

Research Paper

Evaluation of the Behavior of Steel Braced Frames Equipped with Yielding Steel Plate Dampers and Shape Memory Alloy Dampers

Younes Majidi¹, Mehdi Ghassemieh^{2*}, Moein Rezapour³

1- Master of Science Graduate in Civil Engineering (Structural Engineering), University of Tehran, Tehran, Iran

2- Professor, Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Doctor of Philosophy Graduate in Civil Engineering (Structural Engineering), University of Tehran, Tehran, Iran



Citation: Majidi, Y., Ghasemiyeh, M., and Rezapour, M. (2026), "Evaluation of the Behavior of Steel Braced Frames Equipped with Yielding Steel Plate Dampers and Shape Memory Alloy Dampers", *Journal of Steel & Structure*, 20(51), pp.69-88 (In Persian).

doi 10.22034/jss.2026.560392.1014

Article info:

Article History:

Received: 17 November 2025

Revised: 2 February 2026

Accepted: 16 March 2026

Published: 4 April 2026

Keywords:

Shape Memory Alloy
Seismic Damper
Self-Centering
Energy Dissipation
Ductility

ABSTRACT

Background: Yielding steel dampers are widely used to enhance the energy dissipation capacity of steel structures; however, significant residual deformations after earthquakes may impair post-earthquake functionality. Owing to their self-centering capability, Shape Memory Alloys (SMAs) offer an effective solution to this limitation. This study aims to investigate the influence of incorporating SMAs into steel plate dampers on the seismic performance, energy dissipation capacity, and residual deformation of concentrically braced steel frames.

Methods: Eleven finite element models, including one conventional reference model and ten SMA-equipped models with different SMA lengths, cross-sectional areas, and stiffness values, were developed in ABAQUS. Cyclic loading analyses were performed to evaluate and compare ultimate strength, energy dissipation capacity, ductility, equivalent viscous damping ratio, and residual displacement.

Results: The results indicate that incorporating SMAs considerably improves the seismic performance of the system. Compared with the reference model, the ultimate strength and energy dissipation capacity increased by up to **122.7%** and **81.9%**, respectively, while the residual displacement decreased by as much as **26.1%**. In addition, the hysteretic response gradually evolved toward a flag-shaped behavior, demonstrating enhanced self-centering capability. The results also revealed that the appropriate selection of SMA length and stiffness provides an effective balance between energy dissipation and residual deformation reduction.

Conclusion: Integrating Shape Memory Alloys with yielding steel plate dampers significantly enhances the seismic behavior of concentrically braced steel frames by simultaneously increasing strength and energy dissipation while reducing permanent deformations. Therefore, this system can be considered an efficient solution for improving seismic resilience and post-earthquake functionality of steel structures.

* Corresponding Author's E-mail: m.ghassemieh@ut.ac.ir



Copyright for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Iranian Society of Steel Structures 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>

Introduction

Steel yielding dampers have been widely employed as passive energy dissipation devices to improve the seismic performance of steel structures. Despite their high energy absorption capacity, these systems often experience considerable residual deformations after severe earthquakes, leading to costly repairs and reduced post-earthquake functionality. Shape Memory Alloys (SMAs), owing to their superelastic behavior and self-centering capability, have emerged as a promising solution for mitigating permanent deformations while maintaining adequate energy dissipation. Although numerous studies have investigated SMA-based self-centering systems, limited research has focused on integrating SMA elements with yielding steel plate dampers in concentrically braced frames and evaluating the influence of SMA mechanical characteristics on the cyclic performance of the entire system. Therefore, this study aims to investigate the effect of SMA length, cross-sectional area, and stiffness on the hysteretic behavior, energy dissipation, residual displacement, and overall seismic performance of concentrically braced steel frames equipped with steel plate dampers.

Methods

A nonlinear finite element model of a concentrically braced steel frame equipped with a yielding steel plate damper was developed using ABAQUS. Eleven numerical specimens were analyzed, including one conventional specimen without SMA elements and ten hybrid specimens incorporating SMA bars with different lengths, cross-sectional areas, and stiffness values. Material nonlinearities, contact interactions, and geometric nonlinearities were considered in the numerical simulations. The specimens were subjected to quasi-static cyclic loading following a prescribed loading protocol. The seismic

performance of each model was evaluated using hysteretic response, ultimate strength, energy dissipation capacity, equivalent viscous damping ratio, ductility, and residual displacement. The influence of SMA properties on the structural behavior was systematically investigated and compared with that of the conventional system.

Results

The numerical analyses indicated that incorporating Shape Memory Alloy elements into steel plate dampers substantially improved the seismic performance of the proposed system. Compared with the conventional specimen, the hybrid specimens exhibited significant increases in ultimate strength and energy dissipation capacity, together with noticeable reductions in residual displacement. Increasing the stiffness of SMA elements enhanced the lateral resistance of the system, whereas excessive stiffness slightly reduced the equivalent viscous damping ratio. Furthermore, longer SMA elements provided superior self-centering behavior and decreased permanent deformations. The results revealed that an appropriate combination of SMA stiffness and geometry can effectively balance energy dissipation, structural strength, and recentering capability, resulting in a more resilient structural system against earthquake loading.

Conclusion

The numerical results demonstrate that integrating Shape Memory Alloy elements with steel plate dampers significantly enhances the seismic performance of concentrically braced steel frames. The hybrid system exhibited substantial improvements in ultimate strength and energy dissipation capacity while considerably reducing residual displacements due to the self-centering capability of SMA elements. The hysteretic response gradually changed from conventional spindle-shaped loops toward

stable flag-shaped loops, indicating improved recentering performance. Moreover, the study showed that the mechanical properties of SMA elements, particularly stiffness and length, play a decisive role in balancing strength enhancement, energy dissipation, and residual deformation control. Overall, the proposed hybrid damping system provides an efficient strategy for improving the seismic resilience and post-earthquake functionality of steel structures.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

No generative AI or AI-assisted technologies were used in the writing, analysis, or preparation of this manuscript.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

This study is entirely based on numerical modeling and finite element simulations. No experiments involving human participants or animals were conducted. The research was carried out following accepted academic and professional ethical standards, and all sources used in this study have been properly cited.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship and publication of this article.

Author's contributions

First Author: Conceptualization, numerical modeling, finite element analysis, data acquisition, visualization, and preparation of the original manuscript.

Second Author: Research supervision, methodology development, validation of numerical models, interpretation of results, critical revision, and final approval of the manuscript.

Third Author: Data analysis, interpretation of results, manuscript review and editing, validation of research findings, and preparation of the final version of the manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this study.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere appreciation to the Faculty of Civil Engineering of the University of Kashan for providing the facilities and scientific support required to conduct this research. The constructive comments of the anonymous reviewers are also gratefully acknowledged, as they significantly improved the quality of the manuscript.

