



Evaluation of seismic behavior of eccentric braced dual steel frames equipped with shape memory alloys

M. Bagheri¹, S. A. Hosseini², A. Vedad³

¹ Department of Civil Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

² Faculty of Technology and Mining, Yasouj University, Choram, Iran

³ Department of Civil Engineering, Besat Institute of Higher Education, Kerman, Iran

ABSTRACT: Due to the suitability and ductility of the eccentric bracing system, the effect of reversible materials such as shape memory alloys in reducing the residual displacement at the end of the earthquake is studied. Moreover, seismic evaluation of eccentric bracing dual steel bending frame structures within 5, 10, and 15-stories equipped with shape memory alloy rods were subjected to the non-linear dynamic time history analysis. Maximum absolute displacement of the roof and relative displacement of stories, the maximum residual displacement of the roof, maximum base shear, and roof acceleration in the desired frames were evaluated and compared. Survey results showed that the absolute and relative inter-story drift in all three models due to the lower elastic modulus of shape memory alloys has been greater than models without shape memory alloys. On the other hand, the values of residual displacement, shear stories, and acceleration of the roof of structural models have shown a sudden sharp drop compared to models that have not been equipped with shape memory alloys. Comparison of structural responses in different models also showed a further reduction effect on the plastic displacement of the 5-stories model, base shear, and roof acceleration of 10 and 15-stories structures.

Review History:

Received: Sep. 19, 2020

Revised: Jan. 29, 2021

Accepted: Jun. 25, 2021

Available Online: Jul. 03, 2021

Keywords:

Dual steel moment-resisting frame

Chevron eccentric brace

Shape memory alloy

Residual displacement

Non-linear dynamic time history analysis

1- Introduction

One of the intelligent structural controllers is shape memory alloys (SMAs) that have been widely used in engineering and medical sciences. One of the main applications of SMAs is to inhibit the displacement of waste plastics due to their properties, such as high damping capacity, durability, and resistance to fatigue and corrosion. So that by increasing the damping of the structure and seismic energy dissipation, forces, and displacement, Earthquake-generated debris is significantly reduced in the structural building, while it is usually not possible to reduce them at the same time in traditional retrofitting methods. SMAs are used in seismic isolation systems, energy dampers, structural joints, innovative reinforced concrete, and composites structures [1].

One of the main drawbacks of concentric bracing systems is the lack of proper inelastic deformations. So eccentric braces are used to improve the bracing behavior under alternating loads and to prevent flexural buckling. In this study, a new type of connection of SMA rod to eccentric bracing structures was modeled, and the comparative results were analyzed.

2- Methodology

In this study, dual steel moment frames with Chevron eccentric bracing system in 5, 10, and 15-stories equipped

with SMA rods (EBF-SMA) and without SMA (EBF) are modeled in SeismoStruct software [2], and non-linear dynamic time history analysis is performed. Then the maximum seismic responses, including absolute displacement of the roof, the relative displacement of stories, displacement of the roof, base shear, roof acceleration, plastic joints of the frame members, and energy absorption of the braces, were evaluated and compared.

The models include three spans of 4 meters in x and y directions with a height of each floor equal to 3.20 meters in an area with high seismicity on type soil D. AISC 2010 [3] has been used to design medium bending steel eccentric bracing frames. Seismic provisions such as drift ratios and application of load combinations 100% in the main direction and 30% in the orthogonal direction are controlled according to the Iranian Code of Practice for Seismic Resistance Design of Buildings: Standard No. 2800. The behavior of applied steel is a bi-line type according to the characteristics defined in SeismoStruct software, which is known as `stl_bl` and has a coefficient of elasticity and yield strength of 2×108 and 24×104 kPa, respectively, while the cinematic strain hardness is 0.005. For SMAs, a coefficient of elasticity of 27,600 MPa is considered. This coefficient is approximately seven times lower than the elasticity of steel, which has a significant effect on the structural responses.

*Corresponding author's email: mnsrbagheri@birjandut.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

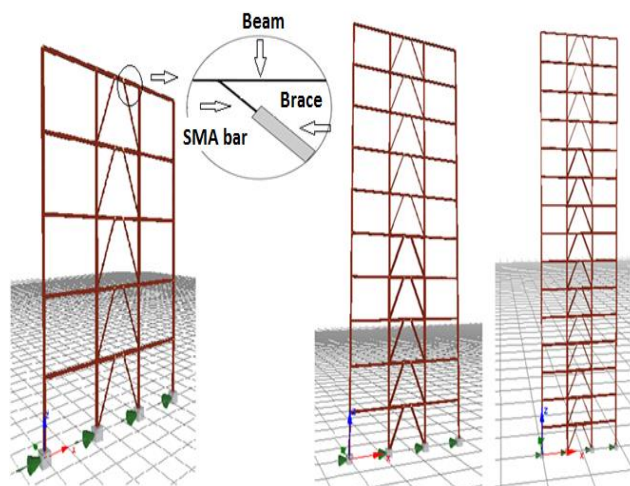


Fig.- 1. Structural models in SeismoStruct software

Applied earthquake records are away from the fault on type soil D and in a region with a high seismic hazard that have been selected from Table C-3 of FEMA440 [4]. Figure 1 depicts a schematic view of structural models equipped with SMA generated in SeismoStruct software.

2- 1- Verification

In order to verify the accuracy of the structural modeling in SeismoStruct software, an experimental model adopted by Xu et al. [5] has been selected that a reverse Chevron bracing system is subjected to a cyclic lateral load. The frame is equipped with post-tensioned cables and SMA rods. The steel of the members is A572 Grade 50 in I-shape. High-strength cables with a diameter of 15 mm are pulled back in the middle of the height of the link beam, and 4 SMA rods with a diameter of 30 mm are located symmetrically at the junction of the link beam. The dimensions of the sections used for the column, beam, and brace are shown in Figure 2.

The comparative hysteresis curves of the SeismoStruct modeling and the experimental are plotted in Figure 3, which shows the acceptable accuracy of the model made in the software.

3- Results and Discussion

Survey results indicated application of SMA in the Chevron bracing increases the absolute displacement compared to the structure without SMA. One of the reasons for this increase is the low coefficient of elasticity of SMA alloys compared to steel, leading to reduced structural stiffness. Based on the results of structural responses, it was found that the absolute displacement ratio of the models with SMA to models without SMA is 1.7. Also, this ratio is equal to 3.1, 2.1, and 1.9 for relative inter-story displacement in 5, 10, and 15-stories structures, respectively. So, high-rise structures with SMA alloys have a smaller increase in relative displacement than short-rise ones, creating a better situation for the structure in operating conditions and the safety of residents.

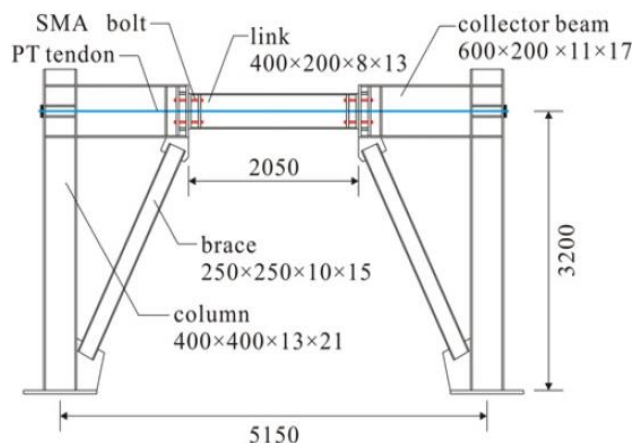


Fig. 2. Zhou et al. experimental model [5]

The diagrams of maximum residual displacement for all accelerograms at the end of the effective earthquake time showed that models with SMA could return to their original state and increase energy absorption after withstanding a significant strain. So that the average maximum displacement of all earthquake records in 5, 10, and 15-stories SMA equipped models was about 67.5%, 59.2, and 57.9% less than structures without SMA, respectively. That indicates the excellent performance of SMA-equipped structures in reducing earthquake damage to structural members and greatly reduces the cost of repairs and reconstruction.

The base shear created in the SMA structures is reduced under seismic loading compared to conventional structures. That is due to the increase in the time and softness of SMA-equipped models compared to conventional structures, reducing the seismic forces in the bracing elements. The average reduction of base shear for 5, 10, and 15-stories equipped SMA structures compared to models without SMA is 47.4%, 48.9%, and 56.1%, respectively.

Comparison of maximum acceleration reduction on the roof of structures with and without SMA is equal to 50.8, 58.6, and 43.4% in 5, 10, and 15-stories, respectively, which could cause in reducing the base shear.

The value of residual displacement, base shear, and roof acceleration for 5-stories structures has decreased more than the corresponding values of 10 and 15-stories.

Comparing the cyclic curves of SMA models, it is clear that the presence of SMA reduces the energy absorption of the bracing system and thus reduces the cross-section of the brace and the connection beam that, on average, 2.36 % of the earthquake energy is absorbed by the SMA.

Due to the ultra-elastic properties of SMA, story shear, roof acceleration, and stiffness of the structure were increased in the period time, while residual displacement values have decreased significantly.

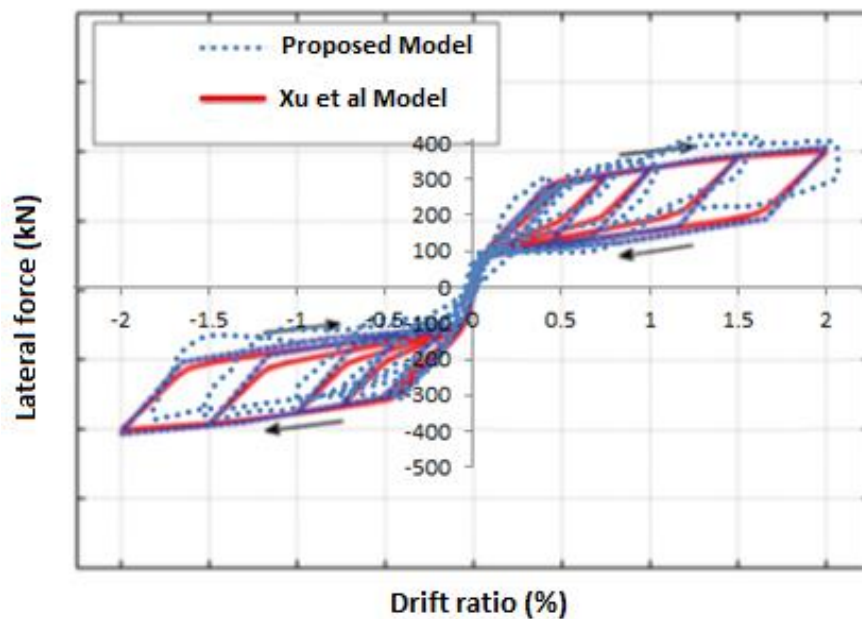


Fig. 3. Experimental and SeismoStruct hysteresis curves

4- Conclusion

In this study, 2-D dual moment steel with Chevron bracing models was generated in SeismoStruct software, that at the end of the braces, SMA rods were used. The structures were subjected to the non-linear dynamic time history analysis, and the structural responses such as maximum absolute roof displacement, maximum relative floor displacement, maximum roof displacement, maximum base shear, and maximum roof acceleration were evaluated and compared. A comparison of the results showed that SMA-equipped high-rise structures showed a slight increase in relative inter-story displacement, which provides more suitable conditions in operation conditions.

References

- [1] G. Song, N. Ma, H.-N. Li, Applications of shape memory alloys in civil structures, *Engineering structures*, 28(9) (2006) 1266-1274.
- [2] SeismoSoft, SeismoStruct—a computer program for static and dynamic non-linear analysis of framed structures [online], in, 2006.
- [3] A. Committee, Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-10), American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois, (2010).
- [4] A. Fema, 440, Improvement of non-linear static seismic analysis procedures, FEMA-440, Redwood City, 7(9) (2005) 11.
- [5] X. Xu, Y. Zhang, Y. Luo, Self-centering eccentrically braced frames using shape memory alloy bolts and post-tensioned tendons, *Journal of Constructional Steel Research*, 125 (2016) 190-204.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Bagheri , S. A. Hosseini, A. Vedad , *Evaluation of seismic behavior of eccentric braced dual steel frames equipped with shape memory alloys*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(2) (2022)
M. Bagheri et al., *Amirkabir J. Civil. Eng.*, 54(2) (2022) 133-136,

DOI: 10.22060/ceej.2021.19030.7038





ارزیابی رفتار لرزه‌های قاب‌های دوگانه فولادی با مهاربند برون محور دارای میله‌ی آلیاژ حافظه دار شکلی

منصور باقری^{*}، سید عباس حسینی^آ، امین وداد^آ

۱- گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

۲- دانشکده صنعت و معدن چرام، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران.

۳- مؤسسه آموزش عالی بعثت کرمان، کرمان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۹

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

کلمات کلیدی:

قاب دوگانه‌ی فولادی با مهاربند واگرا

آلیاژ حافظه دار شکلی

تغییر مکان پسماند

تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی

غیرخطی

خلاصه: به دلیل مناسب بودن سیستم مهاربندهای برون محور از نظر عملکرد و شکل‌پذیری مطلوب و نیز بررسی میزان تأثیر مصالح برگشت پذیر مانند آلیاژ حافظه دار شکلی در کاهش تغییر مکان پسماند در انتهای زمان زلزله، ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های با تعداد طبقات مختلف در این پژوهش انجام شد. سازه‌های دارای سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی با مهاربند برون محور در ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با میله‌ی آلیاژ حافظه دار شکلی، تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی قرار گرفته و بیشینه جابجایی مطلق بام و نسبی طبقات، بیشینه تغییر مکان پسماند بام، بیشینه برش پایه و شتاب بام در قاب‌های مورد نظر، ارزیابی و مقایسه شدند. نتایج نشان داد که تغییر مکان مطلق و نسبی بین طبقه‌ای در هر سه سازه مورد نظر دارای میله آلیاژهای حافظه دار شکلی به دلیل ضریب کشسانی پایین این آلیاژ بیشتر از سازه بدون آن می‌باشد. از طرفی نیز، مقادیر تغییر مکان پسماند به سبب خاصیت فوق الاستیک مصالح آلیاژ حافظه دار شکلی و نیز برش طبقات و شتاب نظیر طبقه بام با توجه به افزایش زمان تناوب و نرمی سازه، در مدل‌های دارای این نوع آلیاژ نسبت به سازه‌های بدون آن، کاهش مشخصی داشته‌اند. همچنین مقایسه‌ی پاسخ‌های سازه در طبقات مختلف نیز حاکی از اثر کاهشی بیشتر در تغییر مکان پسماند سازه‌ی ۵ طبقه و نیز در برش پایه و شتاب بام سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه دارد.

