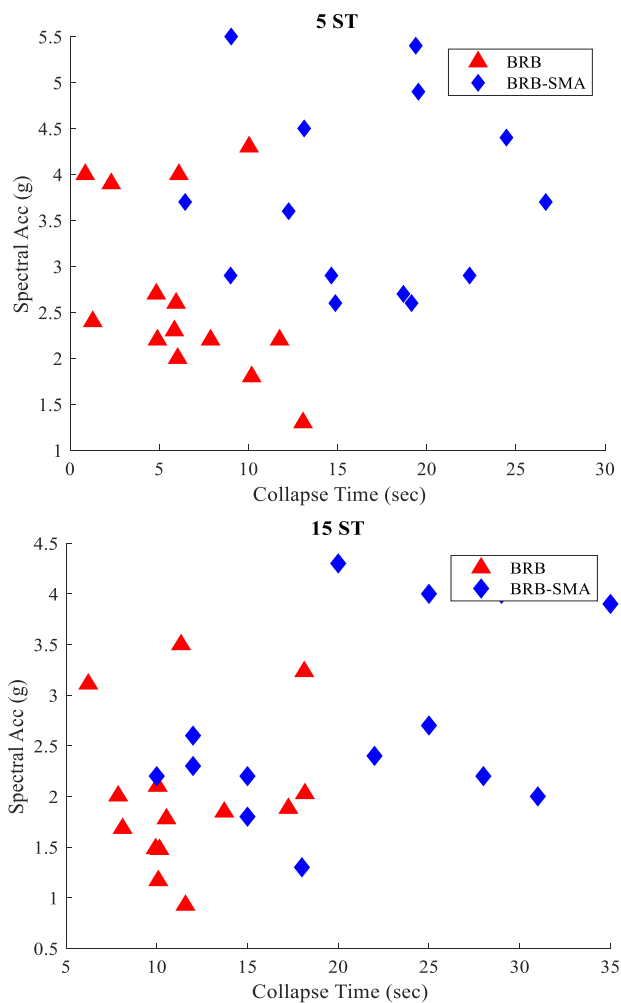


Fig. 3. The collapse capacity of the studied frames under 7 pairs of earthquakes

records, the collapse duration of the BRB-SMA frame is 17 seconds and that of the BRB frame is 5 seconds. Also, at the level of 50% of the input records, the collapse duration of the BRB-SMA frame is 25.6 seconds and the BRB frame is 10 seconds, and at the level of 84% of the input records, the collapse duration of the BRB-SMA and BRB frame are 32 and 18 seconds, respectively.

4- Conclusions

In this study, the role of shape memory alloy was investigated in increasing the duration of collapse and sidesway collapse capacity of BRB frames under near fault earthquakes. The following results can be mentioned below:

1. Based on the results of incremental dynamic analysis, a frame with BRB-SMA showed the highest collapse capacity and a frame with BRB indicated the lowest collapse capacity. Also, the rate of spectral acceleration has enhanced by increasing the height of the specimens with shape memory alloy.

2. Based on fragility curves, performance levels of immediate occupancy (IO), life safety (LS) and collapse

prevention (CP) of frames were compared. The results showed that the use of shape memory alloy in the BRB has significantly increased the collapse capacity of mid-rise and high-rise structures. For example, at the 84% probability level, the collapse capacity of a 15-story frame with the BRB-SMA increased in comparison with 16% probability level of BRB frame.

3. The sidesway collapse duration in BRB frames with shape memory alloy has increased compared to the state without it. Also, the results related to the collapse duration showed that at high spectral accelerations, the sidesway collapse duration of the frames decreased

References

- [1] T. Wakui, Y. Tanzawa, T. Hashizume, T. Nagao, Hybrid configuration of Darrieus and Savonius rotors for stand-alone wind turbine-generator systems, *Electrical Engineering in Japan*, 150(4) (2005) 13-22. [1] S.V. Hashemi, M. Pouraminian, A. Sadeghi, Seismic Fragility Curve Development of Frames with BRB's Equipped with Smart Materials subjected to Mainshock-Aftershock Ground Motion. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (2021). (In Persian).
- [2] B. Asgarian, S. Moradi, Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces, *Journal of Construction steel research*, Elsevier, 67(1) (2011) 65-74.
- [3] D. J. Miller, L. A. Fahnestock, M. R. Eatherton, Development and experimental validation of a nickel-titanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace, *Engineering Structures*, 40 (2012) 288-298.
- [4] A. Fayeq Ghowsi, D. Ranjan Sahoo, Seismic response of SMA-based self-centering buckling-restrained braced frames under near-fault ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 139 (2020).
- [5] A. Sadeghi, S.V. Hashemi, K. Mehdizadeh, Probabilistic Assessment of Seismic Collapse Capacity of 3D Steel Moment-Resisting Frame Structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (2020).
- [6] K. Mehdizadeh, A. Karamodin, A. Sadeghi, Progressive Sidesway Collapse Analysis of Steel Moment-Resisting Frames Under Earthquake Excitations. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng* (2020).
- [7] V. Saberi, H. Saberi, A. Sadeghi, Collapse Assessment of Steel Moment Frames Based on Development of Plastic Hinges. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(11) (2020) 1-21. (In Persian).
- [8] FEMA P 695. Quantification of Building Seismic Performance Factors. Washington, D.C. Federal Emergency Management Agency, USA, (2009).
- [9] L. F. Ibarra, H. Krawinkler, Global collapse of frame structures under seismic excitations. Report No. PEER 2005/06, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, University of California at Berkeley, Berkeley, California, (2005).
- [10] Commentary of Instruction for seismic Rehabilitation of Existing Buildings, NO: 361. Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization, (2018).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. V. Hashemi, M. Miri, M. Rashki, S. Etedali, Investigation the Sidesway Collapse and Seismic Fragility Analysis of Frames with BRB Equipped with SMAs, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 149-152.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19082.7060](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19082.7060)





بررسی فروریزش تدریجی و تحلیل شکنندگی لرزه ای قاب های دارای مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ های حافظه دار شکلی

سیده وحیده هاشمی^۱، محمود میری^{۲*}، محسن راشکی^۱، صادق اعتدالی^۲

۱-دانشکده هنر و معماری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲-دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۲

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

کلمات کلیدی:

مهاربند کمانش تاب

آلیاژ حافظه دار شکلی

تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی

تحلیل شکنندگی لرزه ای

مدت زمان فروریزش

خلاصه: اگر چه مهاربندهای کمانش تاب قادر به اتلاف مقادیر زیادی از انرژی ورودی زلزله می باشند، اما به دلیل تغییر شکل های ماندگار بزرگ بعد از یک زلزله قوی نیاز به تعمیر یا تعویض دارند. لذا، استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی در این مهاربندها مورد توجه قرار گرفته است. این آلیاژها می توانند پس از باربرداری به وضعیت اولیه خود باز گردند. هدف از مطالعه حاضر، بررسی فروریزش تدریجی و تحلیل شکنندگی قاب های دارای مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ های حافظه دار تحت زلزله های نزدیک به گسل در مقایسه با قاب های بدون آلیاژ است. برای این منظور، دو قاب ۵ و ۱۵ طبقه دارای مهاربند کمانش تاب با و بدون آلیاژ حافظه دار تحت ۷ زوج شتاب-نگاشت نزدیک گسل مورد مطالعه قرار گرفته اند. تحلیل های دینامیکی غیرخطی افزایشی با استفاده از نرم افزار OpenSees بر روی قاب ها انجام شده است. نتایج نشان داد که به طور میانگین، ظرفیت و مدت زمان مورد نیاز جهت فروریزش سازه های دارای مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ نسبت به سازه های دارای مهاربند های کمانش تاب به ترتیب ۳۰ و ۳۵ درصد بیش تر است. به عنوان نمونه، به ازای شتاب طیفی g_3 ، احتمال فروریزش برای قاب ۵ طبقه با مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ ۲۸ درصد و برای قاب بدون آلیاژ ۶۰ درصد می باشد. در قاب ۱۵ طبقه نیز در سطح آماری ۵۰ درصد، مدت زمان فروریزش قاب با مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ، ۲۵/۶ ثانیه و قاب بدون آلیاژ، ۱۰ ثانیه می باشد. علاوه بر این، به ازای شتاب های طیفی ۱ تا ۴، استفاده از آلیاژ حافظه دار، امکان رسیدن به سطح عملکردی آستانه ی فروریزش را بیش از ۵۰ درصد کاهش می دهد.

۱- مقدمه

خاصیت مهم آن ها، اثر حافظه دار شکلی و خاصیت فوق الاستیک بودن آن هاست. آلیاژهای حافظه دار شکلی نوعی از مصالح هوشمندند که پتانسیل قابل توجهی برای کنترل پاسخ های سازه های مهاربندی کمانش تاب را دارند [۱ و ۲]. آلیاژ حافظه دار عنوان گروهی از مواد محرک می باشد که خواص متمایز و برتری نسبت به سایر آلیاژها دارند. عکس العمل شدید این مواد نسبت به برخی از پارامترهای ترمودینامیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه به گونه ای است که می تواند رفتار سیستم را بهبود بخشد. در دمای پایین یک نمونه حافظه دار می تواند تغییر شکل پلاستیک چند درصدی را تحمل کند و سپس به شکل اولیه خود در دمای بالا باز گردد [۳-۶]. اگر بتوان سیستم مهاربندی کمانش تاب را به وسیله ی مصالح دارای خاصیت ارتجاعی بالا و کرنش پسماند اندک، نظیر آلیاژهای حافظه دار شکلی تسلیح کرد، می توان به یک سیستم با برگشت پذیری بالا دست یافت [۷]. سیستم های هوشمند در مهندسی سازه به سیستم هایی اطلاق می شود که به طور خودکار قابلیت انطباق رفتار سازه در پاسخ به بارگذاری غیرمترقبه را دارا هستند

امروزه قاب های دارای مهاربند کمانش تاب (BRB)، به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی در نظر گرفته می شود. با توجه به عدم کمانش در فشار، نمودار هیستریزس آن ها پایدار است ولی این مهاربندها دارای معایبی نیز می باشند. از جمله این معایب می توان به ایجاد تغییر شکل های ماندگار در سازه بعد از پایان بارگذاری و همچنین هزینه بر بودن تعویض این اعضا پس از خرابی و جاری شدن هسته ی فولادی این مهاربندها اشاره نمود. برای رفع این نواقص، از آلیاژ حافظه دار شکلی (SMA) استفاده می شود. در سال های اخیر، یک مجموعه از آلیاژهای فلزی، مرکب از میرایی ذاتی بالا و خصوصیات مقاومتی نسبتا بالا به طور فزاینده در کاربردهای صنعتی جدید مطرح شدند که آلیاژهای حافظه دار شکلی نام دارند. دو

- 1 Buckling Restrained Brace
- 2 Shape Memory Alloy

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mmiri@eng.usb.ac.ir



فولادی با ورق نازک بدون آلیاژ^۴ (SPSW-Base)، تحت بار دورهای مشابه قرار گرفت نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش درصد آلیاژ مصرفی شکل پذیری نیز افزایش یافته است [۱۵]. در سال ۲۰۱۸، میرزایی و همکاران از آلیاژ حافظه دار شکلی در قاب‌های با مهاربندهای هم‌محور با عضو قائم استفاده کردند و نتایج نشان داد که استفاده از آلیاژ حافظه دار شکلی باعث اتلاف بیش‌تر انرژی زلزله می‌گردد [۱۶]. سانژینگ و همکاران^۵ در سال ۲۰۱۸، با به کار بردن آلیاژ حافظه دار در قاب‌های با مهاربندهای هم‌گرای هشتی، عملکرد آن‌ها را با مهاربندهای کمانش‌تاب مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که بهتر است از مهاربندهای هم‌گرای مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی به جای مهاربند کمانش‌تاب استفاده گردد [۱۷]. نظری مفرد و شکرگزار در سال ۲۰۱۹، در دو سازه ۴ و ۸ طبقه، آلیاژ حافظه دار شکلی را در هسته مهاربند کمانش‌تاب به کار بردند. سپس با انجام تحلیل پوش‌آور و دینامیکی افزایشی، عملکرد لرزه‌ای آن‌ها را تحت ۶ شتاب‌نگاشت زلزله ارزیابی کردند. نتایج این تحقیق حاکی از بهبود پاسخ‌های لرزه‌ای مورد مطالعه بوده است [۱۸]. پاچیده و همکاران در سال ۲۰۲۰، به مطالعه آزمایشگاهی و عددی اثرات ناشی از نوع فولاد هسته و فاصله‌ی هسته از غلاف بر رفتار مهاربند کمانش‌تاب پرداخته‌اند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که استفاده از فولاد نرم‌تر با تنش تسلیم پایین‌تر و با ضخامت برابر در هسته موجب کاهش ظرفیت باربری و مقاومت مهاربند می‌گردد [۱۹]. صابری و همکاران در سال ۲۰۲۰، به بررسی تأثیر جنس، ضخامت و سوراخ‌دار بودن صفحات کناری بر عملکرد چرخه‌ای اتصال خمشی پرداخته‌اند. برای این منظور علاوه بر استفاده از صفحات کناری از جنس فولاد نرمه و فولاد پر مقاومت کم آلیاژ، از آلیاژ حافظه دار شکلی نیکل-تیتانیوم نیز استفاده شده است تا اثر فوق الاستیک این آلیاژ بر عملکرد اتصال نیز مورد بررسی قرار گیرد [۲۰]. پاچیده و همکاران در سال ۲۰۲۰، به معرفی و بررسی عملکرد آزمایشگاهی سیستم نوین مهاربندی و ترکیب آن با میراگر تسلیم شونده پرداخته‌اند. این سیستم که در راستای افزایش شکل‌پذیری، جذب انرژی بالاتر و پوشش ضعف‌های سیستم‌های موجود مورد پیشنهاد و بررسی قرار گرفته است، از یک عضو مهاربند لوزی شکل به همراه میراگر تسلیم شونده حلقوی در وسط آن تشکیل شده است. در ساخت نمونه‌ها ۳ مدل مختلف با اتصالات صلب، نیمه صلب و مفصلی مدنظر قرار گرفته است که پس از ساخت، تحت بار چرخه‌ای قرار گرفته و نتایج آن‌ها با یکدیگر مورد مقایسه شدند. نتایج این تحقیق بیانگر قابلیت بالای هر سه سیستم در جذب انرژی