ارزیابی رفتار قاب مهاربندی فولادی مجهز به میراگر صفحه فولادی تسلیم‌شونده و آلیاژ حافظه‌دار شکلی

یونس مجیدی^۱، مهدی قاسمیه^{۲*}، معین رضاپور^۳

۱- دانش آموخته ارشد مهندسی عمران-سازه، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی-دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- دانش آموخته دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشگاه تهران، تهران، ایران



Citation: Majidi, Y., Ghasemiyeh, M., and Rezapour, M. (2026), "Evaluation of the Behavior of Steel Braced Frames Equipped with Yielding Steel Plate Dampers and Shape Memory Alloy Dampers", *Journal of Steel & Structure*, 20(51), pp.69-88 (In Persian).

doi 10.22034/jss.2026.560392.1014

چکیده

زمینه پژوهش: استفاده از میراگرهای فولادی تسلیم‌شونده یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش ظرفیت اتلاف انرژی در سازه‌های فولادی است؛ اما باقی‌ماندن تغییرشکل‌های ماندگار پس از زلزله، بهره‌برداری مجدد از سازه را با محدودیت مواجه می‌کند. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) به دلیل برخورداری از خاصیت خودبازگرداندگی، می‌توانند این ضعف را برطرف نمایند. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر به‌کارگیری آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در میراگرهای صفحه‌ای فولادی بر بهبود عملکرد لرزه‌ای، افزایش ظرفیت اتلاف انرژی و کاهش تغییرشکل‌های ماندگار قاب‌های مهاربندی هم‌محور فولادی است.

روش پژوهش: در این پژوهش، ۱۱ مدل اجزای محدود شامل یک مدل مرجع و ۱۰ مدل مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار با طول، سطح مقطع و سختی‌های مختلف در نرم‌افزار ABAQUS توسعه داده شد. رفتار چرخه‌ای مدل‌ها تحت بارگذاری رفت و برگشتی بررسی و شاخص‌هایی شامل مقاومت نهایی، ظرفیت اتلاف انرژی، شکل‌پذیری، نسبت میرایی و اسکوز معادل و جابه‌جایی ماندگار ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شدند.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی موجب بهبود قابل‌توجه عملکرد لرزه‌ای سیستم می‌شود؛ به‌طوری‌که مقاومت نهایی تا ۱۲۲/۷ درصد و ظرفیت اتلاف انرژی تا ۸۱/۹ درصد نسبت به مدل مرجع افزایش یافت و جابه‌جایی ماندگار تا ۲۶۱ درصد کاهش پیدا کرد. همچنین، رفتار هیستریزس سیستم به الگوی پرجمعی نزدیک‌تر شده و قابلیت خودبازگرداندگی آن بهبود یافت. بررسی پارامترهای مختلف نیز نشان داد که انتخاب مناسب طول و سختی آلیاژ، نقش تعیین‌کننده‌ای در ایجاد تعادل بین ظرفیت اتلاف انرژی و کاهش تغییرشکل‌های ماندگار دارد.

نتیجه‌گیری: به‌کارگیری آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در میراگرهای صفحه‌ای فولادی، ضمن افزایش مقاومت و ظرفیت جذب انرژی، موجب کاهش تغییرشکل‌های دائمی و بهبود قابلیت بهره‌برداری سازه پس از زلزله می‌شود. بنابراین، این سیستم می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر برای ارتقای عملکرد لرزه‌ای و افزایش تاب‌آوری قاب‌های فولادی مهاربندی‌شده مورد استفاده قرار گیرد.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۲۶ آبان ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۳ بهمن ماه ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۲۵ اسفند ماه ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱۵ فروردین ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

آلیاژ حافظه‌دار شکلی
میراگر لرزه‌ای
خودبازگرداندگی
جذب انرژی
شکل‌پذیری

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: m.ghassemieh@ut.ac.ir

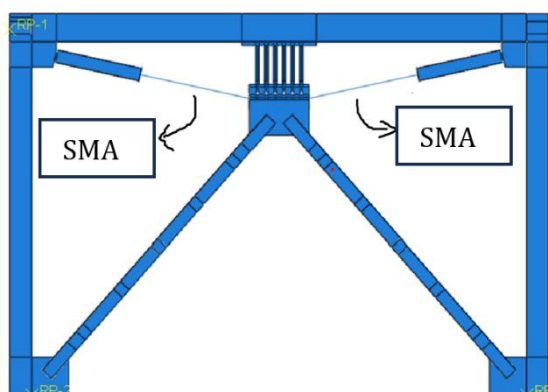
حقوق نشر این مقاله برای نویسنده(گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه‌های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می‌باشد. برای اطلاعات بیشتر، لطفاً به وبسایت

مربوطه مراجعه فرمایید. <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>



۱- مقدمه

نسبت میرایی ویسکوز معادل مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۱) نحوه به‌کارگیری این سیستم را نشان می‌دهد.



شکل ۱- سیستم دارای آلیاژ حافظه‌دار استفاده‌شده در این مقاله

نوآوری اصلی پژوهش حاضر در بررسی رفتار لرزه‌ای یک سیستم ترکیبی متشکل از مهاربند فولادی، میراگر صفحه‌ای فولادی تسلیم‌شونده و عناصر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در مقیاس قاب سازه‌ای است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که تمرکز آن‌ها عمدتاً بر رفتار اجزای منفرد یا مدل‌های ساده آزمایشگاهی بود، در این تحقیق عملکرد سیستم پیشنهادی به‌صورت یکپارچه و در چارچوب یک قاب مهاربندی‌شده تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است.

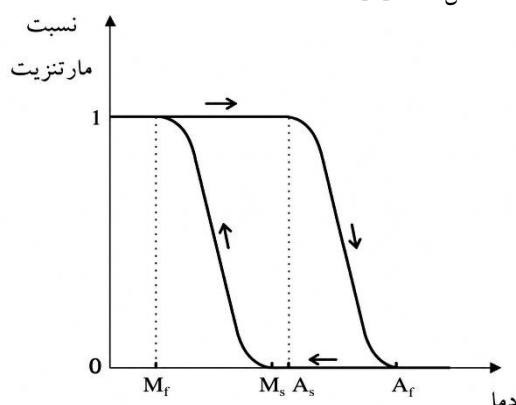
از دیگر جنبه‌های نوآورانه این مطالعه می‌توان به بررسی هم‌زمان اثر آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر افزایش ظرفیت خودبازگرداندگی، کاهش تغییرمکان ماندگار و تغییر الگوی استهلاك انرژی در مقایسه با سیستم‌های متداول اشاره نمود. همچنین، در این پژوهش تلاش شده است با استفاده از یک مدل عددی غیرخطی کالیبره‌شده بر اساس نتایج آزمایشگاهی، تأثیر ترکیب میراگر فولادی و آلیاژ حافظه‌دار بر شاخص‌های عملکرد لرزه‌ای قاب، از جمله مقاومت، شکل‌پذیری، اتلاف انرژی و نسبت میرایی معادل، به‌صورت کمی بررسی و تحلیل شود. این رویکرد امکان مقایسه‌ای منسجم میان سیستم پیشنهادی و سیستم‌های مرجع را فراهم ساخته و درک دقیق‌تری از مزایا و محدودیت‌های کاربرد آلیاژ حافظه‌دار در سازه‌های مهاربندی‌شده ارائه می‌دهد.