۱- مقدمه

یکی از انواع کنترل‌کننده‌های هوشمند، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی^۱ بوده که کاربردهای گسترده‌ای در علوم مهندسی و پزشکی پیدا کرده است. از جمله کاربردهای اصلی این نوع آلیاژها، مهار جابجایی‌های پلاستیک پسماند به علت داشتن خصوصیات هم‌چون ظرفیت میرایی بالا، دوام و نیز مقاومت در برابر خستگی و خوردگی می‌باشد. به طوری که با افزایش میرایی سازه و استهلاک انرژی زمین‌لرزه، نیروهای وارده و تغییر مکان‌های پسماند ایجاد شده توسط زلزله در ساختمان به صورت هم‌زمان به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد، در حالی که کاهش هم‌زمان این دو در روش‌های سنتی مقاوم‌سازی معمولاً امکان‌پذیر نیست. کاربرد الیاف حافظه‌دار شکلی با سیستم‌های جداگر لرزه‌ای، میراگرهای انرژی، اتصالات سازه‌ای، بتن مسلح هوشمند و کامپوزیت‌ها، نمونه‌هایی از کاربردهای این آلیاژ می‌باشند [۲].

آلیاژهای حافظه‌دار عنوان گروهی از مواد محرک می‌باشند که خواص متمایز و برتری نسبت به سایر آلیاژها دارند. عکس‌العمل شدید این مواد نسبت به برخی از مشخصه‌های ترمودینامیکی و مکانیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه در اثر اعمال مشخصه‌های مذکور به گونه‌ای است که

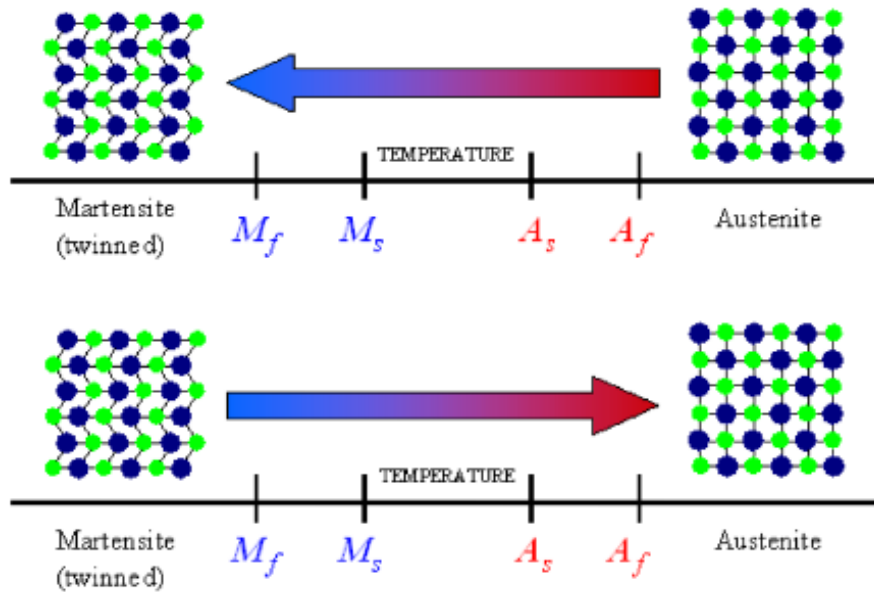
مشاهده عملکرد سازه‌ها در هنگام وقوع زلزله و همچنین مطالعات تحلیلی و بررسی‌های آزمایشگاهی و جمع‌آوری اطلاعات مربوط به زمین لرزه‌های چهار دهه اخیر، امکان ارائه روشی مدرن برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله را فراهم آورده است. مطالعات فراوانی در زمینه کنترل پاسخ سازه‌ها در برابر زلزله صورت پذیرفته به طوری که برای مستهلک کردن انرژی، سه سیستم فعال، نیمه فعال و غیرفعال ابداع شده است. سیستم‌های کنترل فعال سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها سازه به سیستم پردازش‌گر مجهز شده و در هر لحظه متناسب با بار جانبی وارد شده، به یک منبع نیرو برای کنترل سازه احتیاج است. سیستم‌های کنترل غیرفعال نیز سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها سازه به وسیله تجهیزات از پیش طراحی شده، مانند میراگر و جداگر لرزه‌ای و بدون احتیاج به منبع خارجی در مقابل بارهای جانبی مقاومت می‌کند و بخش نسبتاً زیادی از انرژی ورودی به سازه را تحت مکانیزم‌های مختلف جذب می‌نمایند [۱]. در این میان با پیشرفت علم، مبحث کاربرد سیستم‌های نوین در مهندسی مطرح و پیشنهادهاى مختلفی در این زمینه ارائه شده است.

1 Shape Memory Alloys (SMAs)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mnsrbagheri@birjandut.ac.ir

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





شکل ۱. تغییر شکل مارتنزیتی با تغییر دما در غیاب بار خارجی [۴]

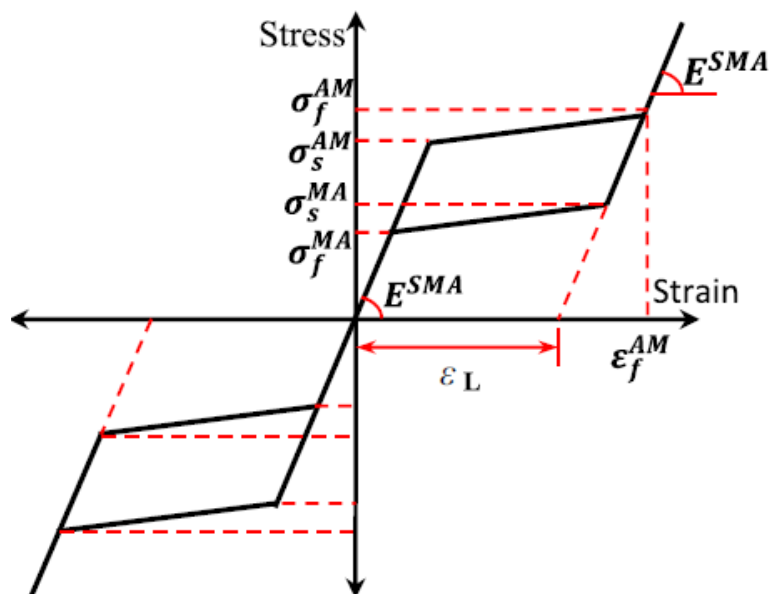
Fig.1. Martensite deformation with temperature change in the absence of external load

نمی‌باشد. این تبدیل منحنی تنش- کرنش، ماده را به صورت غیرخطی درمی‌آورد. در انتها تمامی آستنیت‌ها به مارتنزیت بدل شده و لذا ماده دچار سخت شدگی خواهد شد. در هنگام باربرداری، مارتنزیت ناپایدار می‌شود و تبدیل معکوس رخ می‌دهد. تبدیل معکوس از روی یک مسیر متفاوت ماده را به مکان اولیه می‌رساند. این رفتار را که در شکل ۲ نشان داده شده است، فوق الاستیک یا شبه الاستیک می‌نامند چرا که هیچ کرنش پسماندی روی ماده باقی نمی‌ماند. اهمیت بررسی تغییر شکل‌های پسماند این است که با ورود سازه به ناحیه غیرخطی و شروع تغییر شکل‌های غیرارتجاعی، پس از حذف عامل خارجی بار، تغییر شکل‌های ماندگار در سازه باقی می‌ماند که وجود این نوع تغییر شکل‌های دائمی تأثیر منفی در عملکرد ساختمان‌های به خصوص با اهمیت زیاد و خیلی زیاد می‌گذارد [۵].

مک کورمیک و همکاران [۶]، با مطالعه تأثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر روی قاب‌های مهاربندی شورون، نشان دادند که تغییر مکان پسماند به خصوص در طبقات پایین به طور محسوسی کاهش می‌یابد. محمودی و همکاران [۷]، به بررسی قاب‌های مهاربند زانویی مجهز به میله‌های SMA پرداخته و نتیجه گرفتند که میله‌های با قطر ۱۲ میلی‌متر عملکرد مناسب‌تری داشته و به طور کلی، استفاده از SMA به طور قابل ملاحظه‌ای موجب کاهش تغییر مکان پسماند و تغییر سختی، شکل‌پذیری و مقاومت سازه‌ها

می‌تواند رفتار سیستم را بهبود بخشد. مکانیسم اصلی که خواص آلیاژهای حافظه‌دار را کنترل می‌کند در رابطه با تغییر کریستالی آلیاژ است [۳]. به این معنی که ساختار مارتنزیتی در دمای پایین با افزایش دما به ساختار آستنیتی تبدیل می‌شود و در هنگام سرد شدن، فرآیند عکس رخ خواهد داد. اگر در این آلیاژها در دمای پائین و هنگامی که فاز مارتنزیت حاکم است تغییر فرم پلاستیکی روی دهد، ساختار کریستالی دوقلو شده‌ای برای آلیاژ ایجاد می‌شود که ناشی از تغییر فرم پلاستیک می‌باشد. با گرم کردن آلیاژ تغییر فرم یافته تا دمای شروع فاز آستنیت می‌توان شکل اولیه را بازگرداند که این توانایی به عنوان اثر حافظه‌ی شکل خوانده می‌شود. در حقیقت در اثر فرآیند برگشت به شکل اولیه، تنش‌هایی در آلیاژ تولید می‌گردد که این تنش باعث تحریک شده و به آن تنش بازیافتی می‌گویند. بهبود توزیع تنش و کرنش، بهبود خواصی چون مدول یانگ و تنش تسلیم و توانایی کنترل رفتار سیستم، از جمله آثار مفید تنش‌های بازیافتی می‌باشد. تغییر شکل برگشت‌پذیر مارتنزیتی با سرد و گرم کردن در غیاب بار خارجی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

اعمال تنش به یک ماده حافظه‌دار شکلی که در حالت اولیه آستنیت قرار دارد و دمای آن بالاتر از A_f می‌باشد، موجب می‌شود که آستنیت به مارتنزیت ایجاد شده توسط تنش تبدیل شود، چرا که آستنیت در تنش‌های بالا پایدار



شکل ۲. رفتار فوق الاستیک آلیاژ حافظه دار شکلی [۵]

Fig. 2. Ultra-elastic behavior of SMA

یکی از مشکلات مهاربندهای همگرا، عدم رفتار مناسب در تغییر شکل‌های غیرارتجاعی آن‌ها می‌باشد که برای حل مشکل کاهندگی مهاربند تحت بار متناوب، از مهاربند برون محور استفاده شده که با ایجاد تسلیم در اعضای خمشی می‌توان از کمانش آن تحت فشار جلوگیری کرد. از طرف دیگر، مطابق آیین نامه فولاد امریکا ویرایش ۲۰۱۰ [۱۳]، تیر پیوند به عنوان فیوز عمل کرده و ضعیف است و عضو مهاربند، ستون و تیر خارج از آن نیز باید قوی باشد. از طرفی، میله‌های SMA می‌توانند هم در محل اتصال تیر پیوند به تیر خارج از پیوند و هم در محل اتصال مهاربند به تیر استفاده شده و در صورت پاسخ‌های مطلوب مانند کاهش برش پایه و شتاب طبقات و نیز تغییر مکان پسماند، میزان اثر گذاری آن در کاهش پاسخ‌های سازه بررسی شود.

۲- نوآوری تحقیق

با توجه به انجام تحقیقات متعدد در مورد استفاده از میله‌ی آلیاژ حافظه‌دار شکلی در محل اتصال تیر به ستون قاب‌های خمشی و نیز در انتهای مهاربندهای همگرا [۸-۶] و همچنین در محل اتصال تیر پیوند به تیر خارج پیوند [۱۲]، در این مطالعه نوع جدیدی از اتصال میله SMA به مهاربندهای برون محور در سازه‌های با طبقات مختلف مدل‌سازی، تحلیل

می‌شود. همچنین مرادی و همکاران [۸] مطالعات متعددی جهت بررسی قابلیت کاربرد این آلیاژها در مهندسی سازه و زلزله انجام دادند که حاکی از کاهش تغییر شکل‌های پسماند پس از زلزله در صورت استفاده از این آلیاژ به خصوص در سازه‌های مهاربندی شده بود. مساح و دورور [۹] در مطالعه خود به اثر SMA در قاب‌های فولادی ۴، ۹ و ۱۴ طبقه دارای تیر پیوند عمودی پرداختند. نتایج نشان‌گر این بود که مصالح فوق ارتجاعی مزبور موجب بهبود شکل‌پذیری سازه، ظرفیت برگشت‌پذیری عالی و مقاومت جانبی مطلوب می‌شود و هر دو تغییر مکان نسبی و پسماند را کاهش می‌دهد. میرزایی و عطار نژاد [۱۰] نیز به بررسی عملکرد نوعی مهاربند برون محور با پیوند عمودی دارای SMA پرداختند که ارائه پایین‌ترین سطح تغییر مکان پسماند برای این سیستم از مهم‌ترین نتایج این تحقیق بود. همچنین کیو و ژو [۱۱]، روش طراحی مبتنی بر عملکرد قاب‌های مهاربندی فولادی با مهارهای برگشت‌پذیر ساخته شده از SMA را بررسی نمودند. همچنین با توجه به ضرورت بررسی عملکرد میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قاب‌های مهاربندی شده‌ی واگرا، ژو و همکاران [۱۲] در پژوهشی پیرامون برگشت‌پذیری در قاب‌های مهاربندی برون محور با کابل و میله‌ی SMA، تأثیر شکل جزئیات اتصال تیر پیوند را روی عملکرد چرخه‌ای سیستم EBF بررسی نمودند.