تا بدین وسیله، ایمنی، افزایش عمر و کارایی سازه تأمین شود. استفاده از چنین مصالحی در اعضای ساختمانی فیوز شونده باعث می‌شود که پس از زلزله، سازه آسیب دیده زودتر به حالت بهره‌برداری برگردد یا هزینه‌های تعمیر و بازسازی آن کاهش یابد. این آلیاژها به سبب وقوع تبدیل فاز در ساختار کریستالی، قادر به بازگشت شکل اولیه‌ی خود در تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد [۹ و ۸]. در ادامه، تاریخچه‌ی پژوهش در زمینه‌ی مهاربند کمانش‌تاب و آلیاژ حافظه دار شکلی به منظور تبیین چارچوب نظری تحقیق حاضر ارائه شده است:

عسگریان و مرادی در سال ۲۰۱۱، به بررسی قابلیت کاربرد آلیاژهای حافظه دار شکلی در مهندسی سازه و زلزله پرداخته‌اند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از این آلیاژها در سازه‌ها و به خصوص در مهاربندها می‌تواند موجب کاهش تغییر شکل‌های پسماند پس از زلزله گردد [۱۰]. در سال ۲۰۱۴، میلر و همکاران^۱ مطالعه‌ی آزمایشگاهی و محاسباتی روی مهاربندهای کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی انجام دادند. نتایج حاکی از بهبود رفتار لرزه‌ای این نوع مهاربندها می‌باشد [۱۱]. میرزااحسینی و گرامی در سال ۲۰۱۷، ضمن ارزیابی خواص آلیاژ نوین پایه مس Cu-Al-Mn، قابلیت مدل‌های رفتاری برای شبیه‌سازی عددی این آلیاژ را بررسی نمودند. نتایج شبیه سازی عددی رفتار آلیاژ Cu-Al-Mn در آزمایش کشش و شبه استاتیکی توسط دو مدل فاگازا و خود بازگشتی نشان داد، این مدل‌ها در کنار سادگی کاربرد و عدم نیاز به پارامترهای آزمایشگاهی پیچیده، انطباق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی داشته‌اند [۱۲]. هو و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۷، سه نوع آلیاژ حافظه دار شکلی پایه مسی، آهنی و نیکلی در مهاربند هم‌گرای ۳ طبقه را مورد بررسی قرار دادند و تأثیر این سه نوع آلیاژ را در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که آلیاژ حافظه دار شکلی پایه مسی عملکرد بهتری داشته است [۱۳]. شی و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۸، سازه‌ی مهاربندی فولادی مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی را تحت ۷ زلزله‌ی نزدیک گسل مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی قرار دادند و نتایج نشان داد که سطح خسارت در حد آستانه‌ی فروریزش می‌باشد [۱۴]. قلهدکی و همکاران در سال ۲۰۱۸، نمونه‌های دیوار برشی فولادی سه طبقه با ورق نازک با مقیاس یک سوم، دارای درصدهای مختلف از آلیاژ حافظه دار شکلی Ni-Ti، تحت بار چرخه‌ای قرار دادند، همچنین یک نمونه دیوار برشی

- 1 Miller et al.
- 2 Hou et al.
- 3 Shi et al.

4 Steel Plate Shear Wall-Base
5 Canxing et al.

و شکل‌پذیری می‌باشد [۲۱].

(DM) ^۴ انتخاب شوند. انتخاب مناسب این دو پارامتر اهمیت زیادی دارد و در سال‌های گذشته تحقیقات مختلفی در این زمینه انجام شده است. انتخاب یک IM مناسب، منجر به پراکندگی کمتر پاسخ‌های لرزه‌ای می‌شود و در نتیجه تخمین‌های دقیق‌تری می‌توان ارائه نمود. پارامتر مناسب IM معمولاً شتاب حداکثر زلزله (PGA) ^۵ و یا شتاب طیفی در مد اول سازه با میرایی ذاتی ۵ درصد ($S_a(T_1, 5\%)$) می‌باشد که با توجه به پیشنهادها مراجع مختلف استفاده از این پارامتر باعث پراکندگی کمتر پاسخ‌های تحلیل‌های IDA می‌گردد. DM، به منظور انعکاس هر چه بهتر پاسخ سازه‌ای است و به طور متداول برابر حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای (گریز طبقه) در نظر گرفته می‌شود. برای انجام تحلیل‌های IDA، رکوردهای زلزله متناسب با شرایط تحلیل و موقعیت سازه و با تعداد مورد قبول انتخاب می‌گردد [۲۴] و [۲۳]. در این تحقیق تحلیل‌های IDA با گام‌های کوچک و کنترل شونده انجام شده است. با توجه به هدف ارزیابی ظرفیت فروریزش سازه‌ها تحت زلزله‌های مختلف، به منظور به دست آوردن پاسخ‌های دقیق‌تر، در بازه‌های نزدیک به فروریزش گام‌های تحلیل کوچک‌تر شده است. از ابتدای شروع تحلیل‌های فواصل گام‌ها ۰/۱ شتاب طیفی و در آخرین بازه فواصل گام‌ها به ۰/۰۲ کاهش یافته است. همچنین به منظور همگرایی پاسخ‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی از الگوریتم هانت-فیل ^۶ استفاده شده است. به منظور بیان کمی آسیب‌پذیری اجزای مختلف سازه‌ای و یا غیرسازه‌ای بر حسب میزان خطر زلزله می‌توان در مورد هر نوع از سازه‌ها یا اجزای غیرسازه‌ای حساس به جابجایی نسبی و اجزای غیرسازه‌ای حساس به شتاب، احتمال وقوع یا فراگذشت از یک میزان خسارت خاص را بر حسب یک ویژگی معرف زلزله نظیر PGA، PGV ^۷ و PGD ^۸ بیان کرد. تکرار این عملیات برای مقادیر مختلف PGA یا سایر تک‌پارامترها، منجر به تولید منحنی‌های نرمال شده‌ای موسوم به منحنی شکنندگی می‌شود. مطالعات مختلف نشان داده است که پارامترهای ظرفیت و تقاضای لرزه‌ای سازه با توزیع احتمالاتی لوگ نرمال مطابقت بیشتری دارند و منحنی‌های شکنندگی به صورت تابع چگالی احتمالاتی جمع‌می‌گردد. لوگ نرمال انتخاب مناسب‌تری می‌باشد [۲۴]. مطابق رابطه‌ی (۱) تابع شکنندگی تخمینی از احتمال فراگذشت میزان خرابی از حدود مشخصی برای یک شدت مشخص از زلزله را بیان می‌کند.

امروزه بررسی فروریزش تدریجی سازه‌ها و توسعه منحنی‌های شکنندگی جهت ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها امری مهم می‌باشد. محققان در سازه‌های قاب خمشی در این زمینه تحقیقاتی ارائه داده‌اند [۲۲-۲۴]، ولی در سازه‌های مجهز به سیستم‌های مهاربندی تحقیقات محدودی انجام گرفته است. با توجه به اینکه اجرای سازه‌های فولادی با انواع سیستم‌های مهاربندی در کشورمان رایج می‌باشد، بررسی و مقایسه‌ی احتمالاتی رفتار آن‌ها با در نظر گرفتن زلزله‌های مناسب می‌تواند نگرشی نو نسبت به رفتار این سیستم‌ها ایجاد نماید. لذا در این تحقیق، با در نظر گرفتن سازه‌های فولادی ۵ و ۱۵ طبقه با سیستم مهاربندی کمانش‌تاب، انتظار ارزیابی دقیق‌تری از نقش کاربرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی در پتانسیل فروریزش سازه‌ها تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل پیش‌بینی شده است. علاوه بر بررسی نقش آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در ظرفیت فروریزش قاب‌های فولادی، ارزیابی و مقایسه احتمالاتی رفتار قاب‌ها با توسعه منحنی‌های شکنندگی در سطوح مختلف عملکرد دستورالعمل FEMA P ۶۹۵ [۲۵] انجام شده است. همچنین با بررسی مدت زمان فروریزش سازه‌ها در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی، میزان اثر بخشی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در بهبود مدت زمان رخداد فروریزش مورد مطالعه قرار گرفته است و می‌توان تاب‌آوری سیستم لرزه‌ای مدنظر را افزایش داد.

۲- مبانی تحقیق

در این روش یک رکورد زمین‌لرزه به نحوی بر سازه اعمال می‌شود که محدوده‌ی وسیعی از شدت‌های لرزه‌ای و پاسخ‌های سازه را در برگیرد. به منظور انجام تحلیل‌های IDA ^۱، با در نظر گرفتن اهمیت عدم قطعیت محتوی فرکانسی رکوردها و اثر شکل طیف زلزله‌ها، تعداد قابل قبولی رکوردهای زمین‌لرزه انتخاب می‌شوند. این شیوه‌ی تحلیل غیرخطی در توصیه‌های آئین‌نامه‌ای به عنوان روشی برای پیش‌بینی ظرفیت سازه‌ها در سطوح عملکرد مختلف مورد استفاده قرار گرفته است و در این مطالعه در قالب روش برآورد احتمالاتی تقاضای لرزه‌ای (PSDA) ^۲ مطرح می‌شود [۲۲]. به منظور انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی، ابتدا باید پارامترهای مناسبی برای انعکاس شدت لرزه‌ای (IM) ^۳ و پارامتر تقاضا)

- 4 Damage Measure
- 5 Peak Ground Acceleration
- 6 Hunt & Fill Algorithm
- 7 Peak Ground Velocity
- 8 Peak Ground Displacement

- 1 Nonlinear Incremental Dynamic Analysis
- 2 Probabilistic Seismic Demand Analysis
- 3 Intensity Measure

منظور نیل به اهداف این تحقیق، ابتدا سازه‌های ۵ و ۱۵ طبقه به صورت سه بعدی بر اساس مباحث مقررات ملی ساختمان (مبحث ششم و دهم مقررات ملی [۲۶ و ۲۷]) و استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۲۸] طراحی گردید. به منظور طراحی سازه‌های مذکور از تحلیل‌های استاتیکی معادل و دینامیکی طیفی استفاده شده است [۲۹]. مقاطع طراحی شده برای قاب‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. جهت انجام تحلیل‌های دینامیکی افزایشی از زوج شتاب‌نگاشت FEMA P ۶۹۵ استفاده شد. این دستورالعمل ارزیابی احتمالاتی فروریزش سازه‌ها را در بر می‌گیرد. مطابق FEMA P ۶۹۵، به منظور کاهش پراکندگی نتایج، این شتاب‌نگاشت‌ها ابتدا نسبت به سرعت حداکثر شتاب‌نگاشت مقیاس شده‌اند. همچنین در تحقیق حاضر شتاب طیفی همه‌ی رکوردها در زمان تناوب مد اول سازه، به عدد یک مقیاس گردید.

در ادامه‌ی مدل‌سازی، در هر سازه یکی از قاب‌های کناری با استفاده از نرم‌افزار OpenSees [۳۰] به صورت دو بعدی مدل شده و رفتار غیرارتجاعی قاب‌ها، که در دهانه‌های مختلف دارای مهاربندند، در دو حالت مهاربند کمانش‌تاب با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی تحت ۱۴ شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل پیشنهادی دستورالعمل FEMA-P۶۹۵ بررسی شده است. هر سازه ۱۴ بار (معادل ۷ زوج شتاب‌نگاشت) تحت تحلیل دینامیکی افزایشی قرار گرفت و برای هر تحلیل یک ظرفیت فروریزش به دست آمد و تعداد داده‌های کافی جهت ارزیابی دقیق‌تر احتمال فروریزش قاب‌ها استفاده گردید. سپس منحنی‌های شکنندگی با استفاده از خروجی‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی توسط نرم‌افزار آماری Easyfit ۵.۵ ترسیم شده‌اند و از تفسیر نتایج آن در جهت تعیین سطوح عملکرد سازه بهره گرفته می‌شود. پلان سازه‌های مذکور مطابق شکل ۱ در هر طرف دارای ۶ دهانه می‌باشد. فاصله‌ی دهانه‌ها ۶ متر و ارتفاع طبقات ۴ متر در نظر گرفته شده است. بار مرده‌ی طبقات ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و بار زنده‌ی طبقات و بام به ترتیب ۲۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مربع لحاظ گردید. نمای قاب دو بعدی کناری مطابق شکل ۲ ارائه شده است. در این مقاله، مصالح به کار رفته در تیرها، ستون‌ها و مهاربندها همگی از نوع ST۳۷ با مدول الاستیسیته برابر ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال، تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۳۷۰ مگاپاسکال، در نظر گرفته شده است. مصالح فولادی تک محوری دو خطی با سخت شوندگی سینماتیکی و سختی ایزوتروپیک بر اساس مدل Steel۰۱ با میزان سخت شدگی ۳ درصد فرض شده‌اند [۳۱]. برای اعضای سازه‌ای تیر و ستون از المان تیر-ستون

$$F_i(im) = P((D > d_i | IM = im)) \quad (۱)$$

در این رابطه، $F_i(im)$ ، احتمال فراگذشت خرابی از حالت خرابی تحت یک زلزله‌ی مشخص است. پارامترهای شدت زلزله بیانگر بزرگی زلزله می‌باشد و با پارامترهایی نظیر بیشینه شتاب زمین، شتاب طیفی مود اول سازه، بیشینه سرعت زمین و تغییر مکان طیفی (SD) بیان می‌شود. حالت خرابی (i) به صورت کمی از مقدار $i=0$ برای حالت بدون خرابی تا $i=n$ برای n امین حالت خرابی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه خرابی در سازه‌ها توسط انواع مختلفی از شاخص‌های خرابی اندازه‌گیری می‌شود، رابطه (۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت.