در سال‌های اخیر، سیستم‌های مختلفی با هدف کاهش آسیب لرزه‌ای و کنترل تغییرمکان‌های ماندگار توسعه یافته‌اند که از جمله آن‌ها می‌توان به مهاربندهای همگرا و واگرا، میراگرهای فولادی تسلیم‌شونده و سیستم‌های مبتنی بر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی اشاره نمود. مهاربندهای فولادی متداول و میراگرهای تسلیم‌شونده

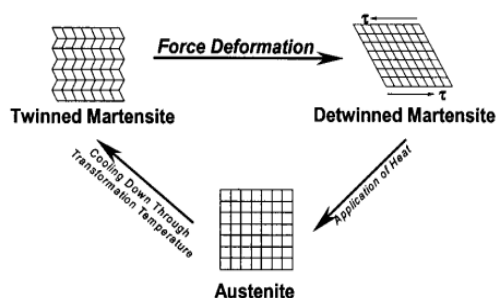
زلزله یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های طبیعی است که تهدیدی جدی برای سازه‌ها به‌ویژه در مناطق لرزه‌خیز به‌شمار می‌آید. به همین دلیل طراحی و مقاوم‌سازی سازه‌ها با هدف کاهش خسارات و امکان بازسازی آسان، از اهمیت بالایی برخوردار است. در گذشته طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس مقاومت و شکل‌پذیری صورت می‌گرفت، اما این روش در برابر زلزله‌های شدید، نیازمند تجهیزاتی برای استهلاك انرژی مانند میراگرها بود [۱]. در رویکردهای نوین طراحی لرزه‌ای، اعضای سازه بر اساس نقش آن‌ها در تحمل بارهای لرزه‌ای به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: اعضای تغییرشکل‌کنترل و اعضای نیروکنترل. اعضای تغییرشکل‌کنترل به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که تحت زلزله‌های شدید مجاز به ورود کنترل‌شده به ناحیه غیرکشسان بوده و از طریق تغییرشکل‌های بزرگ، انرژی لرزه‌ای را مستهلک نمایند. در مقابل، اعضای نیروکنترل باید در محدوده رفتار الاستیک باقی بمانند و طراحی آن‌ها بر اساس حداکثر نیروهای منتقل‌شده از اعضای تغییرشکل‌کنترل انجام می‌گیرد تا از گسیختگی ترد و ناگهانی جلوگیری شود. این تفکیک، مبنای اصلی طراحی عملکردی و استفاده از سیستم‌های استهلاك انرژی در سازه‌های مقاوم در برابر زلزله محسوب می‌شود [۲].

یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش پاسخ سازه در برابر بارهای لرزه‌ای، استفاده از سیستم‌های کنترل لرزه‌ای است که به چهار دسته غیرفعال، نیمه‌فعال، فعال و ترکیبی تقسیم می‌شوند. در این میان، سیستم‌های کنترل غیرفعال به‌دلیل هزینه پایین، سهولت نصب و عدم نیاز به منبع انرژی خارجی، کاربرد گسترده‌تری دارند. انواع رایج این سیستم‌ها شامل میراگرهای ویسکوز، ویسکوکشسان، اصطکاکی و تسلیمی فولادی هستند [۳]. یکی از چالش‌های مهم پس از وقوع زلزله، بروز تغییرشکل‌های ماندگار در سازه‌ها است. اگرچه اعضای شکل‌پذیر، توانایی بالایی در جذب انرژی دارند، اما ممکن است دچار جابه‌جایی‌های دائمی شوند که بهره‌برداری پس از زلزله را با مشکل مواجه می‌کند. در سازه‌های حیاتی، کاهش این جابه‌جایی‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از مصالح مرکزگرا مانند آلیاژهای حافظه‌دار شکلی می‌تواند به‌طرز مؤثری این مشکل را برطرف نماید. در این پژوهش، عملکرد یک قاب مهاربندی و اگر مجهز به میراگر فولادی تسلیمی و آلیاژ حافظه‌دار شکلی از نظر میزان استهلاك انرژی، رفتار مرکزگرا، مقاومت نهایی، شکل‌پذیری و

فرآیند ساخت و حتی نرخ بارگذاری وابسته هستند. در دمای پایین‌تر از M_f ، آلیاژ به‌طور کامل در فاز مارتنزیت بوده و رفتار حافظه‌شکلی دارد؛ در دمای بالاتر از A_f فاز آستنیت غالب می‌شود و رفتار فوق‌ارتجاعی ظاهر می‌شود. در بازه دمایی بین این دو، ترکیبی از هر دو فاز دیده می‌شود (شکل (۲)). از سوی دیگر، تنش نیز در تشکیل فاز مارتنزیت نقش دارد. مارتنزیتی که با کاهش دما شکل می‌گیرد، «پیچ‌خورده» و مارتنزیتی که در اثر تنش ایجاد می‌شود، «پس‌پیچ‌خورده» نامیده می‌شود؛ این دو ساختار از نظر نوع فاز یکسان هستند اما جهت‌گیری اتم‌ها در آن‌ها متفاوت است (شکل (۳)) [۴].



شکل ۲- نسبت مارتنزیت به دما [۴]



شکل ۳- ساختارهای آستنیت و مارتنزیت [۵]

عسگریان و مرادی رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی مجهز به مهاربندهای دارای آلیاژ حافظه‌دار (با قابلیت خودبازگردانی و سخت‌شدگی کرنشی) را بررسی کردند. با تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی ۲۴ مدل در نرم‌افزار Opensees و مقایسه با مهاربندهای کمانش‌تاب، نشان دادند که آلیاژهای حافظه‌دار، کاهش محسوس آسیب‌پذیری سازه در زلزله را ممکن می‌سازند [۶].

دروش^۱ و همکاران رفتار آلیاژ حافظه‌دار نیتینول با خاصیت فوق‌کشسان را تحت بارگذاری چرخه‌ای برای کاربردهای لرزه‌ای بررسی نمودند. با آزمایش نمونه‌های سیم و میله در ابعاد مختلف،

اگرچه توانایی بالایی در استهلاک انرژی دارند، اما به دلیل ایجاد تغییرشکل‌های ماندگار قابل توجه، معمولاً نیازمند تعمیر یا تعویض پس از زلزله‌های شدید هستند. در مقابل، سیستم‌های مبتنی بر آلیاژ حافظه‌دار شکلی به دلیل خاصیت فوق‌کشسانی، قابلیت خودبازگرداندگی و کاهش تغییر مکان‌های ماندگار را فراهم می‌کنند.