جهت طراحی سازه‌ها با سیستم قاب خمشی فولادی متوسط با مهاربند برون محور از آئین‌نامه‌ی فولاد آمریکا ویرایش سال ۲۰۱۰ استفاده شده است. کنترل ضوابط لرزه‌ای مانند دریافت طبقات و نیز اعمال ترکیبات بار ۱۰۰ درصد جهت اصلی و ۳۰ درصد جهت متعامد بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ انجام شده و همچنین نسبت تنش در تمام اعضای مدل‌های سازه‌ای کمتر از یک می‌باشد. مشخصات مقاطع کلیه اجزای سازه‌ها شامل ستون‌ها، تیرها و مهاربندهای برون محور شورون در جداول ۱ و ۲ آمده است. با توجه به طرح لرزه‌ای میحث دهم مقررات ملی ساختمان فشرده لرزه‌ای بودن مقطع تیر پیوند با استفاده از جدول ۱۰-۳-۴ مرجع مزبور بررسی و کنترل گردید.

فولاد مورد استفاده در این تحقیق بر اساس خصوصیات تعریف شده در نرم‌افزار سایزمو استراکت از نوع دو خطی بوده که با عنوان `stl_bl` شناخته می‌شود و دارای ضریب کشسانی و مقاومت حد تسلیم به ترتیب برابر با 2×10^8 و 24×10^4 کیلوپاسکال و سختی کرنشی سینماتیکی $0/005$ است و محدوده الاستیک در بارگذاری‌های مختلف ثابت می‌ماند. منحنی تنش-کرنش این فولاد و نیز منحنی تنش-کرنش آلیاژ حافظه‌دار شکلی در شکل ۴ نمایش داده شده است.

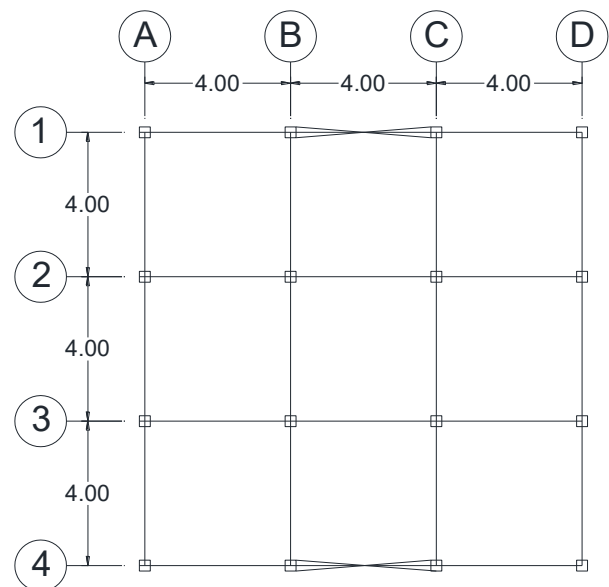
همچنین مشخصات مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیز بر اساس مطالعه محمودی و همکاران [۷] مطابق جدول ۳ می‌باشد. برای این مصالح، ضریب کشسانی برابر ۲۷۶۰۰ مگاپاسکال لحاظ شده است. این ضریب تقریباً ۷ برابر کمتر از ضریب کشسانی فولاد می‌باشد که بر اساس روابط مقاومت مصالح روی پاسخ‌های سازه مربوط به تغییر مکان جانبی اثر قابل ملاحظه‌ای دارد. همچنین مقاومت تسلیم و نهایی حالت آستنتی به ترتیب ۴۱۴ و ۵۵۰ و همچنین مقاومت تسلیم و نهایی حالت مارتنزیت به آستنتی به ترتیب برابر با ۳۹۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال با کرنش نهایی ۵/۵ درصد در نظر گرفته شده است.

برای انجام مدل‌سازی در نرم‌افزار سایزمو استراکت، از مقاطع معرفی شده در جداول ۱ و ۲ که حاصل تحلیل و طراحی اولیه‌ی مدل‌ها در نرم‌افزار ایتبس [۱۵] می‌باشد، استفاده شده است. در این نرم‌افزار، مقاطع مورد نظر به صورت انتخاب خودکار به قاب‌های مدل شده اختصاص داده شده و ترکیبات بار مربوط به سازه‌های فولادی تعریف و سپس تحلیل استاتیکی معادل انجام شده و مقاطع اولیه برای ستون، تیر و مهاربند مشخص شدند. از سوی دیگر نیز با توجه به اینکه امکان تعریف مصالح با خصوصیات آلیاژ حافظه‌دار شکلی با عنوان `se_sma` به طور مستقیم در نرم‌افزار سایزمو استراکت وجود دارد، لذا از این نرم‌افزار برای مدل‌سازی و انجام تحلیل تاریخچه زمانی

و نتایج حاصل با حالت بدون این آلیاژ مقایسه گردید. در این پژوهش، قاب خمشی فولادی دوگانه با مهاربند برون محور شورون در ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه دارای میله از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی (EBF-SMA) و یا بدون این آلیاژ (EBF) در نرم‌افزار سایزمو استراکت [۱۴] مدل‌سازی و تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی قرار گرفته است. سپس میزان حداکثر پاسخ‌های لرزه‌ای شامل جابجایی مطلق بام، تغییر مکان نسبی طبقات، تغییر مکان پسماند بام، برش پایه و شتاب بام و همچنین شرایط تشکیل مفاصل پلاستیک اعضای قاب و میزان جذب انرژی مهاربندها، ارزیابی و مقایسه گردید.

۳- مدل‌های مورد بررسی

مدل این سازه‌ها شامل سه دهانه ۴ متری در راستاهای X و Y با ارتفاع هر طبقه برابر با ۳/۲۰ متر در منطقه با شدت لرزه خیزی زیاد روی خاک نوع D و با کاربری مسکونی مطابق پلان شکل ۳ است. همچنین مقدار بار ثقیلی به صورت بار مرده و زنده به ترتیب برابر با ۵۱۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع وارد بر کف طبقات می‌باشد که این بارها توسط دال سقف و تیرهای خمشی تحمل شده و به ستون‌ها منتقل می‌گردد.



شکل ۳. پلان سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه

Fig. 3. Plan of 5, 10, and 15-stories structures

جدول ۱. مشخصات مقاطع ستون در سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه

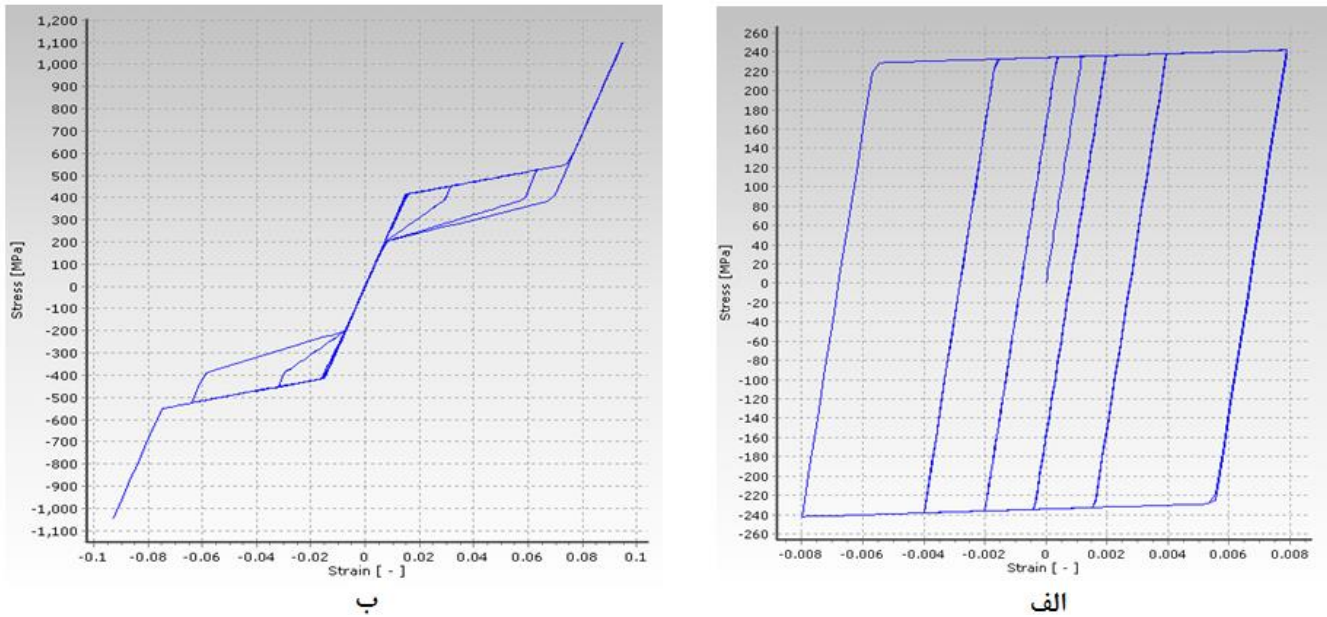
Table 1. Section properties of columns for 5, 10, and 15-stories structures

ستون جانبی			ستون میانی			
۱۵ طبقه	۱۰ طبقه	۵ طبقه	۱۵ طبقه	۱۰ طبقه	۵ طبقه	طبقه
BOX180×15	BOX150×10	BOX150×10	BOX200×20	BOX180×15	BOX150×10	۴-۱
BOX180×15	BOX150×10	BOX150×10	BOX180×15	BOX150×10	BOX150×10	۵
BOX180×15	BOX150×10	-	BOX180×15	BOX150×10	-	۶
BOX180×15	BOX150×10	-	BOX180×15	BOX150×10	-	۷-۹
BOX150×15	BOX150×10	-	BOX150×15	BOX150×10	-	۱۰
BOX150×15	-	-	BOX150×15	-	-	۱۱ و ۱۲
BOX150×10	-	-	BOX150×10	-	-	۱۳-۱۵

جدول ۲. مشخصات مقاطع تیر و مهاربند برون محور شورون در سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه

Table 2. Section properties of beams and Chevron eccentrically brace for 5, 10, and 15-stories structures

مهاربند برون محور شورون			تیر خارج از دهانه مهاربند			تیر دهانه مهاربند			طبقه
۱۵ طبقه	۱۰ طبقه	۵ طبقه	۱۵ طبقه	۱۰ طبقه	۵ طبقه	۱۵ طبقه	۱۰ طبقه	۵ طبقه	
2UNP120	2UNP100	2UNP80	IPE270	IPE200	IPE180	IPE400	IPE270	IPE200	۱
2UNP120	2UNP100	2UNP80	IPE270	IPE200	IPE180	IPE360	IPE270	IPE200	۲-۵
2UNP100	2UNP80	-	IPE270	IPE200	-	IPE360	IPE200	-	۶
2UNP100	2UNP80	-	IPE270	IPE200	-	IPE270	IPE200	-	۷-۱۰
2UNP80	-	-	IPE270	-	-	IPE270	-	-	۱۱
2UNP80	-	-	IPE240	-	-	IPE240	-	-	۱۲-۱۴
2UNP80	-	-	IPE180	-	-	IPE180	-	-	۱۵



شکل ۴. منحنی تنش- کرنش تعریف شده در نرم افزار سائزمو استراکت (الف): فولاد- (ب): آلیاژ حافظه دار شکلی [۱۴].

Fig. 4. Stress-strain curve defined in SeismoStruct software for; a:steel-b:SMA

جدول ۳. مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه دار شکلی [۷]

Table 3. Mechanical properties of SMA

مقدار (مگاپاسکال)	کمیت
۲۷۶۰۰	مدول الاستیسیته
۴۱۴	مقاومت تسلیم (آستنیت به مارتنزیت)
۵۵۰	مقاومت نهایی (آستنیت به مارتنزیت)
۳۹۰	مقاومت تسلیم (مارتنزیت به آستنیت)
۲۰۰	مقاومت نهایی (مارتنزیت به آستنیت)
۵/۵ درصد	کرنش نهایی

طول تیر پیوند در مدل سازی این پژوهش به میزان ۲۰ درصد کل طول تیر دهانه‌ی مهاربندی به مقدار ۸۰ سانتی متر لحاظ شده است.