$$F_i(im) = P((DI > d_i | IM = im)) \quad (۲)$$

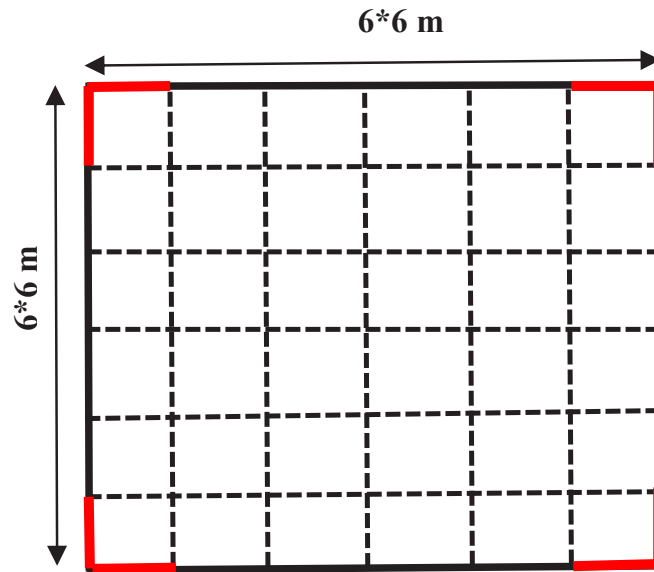
در رابطه‌ی فوق d_i شاخص خسارت متناظر با حالت خرابی i می‌باشد. با داشتن تابع چگالی احتمال در هر مقدار از شدت زلزله، می‌توان، $F_i(im)$ را بر اساس تئوری احتمالات مطابق رابطه‌ی (۳) به دست آورد [۲۴].

$$F_i(im) = P((DI > d_i | IM = im)) = 1 - \int_{-\infty}^{d_i} f_{im}(di) d(di) \quad (۳)$$

به منظور محاسبه‌ی تابع چگالی احتمال، سازه تحت رکوردهای مختلف زلزله که به شدت مشخصی مقیاس شده‌اند قرار می‌گیرد. اعمال رکوردهای زلزله‌ها به سازه معمولاً به صورت افزایشی و با افزایش تدریجی شتاب طیفی یا حداکثر شتاب آن‌ها انجام می‌شود. توزیع پاسخ سازه به ازای IM های مختلف استخراج و احتمال فراگذشت برای سطوح مختلف محاسبه می‌گردد.

۳- طراحی و مدل‌سازی

در این تحقیق، رفتار لرزه‌ای سازه‌های دارای سیستم مهاربندی کمانش‌تاب با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی بررسی و مقایسه می‌شود. به



شکل ۱. پلان مشترک سازه های ۵ و ۱۵ طبقه سه بعدی مورد استفاده در این تحقیق

Fig. 1. The similar plan of 5 and 15-story structures 3 dimensionally in this research

هندسی غیرخطی را به صورتی کاملاً دقیق از سیستم محلی به سیستم کلی محاسبه کرده است. همچنین اتصالات تیر به ستون و ستون به پی، صلب فرض شده است. شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر با مشخصات مندرج در جدول ۳ از سایت PEER [۳۳] استخراج شده‌اند و با استفاده از نرم‌افزار SeismoSignal [۳۴]، با میرایی ۰.۵٪ ارائه شده‌اند. در این جدول ضرایب مقیاس نهائی اعمال شده به شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر ارائه شده است. این ضرایب بدون اعمال شتاب جاذبه (g)، مقدار شتاب طیفی زلزله‌ها در زمان تناوب تجربی مد اول سازه را به عدد واحد مقیاس می‌کنند. در ادامه، گام به گام روش تحقیق به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

۱- طراحی قاب‌های فولادی منظم دارای مهاربند کمانش‌تاب با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی.

۲- تهیه مدل‌های غیرخطی قاب‌های مورد مطالعه و انتخاب ۷ زوج رکورد نزدیک به گسل پیشنهادی دستورالعمل FEMA P۶۹۵.

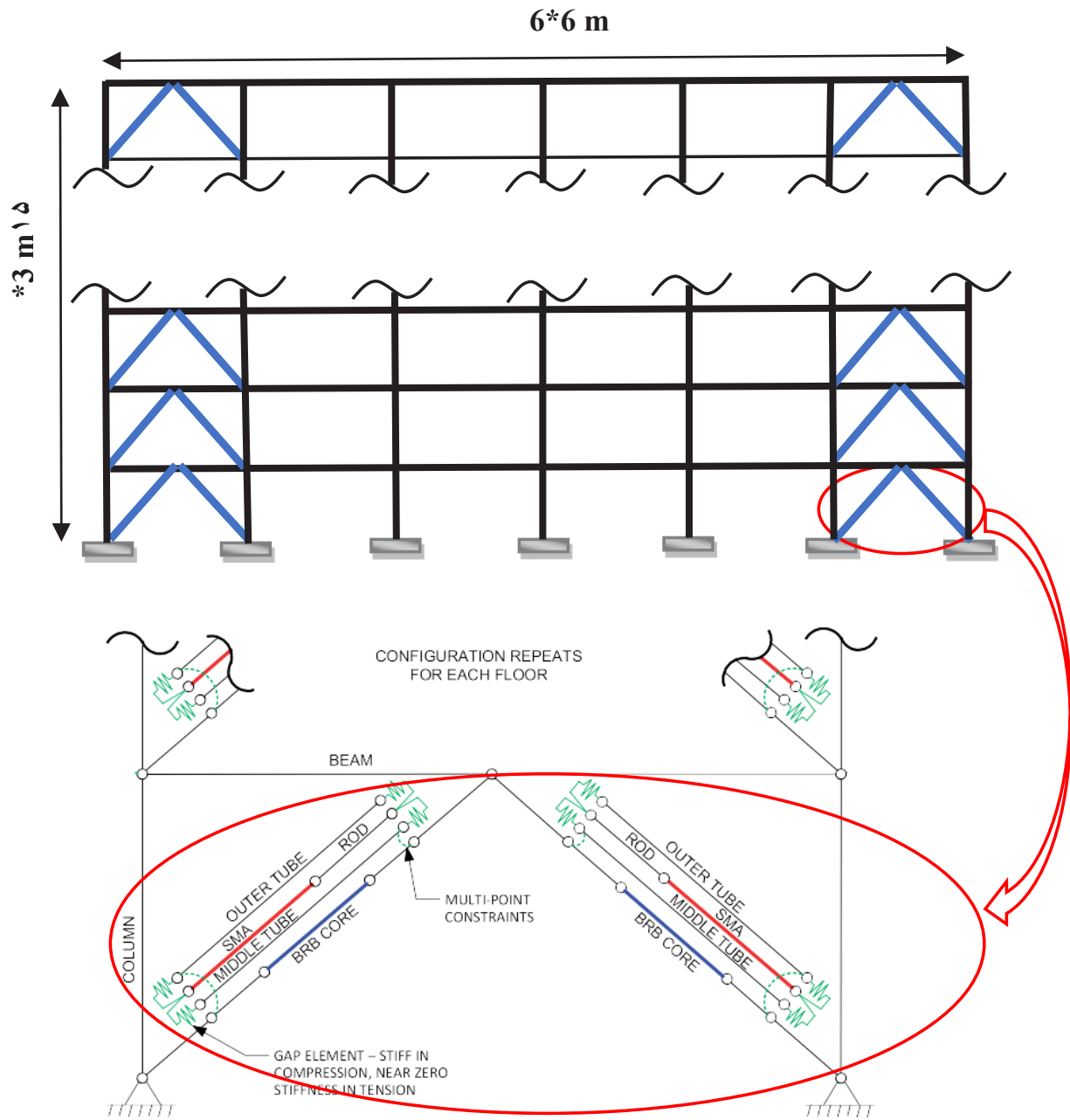
۳- انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایشی قاب‌های مورد مطالعه تحت رکوردهای انتخابی.

۴- برآورد ظرفیت فروریزش تدریجی و مدت زمان فروریزش قاب‌های فولادی دارای مهاربند کمانش‌تاب با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی.

۵- توسعه‌ی منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای در سطح عملکردی فروریزش.

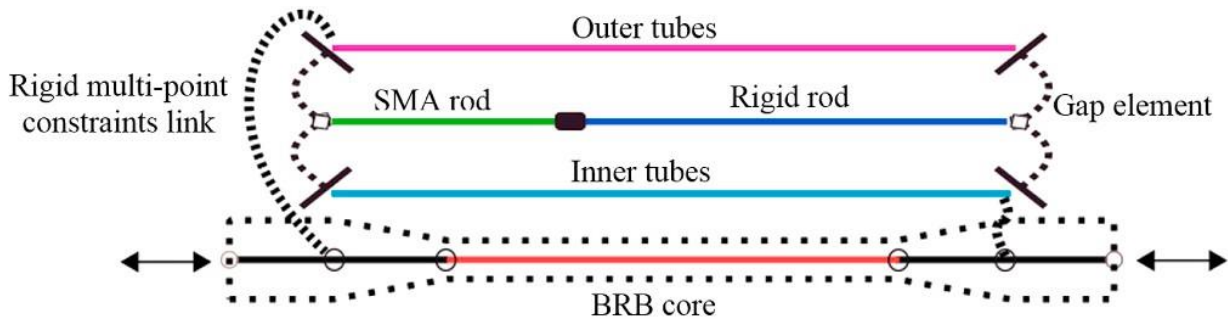
غیرخطی در مدل‌سازی استفاده شده است. این المان‌ها به صورت نیرویی^۱ و بر پایه‌ی پلاستیسیته‌ی گسترده می‌باشند تا رفتار واقعی المان‌ها را در تحلیل غیرخطی ارزیابی نمایند. در ادامه، مدل عددی مهاربند کمانش‌تاب مجهز به میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی در راستای غلاف‌های داخلی و خارجی مطابق شکل ۳ ارائه شده است. برای مدل‌سازی غلاف‌های داخلی و خارجی از المان تیر-ستون الاستیک با ممان اینرسی بالا استفاده شده است. این غلاف‌ها به انتهای الاستیک قطعات مهاربند کمانش‌تاب به وسیله‌ی المان zero-length متصل شده‌اند. المان‌های GAP در دو انتهای غلاف‌ها برای مدل‌سازی لغزش صفحات استفاده شده است. میله‌های صلب در راستای طول میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی به صورت المان الاستیک مدل شده‌اند. مصالح المان GAP در فشار الاستیک در نظر گرفته شده و از تاثیرات کشش صرف نظر گردیده است. المان اضافی نیز برای مدل‌سازی تماس بین صفحات لغزان و غلاف‌ها استفاده شده است. هسته مهاربند کمانش‌تاب و میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی به صورت المان تیر-ستون جابجایی^۲ مدل شده‌اند [۳۲]. برای مدل‌سازی این آلیاژها از دستور Self-Centering در نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. جهت برآورد رفتار غیرخطی هندسی از تبدیل همگرد استفاده شده است که در این نوع تبدیل، تبدیلات

-
- 1 Force Beam-Column Element
 - 2 Displacement Beam-Column Element



شکل ۲. قاب کناری استخراج شده از سازه های سه بعدی مورد نظر

Fig. 2. The side frame extracted from the studied 3D structures



شکل ۳. نمای شماتیک مه‌اربن‌د کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی [۳۲]

Fig.3. The schematic elevation of buckling restrained brace equipped with shape memory alloy

جدول ۱. مقاطع طراحی شده قاب ۵ طبقه

Table 1. Designed sections of 5-story frame

قاب دارای BRB-SMA		قاب دارای BRB		تیر		ستون		شماره طبقه
سطح مقطع هسته BRB (mm^2)	سطح مقطع SMA (mm^2)	سطح مقطع هسته BRB (mm^2)	سطح مقطع SMA (mm^2)	دهانه‌های وسط	دهانه‌های کناری	دهانه‌های وسط	دهانه‌های کناری	
۳۵۴/۳	۱۱۴۵/۱	۱۷۱۹/۲	۱۱۴۵/۱	IPE 270	IPE 550	BOX 25*25*2	BOX 30*30*3	طبقه ۱ و ۲
۲۹۸/۱	۹۶۲/۵	۱۵۴۸/۳	۹۶۲/۵	IPE 270	IPE 550	BOX 20*20*1.5	BOX 20*20*1.5	طبقه ۳ و ۴
۱۵۶/۲	۷۸۱/۸	۱۰۳۲/۲	۷۸۱/۸	IPE 270	IPE 360	BOX 20*20*1.5	BOX 20*20*1.5	طبقه ۵