با این حال، کاربرد عملی گسترده این فناوری با چالش‌هایی نظیر هزینه بالای آلیاژهای حافظه‌دار، پیچیدگی مدل‌سازی رفتاری، عدم وجود دستورالعمل‌های طراحی مدون و نگرانی نسبت به عملکرد بلندمدت تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای همراه بوده است. علاوه بر این، بسیاری از مطالعات پیشین عمدتاً بر رفتار اجزای منفرد متمرکز بوده و بررسی جامعی از عملکرد سیستم سازه‌ای در مقیاس قاب ارائه نکرده‌اند. در این پژوهش تلاش شده است با ترکیب میراگر فولادی تسلیم‌شونده و آلیاژ حافظه‌دار در قالب یک سیستم ترکیبی، ضمن حفظ ظرفیت استهلاک انرژی، رفتار خودبازگرداننده سیستم بهبود یافته و عملکرد لرزه‌ای قاب مهاربندی‌شده به‌صورت سیستماتیک مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به دلیل توانایی منحصربه‌فرد در بازگشت به شکل اولیه پس از تغییرشکل، از اهمیت زیادی در کاربردهای مهندسی و پزشکی برخوردار هستند. این ویژگی‌ها به دلیل ساختار اتمی خاص این آلیاژها است که تحت تأثیر شرایط دما و تنش به‌طور مداوم در حال تغییر و تکامل است. این آلیاژها به‌طور کلی در دو فاز کریستالی متفاوت ظاهر می‌شوند: آستنیت و مارتنزیت. آستنیت در دماهای بالا و تنش پایین، پایدار است و موجب بروز رفتار فوق‌ارتجاعی می‌شود؛ درحالی‌که مارتنزیت در دماهای پایین یا تنش‌های بالا پایدار است و منجر به پدیده حافظه‌شکلی می‌شود [۴].

رفتارهای اصلی این مواد حافظه شکلی و فوق‌ارتجاعی مستقیماً با تغییرات فازی میان این دو ساختار مرتبط است. در حالت فوق‌ارتجاعی، آلیاژ می‌تواند بدون تغییرشکل دائمی تا حدود هشت درصد کرنش را تحمل نماید. در مقابل، در رفتار حافظه‌شکلی، تغییرشکل در ابتدا باقی می‌ماند اما با گرم کردن، ماده به شکل اولیه بازمی‌گردد. تحول میان فازهای آستنیت و مارتنزیت از طریق چهار دمای کلیدی M_s : دمای آغاز حالت مارتنزیت، M_f : دمای پایان حالت مارتنزیت، A_s : دمای آغاز حالت آستنیت و A_f : دمای پایان حالت آستنیت انجام می‌شود که به ترکیب شیمیایی،

¹ Desroches

بررسی نمودند. این سیستم با تلفیق خودبازگردانی آلیاژ حافظه‌دار و اتلاف انرژی بالای این مهاربند، از طریق تحلیل‌های غیرخطی نشان داد که طراحی بهینه می‌تواند به‌طور هم‌زمان تغییرشکل ماندگار و جابه‌جایی نسبی طبقات را کاهش دهد. نتایج اثبات می‌کند این سیستم ترکیبی، بر سیستم‌های منفرد آلیاژ حافظه‌دار یا مهاربند کمانش‌تاب برتری داشته و گزینه‌ای مؤثر برای طراحی سازه‌های جدید یا مقاوم‌سازی سازه‌های موجود است [۱۲].

۳- میراگر صفحه فولادی تسلیم‌شونده

میراگر صفحه‌ای X شکل، نخستین بار توسط برگمن^۲ و همکاران در سال ۱۹۸۷ معرفی شد [۱۳] و در ادامه، نوع مثلی شکل آن توسط تسای^۳ و همکاران در سال ۱۹۹۳ تحت آزمایش بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت [۱۴]. میراگرهای صفحه‌ای از مجموعه‌ای صفحات فولادی موازی تشکیل شده‌اند که تحت بارگذاری جانبی، به‌صورت خمشی وارد ناحیه تسلیم می‌شوند و از این طریق، انرژی لرزه‌ای را مستهلک می‌کنند. این نوع میراگرها ازجمله پرکاربردترین انواع میراگرهای فولادی هستند و در دو فرم کلی در سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند:

- صفحات فولادی X شکل
- صفحات فولادی مثلی شکل

این دو نوع در مقایسه با صفحات مستطیلی، عملکرد بهتری در توزیع یکنواخت تغییرشکل پلاستیک و جذب انرژی دارند؛ به‌طوری‌که در آن‌ها تسلیم به‌صورت همگن در سراسر ارتفاع صفحه اتفاق می‌افتد؛ درحالی‌که در صفحات مستطیلی، این تغییرشکل‌ها بیش‌تر در نواحی بالا و پایین متمرکز می‌شوند. این میراگرها معمولاً در اتصال میان تیر و محل تقاطع مهاربندهای کششی و فشاری قرار می‌گیرند. تفاوت اصلی آن‌ها در هندسه و نوع اتصال به سازه است؛ به‌گونه‌ای که میراگر X شکل از دو سمت به‌صورت گیردار متصل می‌شود، درحالی‌که نوع مثلی شکل از یک انتها گیردار و از انتهای دیگر به‌صورت مفصلی نصب می‌شود (شکل (۴)).

پارامترهای کلیدی شامل خودبازگردانی، میرایی و مقاومت را تحلیل نمودند. نتایج نشان داد نمونه‌های سیمی مقاومت و میرایی بالاتر نسبت به میله دارند و قابلیت خودبازگردانی مستقل از ابعاد مقطع بوده و تنش پسماند ایجاد نمی‌کند. همچنین هر دو نمونه، میرایی محدودی از خود نشان دادند [۷].

مک‌کورمیک^۱ و همکاران به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های مهاربندهای سستی (شکل‌پذیری و اتلاف انرژی کم، کمانش) دو قاب مهاربندی همگرا (سه و شش طبقه) مجهز به آلیاژ حافظه‌دار فوق‌کشسان را ارزیابی نمودند. تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی ایشان نشان داد آلیاژهای حافظه‌دار در انتهای مهاربندها جابه‌جایی نسبی ماندگار را در هر دو قاب کاهش می‌دهد و همچنین خودبازگردانی آلیاژ حافظه‌دار در سازه‌های کوتاه‌مرتبه (سه طبقه) کارآمدتر است [۸].

قاسمیه و کاری در بررسی کاربرد آلیاژهای حافظه‌دار در کنترل لرزه‌ای سازه‌های فولادی، با مقایسه تحلیلی قاب‌های خمشی آسیب‌دیده مجهز به آلیاژ حافظه‌دار و مهاربندهای کمانش‌تاب، دریافتند که هر دو سیستم در شرایط آسیب محدود، عملکرد مشابهی دارند؛ اما آلیاژ حافظه‌دار از برتری قابل‌توجهی در افزایش اتلاف انرژی، تقویت خودبازگردانی و کاهش جابه‌جایی ماندگار برخوردار است [۹].

قاسمیه و همکاران در پژوهشی دیگر نشان دادند که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در دیوارهای برشی بتنی می‌تواند منجر به مرکزگرایی در رفتار چرخه‌ای شود. در این مطالعه، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی منجر به کاهش کرنش‌های پسماند شد [۱۰].