از دیگر سو، میزان بیشینه دوران مجاز برای تیر پیوند نسبت به تیر خارج از آن به ترتیب برابر با ۰/۰۸ اگر $M_p/V_p < 1.6$ و $e < 0.2$ اگر $e \geq 2.6$ است که در آن، متغیر e طول تیر پیوند بوده و M_p/V_p و Z و V_p

که در آن، t_f ضخامت بال و t_w ضخامت جان و d ارتفاع کل تیر پیوند است. لذا نسبت مقاومت محوری مورد نیاز تیر پیوند به مقاومت تسلیم محوری تیر پیوند (P_u/P_e) برابر با ۰/۵۰۴ شده و کمتر از ۰/۱۵ است، بنابراین مطابق تبصره انتهای همین بند، هیچ محدودیتی برای طول تیر پیوند وجود ندارد و تنها کافی است که طول کوچکی برای آن لحاظ گردد لذا

جدول ۴. نتایج تحلیل مقادیر ویژه مدل های EBF-SMA و EBF در مود اول

Table 4. Results of Eigenvalue analysis of EBF-SMA and EBF models in the first mode

تغییر مکان جهت X	زمان تناوب اصلی (ثانیه)	مدل	سازه
۵/۹۵	۰/۴۸	EBF	۵ طبقه
۶/۰۵	۰/۵۱	EBF-SMA	
۷/۹۷	۱/۱۱	EBF	۱۰ طبقه
۸.۱۳	۱/۲۱	EBF-SMA	
۹/۵۱	۱/۹۵	EBF	۱۵ طبقه
۹/۷۲	۲.۱۱	EBF-SMA	

برای بررسی و کنترل مشخصات لرزه‌ای تیر پیوند استفاده شده در قاب‌های مورد نظر، مطابق با بند ۱۰-۳-۱۲-۴ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در خصوص طول تیر پیوند در مهاربندهای برون محور ویژه و با توجه به اینکه خروجی نرم‌افزار ایتبس برای مقاومت محوری (P_u) و مقاومت برشی (V_u) مورد نیاز تیر پیوند طبقه اول سازه ۵ طبقه از IPE۲۰۰ به ترتیب برابر با ۳۴۵۰/۱۶۹ و ۱۹۶۲/۳۹۴ کیلوگرم بوده است، مقاومت تسلیم محوری و نیز مقاومت تسلیم برشی تیر پیوند از روابط (۱) و (۲) بر حسب کیلوگرم حاصل می‌شود:

$$P_c = F_y A_g = 2400 \times 28.5 = 68400 \quad (1)$$

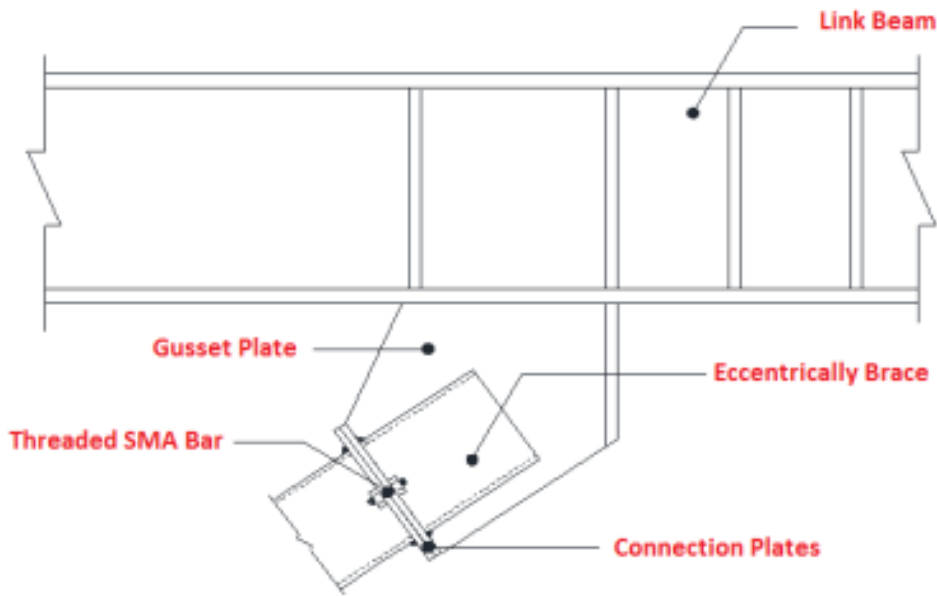
$$V_c = 0.6 \times F_y A_w = 0.6 \times 2400 \times 10.248 = 14757.12 \quad (2)$$

که در آن، F_y تنش حد تسلیم فولاد، P_c مقاومت تسلیم محوری، V_c مقاومت برشی و نیز A_g و A_w به ترتیب برابر با مساحت کل مقطع و مساحت جان تیر پیوند برای مقاطع I-شکل می‌باشند که از رابطه (۳) بر حسب سانتی‌متر به دست می‌آید.

$$A_w = (d - 2t_f) t_w = (20 - 2 \times 0.85) \times 0.56 = 10.248 \quad (3)$$

غیرخطی کمک گرفته شده است. پس از تعریف مصالح SMA، از قسمت مربوط به مقاطع در نرم‌افزار مزبور، مقطع دایره‌ای از نوع circular solid section را انتخاب و قطر میله مشخص می‌شود. این المان بر اساس دستورالعمل نرم‌افزار سائزمواستراکت به صورت تک محوری و مطابق با پژوهش آریچیو و ساکو [۱۶] بوده و در آن فرض شده است که مهارهای SMA تحت فشار محوری دچار کماتش نشوند و سختی آن‌ها تحت رفتار آستیت و مارتزیت کامل، ثابت باشد. ضمناً برای کنترل یکسان بودن سختی کلی سازه، مدل‌های با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی از نظر زمان تناوب اصلی با هم مقایسه شده و پس از انجام تحلیل مقادیر ویژه به نتایج مشابهی رسیده‌اند که در جدول ۴ مقادیر زمان تناوب اصلی سازه‌ها و تغییر مکان جهت X در مود اول سازه آمده است.

پس از تعریف مصالح و مقاطع لازم برای ستون‌ها، تیرها، مهاربندها و همچنین اعضای SMA، گره‌های دو سر اعضا تعیین شده و با انتخاب گره‌های مورد نظر و تعیین مقطع مورد نظر از لیست موجود، مدل‌سازی سازه‌ها انجام می‌گیرد. همچنین برای میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی به کار رفته در انتهای مهاربندها، قطر ۱۲ میلی‌متر مطابق مطالعه‌ی محمودی و همکاران [۷] و همچنین مطالعه‌ی وانگ و همکاران [۱۷] انتخاب شده است. از طرف دیگر و همان‌طور که در قسمت مقدمه نیز بیان شد، در پژوهش دسروچ و همکاران [۱۸] نیز مهارهای SMA در انتهای قاب فولادی با مهاربند همگرای شورون معکوس مورد بررسی لرزه‌ای قرار گرفته که قطر متوسط مهار آلیاژ حافظه‌دار شکلی برابر با ۱۲/۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۵. نحوه اتصال میله آلیاژ حافظه دار شکلی به ورق اتصال مهاربند برون محور

Fig. 5. Connection of threaded SMA bar to eccentrically brace gusset plate

می‌آیند که در آن، γ_p دوران غیرالاستیک تیر پیوند نسبت به ناحیه خارج از آن برحسب رادیان، Δ تغییر مکان جانبی نسبی طرح و L و h نیز به ترتیب برابر با طول دهانه قاب دارای مهاربند برون محور و ارتفاع طبقه می‌باشند.

$$\gamma_p = (L \cdot \Delta) / (e \cdot h) = (400 \times 1.935) / (80 \times 320) = 0.0302 < 0.0424 \quad (۶)$$

$$\gamma_p = (L \cdot \Delta) / (e \cdot h) = (400 \times 2.694) / (80 \times 320) = 0.0421 < 0.0424 \quad (۷)$$

همچنین نحوه اتصال میله SMA در انتهای مهاربند به ورق‌های اتصال مهاربند برون محور به تیر در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این جزئیات، از دو ورق اتصال برای مونتاژ مهاربند استفاده شده و با ایجاد رزوه در میله‌ی SMA، آلیاژ به ورق پیچ شده است.

همچنین در شکل ۶ نیز مدل کلی سازه‌های این پژوهش در ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با وجود مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی در انتهای مهاربند نمایش داده شده است.

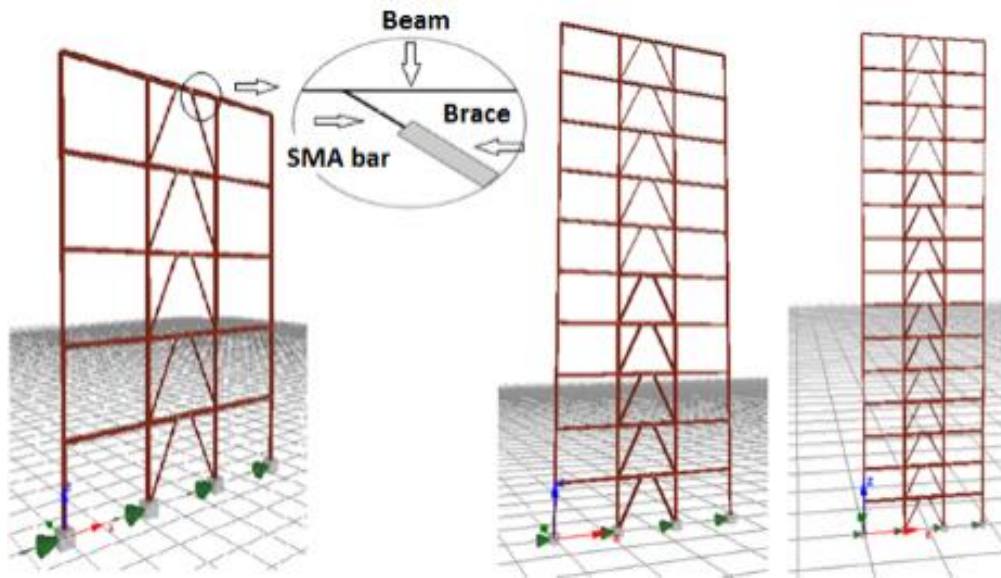
به ترتیب لنگر برحسب کیلوگرم سانتی‌متر، برش برحسب کیلوگرم و اساس مقطع پلاستیک برحسب سانتی‌متر مکعب مقطع تیر پیوند هستند و برای تیر پیوند مزبور مطابق روابط (۴) و (۲) به دست می‌آیند.

$$M_p = F_y Z = 2400 \times 221 = 530400 \quad (۴)$$

بنابراین داریم:

$$1.6M_p / V_p = 57.51; 2.6M_p / V_p = 93.45 \quad (۵)$$

و چون طول تیر پیوند بین دو عدد و برابر با ۸۰ سانتی‌متر است، لذا به کمک درون‌یابی، بیشینه دوران غیرالاستیک مجاز تیر پیوند مورد نظر برابر با 0.0424 رادیان به دست می‌آید. همچنین مقادیر دوران غیرالاستیک تیر پیوند برای سازه ۵ طبقه EBF و SMA-EBF به ترتیب برابر با 0.0302 و 0.0421 رادیان بوده که کمتر از مقدار مجاز است. این مقادیر به کمک روابط (۶) و (۷) و با استفاده از شکل ۱۰-۳-۱۲-۱ مبحث دهم به دست



شکل ۶. مدل سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در نرم افزار سائزمو استراکت و جانمایی محل آلیاژ حافظه دار شکلی

Fig. 6. 5, 10, and 15-stories structural models in SeismoStruct software and SMA locating

جدول ۳-C دستورالعمل FEMA۴۴۰ [۱۹]، انتخاب شده است. در جدول ۵ لیست شتاب نگاشت‌های مورد استفاده آمده است. همچنین برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی و امکان مقایسه نتایج، کلیه‌ی شتاب نگاشت‌های به کار رفته به کمک نرم افزار سائزمو سیگنال به عدد شتاب گرانش زمین مقیاس شده‌اند. پس از تکمیل مدل سازی و بارگذاری، برای تمامی نمونه‌های سازه‌ای مورد مطالعه در نرم افزار سائزمو استراکت، تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی تحت شتاب نگاشت‌های مورد نظر و با مدت زمان‌های متفاوت از ۳۸ تا ۸۰ ثانیه، انجام شده است.

۵- صحت سنجی

به منظور کنترل صحت مراحل مدل سازی قاب دوگانه فولادی با آلیاژ حافظه دار شکلی در نرم افزار سائزمو استراکت، از مطالعه ژو و همکاران [۱۲] استفاده شده که در آن، یک مدل آزمایشگاهی یک طبقه‌ی تک دهانه شامل ستون و تیر پیوند فولادی با مهاربند واگرای شورون معکوس تحت بار جانبی سیکی قرار گرفته است. این قاب مجهز به کابل‌های پس کشیده و میله‌های SMA می‌باشد. ابعاد مقاطع استفاده شده برای ستون، تیر و مهاربند در شکل ۷ نشان داده شده است. فولاد به کار رفته از نوع A۵۷۲ Grade ۵۰ به صورت I-شکل برای مقاطع مختلف می‌باشد. همچنین

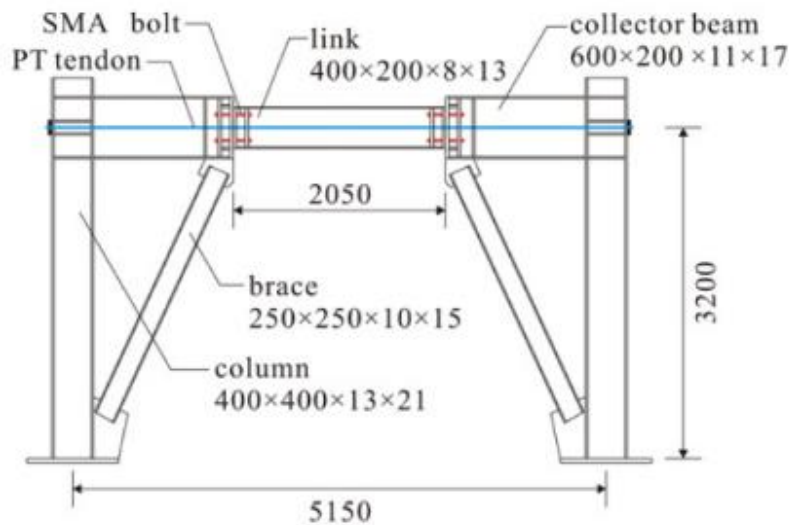
۴- تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی

تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی روشی پیچیده، زمان‌بر و در عین حال دقیق بوده و برای ارزیابی نیازهای غیرارتجاعی سازه تحت شتاب نگاشت‌های حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحلیل، آثار مودهای بالاتر و تغییرات مدل بار اینرسی به علت نرم شدگی سازه در حین زلزله به صورت خودکار در نظر گرفته شده و به طور مستقیم، تغییر مکان کلی حداکثر که توسط یک رکورد لرزه‌ای مشخص به سازه اعمال می‌گردد، تعیین شده و نیازی به تخمین زدن این مشخصه بر پایه روابط تجربی تئوریک نمی‌باشد. به طور کلی، این روش در مقایسه با روش پوش آور استاتیکی به دلیل اجتناب از تقریب‌های موجود جهت ساده سازی مدل سازه‌ای، از دقت بالاتری برخوردار است و برای تحلیل همه نوع سازه از نظر آیین‌نامه‌ها قابل انجام است. از این رو در این پژوهش، از این نوع تحلیل به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های دو بعدی استفاده شده است. از طرف دیگر، رکوردهای زلزله برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی بر اساس مشخصه‌های متفاوت دسته‌بندی می‌شوند که از جمله می‌توان به دسته‌بندی بر اساس بزرگی زلزله، نوع خاک، فاصله سایت تا منبع، مکانیسم گسل، مدت تداوم زلزله و مقادیر دامنه اشاره نمود. رکوردهای استفاده شده در این مطالعه نیز مربوط به شتاب نگاشت‌های دور از گسل برای سایت D که مشابه خاک نوع III استاندارد ۲۸۰۰ ایران و در منطقه با خطر لرزه‌خیزی زیاد می‌باشد، از

جدول ۵. مشخصات شتاب نگاشت های مورد استفاده [۱۹]

Table 5. Properties of applied earthquake records [21]

شماره	تاریخ وقوع	نام زلزله	نام ایستگاه	حداکثر سرعت (cm/s)	شدت (ریشتر)	جهت (درجه)	حداکثر شتاب (cm/s ²)
۱	10/01/87	Whittier Narrows	Los Angeles, 116th St School	۱۱/۴	۶/۱	۲۷۰	۲۸۸/۴
۲	10/15/79	Imperial Valley	Calexico, Fire Station	۲۲/۴۵	۶/۸	۲۲۵	۲۶۹/۶
۳	6/28/92	Landers	Yermo, Fire Station	۵۱/۳۹	۷/۵	۲۷۰	۲۴۰
۴	01/17/94	Northridge	Los Angeles, Hollywood Storage Bldg.	۲۱/۷۱	۶/۸	۳۶۰	۳۸۱/۴
۵	01/17/94	Northridge	Santa Monica City Hall	۴۱/۶۰	۶/۸	۹۰	۸۶۶/۲
۶	10/17/89	Loma Prieta	Gilroy #3, Sewage Treatment Plant	۱۳/۳۰	۷/۱	۰	۵۳۱/۷
۷	04/24/84	Morgan Hill	Gilroy #4, 2905 Anderson Rd	۱۷/۳۰	۶/۱	۳۶۰	۳۴۱/۴

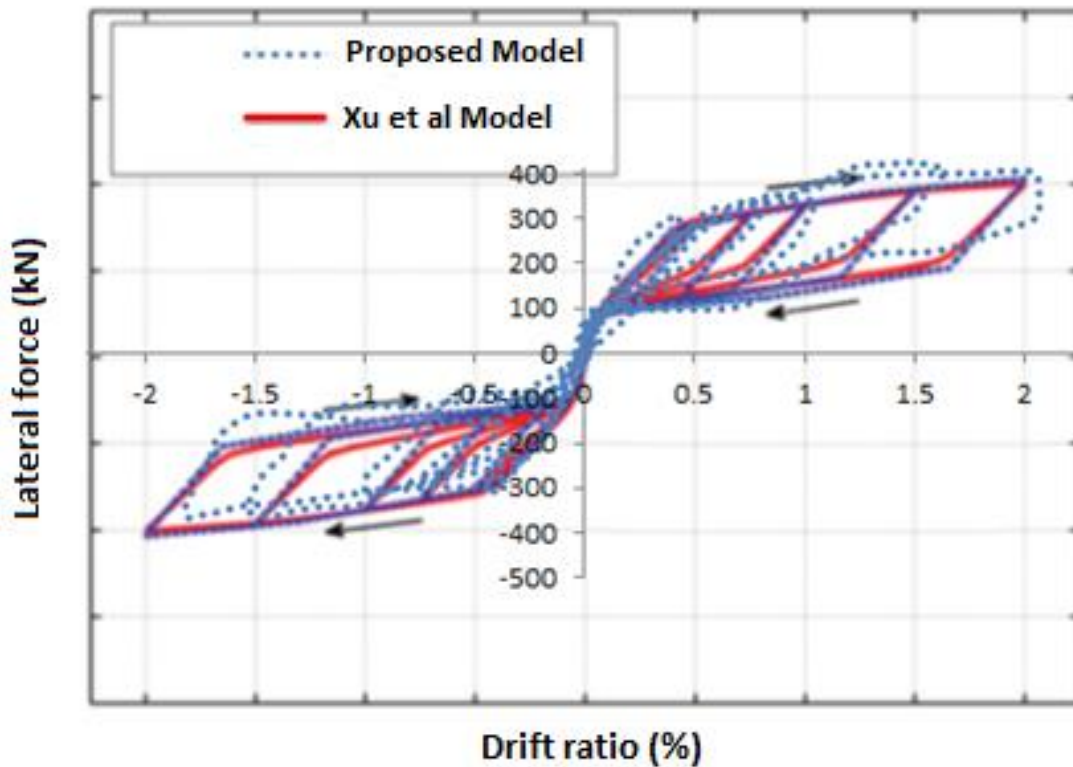


شکل ۷. مدل قاب مهاربندی شده ی مطالعه زو و همکاران [۱۲].

Fig. 7. Restrained frame of Xu et al. experiment [12]

و نهایی حالت مارتنزیت به آستنیت به ترتیب برابر با ۲۲۰ و ۱۲۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی ۵۰ گیگا پاسکال با کرنش نهایی ۰/۰۵ می‌باشد. مدل‌های مورد مطالعه در تحقیق مزبور عبارت از قاب مهاربندی شده با میله‌های SMA و کابل‌های پس کشیده می‌باشد.

کابل‌های با مقاومت بالا به قطر ۱۵ میلی‌متر در میانه‌ی ارتفاع تیر پیوند به صورت پس کشیده و نیز ۴ میله‌ی SMA به قطر ۳۰ میلی‌متر به طور متقارن در محل اتصال تیر به تیر پیوند قرار دارد. مقاومت تسلیم و نهایی حالت آستنیت به مارتنزیت به ترتیب ۳۸۰ و ۴۹۰ و همچنین مقاومت تسلیم



شکل ۸. مقایسه دو منحنی چرخه ای به دست آمده از سائزمو استراکت و مدل آزمایش ژو و همکاران.

Fig. 8. Xu et al. experiment and SeismoStruct hysteresis curves

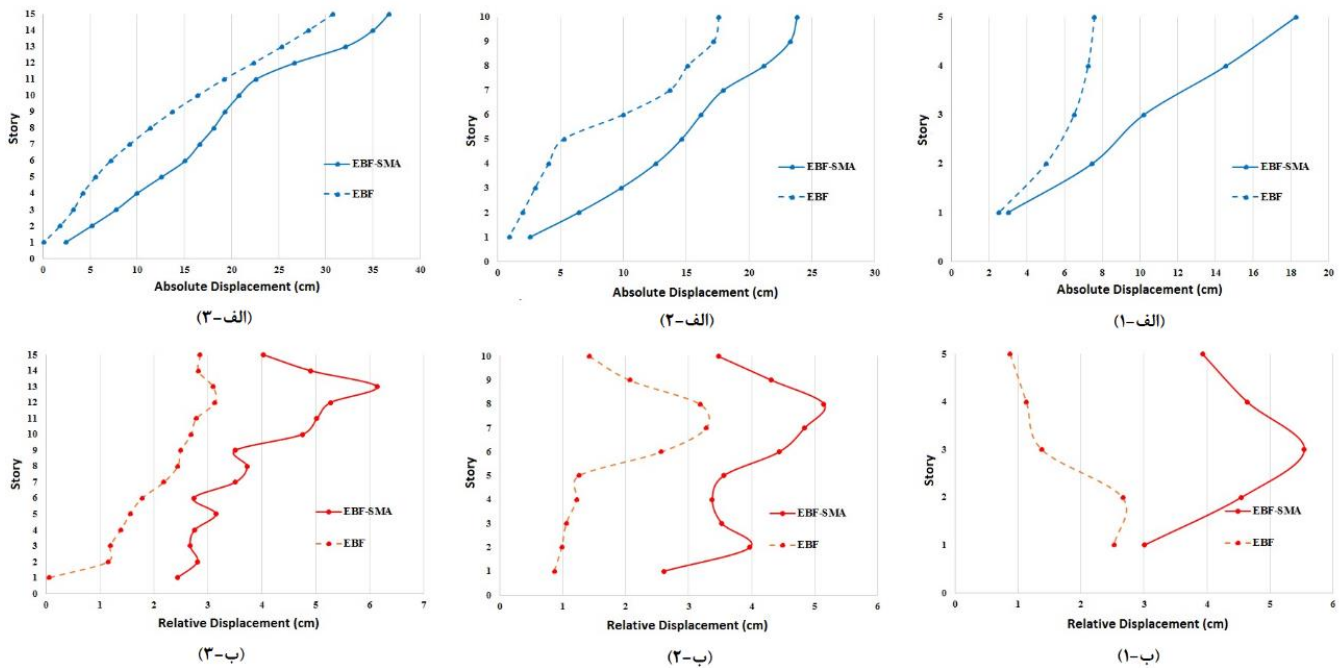
مشخص می‌شود که به طور کلی در مقادیر متوسط شتاب‌نگاشت‌های اعمال شده، تغییر مکان مطلق در طبقات برای مدل دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی قرار گرفته در انتهای مهاربند، بیشتر از مدل بدون آلیاژ است. برای سازه ۵ طبقه، اختلاف ایجاد شده در منحنی تغییر مکان مطلق با افزایش ارتفاع سازه، بیشتر شده ولی در دو سازه دیگر کم و بیش با یک شیب مشخص ادامه یافته است. همچنین نمودارهای مربوط به تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای کلیه سازه‌های مورد بررسی در شکل ۹ نیز حاکی از اختلاف معنادار میزان متوسط تغییر مکان نسبی و به خصوص برای سازه ۵ طبقه دارد و همانطور که انتظار می‌رود، میزان این تغییر مکان در یک سوم بالایی سازه‌ها دارای بیشترین مقدار است. لازم به ذکر است که روند تغییر مکان‌های مطلق و نسبی برای تمامی شتاب‌نگاشت‌ها از یک حالت یکسان تبعیت می‌کند به نحوی که این تغییرات برای مدل EBF-SMA بیشتر از EBF بوده است. مقادیر متوسط تغییر مکان مطلق و نسبی طبقات سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه برای مدل‌های EBF-SMA و EBF تحت شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر در جداول ۶ و ۷ آمده است.

پس از مدل‌سازی و اعمال بار جانبی به مدل EBF-T۰ که مدل قاب مهاربندی شده با میله‌های SMA و بدون کابل‌های پس‌کشیده است، منحنی چرخه‌ای به دست آمده با منحنی مدل مطالعه شده مطابق شکل ۸ مقایسه شد که انطباق مناسبی بین منحنی مطالعه‌ی ژو و همکاران و نیز منحنی قاب مدل‌سازی شده در نرم‌افزار سائزمو استراکت را نشان می‌دهد.

۶- بررسی نتایج

پس از انجام تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی روی سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با SMA (مدل EBF-SMA) و بدون SMA (مدل EBF)، مجموعه‌ای از نتایج شامل حداکثر تغییر مکان مطلق طبقات، حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای، حداکثر تغییر مکان پسماند در پایان زمان مؤثر زلزله، حداکثر نیروی برش پایه و نیز حداکثر شتاب بام در ادامه مطالب آمده و توضیحاتی بیان شده است.

با توجه به نمودارهای شکل ۹ مربوط به تغییر مکان مطلق طبقات مختلف سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل EBF-SMA و EBF



شکل ۹. (الف-۱) - (الف-۳). متوسط تغییر مکان مطلق (ب-۱) - (ب-۳). متوسط تغییر مکان نسبی، سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل های EBF و EBF-SMA تحت شتاب نگاشت های مختلف.

Fig.9.a1-a3) Absolute displacement average; b1-b3) Relative displacement average; of EBF-SMA and EBF models for 5, 10, and 15-stories structures under different earthquake records

جدول ۶. نسبت متوسط تغییر مکان مطلق طبقات سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل EBF-SMA به EBF.