جدول ۲. مقاطع طراحی شده قاب ۱۵ طبقه

Table 2. Designed sections of 15-story frame

قاب دارای BRB-SMA		قاب دارای BRB		تیر		ستون		شماره طبقه
سطح مقطع هسته BRB (mm^2)	سطح مقطع SMA (mm^2)	سطح مقطع هسته BRB (mm^2)	سطح مقطع SMA (mm^2)	دهانه‌های وسط	دهانه‌های کناری	دهانه‌های وسط	دهانه‌های کناری	
۹۸۷/۳	۳۶۸۹/۳	۴۵۸۵/۵	۳۶۸۹/۳	IPE 360	IPE 600	BOX 30*30*2.5	BOX 50*50*1	طبقه ۱ و ۲ و ۳
۸۹۸/۶	۳۰۱۵/۲	۴۱۲۶/۴	۳۰۱۵/۲	IPE 360	IPE 600	BOX 30*30*2	BOX 40*40*3	طبقه ۴ و ۵ و ۶
۸۵۳/۱	۲۶۷۴/۴	۳۶۴۳/۹	۲۶۷۴/۴	IPE 330	IPE 500	BOX 23*23*2	BOX 25*25*2	طبقه ۷ و ۸
۶۹۴/۵	۲۱۳۶/۲	۲۹۷۷/۸	۲۱۳۶/۲	IPE 330	IPE 450	BOX 22*22*1.5	BOX 25*25*1.5	طبقه ۹
۴۱۷/۳	۱۸۴۵/۴	۲۲۶۳/۳	۱۸۴۵/۴	IPE 300	IPE 400	BOX 21*21*1.5	BOX 25*25*1.5	طبقه ۱۰
۳۸۹/۴	۱۲۸۴/۹	۱۷۹۳/۱	۱۲۸۴/۹	IPE 270	IPE 360	BOX 21*21*1.5	BOX 23*23*1.5	طبقه ۱۱
۲۹۲/۱	۹۸۹/۹	۱۲۵۴/۳	۹۸۹/۹	IPE 250	IPE 330	BOX 20*20*1.5	BOX 22*22*1.5	طبقه ۱۲ و ۱۳
۱۲۵/۲	۴۲۶/۴	۸۶۴/۹	۴۲۶/۴	IPE 230	IPE 300	BOX 20*20*1.5	BOX 22*22*1	طبقه ۱۴ و ۱۵

جدول ۳. زلزله‌های مورد نظر در این تحقیق [۲۵]

Table 3. The studied earthquakes in this research [25]

شماره	بزرگی (M) (ریشتر)	سال وقوع	زلزله	ایستگاه زلزله	ضرایب مقیاس نهائی (g)	
					مولفه L	مولفه T
۱	۶/۵	۱۹۷۹	Imperial Valley-06	El Santro Array #6	۱/۲۷	۱/۶۷
۲	۶/۵	۱۹۷۹	Imperial Valley-06	El Santro Array #7	۱/۳۱	۰/۷۲
۳	۶/۹	۱۹۸۰	Irpinia. Italy-01	Sturmo	۲/۶۴	۲/۴۲
۴	۶/۵	۱۹۸۷	Superstation Hills-02	Parachute Test Site	۱/۰۲	۱/۲۱
۵	۶/۹	۱۹۸۹	Loma Prieta	Saratoga-Aloha	۲/۰۵	۴/۱۲
۶	۶/۷	۱۹۹۲	Erzincan. Turkey	Erzincan	۱/۲۴	۱/۲۶
۷	۷/۰	۱۹۹۲	Cape Mendocino	Petrolia	۰/۷۱	۰/۶۲

$$A_{sc} = \frac{P_{u-BRB-SMA}}{\phi F_{ysc} (1 + \beta \omega)} \quad (۶)$$

$$A_{SMA} = \frac{\beta \omega F_{ysc} A_{sc}}{F_{i-SMA}} \quad (۷)$$

۴- صحت‌سنجی

۴-۱- صحت‌سنجی مدل‌سازی تحت بار شبه استاتیکی (چرخه‌ای)

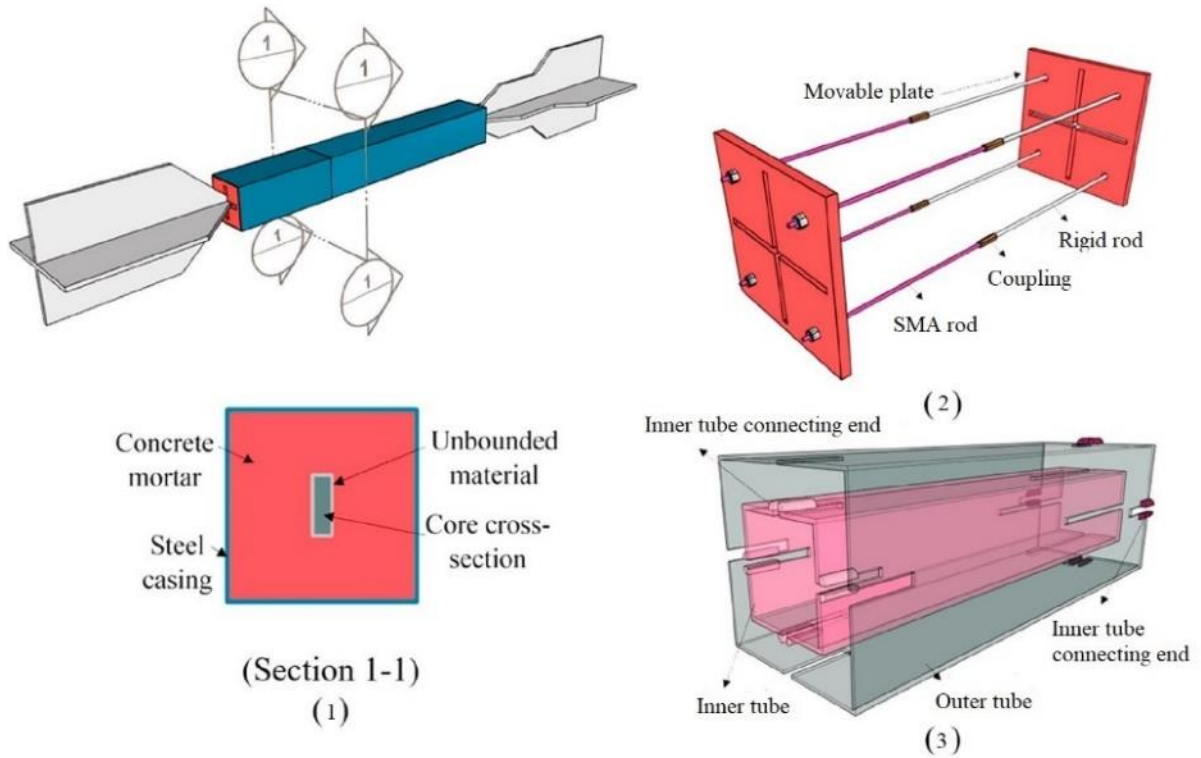
در این تحقیق، به منظور صحت‌سنجی نمونه‌ی آزمایشگاهی قاب خمشی فولادی یک طبقه‌ی یک دهانه با ارتفاع و عرض ۱/۲۵۰ متر و ۱/۵۹۰ متر در نظر گرفته شده است. بار چرخه‌ای به وسیله‌ی دو جک هیدرولیکی که در دو طرف نمونه قرار دارد، وارد می‌شود. در پشت هر جک یک نیروسنج برای اندازه‌گیری نیرو قرار داده شده است. تغییر مکان نمونه توسط چهار تغییر مکان‌سنج نصب شده در کنار جک‌ها اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری تغییر شکل ستون‌ها بر روی هر ستون چهار تغییر مکان‌سنج نصب شده است که یک عدد در بالای ستون و سه عدد دیگر در فواصل مساوی از یکدیگر از پایین تا بالای هر ستون قرار داده شده است. شکل ۵ نمونه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد [۳۵].

۳-۱- طراحی مهاربندهای کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی

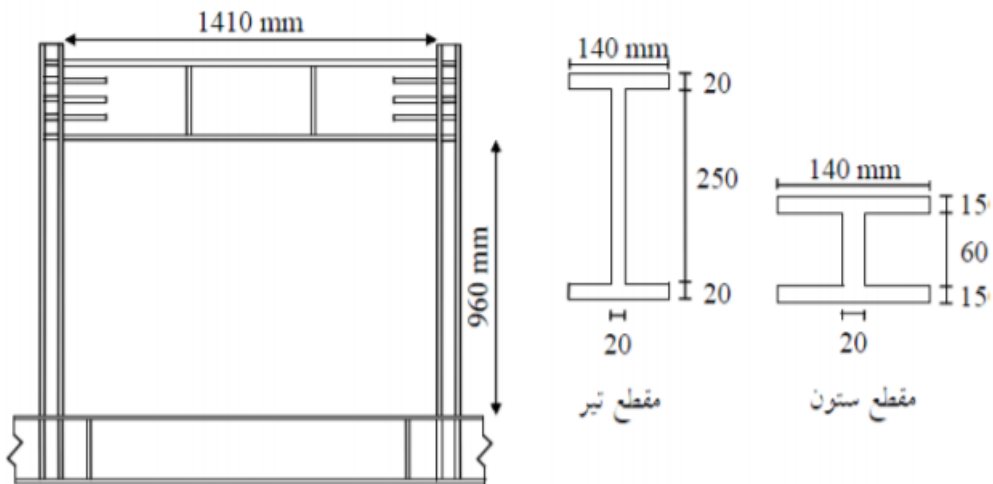
جزئیات مدل‌سازی مهاربند کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی در شکل ۴ ارائه شده است. این مکانیسم مطابق شکل مذکور شامل سه قسمت می‌باشد: (۱) هسته‌ی BRB، ملات بتنی، پوشش بتنی و مصالح غیرچسبنده (۲) چهار میله‌ی آلیاژ حافظه‌دار شکلی و صفحات لغزان (۳) غلاف داخلی، غلاف میانی و غلاف خارجی می‌باشد. به منظور محاسبه‌ی سطح مقطع هسته‌ی مهاربند کمانش‌تاب و میله‌های آلیاژ حافظه‌دار رابطه‌های (۴) تا (۷) به کار برده می‌شوند. پارامترهای P_u ، F_{ysc} ، F_{i-SMA} ، A_{SMA} ، A_{sc} ، β و ω به ترتیب معادل نیروی نهایی مهاربند، تنش تسلیم هسته فولادی BRB، تنش اولی SMA، سطح مقطع هسته فولادی BRB، کل سطح مقطع میله‌های SMA، ضریب مقاومت فشاری و ضریب سخت‌شدگی کرنشی می‌باشد. ضمناً، سطح مقطع آلیاژ حافظه‌دار چنان تعیین شده است که به هنگام تسلیم هسته‌ی مهاربندهای کمانش‌تاب جاری گردد.

$$F_i(im) = P(DI > di | IM = im) = 1 - \int_{-\infty}^{di} f_{im}(di) d(di) \quad (۴)$$

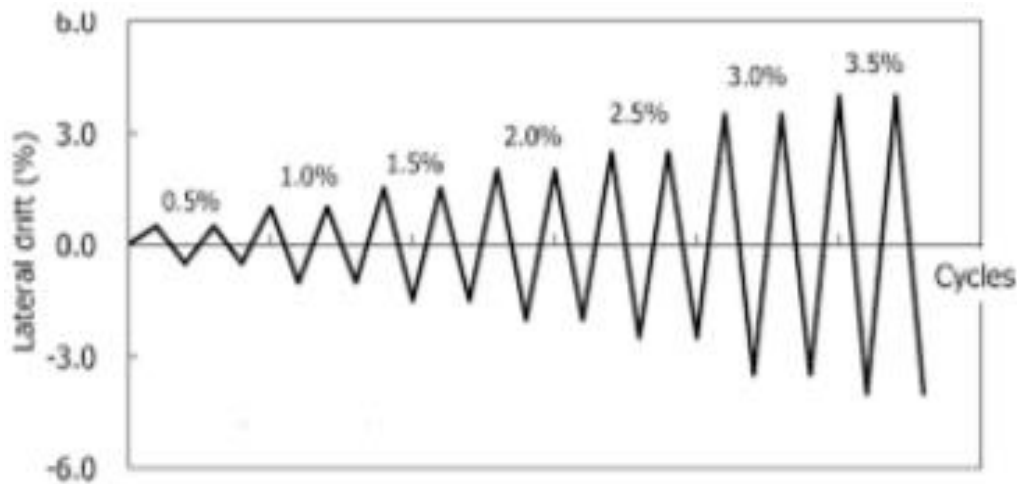
$$\beta \omega F_{ysc} A_{sc} \leq F_{i-SMA} A_{SMA} \quad (۵)$$



شکل ۴. جزئیات مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی (۱) مهاربند کمانش تاب (۲) میله های SMA (۳) غلاف ها [۳۲]
 Fig. 4. Details of buckling restrained brace equipped with shape memory alloy 1) buckling restrained brace 2) SMA rods 3) sheaths [32]

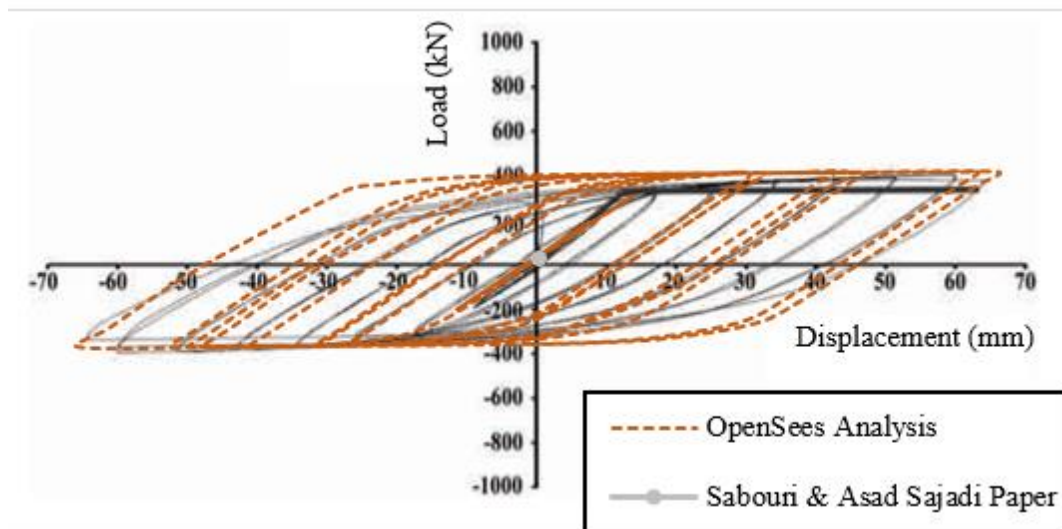


شکل ۵. مشخصات نمونه آزمایشگاهی قاب خمشی فولادی صبوری و سجادی [۳۵]
 Fig.5. Experimental specifications of steel moment frame of Sabouri and Sajadi [35]



شکل ۶. بارگذاری چرخه ای مطابق ATC-۲۴ [۳۶]

Fig. 6. Cyclic loading based on ATC-24 [36]



شکل ۷. مقایسه ی منحنی هیستریزیس نمونه ی عددی و نمونه ی آزمایشگاهی

Fig. 7. The hysteresis curve comparison of numerical and experimental models

قابل توجهی در نمونه ایجاد نشد. بار آستانه‌ی جاری شدن ورق نزدیک به δ_y ۱/۷ میلی‌متر است. به علت کوچک بودن تغییر مکان آستانه‌ی جاری شدن و جلوگیری از خستگی نمونه در زمان آزمایش، گام تغییر مکان تا دوره بارگذاری بیست و ششم برابر سه میلی‌متر و مابقی، شش میلی‌متر در نظر گرفته شد. مطابق شکل ۶، مقادیر جابجایی نسبی جانبی برای ۷ سیکل ابتدایی بارگذاری ارائه شده است.