در تحلیل‌های تاریخچه زمانی، یافته‌ها حاکی از آن است که هرچند سیستم ترکیبی دیوار بتنی و آلیاژ حافظه‌دار عملکرد بهتری نسبت به دیوارهای با میلگرد فولادی متعارف دارد، اما دیوارهای مجهز به میلگردهای پیش‌تنیده (با بهره‌گیری از خاصیت حافظه‌داری آلیاژ حافظه‌دار) از صلیب بسیار بالاتری برخوردار هستند.

مطهری و همکاران با بررسی چهار میلگرد از جنس آلیاژ حافظه‌دار در کنترل غیرفعال سازه‌ها، نشان دادند این سیستم‌ها آسیب سازه‌ای را به‌طور محسوسی کاهش می‌دهند، بازیابی شکل اولیه پس از زلزله را ممکن می‌سازند و تغییرشکل‌های باقی‌مانده را کنترل می‌کنند [۱۱].

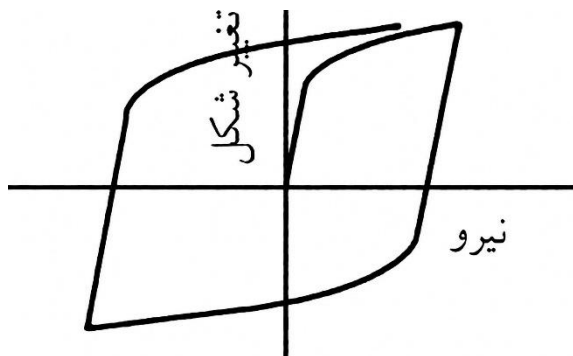
کاری و همکاران با ارائه سیستم ترکیبی مهاربند کمانش‌تاب و آلیاژ حافظه‌دار، بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی را

^۲ Bergman

^۳ Tsai

^۱ McCormick

به گزینه‌ای مناسب برای طراحی سازه‌های جدید و بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود تبدیل کرده است. شکل (۶) نمودار نیرو-تغییر مکان مربوط به این نوع میراگر را نمایش می‌دهد.



شکل ۶- منحنی نیرو-تغییر مکان میراگر تسلیمی [۱۶]

۴- صحت‌سنجی مدل‌های عددی

۴-۱- صحت‌سنجی مدل آلیاژ حافظه‌دار شکلی با نتایج نمونه آزمایشگاهی

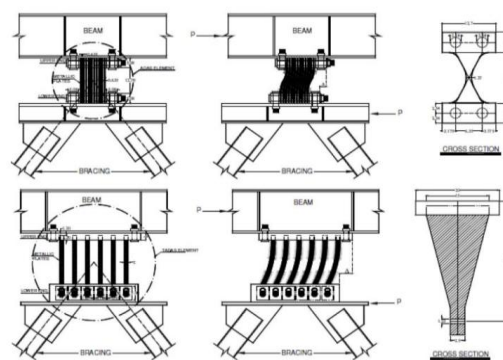
برای اعتبارسنجی عملکرد آلیاژ حافظه‌دار شکلی، از داده‌های آزمایشگاهی دروش و همکاران استفاده شده است [۱۷]. در این آزمایش، میله‌ای از جنس آلیاژ نیتینول با طول ۱۵۲ میلی‌متر و قطر ۱/۸ میلی‌متر تحت بار کششی قرار گرفته است. مشخصات مکانیکی این آلیاژ نیز در جدول (۱) ارائه شده است. در این جدول، نمادهای σ_{ul}^f ، σ_{ul}^s و σ_l^f به ترتیب نشان‌دهنده تنش در آغاز و پایان بارگذاری و همچنین تنش در آغاز و پایان باربرداری است. همچنین پارامترهای E_a ، E_m و ν به ترتیب بیانگر ضریب کشسانی مارتنزیت، ضریب کشسانی آستنیت و نسبت پواسون است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی استفاده شده در

آزمایش دروش و همکاران [۱۷]

ν	E_a (GPa)	E_m (GPa)	σ_l^s	σ_l^f	σ_{ul}^s	σ_{ul}^f
0.33	40	40	500	570	180	58

در این پژوهش، رفتار فوق‌کشسان آلیاژ حافظه‌دار شکلی با استفاده از مدل رفتاری داخلی نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. این مدل رفتاری بر پایه توصیف پدیده‌محور تبدیل فازی القاشده توسط تنش، طراحی شده و قادر به بازتولید ویژگی‌های اصلی آلیاژهای حافظه‌دار فوق‌کشسان از جمله رفتار هیستریزس پرچمی، قابلیت خودبازگرداندگی و کرنش‌های بازیافت‌پذیر تحت بارگذاری چرخه‌ای است.



شکل ۴- هندسه میراگرهای صفحه‌ای و نحوه تغییر شکل آن‌ها [۱۵]

این سیستم‌ها در برابر بارهای ثقلی سازه تأثیر محسوسی ندارند، اما در برابر بارهای جانبی همچون زلزله، با ایجاد تغییر شکل خمشی یکنواخت، موجب استهلاک انرژی می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده، این میراگرها موجب افزایش سختی و مقاومت جانبی سازه نیز می‌شوند. سختی میراگرهای صفحه‌ای بر اساس شکل هندسی آن‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

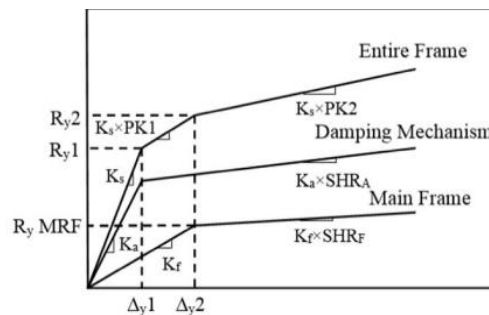
- برای میراگر مثلثی شکل:

$$K_d = \frac{NEbt^3}{6h^3} \quad (۱)$$

- برای میراگر X شکل:

$$K_d = \frac{2NEbt^3}{3h^3} \quad (۲)$$

که در روابط فوق، (E) ضریب کشسانی، (b)، (t) و (h) به ترتیب عرض، ضخامت و ارتفاع صفحات میراگر و (N) تعداد صفحات است.

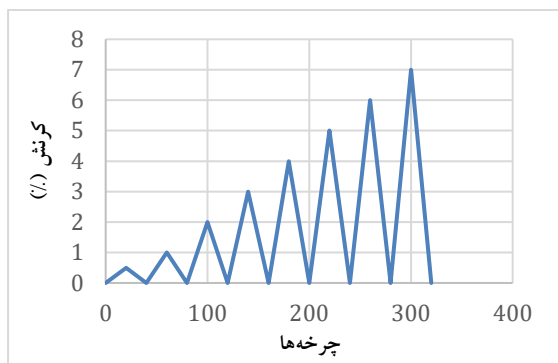


شکل ۵- منحنی نیرو-تغییر مکان سیستم مجهز به میراگر صفحه‌ای

مثلثی شکل [۱۵]

در مقایسه با سایر سیستم‌های میراگر غیرفعال، میراگرهای تسلیم‌شونده فولادی، عملکرد بهتری در جذب انرژی از خود نشان می‌دهند. مزایایی همچون سهولت در ساخت، هزینه پایین، نصب سریع و امکان تعمیر و تعویض آسان پس از زلزله، آن‌ها را

جابه‌جایی‌ها به صورت شبه‌استاتیکی و مطابق با پروتکل شکل (۸) اعمال شده‌اند. این جابه‌جایی‌ها برای دامنه‌های کرنش $0/5$ ، 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 ، 6 و 7 درصد در نظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، با توجه به این که هدف بررسی رفتار خستگی چرخه‌ای نیست، برای هر سطح کرنش تنها یک چرخه بارگذاری اجرا شده است.