Table 6. Absolute displacement average ratio of EBF-SMA to EBF models for 5, 10, and 15-stories structures

متوسط	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	سازه
۱/۷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲/۴	۲/۰	۱/۶	۱/۵	۱/۲	۵ طبقه
۱/۸	-	-	-	-	-	۱/۴	۱/۴	۱/۲	۱/۱	۱/۴	۲/۳	۲/۴	۲/۴	۲/۳	۲/۰	۱۰ طبقه
۱/۷	۱/۰	۰/۹	۰/۹	۰/۸	۰/۹	۱/۰	۱/۳	۱/۶	۱/۸	۲/۱	۲/۲	۲/۴	۲/۴	۲/۸	۳/۲	۱۵ طبقه

طبقه نسبت مقادیر متوسط تغییر مکان های مطلق مدل دارای آلیاژ حافظه دار شکلی به مدل بدون آن در یک سوم پایین ارتفاع حداکثر ۲/۴ و در طبقات بالا ۱/۴ برابر می باشد. روند تغییرات سازه ۱۵ طبقه نیز مانند ۱۰ طبقه بوده و این نسبت ها به ترتیب ۲/۹ و ۲ است. با این حال به طور متوسط میزان

مطابق اعداد مندرج در جدول ۶ مشخص می شود که نسبت مقادیر متوسط تغییر مکان های مطلق مدل EBF-SMA به مدل EBF با افزایش ارتفاع سازه بین ۱/۲ تا ۲/۴ برابر می شود. این نسبت برای سازه های با ارتفاع بیشتر در طبقات پایین تر بیشتر از طبقات بالا است. برای سازه ی ۱۰

جدول ۷. نسبت متوسط تغییر مکان نسبی طبقات سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل EBF-SMA به EBF.

Table 7. Relative displacement average ratio of EBF-SMA to EBF models for 5, 10, and 15-stories structures

متوسط	۱۵	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	سازه
۳/۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۴/۵	۴/۱	۴/۰	۱/۷	۱/۲	۵ طبقه
۲/۱	-	-	-	-	-	۲/۹	۲/۸	۱/۲	۰/۵	۰/۵	۳/۴	۲/۷	۲/۴	۲/۷	۲/۰	۱۰ طبقه
۱/۹	۱/۴	۱/۷	۲/۰	۱/۷	۱/۸	۱/۸	۱/۰	۱/۱	۱/۲	۱/۵	۲/۰	۱/۹	۲/۲	۲/۴	۴/۲	۱۵ طبقه

پسماند را برای هر کدام از شتاب‌نگاشت‌ها مقایسه نمود که فاصله قابل ملاحظه‌ای بین تغییر مکان پسماند EBF-SMA و EBF وجود داشته و نمایانگر مزیت استفاده از این مصالح در سازه‌های فولادی مهاربندی شده است، به طوری که مدل EBF-SMA برای همه‌ی شتاب‌نگاشت‌ها دارای تغییر مکان پسماند کمتری می‌باشد. در شکل ۱۱-ب، تغییر مکان پسماند مدل‌های EBF و EBF-SMA تحت کلیه شتاب‌نگاشت‌ها و برای هر سه سازه مقایسه شده است.

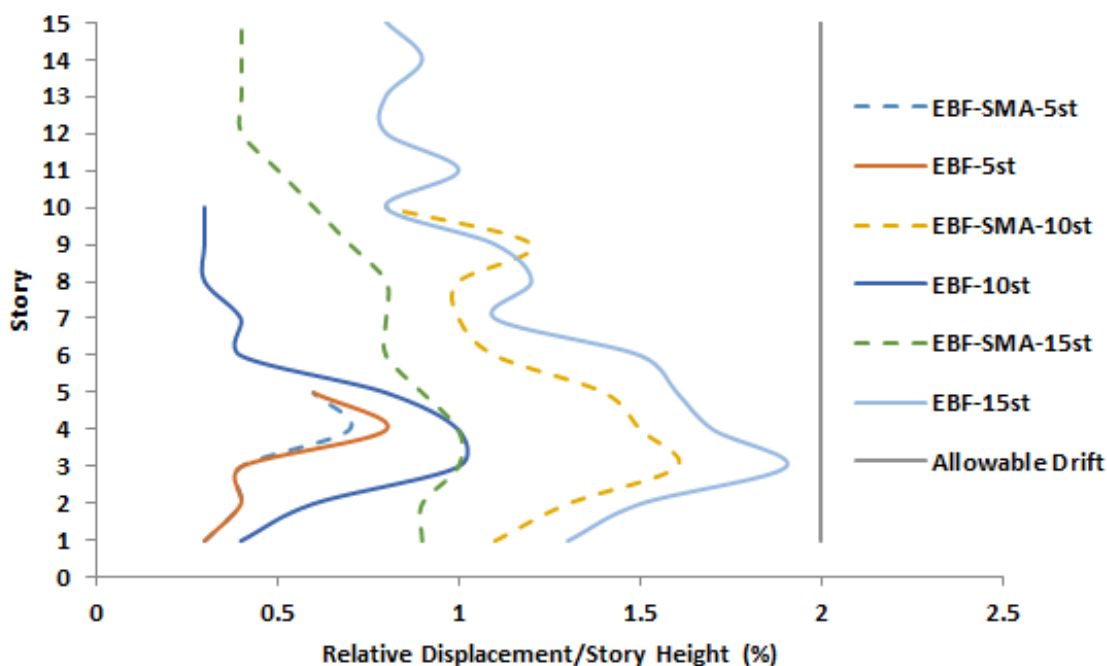
همچنین با مقایسه مقادیر برش پایه سازه‌های مورد نظر برای مدل‌های EBF-SMA و EBF، مشخص می‌گردد که وجود آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سیستم مهاربندی، موجب کاهش برش پایه و در نتیجه کاهش اعمال نیروی زلزله به سازه شده و متناسب با آن موجب، سبک شدن مقاطع می‌گردد. نمودارهای مقایسه‌ای حداکثر برش پایه در همه شتاب‌نگاشت‌ها در شکل ۱۲-الف قابل مشاهده است. در ادامه می‌توان مقادیر شتاب طبقه بام را برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه EBF-SMA و EBF مطابق شکل ۱۲-ب مورد مقایسه قرار داد. همانطور که مشخص است و نتایج با نتایج حاصل از برش پایه مطابقت دارد، شتاب طبقات این سازه‌ها با وجود SMA از مدل بدون آن به وضوح، کمتر می‌باشد. بنابراین با محاسبه مقادیر متوسط تغییر مکان‌های مطلق و نسبی و همچنین متوسط حداکثر تغییر مکان پسماند و متوسط حداکثر برش پایه سازه‌های با و بدون SMA مشخص می‌گردد که سازه با داشتن مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی در انتهای مهاربندهای خود دارای تغییر مکان مطلق و نسبی بیشتر و حداکثر برش پایه، شتاب بام و تغییر مکان پسماند کمتری می‌باشد.

تغییر مکان مطلق سازه مدل EBF-SMA در هر سه سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه بین ۱/۷ تا ۱/۸ برابر مدل EBF بوده که نشان دهنده‌ی پاسخ یکسان سازه‌ها به این مصالح در ارتباط با تغییر مکان مطلق می‌باشد و استفاده یا عدم استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سازه‌های با تعداد طبقات مختلف، موجب تغییرات زیادی در میزان جابجایی مطلق آن‌ها نمی‌شود.

همچنین با توجه به جدول ۷، پاسخ سازه با طبقات کم به تغییر مکان نسبی نسبت به سازه‌های با ارتفاع زیاد، بحرانی‌تر بوده به طوری که به طور کلی نسبت مقادیر متوسط تغییر مکان‌های نسبی مدل EBF-SMA به مدل EBF برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب برابر ۳/۱، ۲/۱ و ۱/۹ است. این مطلب نشان می‌دهد که وجود آلیاژ حافظه‌دار شکلی برای سازه‌های بلند مرتبه موجب افزایش کمتری در تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای آن‌ها می‌شود و شرایط مناسب‌تری برای سازه در حالت بهره‌برداری مهیا می‌نماید.

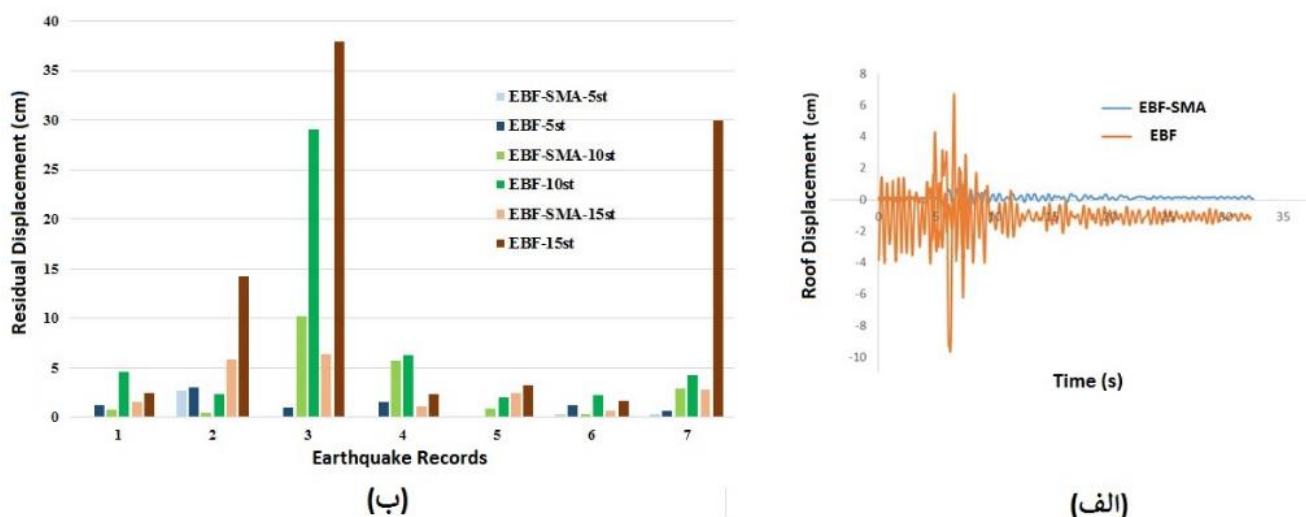
مطابق شکل ۱۰ و بر اساس بند ۳-۵-۲ استاندارد ۲۸۰۰ ایران، مقدار تغییر مکان نسبی طبقات ساختمان‌های تا ۵ طبقه نباید از ۰/۰۲۵ ارتفاع طبقه و برای ساختمان‌های با طبقات بیشتر از ۰/۰۲ ارتفاع طبقه (۲ درصد)، بیشتر باشد که در شکل مزبور، تمامی مقادیر از بیشینه مجاز کمتر بوده و از این نظر محدودیت آیین نامه رعایت شده است.

مطابق با شکل ۱۱-الف، میزان تغییر مکان بام سازه ۵ طبقه تحت شتاب‌نگاشت شماره ۱ برای مدل با آلیاژ حافظه‌دار شکلی در پایان مدت زمان مؤثر زلزله به صورت واضحی کمتر از تغییر مکان مدل بدون این آلیاژ بوده است. همچنین به کمک نمودار تغییرات جابجایی بام سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل‌های EBF-SMA و EBF، می‌توان مقدار تغییر مکان



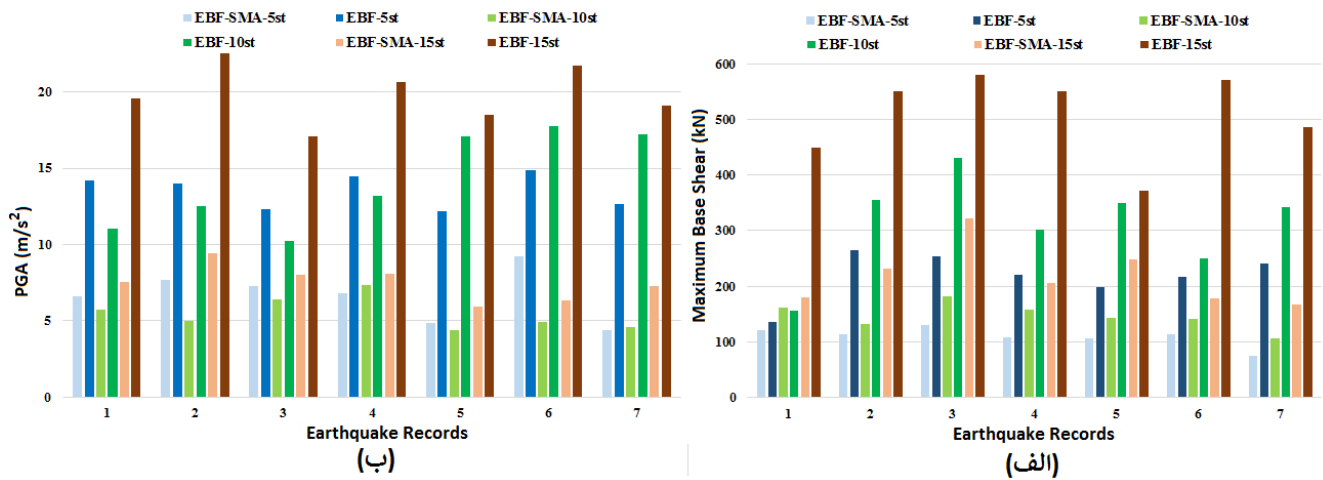
شکل ۱۰. مقایسه نسبت متوسط تغییر مکان نسبی طبقات به ارتفاع طبقه با حداکثر مقدار مجاز برای مدل های EBF-SMA و EBF.

Fig. 10. Comparison of average relative displacement to story height ratio with maximum allowable for EBF-SMA and EBF models



شکل ۱۱-الف. تغییر مکان بام سازه ۵ طبقه در طول زمان زلزله تحت شتاب‌نگاشت شماره ۱-ب. تغییر مکان پسماند سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل های EBF-SMA و EBF در پایان زمان مؤثر زلزله برای کلیه شتاب‌نگاشت ها.

Fig. 11. a) Roof displacement of 5-stories model during the earthquake record No.1; b) Residual displacement of 5, 10, and 15-stories structures of EBF-SMA and EBF models at the end of effective time of all earthquake records



شکل ۱۲- الف. حداکثر برش پایه - ب. حداکثر شتاب بام سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل های EBF-SMA و EBF.