بارگذاری چرخه‌ای مطابق ATC-۲۴ [۳۶] صورت گرفته و شکل ۶ این بارگذاری را نشان می‌دهد. نمونه مطابق استاندارد مذکور تحت بارگذاری دوره‌ای رفت و برگشتی قرار گرفته است. بار به وسیله‌ی دو جک در دو طرف نمونه وارد شده و مقادیر بار و تغییر مکان ثبت شده است. در شکل ۷ منحنی هیستریزیس نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای نشان داده شده است. در شش دوره اول بارگذاری بار به تدریج افزایش داده شد و تقریباً جاری شدگی

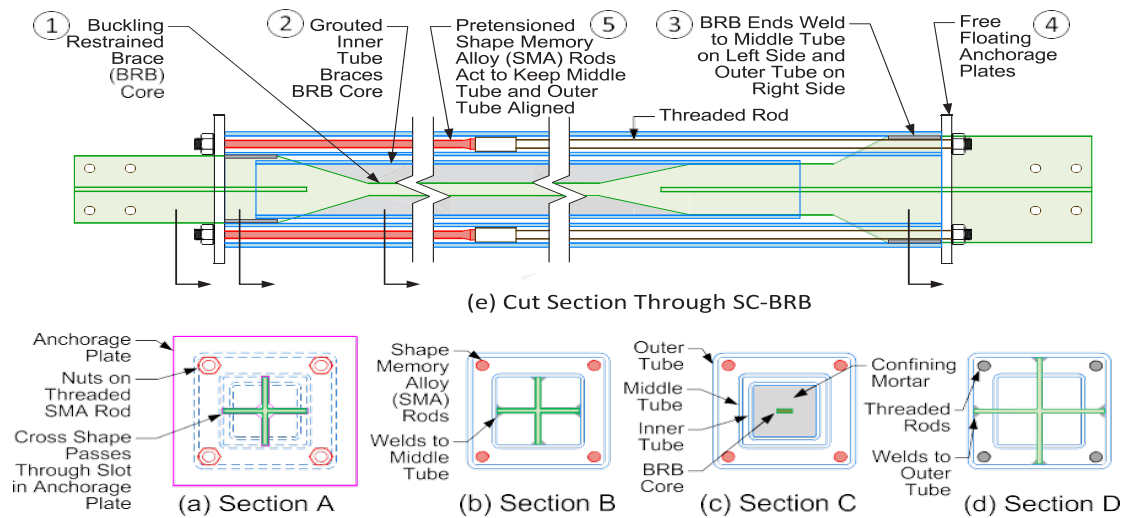
جدول ۴: درصد خطای پارامترهای مورد مطالعه تحت بارگذاری چرخه ای نمونه ی عددی و آزمایشگاهی

Table 4. Error percentage of studied parameters under cyclic loading of numerical and laboratory samples

درصد خطا	نمونه ی عددی	نمونه ی آزمایشگاهی	پارامترهای مورد مطالعه
۶٪/۹۳	۲۶۲	۲۴۵	نیروی تسلیم (kN)
۸٪/۲۱	۳۹۵	۳۶۵	نیروی نهایی (kN)
۸٪/۳۳	۵/۵	۶	تغییر مکان تسلیم (mm)
۳٪/۳۸	۶۱	۵۹	تغییر مکان نهایی (mm)
۲٪	۱۰۲۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	سختی اولیه (kN/m)
۴٪/۱۲	۳۳۷۱	۳۲۳۳	جذب انرژی تجمعی (kN.m)
۱٪/۹	۷۸۵	۷۷۰	جذب انرژی سیکل ۱ (kN.m)
۶٪	۷۲۱	۶۸۰	جذب انرژی سیکل ۲ (kN.m)
۳٪/۱۷	۵۵۰	۵۳۰	جذب انرژی سیکل ۳ (kN.m)
۳٪	۵۰۰	۴۸۵	جذب انرژی سیکل ۴ (kN.m)
۵٪/۱۱	۳۵۰	۳۳۳	جذب انرژی سیکل ۵ (kN.m)
۵٪/۱۲	۳۰۰	۲۸۵	جذب انرژی سیکل ۶ (kN.m)
۱۰٪	۱۶۵	۱۵۰	جذب انرژی سیکل ۷ (kN.m)

۲۶ حلقه بوده است. پایان آزمایش به علت شکنندگی پای ستون بوده و تا پایان آزمایش هیچ گونه کمانش موضعی در بال و جان ستون دیده نشده است [۳۵]. نتیجه ی مدل سازی نمونه ی قاب خمشی مورد مطالعه در نرم افزار OpenSees و مقایسه ی منحنی هیستریزیس آن با حالت آزمایشگاهی مطابق شکل ۷، نشان می دهد که نحوه ی مدل سازی در نرم افزار مذکور قابل اطمینان می باشد و درصد خطا قابل چشم پوشی است. درصد خطای پارامترهای مورد مطالعه در نمونه ی عددی و آزمایشگاهی مطابق جدول ۴ ارائه شده است.

بررسی آزمایش نشان می دهد که در شش دوره ی اول بارگذاری بار به تدریج افزایش داده شده و تقریباً جاری شدگی قابل توجهی در نمونه ایجاد نشده است. در دوره ی هفتم بارگذاری نمونه، کرنش سنج های نصب شده بر روی بال ستون نشان می دهد که تغییر مکان آستانه جاری شدن بال ستون ها تقریباً ۸/۵ میلی متر است. گام تغییر مکان در این آزمایش برابر ۸/۵ میلی متر در نظر گرفته شد. بیشترین بار قابل تحمل نمونه ۴۰۵ کیلو نیوتن در تغییر مکان ۵۹/۶ میلی متر ایجاد شد. نسبت حداکثر تغییر مکان جانبی نمونه به ارتفاع ستون ۶/۶۸ درصد می باشد. تعداد بارگذاری دوره ای



شکل ۸. مدل آزمایشگاهی مهاربند کمانش تاب مجهز به میله های SMA [۱۱]

Fig. 8. The experimental model of BRB-SMA

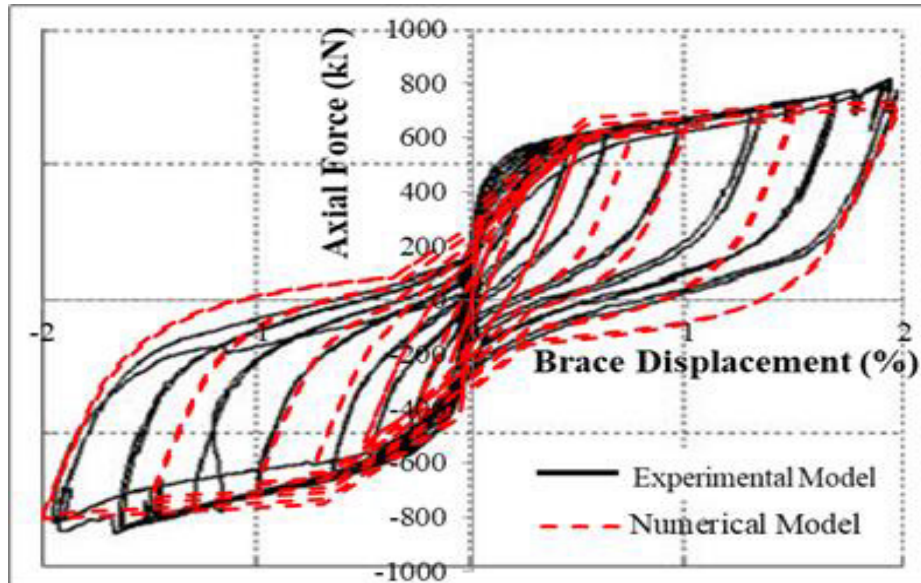
جدول ۵. مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه دار بر اساس منحنی رفتار ارائه شده [۳۷]

Table 5. The mechanical properties of SMA based on the presented behavioral curve

نوع ماده	سختی اولیه (K_1) (N/m^2)	سختی نهایی (K_2) (N/m^2)	تنش فعال سازی (N/m^2)	ضریب بتا (β)
آلیاژ حافظه دار شکلی	۶۳۴۳۱۷۹۲۰۰۰	۲۰۸۰۴۱۲۹۸۷	۲۶۸۸۹۵۶۴۰	۰/۵

مدل سازی لغزش صفحات استفاده شده است. میله های صلب در راستای طول میله های آلیاژ حافظه دار شکلی نیز به صورت المان الاستیک مدل شده اند. همچنین ۴ میله ی آلیاژ حافظه دار شکلی به کار برده شده نیز در شکل ۸ نشان داده شده است. رفتار آلیاژ حافظه دار شکلی مورد استفاده در این تحقیق مطابق جدول ۵ در اثر بارگذاری و بار برداری بدون کرنش پسماند می باشد. هم پوشانی نمودارهای هیستریزس نیروی محوری-تغییر شکل مهاربند مدل آزمایشگاهی و مدل شبیه سازی شده در نرم افزار OpenSees در شکل ۹ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود با مدل سازی این مهاربند در نرم افزار مذکور نتایج قابل قبولی در ارزیابی صحت مدل سازی به دست آمده است.

۴-۲- صحت سنجی مهاربند کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی به منظور صحت سنجی مدل سازی و شبیه سازی در نرم افزار OpenS-ees از مدل آزمایشگاهی شامل مهاربند کمانش تاب با میله های آلیاژ حافظه دار شکلی، ارائه شده در مطالعه میلر و همکاران استفاده شده است [۱۱]. سیستم مهاربندی کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی در شکل ۸ توصیف شده است. برای مدل سازی مهاربند کمانش تاب و میله ی آلیاژ حافظه دار شکلی از المان های تیر-ستون غیرخطی استفاده شده است. این المان ها به صورت جابجایی و بر پایه ی پلاستیسیته ی گسترده می باشند تا رفتار واقعی المان ها را در تحلیل غیرخطی ارزیابی نمایند. جهت ممانعت از کمانش مهاربند مورد نظر از المان های GAP در دو انتهای غلاف ها برای



شکل ۹. مقایسه منحنی هیستریزیس نمونه ی عددی و آزمایشگاهی

Fig. 9. The hysteresis curve comparison of numerical and experimental models

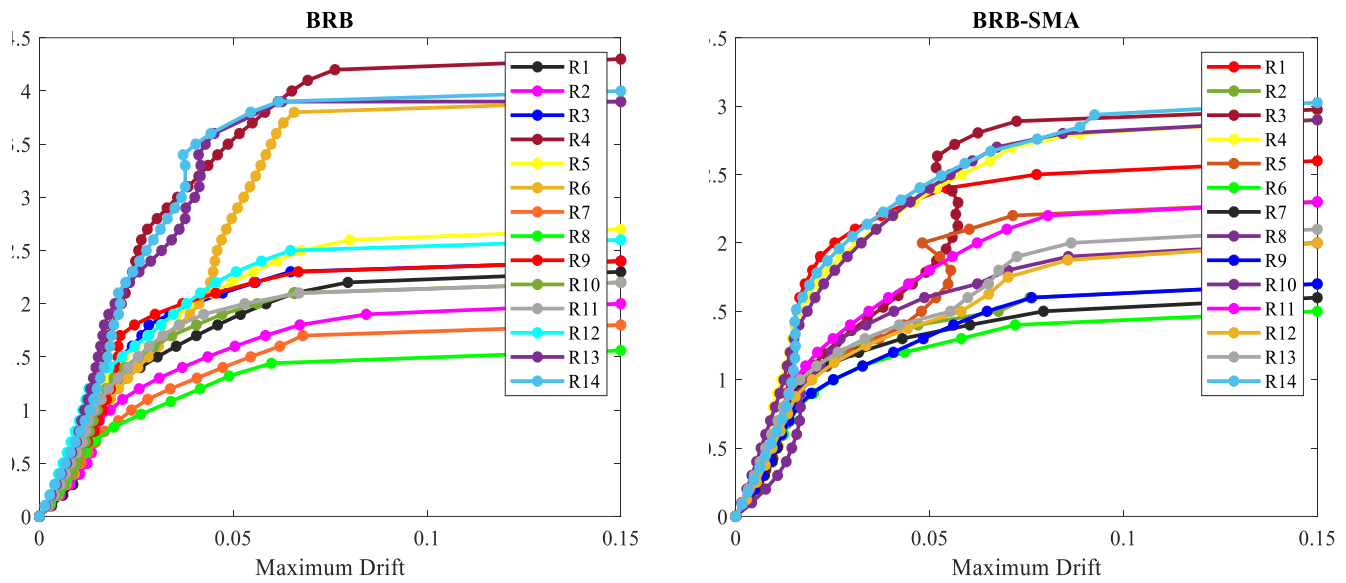
۵- بحث و بررسی نتایج

برای قاب ۱۵ طبقه، ظرفیت فروریزش تحت شتاب‌نگاشت‌های پیشنهادی FEMA P۶۹۵ در محدوده g ۱/۲ تا g ۷ می‌باشد. نتایج، ظرفیت فروریزش بالاتر قاب‌های BRB-SMA را نسبت به قاب‌های BRB ارائه می‌دهند. با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می‌گردد که بیشترین گریز طبقه‌ی در آستانه‌ی فروریزش سازه‌ها، در قاب‌های BRB مقادیر کمتر و در قاب‌های BRB-SMA مقادیر بیشتری می‌باشند. همچنین مطابق انتظار با افزایش ارتفاع ساختمان‌ها به ازای معیار شدت ثابت، تغییر مکان نسبی طبقات افزایش پیدا می‌کند. همچنین سختی الاستیک اولیه با افزایش ارتفاع سازه‌ها کاهش می‌یابد.