شکل ۸- نمودار کرنش بر حسب تعداد چرخه

لازم به توضیح است که در مدل رفتاری آلیاژ حافظه‌دار شکلی مورد استفاده در این پژوهش، پارامترهایی نظیر سخت‌شوندگی تبدیل فازی و نسبت مرکزگرایی به صورت پارامترهای مستقل و صریح تعریف نمی‌شوند؛ بلکه اثر آن‌ها به طور ضمنی از طریق شکل منحنی هیستریزیس، تنش‌های آغاز و پایان تبدیل فازی، مدول‌های الاستیسیته فازهای آستنیت و مارتنزیت و میزان کرنش بازیافت‌پذیر منعکس می‌شود. به بیان دیگر، رفتار مرکزگرایی سیستم و میزان بازیافت تغییرشکل، حاصل پاسخ کلی مدل فوق‌کشان تعریف‌شده برای آلیاژ حافظه‌دار شکلی است و نتیجه تعریف یک ضریب جداگانه نیست.

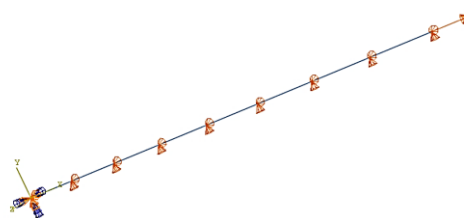
در این مطالعه هدف اصلی، بازتولید رفتار ماکروسکوپی چرخه‌ای آلیاژ حافظه‌دار و بررسی تأثیر آن بر عملکرد چرخه‌ای سیستم سازه‌ای در مقیاس قاب بوده است. از این رو، مدل انتخابی که در مطالعات عددی مشابه به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است، برای دستیابی به اهداف پژوهش مناسب ارزیابی می‌شود. با این حال، بررسی اثر پارامترهای پیشرفته‌تر رفتاری آلیاژ حافظه‌دار و مدل‌سازی صریح سخت‌شوندگی تبدیل فازی، می‌تواند به عنوان مسیر تحقیقاتی آینده مورد توجه قرار گیرد.

میله مورد نظر با استفاده از دو گره شبکه‌بندی شده است. در نهایت، فرآیند صحت‌سنجی مطابق شکل (۹) انجام گرفته و نتایج حاصل نشان می‌دهد که پاسخ مدل عددی تطابق بسیار خوبی

در این مدل، رفتار مکانیکی آلیاژ از طریق تعریف مدول‌های الاستیسیته مجزا برای فاز آستنیت و مارتنزیت و همچنین تنش‌های متناظر با آغاز و پایان تبدیل فازی در مسیرهای بارگذاری و باربرداری کنترل می‌شود. این پارامترها نحوه تحول فاز در طول چرخه‌های بارگذاری را تعیین کرده و امکان شبیه‌سازی دقیق پاسخ فوق‌کشان آلیاژ را فراهم می‌کنند.

پارامترهای مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی مورد استفاده در این مطالعه، بر اساس نتایج آزمایشگاهی گزارش‌شده توسط دروش و همکاران کالیبره شده‌اند [۱۷]. مدول الاستیسیته فاز آستنیت برابر با 40 گیگاپاسکال و مدول الاستیسیته فاز مارتنزیت برابر با 30 گیگاپاسکال در نظر گرفته شده و نسبت پواسون برابر با $0/33$ فرض شده است. تنش‌های متناظر با آغاز و پایان تبدیل فازی در مسیر بارگذاری و باربرداری نیز مستقیماً از داده‌های آزمایشگاهی استخراج و در مدل عددی اعمال شده‌اند. همچنین کرنش تبدیل بیشینه آلیاژ برابر با 6 درصد در نظر گرفته شده است که در محدوده متعارف گزارش‌شده برای آلیاژهای نیتینول فوق‌کشان قرار دارد. لازم به ذکر است که مدل رفتاری به کاررفته در این پژوهش، با هدف بازتولید پاسخ چرخه‌ای ماکروسکوپی آلیاژ حافظه‌دار شکلی انتخاب شده و تمرکز آن بر شبیه‌سازی ویژگی‌هایی نظیر رفتار پرچمی، کاهش جابه‌جایی ماندگار و قابلیت خودبازگرداندگی سیستم سازه‌ای است. بنابراین، مکانیزم‌های ریزساختاری نظیر سخت‌شوندگی تبدیل فازی یا تخریب تدریجی خواص ماده در اثر خستگی چرخه‌ای به صورت صریح در این مدل لحاظ نشده‌اند. این فرض با توجه به هدف مطالعه که بررسی عملکرد کلی لرزه‌ای و رفتار چرخه‌ای قاب مهاربندی شده است، قابل قبول تلقی می‌شود.

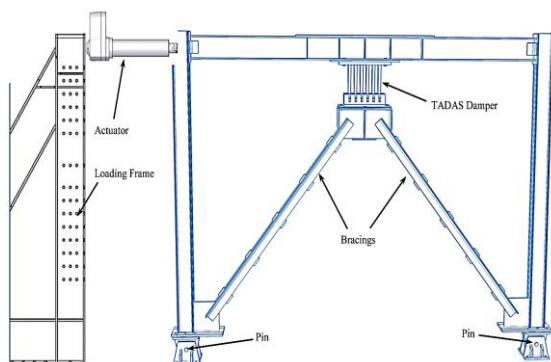
برای انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار Abaqus، از المان نوع سیمی (وایر)^۱ استفاده شده است. در این شبیه‌سازی، میل به طول 152 میلی‌متر و قطر $1/8$ میلی‌متر به صورت عددی شبیه‌سازی شده است. یکی از انتهای میل به صورت گیردار در نظر گرفته شده و به انتهای دیگر، جابه‌جایی اعمال شده است (شکل (۷)).



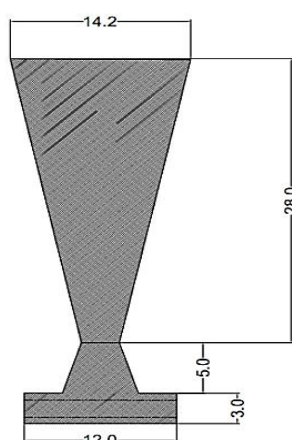
شکل ۷- شرایط مرزی مدل عددی

¹ Wire

به میراگر صفحه‌ای مثلثی شکل با شش صفحه فولادی متصل شده است (شکل‌های (۱۱) و (۱۲)). مشخصات هندسی و مکانیکی این نمونه نیز در جدول‌های (۳) و (۴) ارائه شده است.