Fig. 12. a) Maximum story shear; b) Maximum roof acceleration of EBF-SMA and EBF models for 5, 10, and 15-stories structures

نیز به ترتیب در سازه های ۱۵ و ۱۰ طبقه بروز بیشتری داشته است. همچنین در شکل ۱۴-الف، مقایسه ای بین متوسط پاسخ های سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه برای تغییر مکان مطلق طبقات شده است. مقادیر متوسط تغییر مکان مطلق طبقه پنجم سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با SMA، به ترتیب برابر با ۱۸/۲۷، ۱۴/۶۳ و ۱۲/۵۸ سانتی متر است و نشان می دهد که این تغییر مکان در طبقه پنجم سازه ۵ طبقه بیشتر از طبقه نظیر آن در سازه های دیگر است. تغییر مکان مطلق طبقه دهم سازه های ۱۰ و ۱۵ طبقه نیز به ترتیب برابر با ۲۳/۸۴ و ۱۶/۷۹ سانتی متر است.

از طرف دیگر، مطابق با شکل ۱۴-ب، مقایسه ای بین متوسط پاسخ های سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه برای تغییر مکان نسبی بین طبقه ای شده است. نمودارهای مزبور نشان می دهد که تغییر مکان نسبی سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با SMA، در یک سوم فوقانی ارتفاع آنها، دارای بیشترین مقادیر می باشد و حداکثر تغییر مکان نسبی سازه ۵ طبقه بیشتر از تغییر مکان نسبی طبقات نظیر آن در سازه های ۱۰ و ۱۵ طبقه است. به طور مثال با مقایسه مقدار تغییر مکان نسبی طبقه پنجم برای سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مشخص می شود که این پاسخ در سازه با تعداد طبقات کمتر نسبت به سازه مرتفع تر، بیشتر بوده است و نشان دهنده عملکرد مناسب تر SMA در سازه های با ارتفاع بیشتر می باشد.

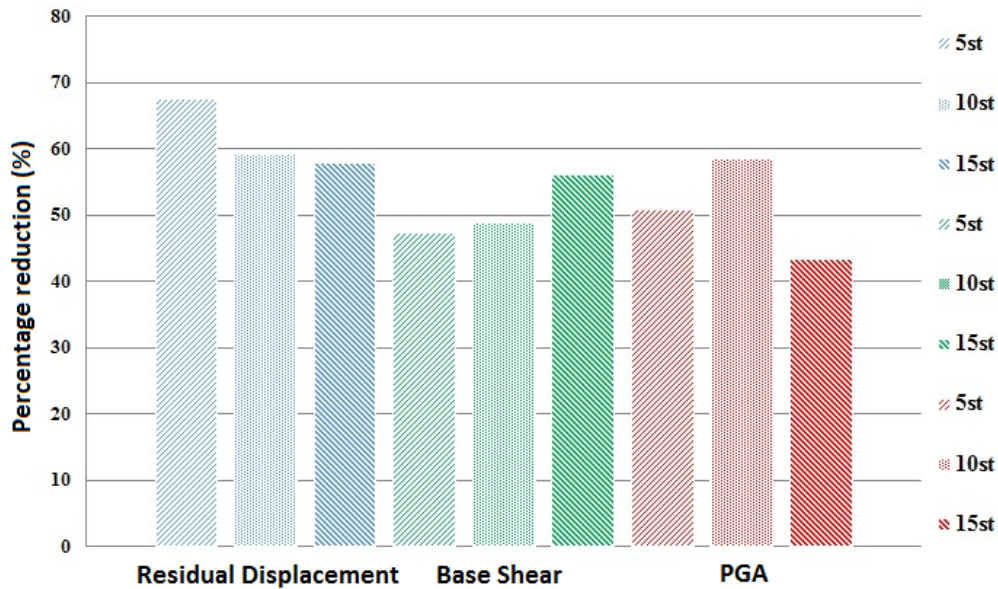
از طرف دیگر، همانطور که در بخش ۴ نیز بیان شد، عوامل متعددی از جمله جنس خاک، مکانیسم گسل، فاصله سایت تا منبع، بزرگی زلزله و نیز مدت زمان مؤثر زلزله بر پاسخ سازه تأثیر گذاشته و به دنبال آن نتایج متنوعی حاصل می شود. بنابراین با انتخاب تعداد بیشتری رکورد زلزله که تا حد ممکن دارای خصوصیات مشترکی هستند و به دست آوردن متوسط مقادیر، نتایج مورد نظر به واقعیت نزدیک شده و قابل بررسی می باشد. در جدول ۸، مقدار کاهش حداکثر تغییر مکان پسماند، حداکثر برش پایه و حداکثر شتاب مدل EBF-SMA نسبت به مدل EBF بر حسب درصد، برای همه شتاب نگاشت ها آمده است. بر اساس این جدول مشخص می شود که کاهش تغییر مکان پسماند برای متوسط شتاب نگاشت های وارده برای مدل EBF-SMA نسبت به مدل EBF در سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب برابر با ۶۷/۵، ۵۹/۲ و ۵۷/۹ درصد بوده است. همچنین کاهش مقادیر برش پایه برای سازه های مزبور به ترتیب ۴۷/۴، ۴۸/۹ و ۵۶/۱ درصد و نیز کاهش شتاب بام به ترتیب ۵۰/۸، ۵۸/۶ و ۴۳/۴ درصد می باشد.

نمودارهای میله ای شکل ۱۳ نیز بیانگر اثر مثبت وجود SMA در کاهش تغییر مکان های پسماند سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در زمان مؤثر زلزله است. بر این اساس، اثر کاهشی تغییر مکان پسماند در سازه ۵ طبقه بیشتر از ۱۰ و ۱۵ طبقه می باشد. همچنین اثر کاهشی برش پایه و شتاب بام

جدول ۸. درصد کاهش حداکثر تغییر مکان پسماند، حداکثر برش پایه و حداکثر شتاب مدل EBF-SMA نسبت به مدل EBF

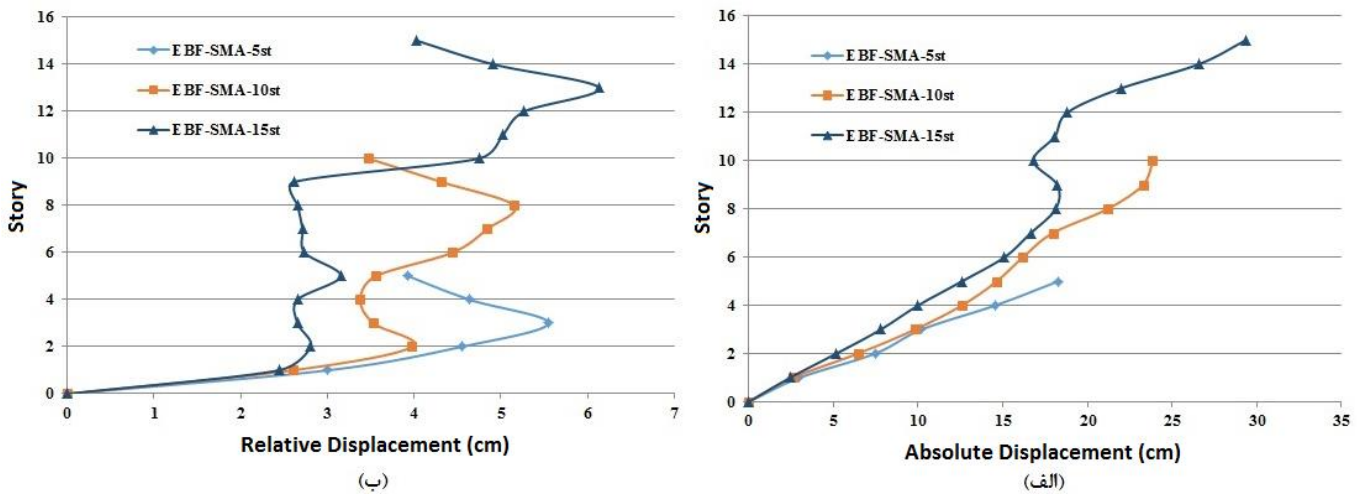
Table 8. Average reduction percent of maximum residual displacement, maximum story shear and maximum acceleration of EBF-SMA compared to EBF

۱۵ طبقه			۱۰ طبقه			۵ طبقه			
شتاب نگاشت بام	برش پایه	تغییر مکان پسماند	شتاب بام	برش پایه	تغییر مکان پسماند	شتاب بام	برش پایه	تغییر مکان پسماند	شتاب نگاشت
۸۶/۷	۵۹/۹	۳۶/۹	۴۸/۱	۲/۶۸	۸۳/۶	۵۳/۶	۱۱/۱	۹۴/۵	۱
۷۸/۷	۵۸/۱	۵۹/۱	۵۹/۹	۶۲/۹	۸۲/۶	۴۵/۱	۵۷/۱	۹/۸	۲
۶۲/۵	۴۴/۴	۸۳/۳	۳۷/۴	۵۸/۱	۶۴/۹	۴۱/۰	۴۸/۹	۹۹/۸	۳
۵۰/۵	۶۲/۶	۵۳/۵	۴۴/۲	۴۷/۴	۸/۱	۵۲/۷	۵۱/۰	۹۱/۴	۴
۱۵/۷	۳۳/۳	۲۳/۱	۷۴/۴	۵۸/۹	۵۳/۷	۵۹/۹	۴۶/۶	۵۵/۹	۵
۵/۷۱	۶۸/۷	۵۸/۵	۷۲/۲	۴۳/۹	۸۷/۸	۳۷/۹	۴۷/۹	۷۵/۲	۶
۴/۱۸	۶۵/۶	۹۰/۶	۷۳/۱	۶۸/۷	۳۳/۴	۶۵/۶	۶۹/۲	۴۵/۷	۷
۴۳/۴	۵۶/۱	۵۷/۹	۵۸/۶	۴۸/۹	۵۹/۲	۵۰/۸	۴۷/۴	۶۷/۵	متوسط



شکل ۱۳. مقایسه درصد کاهش متوسط حداکثر تغییر مکان پسماند، حداکثر برش پایه و حداکثر شتاب مدل EBF-SMA نسبت به مدل EBF.

Fig. 13. Average reduction percent of maximum residual displacement, maximum story shear and maximum acceleration of EBF-SMA compared to EBF



شکل ۱۴- الف. مقایسه متوسط تغییر مکان مطلق - ب. مقایسه متوسط تغییر مکان نسبی سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل EBF-SMA و EBF. Fig.14. a) Average absolute displacement; b), Comparison of average relative displacement EBF-SMA compared to EBF for 5, 10, and 15-stories structures

و محل تشکیل اولین مفصل پلاستیک در هر کدام از مدل‌های EBF و EBF-SMA برای سازه ۵ طبقه آمده است. مطابق این جدول، اولین مفاصل پلاستیک در تیر پیوند طبقات اول و دوم تشکیل شده است و در سطح عملکرد IO، مدل EBF دارای دوران بیشتر و در سطح عملکرد LS نیز به عکس حالت قبل، مدل EBF-SMA دارای دوران بیشتری است. همچنین در سطح عملکرد آستانه فروریزش و برای تیر پیوند طبقه اول نیز مدل دارای SMA، دوران بیشتری دارد. بنابراین به طور کلی رسیدن به سطوح عملکرد ایمنی جانی و آستانه فروریزش در مدل SMA-EBF دارای دوران بیشتر و برای سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه دارای دوران کمتری است.

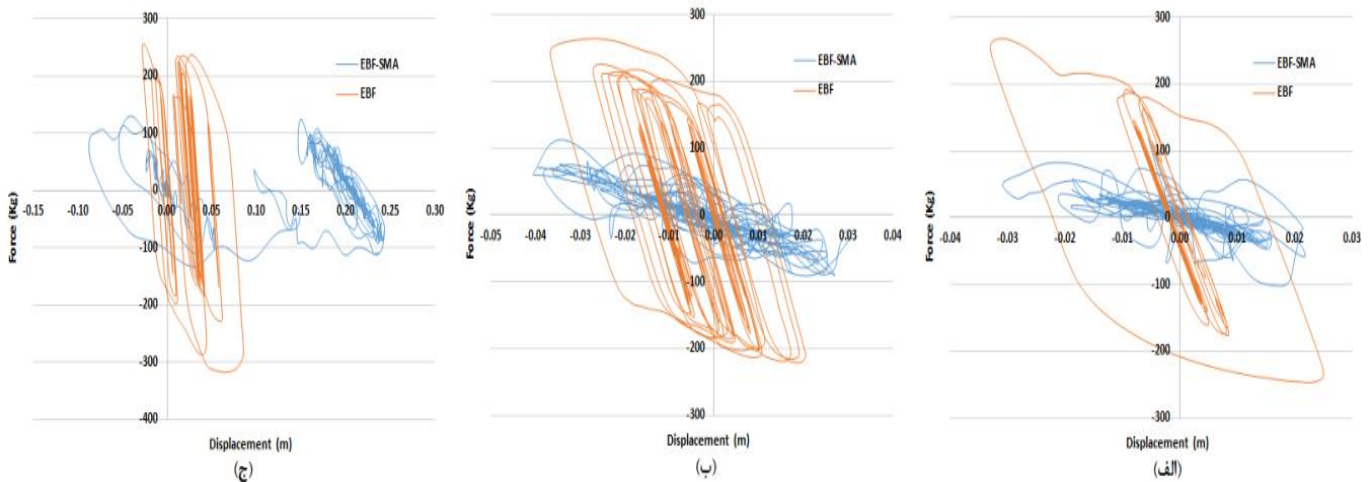
از طرف دیگر، مطابق شکل ۱۵، نمودار چرخه‌ای مهاربند طبقه همکف سازه ۵ طبقه با و بدون مصالح حافظ دار شکلی که تحت سه شتاب‌نگاشت اول جدول ۵ قرار گرفته است، بیان می‌دارد که با وجود مصالح SMA، سطح زیر نمودار نسبت به حالت بدون آن کمتر بوده و جذب انرژی زلزله توسط مهاربند کمتر و بیشتر انرژی زلزله توسط آلیاژ حافظه‌دار شکلی جذب می‌گردد. بنابراین مهاربندها می‌تواند دارای مقطع اقتصادی‌تری بوده و نهایتاً منجر به طرح تیر پیوند با مقطع ضعیف‌تری شود.