با توجه به حجم بالای خروجی تحلیل‌های IDA لازم است که منحنی‌های به دست آمده خلاصه‌سازی گردند. در این تحقیق، خلاصه کردن منحنی‌های IDA در سه سطح ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ انجام گرفت. مطابق شکل ۱۲ منحنی‌های خلاصه‌شده‌ی تحلیل‌های IDA برای هر دو حالت قاب مطابقت می‌کند. مشخص است که ظرفیت فروریزش تدریجی قاب BRB-SMA بیش از سایر قاب‌ها است. مطابق شکل ذیل به عنوان نمونه سطح ۵۰٪ قاب BRB در یک نمودار آورده شده است. مطابق این شکل به عنوان نمونه در قاب ۵ طبقه، سطح ۸۴٪ قاب BRB با سطح ۵۰٪ قاب BRB-SMA مطابقت خوبی با سطح ۱۶٪ قاب BRB-SMA دارد.

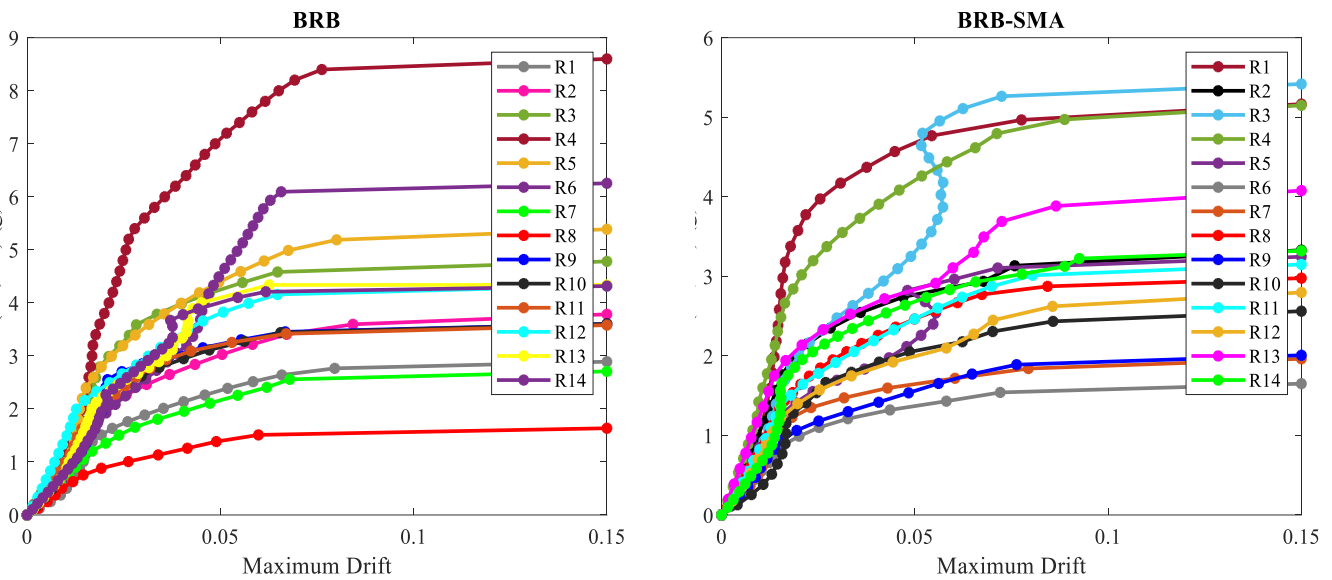
در این تحقیق، به منظور ارزیابی عملکرد قاب‌های فولادی دارای مهاربند کمانش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی، از تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل استفاده شده است. خروجی‌های این تحلیل شامل منحنی‌های IDA و شکنندگی می‌باشد. منحنی‌های شکنندگی را می‌توان برای سطوح احتمال ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد بر حسب توزیع احتمالاتی لوگ نرمال خلاصه نمود که این روش در گزارش PEER [۳۸] نیز ارائه شده است. در این تحقیق بر مبنای نشریه‌ی ۳۶۱ [۳۹]، مقادیر دریفت ۰/۷، ۲/۵ و ۵ درصد به عنوان سطوح عملکرد استفاده‌ی بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه‌ی فروریزش (CP)^۲ در نظر گرفته شده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی برای هر شتاب‌نگاشت با گام‌های شتاب طیفی g ۰/۱ اعمال شده است. ظرفیت فروریزش هر قاب بزرگترین شتاب طیفی است که قاب تحمل نموده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی قاب‌های ۵ و ۱۵ طبقه را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۰، شتاب طیفی در قاب ۵ طبقه دارای BRB در محدوده‌ی g ۱ تا g ۴ و در قاب ۵ طبقه‌ی دارای BRB-SMA در محدوده‌ی g ۱ تا g ۳ می‌باشد. شکل ۱۱ نیز نشان می‌دهد با اضافه شدن آلیاژ حافظه‌دار شکلی

- 1 Immediate Occupancy
- 2 Life Safety
- 3 Collapse Prevention



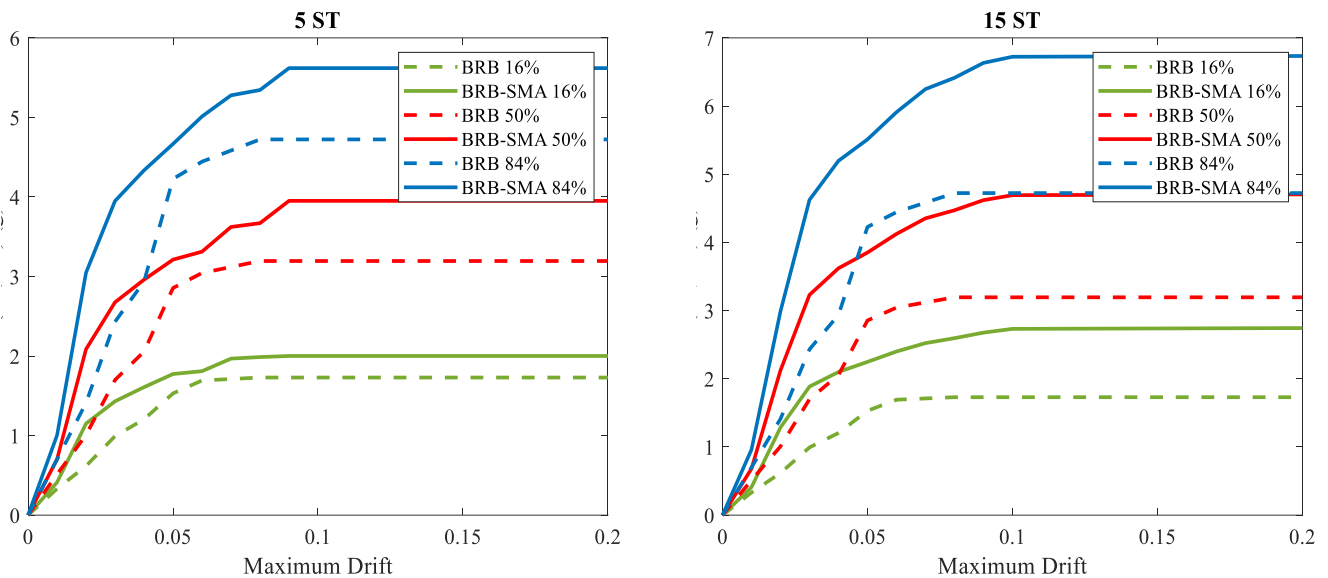
شکل ۱۰. نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب های ۵ طبقه با مهاربند کماتشی تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی

Fig. 10. Results of incremental dynamic analysis of 5-story frames with BRB in two modes with and without SMA



شکل ۱۱. نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب های ۱۵ طبقه با مهاربند کماتشی تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی

Fig. 11. Results of incremental dynamic analysis of 15-story frames with BRB in two modes with and without SMA



شکل ۱۲. خلاصه نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی قاب ۵ و ۱۵ طبقه با مهاربند کماتش تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی

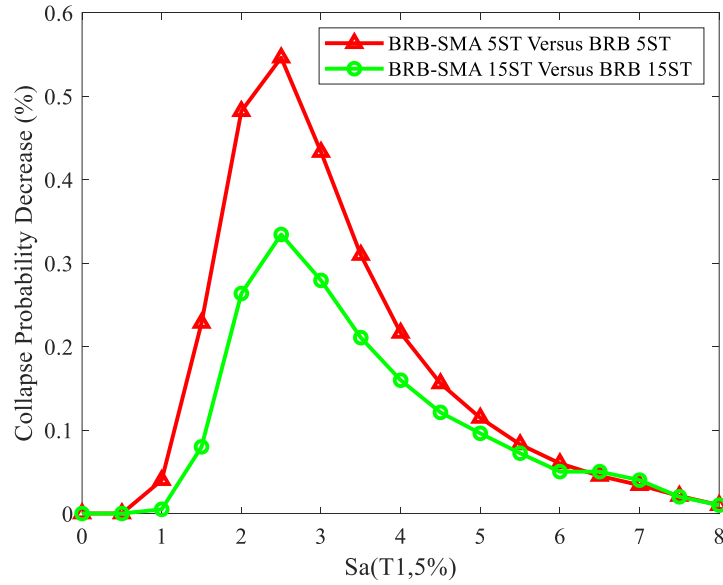
Fig.12. The summarized results of incremental dynamic analysis of 5 and 15-story frames with BRB in two modes with and without SMA

رخداد فروریزش پیش‌رونده در قاب‌ها مشاهده نمی‌شود، برای شتاب طیفی بزرگ‌تر از g ۵ نیز اختلاف بین عملکرد قاب‌ها چندان محسوس نیست. به نظر می‌رسد برای شتاب‌های طیفی بزرگ قاب‌ها در شرایط فروریزش قرار گرفته‌اند. مطابق شکل ۱۵، منحنی شکنندگی بر اساس دریافت ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که قاب BRB-SMA دریافت‌های بزرگ‌تری نسبت به سایر قاب‌ها تحمل کرده است.

در شکل ۱۶ به ترتیب مقایسه‌ای از شتاب طیفی قاب‌های ۵ و ۱۵ طبقه با سیستم‌های مهاربندی مذکور در سطوح عملکردی ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، برای قاب ۵ طبقه در سطح عملکرد ۸۴٪ اختلاف شتاب طیفی در دو سیستم مهاربندی تفاوت دارد و شتاب طیفی قاب با سیستم مهاربندی BRB-SMA حدود ۱۶ درصد بیشتر از قاب با سیستم BRB می‌باشد. برای قاب ۱۵ طبقه در سطح عملکرد ۸۴٪ شتاب طیفی در دو سیستم مهاربندی تفاوت دارد و شتاب طیفی قاب با سیستم مهاربندی BRB-SMA حدود ۱۲ درصد بیشتر از قاب با سیستم BRB می‌باشد. مطابق شکل ۱۷، مقایسه مدت زمان فروریزش قاب‌های مورد مطالعه تحت اثر زلزله‌های مورد مطالعه ارائه شده است. مشخص است زمان فروریزش تحت مولفه‌ی دوم زلزله Irpinia پیشینه و تحت مولفه‌ی اول زلزله Cape Mendocino

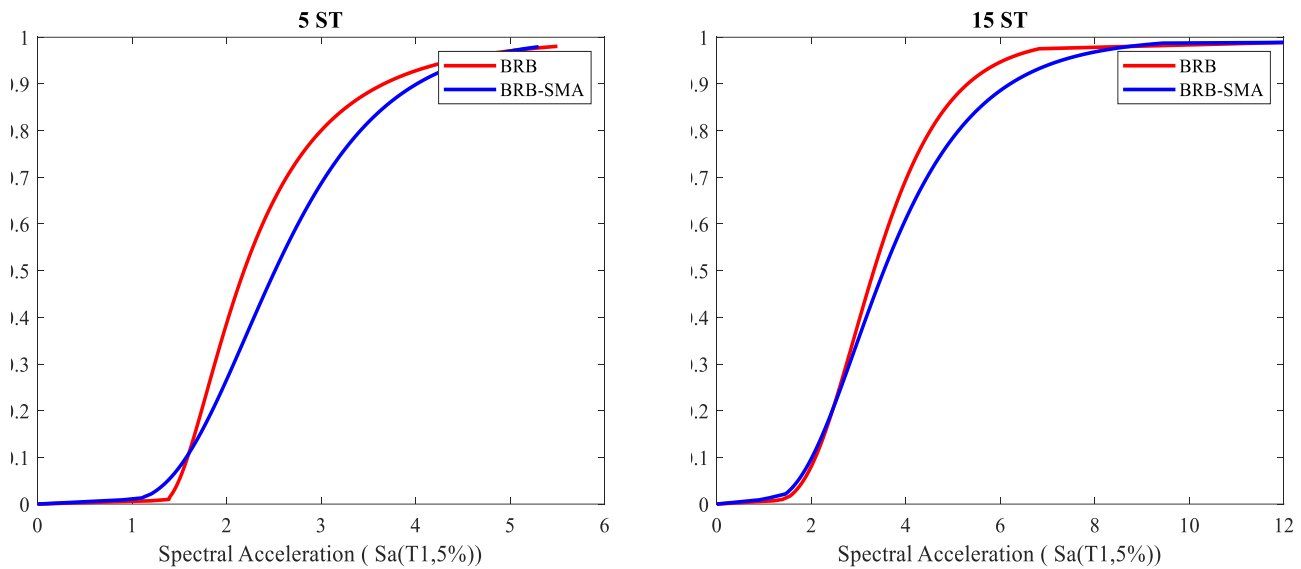
شکل ۱۳ اختلاف احتمال فروریزش قاب‌های ۵ و ۱۵ طبقه مهاربندی کماتش تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به قاب‌های مهاربندی کماتش تاب را نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیشترین نقش قاب مهاربندی کماتش تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار در کاهش فروریزش سازه به ازای شتاب‌های طیفی g ۲ الی g ۳ می‌باشد. مثلاً به ازای شتاب طیفی g ۳، قاب BRB-SMA نسبت به BRB، ۴۵/۵ درصد باعث کاهش رخداد فروریزش شده است. به ازای شتاب‌های طیفی کمتر از g و بیش از g ۵ اختلاف محسوسی در عملکرد قاب‌ها در سطح فروریزش ملاحظه نمی‌شود. احتمال فروریزش در حالت BRB-SMA نسبت به BRB در قاب‌های ۵ و ۱۵ طبقه ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