شکل ۱۱- نمونه آزمایشی محمدی و همکاران [۱۸]



شکل ۱۲- مشخصات هندسی میراگر صفحه‌ای [۱۸]

جدول ۳- مشخصات هندسی نمونه آزمایش شده توسط محمدی و

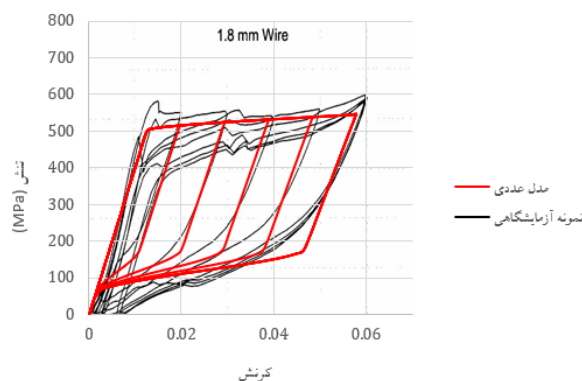
همکاران [۱۸]

طول مهاربند (mm)		۲۷۰۰
مقطع مهاربند	Double angle 100*100*10	
طول تیر (mm)	۴۰۰۰	
مقطع تیر	3PL4000*200*12	
ارتفاع ستون (mm)	۳۰۰۰	
مقطع ستون	2IPE180	

جدول ۴- خصوصیات مکانیکی فولاد [۱۸]

	۲۰۰	۲۰۰
E (GPa)	۲۰۰	۲۰۰
Fu (MPa)	۳۷۰	۵۲۰
Fy (MPa)	۲۴۰	۳۶۰
ν	۰/۳	۰/۳

با داده‌های آزمایشگاهی دارد. این تطابق، دقت شبیه‌سازی عددی را تأیید می‌کند.



شکل ۹- مقایسه نتایج مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی دروش و

همکاران [۱۷]

جدول ۲- مقایسه عددی نمودار مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی در

برخی نقاط

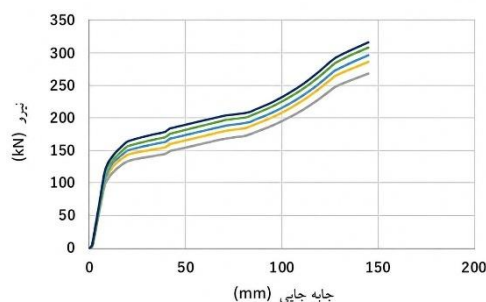
درصد خطا	مدل عددی	نمونه آزمایشگاهی	
نقطه A	۵۰۸/۱۷	۵۶۲/۰۴	۹/۵۸
نقطه B	۱۷۸/۲	۲۳۰/۱۱	۲۲/۵۶

۴-۲- تحلیل حساسیت و صحت‌سنجی قاب مهاربندی‌شده

مجهز به میراگر صفحه‌ای مثلثی شکل

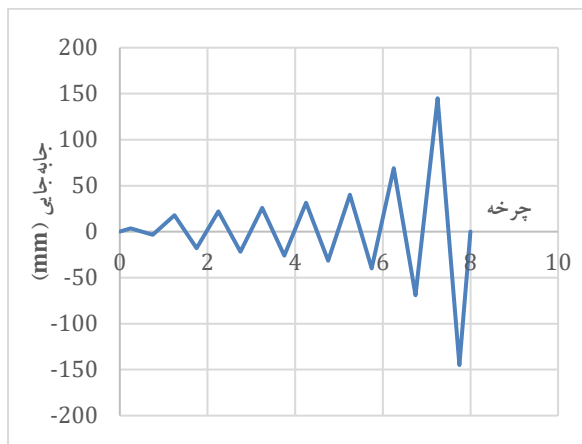
پیش از تحلیل غیرخطی، لازم است تا حساسیت مدل نسبت به اندازه مش سنجیده شود. مدل با اندازه‌های مختلف مش ۸۰، ۷۰، ۶۰، ۵۰ و ۴۰ میلی‌متر تحلیل می‌شود و در نهایت نمودار نیرو-تغییر مکان این مدل‌ها مطابق شکل (۱۰) به دست می‌آید.

تحلیل حساسیت

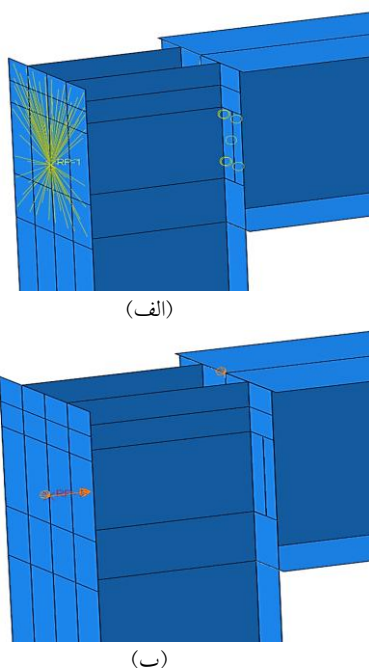


شکل ۱۰- تحلیل حساسیت مدل‌ها نسبت به اندازه مش

برای اعتبارسنجی مدل عددی، از نمونه آزمایشگاهی ارائه‌شده توسط محمدی و همکاران استفاده شده است [۱۸]. این نمونه شامل یک قاب یک طبقه و یک دهانه است که به یک مهاربند مجهز



شکل ۱۳- نمودار جابه‌جایی بر حسب چرخه‌ها



شکل ۱۴- نحوه اعمال بارگذاری در نرم‌افزار Abaqus
(الف) نقطه مرجع (ب) قید کوپل^۵

به‌منظور شبکه‌بندی مدل عددی، از المان هشت‌گره‌ای سه‌بعدی کاهش‌یافته^۶ برای اجزای حجیم و از المان چهارگره‌ای پوسته‌ای کاهش‌یافته^۷ برای اجزای ورق‌مانند استفاده شده است. نحوه شبکه‌بندی این مدل در شکل (۱۵) ارائه شده است. تحلیل عددی با استفاده از حلگر دینامیکی ضمنی^۸ و با رویکرد

در این شبیه‌سازی، تمامی اجزای سازه به‌جز پین‌ها از فولاد ST37 ساخته شده‌اند، درحالی‌که برای پین‌ها از فولاد با مقاومت بالاتر ST52 استفاده شده است. صفحه‌های فوقانی و تحتانی میراگر دارای ابعاد $600 \times 250 \times 30$ میلی‌متر و صفحه‌های جانبی آن با ابعاد $600 \times 100 \times 30$ میلی‌متر طراحی شدند. این صفحات جانبی شامل شش سوراخ به ابعاد 60×22 میلی‌متر هستند. اتصال تیر به ستون از نوع مفصلی بوده و با استفاده از نبشی جان به ابعاد $100 \times 100 \times 10$ میلی‌متر اجرا شده است. همچنین ستون‌ها به صفحه ستون به‌صورت مفصلی متصل شدند. در این پژوهش، نمونه مورد بررسی تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق الزامات آیین‌نامه^۹ ASCE 41-23 قرار گرفته و پاسخ رفتاری آن ثبت شده است [۱۹].