با دقت در نمودارهای حاصله و نتایج آن به طور کلی می‌توان بیان داشت که بیشینه جابجایی پسماند برای همه شتاب‌نگاشت‌ها در پایان زمان مؤثر زلزله در همه سازه‌های مورد بحث دارای SMA به نحو مشخصی کمتر از سازه‌های بدون SMA است. برش پایه ایجاد شده در سازه با آلیاژ حافظه‌دار تحت شتاب‌نگاشت‌های زلزله نسبت به سازه با فولادگذاری مرسوم و به دلیل افزایش زمان تناوب و نرمی سازه‌ها و به دنبال آن بیشینه شتاب وارد بر طبقه بام سازه‌های دارای SMA کاهش یافته است. همچنین اثر مصالح حافظه‌دار شکلی بسته به تعداد طبقات و نوع پاسخ مورد نظر، متفاوت بوده به طوری که میزان تغییر مکان پسماند، برش پایه و شتاب بام در اثر وجود این آلیاژ برای سازه ۵ طبقه نسبت به ۱۰ و ۱۵ طبقه کاهش بیشتری داشته است. همچنین با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی در نرم‌افزار سازه‌مواستراکت، می‌توان اولین گرهی از تیر پیوند که در آن مفصل پلاستیک تشکیل شده است را تحت نقاط عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) تشخیص داد. برای این کار، مشخصه‌ها و معیارهای پذیرش در مدل‌سازی رفتار تیر پیوند سیستم سازه‌ای EBF بر اساس جدول ۶-۵ دستورالعمل FEMA356 [۲۰]، استخراج شده که با کمک آن و با توجه به طول تیر پیوند، مقدار بیشینه دوران غیرالاستیک برای هر سطح عملکرد حاصل می‌شود. در جدول ۹، مقدار دوران تیر پیوند

جدول ۹. مقدار دوران تیر پیوند و محل تشکیل اولین مفصل پلاستیک سازه ۵ طبقه در مدل های EBF-SMA و EBF.

Table 9. Rotation value of link beam and the location of the first plastic hinge of EBF-SMA and EBF models for 5 stories structure

مقادیر دوران غیر الاستیک اولین مفصل پلاستیک			محل اولین مفصل پلاستیک تیر پیوند		سازه
CP:۰/۰۶۲	LS:۰/۰۴۷	IO:۰/۰۰۳۴	طبقه	محل گره	محدوده مجاز دوران بر اساس FEMA356
۰/۰۶۷۳	۰/۰۵۲۱	۰/۰۰۹۴	اول	انتها	EBF
۰/۰۷۳۷	۰/۰۵۵۹	۰/۰۱۰۶	دوم	انتها	EBF
۰/۰۶۲۴	-	-	اول	ابتدا	EBF
۰/۰۷۵۵	۰/۰۷۵۵	۰/۰۰۸۹	اول	انتها	EBF-SMA
۰/۰۶۲۸	۰/۰۶۲۸	۰/۰۰۸۴	دوم	انتها	EBF-SMA
۰/۰۶۴۱	۰/۰۶۴۱	-	اول	ابتدا	EBF-SMA
-	۰/۰۴۷۴	-	دوم	ابتدا	EBF-SMA



شکل ۱۵. الف-ج). مقایسه نمودار چرخه ای مهاربند مدل های ۵ طبقه مدل های EBF-SMA و EBF تحت شتاب‌نگاشت های شماره ۱ تا ۳.

Fig. 15. a-c) Comparison of hysteresis curves of 5-stories structure for EBF-SMA and EBF models under earthquake records No.1-3

جدول ۱۰. مقدار انرژی جذب شده مهاربند طبقه اول سازه ۵ طبقه در مدل های EBF-SMA و EBF بر حسب Kg.m

Table 10. Energy absorption of the first story of 5-stories structure for EBF-SMA and EBF models according to kg.m

متوسط	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	شتاب نگاشت
۳۷/۴۳	۳۳/۵۲	۲۲/۶۹	۴/۳۹	۴۴/۲۵	۷۹/۷۳	۵۷/۲۵	۲۰/۰۹	EBF
۱۵/۸۸	۵/۹۵	۷/۳۱	۳/۸۷	۱۰/۲۹	۶۷/۵۸	۱۱/۳۱	۴/۸۶	EBF-SMA
۲/۳۶	۵/۶۳	۳/۱	۱/۱۳	۴/۳	۱/۱۸	۵/۱	۴/۱۳	نسبت میزان جذب انرژی مدل EBF-SMA و EBF

مکان مطلق مدل های دارای SMA به مدل های بدون آلیاژ ۱/۷ برابر است. همچنین این نسبت برای تغییر مکان نسبی بین طبقه ای در سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب برابر ۳/۱، ۲/۱ و ۱/۹ است. این مطلب نشان می دهد که سازه های بلند مرتبه دارای آلیاژ حافظه دار شکلی نسبت به سازه های کوتاه مرتبه افزایش کمتری در تغییر مکان نسبی داشته اند که موجب ایجاد شرایط مناسب تری برای سازه در حالت بهره برداری و ایمنی ساکنین می شود.

۲- با توجه به این که مصالح آلیاژ حافظه دار شکلی پس از تحمل یک کرنش بزرگ، قادر است به حالت اولیه خود بازگردد و میزان جذب انرژی را افزایش دهد، نتایج حاصل از نمودارهای مربوط به حداکثر جابجایی پسماند برای همه شتاب نگاشت ها در پایان زمان مؤثر زلزله مؤید این موضوع می باشند. به نحوی که میزان متوسط بیشترین جابجایی پسماند همه شتاب نگاشت ها در سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با SMA به ترتیب حدود ۶۷/۵، ۵۹/۲ و ۵۷/۹ درصد کمتر از سازه های بدون SMA بود. این مطلب نشان دهنده ی عملکرد بسیار مناسب این نوع مصالح در کاهش خسارات ناشی از زلزله در اعضای اصلی و فرعی ساختمان بوده و هزینه های مربوط به تعمیرات و بازسازی را تا حد بالایی کاهش می دهد.

۳- برش پایه ایجاد شده در سازه با آلیاژ حافظه دار تحت شتاب نگاشت های زلزله نسبت به سازه با فولادگذاری مرسوم، کاهش پیدا کرده است. این امر به دلیل افزایش زمان تناوب و نرمی سازه ها با آلیاژ SMA نسبت به فولاد گذاری مرسوم بوده که باعث کاهش نیروهای لرزه ای در المان های باربر جانبی می شود. متوسط میزان کاهش برش پایه برای سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه دارای SMA نسبت به سازه های بدون SMA، به ترتیب برابر با ۴۷/۴، ۴۸/۹ و ۵۶/۱ درصد می باشد.

بنابراین میزان جذب انرژی مهاربند طبقه همکف در حالات با و بدون مصالح حافظه دار شکلی مطابق جدول ۱۰ مشخص می شود که با استفاده از SMA تا حد زیادی جذب انرژی توسط این میله ها انجام شده و مهاربندها نقش کمتری در جذب انرژی زلزله دارند. مطابق جدول مزبور برای سازه ۶ طبقه، میزان جذب انرژی ناشی از زلزله مهاربند طبقه اول مدل EBF به طور متوسط ۲/۳۶ برابر مهاربند مدل EBF-SMA است.

۷- نتیجه گیری

در این مطالعه به مدل سازی نمونه های سازه ای دو بعدی با سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی متوسط و مهاربند واگرای شورون در تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ پرداخته شد که در انتهای مهاربندها نیز از آلیاژهای حافظه دار شکلی استفاده شده است. سپس سازه های مزبور در نرم افزار سازه های پستراکت تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه ی زمانی غیرخطی قرار گرفتند و پاسخ های سازه ای به صورت حداکثر جابجایی مطلق بام، حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات، حداکثر تغییر مکان پسماند بام، حداکثر برش پایه و حداکثر شتاب بام مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. در ادامه نتایج شاخص تحقیق حاضر ارائه شده است.

۱- مطابق با نمودارهای مربوط به تغییر مکان مطلق طبقات سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت شتاب نگاشت های زلزله مشخص گردید که به طور کلی، استفاده از آلیاژ حافظه دار شکلی در انتهای مهاربند شورون واگرا، موجب افزایش تغییر مکان مطلق نسبت به سازه بدون این مصالح شده است. یکی از دلایل این افزایش پاسخ مربوط به تغییر مکان نسبی بین طبقه ای تحت اثر زلزله در سازه های دارای آلیاژ حافظه دار شکلی به دلیل افزایش ضریب کشسانی پایین این آلیاژها نسبت به فولاد است، که منجر به کاهش سختی سازه می شود. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل مشخص شد که نسبت تغییر

- performance of steel X-knee-braced frames equipped with shape memory alloy bars, *Journal of Constructional Steel Research*, 147 (2018) 171-186.
- [8] S. Moradi, M.S. Alam, B. Asgarian, Incremental dynamic analysis of steel frames equipped with NiTi shape memory alloy braces, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(18) (2014) 1406-1425.
- [9] S.R. Massah, H. Dorvar, Design and analysis of eccentrically braced steel frames with vertical links using shape memory alloys, *Smart materials and structures*, 23(11) (2014) 115015.
- [10] N. Mirzai, R. Attarnejad, Seismic performance of EBFs equipped with an innovative shape memory alloy damper, *Scientia Iranica*, 27(5) (2020) 2316-2325.
- [11] C.-X. Qiu, S. Zhu, Performance-based seismic design of self-centering steel frames with SMA-based braces, *Engineering Structures*, 130 (2017) 67-82.
- [12] X. Xu, Y. Zhang, Y. Luo, Self-centering eccentrically braced frames using shape memory alloy bolts and post-tensioned tendons, *Journal of Constructional Steel Research*, 125 (2016) 190-204.
- [13] A. Committee, Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-10), American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois, (2010).
- [14] S. SeismoSoft, A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures, in, ed, 2007.
- [15] A. Habibullah, ETABS-three dimensional analysis of building systems, users manual, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, (1997).
- [16] F. Auricchio, E. Sacco, A superelastic shape-memory-alloy beam model, *Journal of intelligent material systems and structures*, 8(6) (1997) 489-501.
- [17] W. Wang, T.-M. Chan, H. Shao, Y. Chen, Cyclic behavior of connections equipped with NiTi shape memory alloy and steel tendons between H-shaped beam to CHS column, *Engineering Structures*, 88 (2015) 37-50.
- [18] R. DesRoches, J. McCormick, M. Delemont, Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and ۴-کاهش حداکثر شتاب وارد بر طبقه بام سازه‌های دارای SMA نسبت به سازه‌های بدون این نوع آلیاژ برابر با ۵۰/۸، ۵۸/۶ و ۴۳/۴ درصد به ترتیب در مدل‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه بوده و در واقع موجب کاهش برش پایه ایجاد شده نیز شده است.
- ۵- اثر مصالح حافظه‌دار شکلی بسته به تعداد طبقات و نوع پاسخ مورد نظر، متفاوت بوده است به طوری که میزان تغییر مکان پسماند، برش پایه و شتاب بام در اثر وجود این آلیاژ برای سازه ۵ طبقه نسبت به ۱۰ و ۱۵ طبقه کاهش بیشتری داشته است.
- ۶- با بررسی و مقایسه منحنی‌های چرخه‌ای مربوط به مهارندهای مدل دارای SMA مشخص می‌شود که وجود این آلیاژ موجب کاهش انرژی جذب شده به عضو مهاربندی و در نتیجه کاهش مقطع مهاربند و تیر پیوند متصل به آن شده و به طور متوسط ۲/۳۶ درصد از انرژی زلزله توسط عضو SMA جذب می‌گردد.

منابع

- [1] M.C. Constantinou, T.T. Soong, G.F. Dargush, Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit, (1998).
- [2] G. Song, N. Ma, H.-N. Li, Applications of shape memory alloys in civil structures, *Engineering structures*, 28(9) (2006) 1266-1274.
- [3] J. Van Humbeeck, Damping capacity of thermoelastic martensite in shape memory alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 355(1-2) (2003) 58-64.
- [4] M. Hosseini, P. Beiranvand, A. Dehestani, K. Dehestani, Shape memory alloys and offering super-elastic property opportunity in reinforced concrete structures, *Archives of Materials Science and Engineering*, 85(1) (2017) 5-13.
- [5] H. Abou-Elfath, Ductility characteristics of concrete frames reinforced with superelastic shape memory alloys, *Alexandria engineering journal*, 57(4) (2018) 4121-4132.
- [6] J. McCormick, R. DesRoches, D. Fugazza, F. Auricchio, Seismic assessment of concentrically braced steel frames with shape memory alloy braces, *Journal of Structural Engineering*, 133(6) (2007) 862-870.
- [7] M. Mahmoudi, S. Montazeri, M.J.S. Abad, Seismic

- (2005) 11. bars, Journal of Structural Engineering, 130(1) (2004) 38-46.
- [20] F. Prestandard, commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356), Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7(2) (2000).
- [19] A. Fema, 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, FEMA-440, Redwood City, 7(9)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Bagheri , S. A. Hosseini, A. Vedad , Evaluation of seismic behavior of eccentric braced dual steel frames equipped with shape memory alloys, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 649-670.

DOI: [10.22060/ceej.2021.19010.7028](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.19010.7028)