شکل ۱۴ منحنی‌های شکنندگی را برای ظرفیت فروریزش قاب‌ها نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، قاب‌های با سیستم مهاربندی BRB-SMA در سطوح عملکردی مختلف دارای بیشترین شتاب طیفی می‌باشند. همان‌طور که این نمودارها نشان می‌دهند، قاب BRB-SMA ظرفیت فروریزش بزرگ‌تری نسبت به سایر قاب‌ها نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، به عنوان نمونه به ازای شتاب طیفی g ۳، احتمال فروریزش برای قاب BRB-SMA ۳۸ درصد و برای قاب BRB ۶۰ درصد می‌باشد. برای شتاب طیفی کمتر از g اختلاف محسوسی در میزان کاهش احتمال



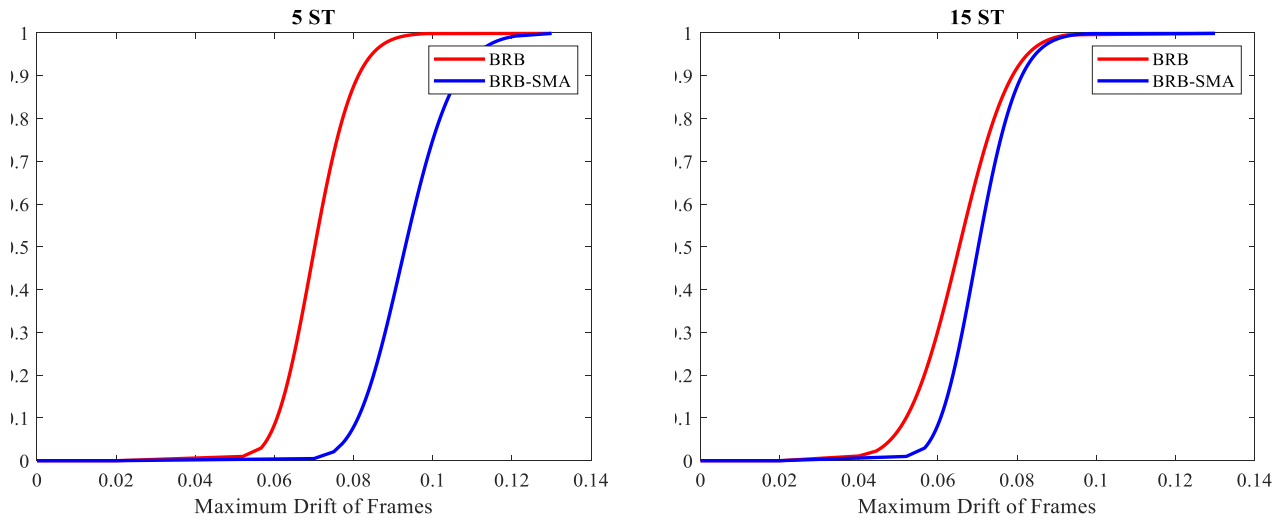
شکل ۱۳. درصد کاهش احتمال فروریزش قاب های ۵ و ۱۵ طبقه مهاربندی کمانش تاب مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی نسبت به مهاربند کمانش تاب

Fig. 13. Reduction percentage of collapse of 5 and 15-story frames with BRB in two modes with and without SMA



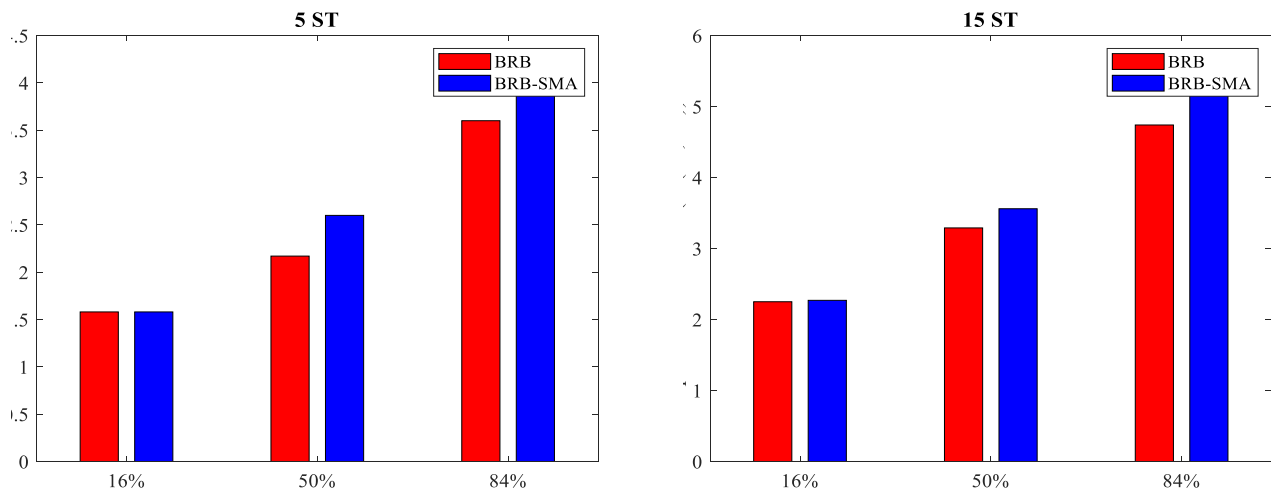
شکل ۱۴. منحنی های شکنندگی لرزه ای ظرفیت فروریزش قاب های ۵ و ۱۵ طبقه

Fig. 14. The seismic fragility curves of collapse capacity of 5 and 15-story frames



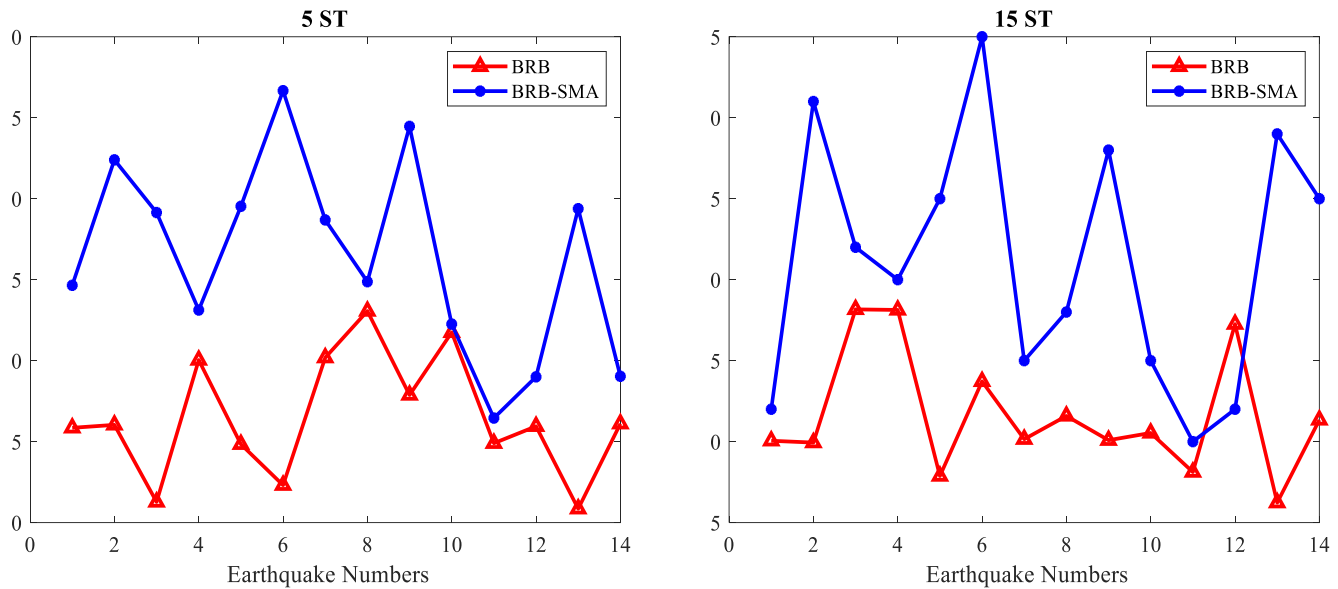
شکل ۱۵. منحنی های شکنندگی لرزه ای دریفت قاب های ۵ و ۱۵ طبقه

Fig. 15. The seismic fragility curves of drift of 5 and 15-story frames



شکل ۱۶. مقایسه شتاب طیفی قاب های مورد مطالعه در سطوح عملکردی ۱۶، ۵۰ و ۸۴ درصد

Fig. 16. Comparison of spectral acceleration of the studied frames at performance levels of 16, 50 and 84%



شکل ۱۷. مقایسه مدت زمان فروریزش قاب های مورد مطالعه تحت اثر زلزله های نزدیک گسل

Fig. 17. Comparison the collapse duration of the studied frames due to near fault earthquakes

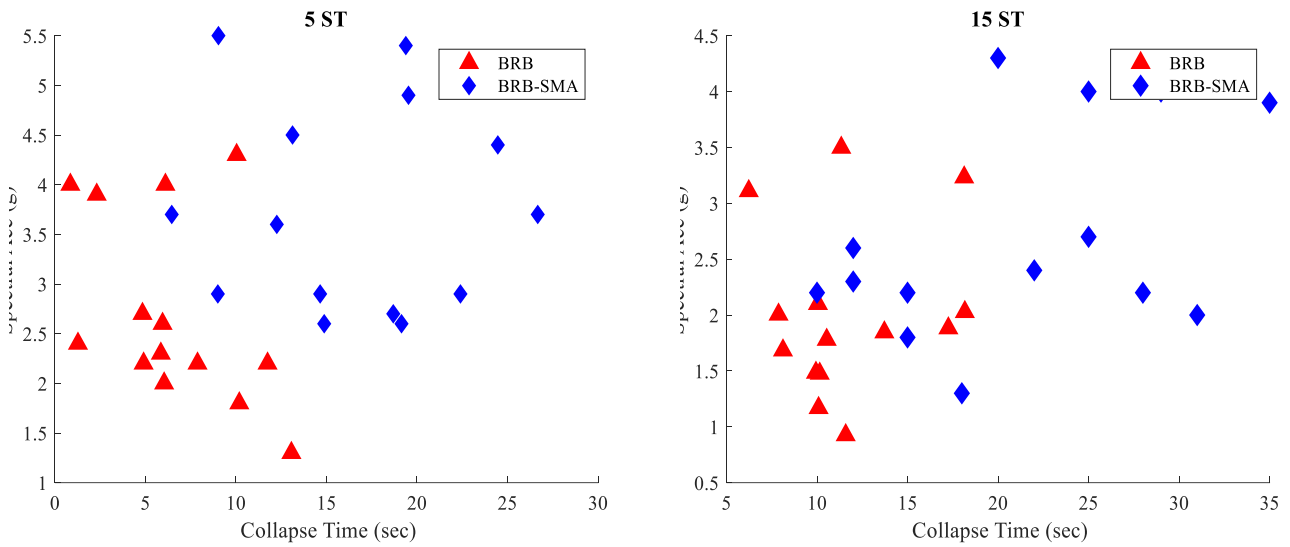
با فواصل $g \ 0.5$ تقسیم‌بندی شده و به ازای هر بازه مدت زمان فروریزش هر قاب محاسبه شده است. ملاحظه می‌گردد که در شتاب‌های طیفی بالا مدت زمان فروریزش تدریجی کاهش یافته و از طرفی در محدوده‌ی مشخصی از ظرفیت‌های فروریزش، مدت زمان فروریزش حداکثر بوده است. به عبارتی همواره با افزایش شتاب طیفی فروریزش، مدت زمان فروریزش کاهش نیافته است. حداکثر شتاب طیفی مد اول قاب ۵ طبقه، $g \ 4/3$ می‌باشد در حالی که در قاب ۱۵ طبقه این مقدار معادل $g \ 3/3$ است.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، نقش آلیاژ حافظه‌دار شکلی در افزایش مدت زمان فروریزش و ظرفیت فروریزش تدریجی تحت زلزله‌های نزدیک به گسل مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به صحت‌سنجی‌های انجام گرفته که نتایج قابل قبولی ارائه دادند، می‌توان به مدل‌های ایجاد شده و پاسخ‌های به دست آمده، اطمینان داشت. با بررسی نتایج و نمودارهای ارائه شده در بخش قبلی می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

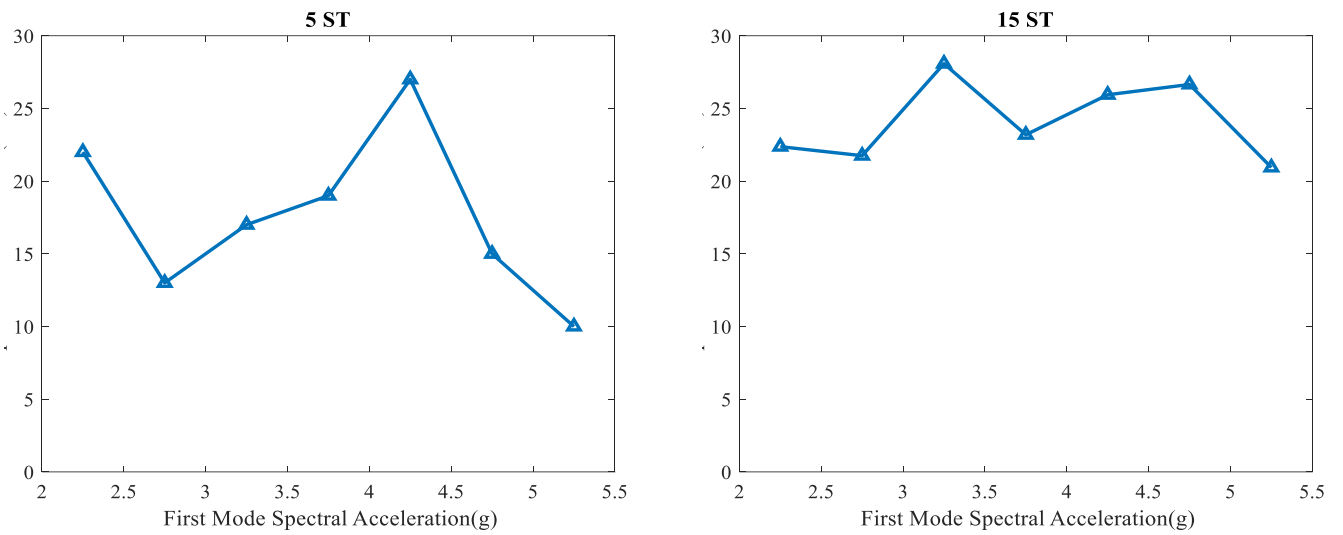
کمینه است. دلیل این تفاوت به علت ماهیت زلزله‌های نزدیک به گسل می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که مدت زمان فروریزش قاب BRB-SMA برای بیشتر زلزله‌ها بزرگ‌تر از مدت زمان لازم فروریزش قاب BRB می‌باشد. قاب BRB کمترین مدت زمان مورد نیاز برای فروریزش تدریجی را ارائه می‌دهد. مطابق شکل ۱۸، قاب BRB-SMA مدت زمان فروریزش بیشتری نسبت به سایر قاب‌ها نشان داده است. در قاب ۱۵ طبقه به عنوان نمونه در سطح 16% شتاب‌نگاشت‌های ورودی، مدت زمان فروریزش قاب BRB-SMA، ۱۷ ثانیه و قاب BRB، ۵ ثانیه می‌باشد. همچنین در سطح 50% شتاب‌نگاشت‌های ورودی، مدت زمان فروریزش قاب BRB-SMA، $25/6$ ثانیه و قاب BRB، ۱۰ ثانیه می‌باشد و در سطح 84% شتاب‌نگاشت‌های ورودی، مدت زمان فروریزش قاب BRB-SMA، ۳۲ ثانیه و قاب BRB، ۱۸ ثانیه است.

مطابق شکل ۱۹، مدت زمان فروریزش قاب‌های ۵ طبقه تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل مورد نظر در مقابل ظرفیت‌های فروریزش آن‌ها ارائه شده است. در ارائه‌ی این شکل شتاب‌های طیفی فروریزش به بازه‌هایی



شکل ۱۸. ظرفیت فروریزش قاب های مورد مطالعه تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت مورد نظر

Fig. 18. The collapse capacity of the studied frames under 7 pairs of earthquakes



شکل ۱۹. مدت زمان فروریزش قاب های مورد مطالعه در مقابل شتاب طیفی فروریزش تدریجی

Fig. 19. Collapse duration of the studied frames versus spectral acceleration of sidesway collapse

E. Miranda, V. Betro, Evaluation of strength Reduction [1] Factors for Earthquake Resistant Design Earthquake Spectra, 10(2) (1994) 357-379.

Element loss analysis ,F. Hashemi Rezvani, B. Asgarian [2] of concentrically braced frames considering structural performance criteria, Steel and Composite Structures, 12(3) (2012) 231-248.

C. Wang, T. Usami, J. Funayama, Evaluation the Influ- [3] ence of Stoppers on the Low-Cycle Fatigue Properties of High Performance Buckling Restrained Braces, Engineering Structures, 41 (2012) 167-176.

[4] C.M. Uang, K.C. Tsai, Research and application of buckling-restrained braced frames, International journal of steel structures, 4(4) (2004) 301-13.

[5] M. S. Alam, M. A. Youssef, M. Nehdi, Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review. Canadian Journal of Civil Engineering 34 (2007) 1075–1086.

M. Pouraminian, S.V. Hashemi, A. Sadeghi, S. Pourbakh- [6] shian, Probabilistic Assessment the Seismic Collapse Capacity of Buckling-Restrained Braced Frames Equipped with Shape Memory Alloys. Journal of Structural and Construction Engineering, (2020). (In Persian).

[7] D.J. Miller, Development and experimental validation of self-centering buckling-restrained braces with shape memory alloy, Master's dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, (2011).

[8] Y.L. Han, Q. Li, A.Q. Li, A. Leung, P.H. Lin, Structural vibration control by shape memory alloy damper, Earthquake engineering & structural dynamics, 32(3) (2003) 483-94.

[9] S.V. Hashemi, M. Pouraminian, A. Sadeghi, Seismic Fragility Curve Development of Frames with BRB's Equipped with Smart Materials subjected to Mainshock-Aftershock Ground Motion. Journal of Structural and Construction Engineering, (2021). (In Persian).

[10] B. Asgarian, S. Moradi, Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces, Journal of Construction steel research, Elsevier, 67(1) (2011) 65-74.

[11] D. J. Miller, L. A. Fahnestock, M. R. Eatherton, Development and experimental validation of a nickel-titanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace, Engineering Structures, 40 (2012) 288–298.

M. Mirzahassemi, M. Gerami, Evaluation of appropriate [12] behavioral models for numerical simulation of new Cu based shape memory alloy. Journal of Structural and Construction Engineering, 4(4) (2017) 5-15.

H. Hou, H. Li, C. Qiu, Y. Zhang, Effect of hys- [13] teretic properties of SMAs on seismic behavior of self-centering concentrically braced frames, Structural

۱- بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی، قاب‌های با سیستم مهاربندی BRB-SMA بیشترین ظرفیت فروریزش و قاب‌های با سیستم BRB کمترین ظرفیت فروریزش را نشان داد. همچنین میزان شتاب طیفی با افزایش ارتفاع نمونه‌ها در نمونه‌های دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی افزایش یافته است.

۲- بر اساس منحنی‌های شکنندگی، سطوح عملکرد استفاده بدون وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) قاب‌ها مقایسه گردید. نتایج نشان داد که استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم مهاربندی کماتش‌تاب به میزان محسوسی ظرفیت فروریزش سازه‌های میان مرتبه و بلند مرتبه را افزایش داده است. به عنوان نمونه در سطح احتمال ۸۴ درصد، ظرفیت فروریزش قاب ۱۵ طبقه با سیستم BRB-SMA نسبت به قاب با سیستم BRB، ۱۶ درصد افزایش نشان داد. ضمناً با مقایسه‌ی منحنی‌های شکنندگی گریز طبقه‌ی قاب‌های ۵ و ۱۵ طبقه، مشخص شد که حداکثر گریز طبقه در مورد قاب BRB-SMA بیشترین و در مورد قاب BRB کمترین است.

۳- به ازای شتاب‌های طیفی $1g$ تا $4g$ ، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم‌های مهاربندی کماتش‌تاب بیشترین تأثیر را در جلوگیری از فروریزش داشت. به عنوان نمونه، در قاب‌های ۵ طبقه به ازای شتاب‌های طیفی فروریزش مختلف، کاربرد سیستم مهاربندی BRB-SMA به جای BRB توانست تا ۱۵ درصد احتمال فروریزش را کاهش دهد.

۴- مدت زمان فروریزش تدریجی در قاب‌های مهاربند کماتش‌تاب دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به حالت بدون آن افزایش یافته است. همچنین نتایج مربوط به مدت زمان فروریزش نشان داد که در شتاب‌های طیفی بالا مدت زمان فروریزش تدریجی قاب‌ها کاهش یافته است.

۵- مهاربند کماتش‌تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قاب با ارتفاع بلندتر (۱۵ طبقه) در گستره‌ی وسیع‌تری از سطح تقاضای لرزه‌ای باعث ایمن بودن و آسیب‌پذیری کمتری نسبت به قاب با ارتفاع کوتاه‌تر (۵ طبقه) می‌باشد.

۶- به کارگیری آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم ساختمانی قاب فولادی دارای مهاربند کماتش‌تاب باعث بهبود رفتار لرزه‌ای سیستم باربر جانبی، کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای و هزینه‌های بازسازی و تعمیر سیستم ساختمانی آسیب دیده شده و به نوعی موجب ارتقای برگشت‌پذیری سیستم می‌شود.

- Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 6, (2013). (In Persian).
- [27] INBC. Design and Construction of Steel Structures. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 10, (2013). (In Persian).
- [28] BHRC. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800, (2014). (In Persian).
- [29] V. Saberi, H. Saberi, M. Babanegar, A. Sadeghi, A. Moafi. Investigation the Effect of Cutting the Lateral Bearing System and Very Soft Story Irregularities on the Seismic Performance of Concentric Braced Frames. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (2021). (In Persian).
- [30] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, *OpenSees Command Language Manual*. http://OpenSees.Berkeley.edu/OpenSees/manuals/user_manual/OpenSees_Command_Language_Manual_June_2006.pdf.
- [31] J. Kim, J. Park, and T. Lee, Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss, *Engineering Structures*, 33(2) (2011) 421-432.
- [32] A. Fayeeghowsi, D. Ranjan Sahoo, Seismic response of SMA-based self-centering buckling-restrained braced frames under near-fault ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 139 (2020).
- [33] PEER Ground Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, Web Site: http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database.
- [34] SeismoSignal. Constitutes a simple, yet efficient, package for the processing of strong-motion data. 2018.
- [35] S. Sabouri, and S. R. Asad Sajadi, Experimental Investigation of Force Modification Factor and Energy Absorption Ductile Steel Plate Shear Walls with Stiffeners and without Stiffener, *Journal of Structure and Steel*, 4(3) (2008) 13-25.
- [36] ATC-24, Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures, Applied Technology Council, California, U.S.A. (1992).
- [37] B. Taftali, Probabilistic seismic demand assessment of steel frames with shape memory alloy connections, PhD. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, (2007).
- [38] L. F. Ibarra, H. Krawinkler, Global collapse of frame structures under seismic excitations. Report No. PEER 2005/06, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, University of California at Berkeley, Berkeley, California, (2005).
- [39] Commentary of Instruction for seismic Rehabilitation of Existing Buildings, NO: 361. Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization, (2018). (In Persian).
- [40] (Control and Health Monitoring. (2017
- [14] F. Shi, G. Saygili, O. E. Ozbulut, Probabilistic seismic performance evaluation of SMA braced steel frames considering SMA brace failure, *Bulletin of Earthquake Engineering*, (2018
- [15] M. Gholhaki, A. Khosravikhor, O. Rezayfar, Study Effect of Ni-Ti Shape Memory Alloy on Ductility of Steel Plate Shear Walls. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (2018) (In Persian).
- [16] N. Mirzai, R. Attarnejad, Performance of EBFs equipped with an innovative shape memory alloy damper, *International Journal of Science & Technology*, (2018).
- [17] Q. Canxing, Z. Yichen, L. Han, Q. Bing, H. Hetao, T. Li, Seismic performance of Concentrically Braced Frames with non-buckling braces, *Engineering Structures*, 154 (2018) 93-102.
- [18] E. Nazarimofrad, A. Shokrgozar, Seismic performance of steel braced frames with self-centering buckling-restrained brace utilizing superelastic shape memory alloys, *Struct Design Tall Spec Build*, (2019).
- [19] Gh. Pachideh, M. Gholhaki, M. Kafi, Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper. *Steel and Composite Structures*, 36(2) (2020) 197-211.
- [20] V. Saberi, H. Saberi, O. Mazaheri, A. Sadeghi, Numerical Investigation of Shape Memory Alloys and Side Plates Perforation Effect on Hysteresis Performance of Connections. *Amirkabir Journal of Civil Engineering* (2020). (In Persian).
- [21] Gh. Pachideh, M. Kafi, M. Gholhaki, Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater, *Structures*, 28 (2020) 467-481.
- [22] A. Sadeghi, S.V. Hashemi, K. Mehdizadeh, Probabilistic Assessment of Seismic Collapse Capacity of 3D Steel Moment-Resisting Frame Structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (2020). (In Persian).
- [23] K. Mehdizadeh, A. Karamodin, A. Sadeghi, Progressive Sidesway Collapse Analysis of Steel Moment-Resisting Frames Under Earthquake Excitations. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng* (2020).
- [24] V. Saberi, H. Saberi, A. Sadeghi, Collapse Assessment of Steel Moment Frames Based on Development of Plastic Hinges. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(11) (2020) 1-21. (In Persian).
- [25] Quantification of Building Seismic Performance Factors. Washington, D.C. Federal Emergency Management Agency, USA, (2009
- [26] INBC. Design Loads for Buildings. Tehran: Ministry of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. V. Hashemi, M. Miri, M. Rashki, S. Etedali, Investigation the Sidesway Collapse and Seismic Fragility Analysis of Frames with BRB Equipped with SMAs, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 737-758.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19082.7060