برای شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار Abaqus، از المان‌های سه‌بعدی توپر^۱ برای میراگر و لقمه‌های مهاربند؛ و از المان‌های پوسته‌ای^۲ برای سایر اجزای سازه استفاده شده است. در محل اتصالات میان این اجزاء، قیود تای^۳ و اتصال بین المان‌های توپر و پوسته‌ای^۴ در نظر گرفته شده و برای لحاظ‌نمودن تماس بین قطعات، از تماس کلی با ضریب اصطکاک $0/16$ بهره گرفته شده است. بارگذاری به‌صورت چرخه‌ای مطابق شکل (۱۳) و در دامنه‌های جابه‌جایی ۸، ۱۶، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۷۰ و ۱۴۵ میلی‌متر اعمال شده است. با توجه به این که بررسی خستگی چرخه‌ای مدنظر نبوده، برای هر مقدار جابه‌جایی فقط یک چرخه در نظر گرفته شده و اعمال بارگذاری نیز در نرم‌افزار Abaqus مطابق شکل (۱۴) از طریق ستون انجام شده است. در شرایط مرزی اولیه، صفحه ستون در تمامی جهات به‌جز چرخش حول محور عمود بر صفحه قاب مقید شده است. علاوه بر این، جابه‌جایی جان تیر در راستای عمود بر صفحه قاب نیز محدود شده تا شرایط واقع‌گرایانه‌تری شبیه‌سازی شود.

^۵ Coupling

^۶ C3D8R

^۷ S4R

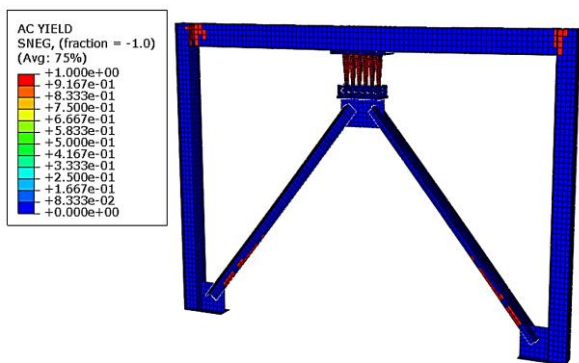
^۸ Dynamic Implicit

^۱ Solid

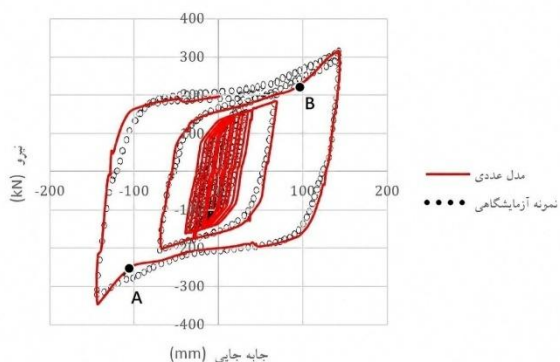
^۲ Shell

^۳ Tie

^۴ Shell to Solid Coupling



شکل ۱۷- نواحی تسلیم شده



شکل ۱۸- مقایسه نتایج مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی

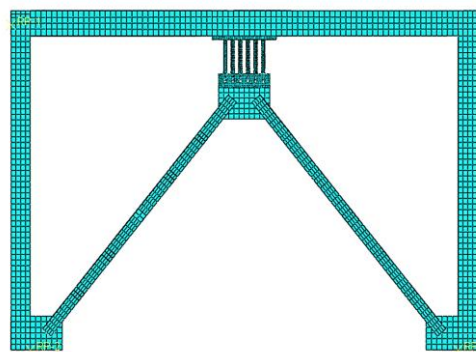
جدول ۵- مقایسه عددی نمودار مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی در برخی نقاط

مدل عددی	نمونه آزمایشگاهی	درصد خطا
نقطه A -۲۴۸/۱۳	-۲۶۸/۸۴	۷/۷
نقطه B ۲۳۴/۹۷	۲۳۷/۲۱	۰/۹۴

۵- شبیه سازی قاب مهاربندی شده مجهز به میراگر تسلیم شونده و آلیاژ حافظه دار شکلی در نرم افزار Abaqus

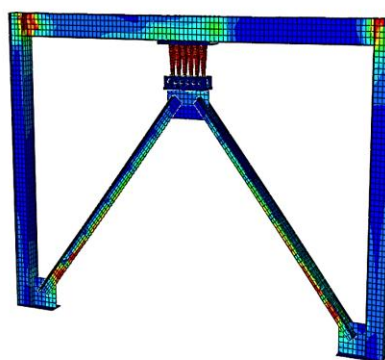
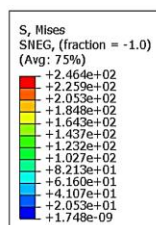
نام گذاری مدل ها به صورت T(n)-S(l)-A انجام شده است، که در آن (T) نشان دهنده میراگر صفحه ای مثلثی، (S) آلیاژ حافظه دار شکلی، (n) تعداد صفحات میراگر، (l) طول و (A) سطح مقطع آلیاژ حافظه دار (به ترتیب بر حسب میلی متر و میلی مترمربع) را نشان می دهد. برای نمونه، مدل T6-S900-100 به مدلی اشاره دارد که شامل شش صفحه میراگر، با آلیاژ حافظه داری به طول ۹۰۰ میلی متر و سطح مقطع ۱۰۰ میلی مترمربع است.

شبیه سازی عددی^۱ انجام شده است تا رفتار غیرخطی نمونه تحت بارگذاری چرخه ای با دقت مناسبی شبیه سازی شود.



شکل ۱۵- شبکه بندی مدل عددی

در شکل های (۱۶) و (۱۷)، نحوه توزیع تنش و نواحی تسلیم در مدل عددی شبیه سازی شده در نرم افزار Abaqus نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، تسلیم عمدتاً در صفحات میراگر، نواحی اتصال تیر به ستون و بخش کوچکی از مهاربند اتفاق افتاده است، در حالی که تنش در سایر اجزای سازه کم تر از حد تسلیم فولاد باقی مانده است. پس از اتمام تحلیل، منحنی نیرو-تغییر مکان نمونه به دست آمد که در شکل (۱۸) نشان داده شده و تطابق مناسبی با نتایج مورد انتظار دارد. این تطابق نشان دهنده صحت عملکرد مدل عددی در پیش بینی رفتار غیرخطی سیستم است. در جدول (۵) در برخی نقاط این دو نمودار به صورت عددی و محاسبه درصد خطا با هم مقایسه شدند.



شکل ۱۶- توزیع تنش

¹ Quasi-Static

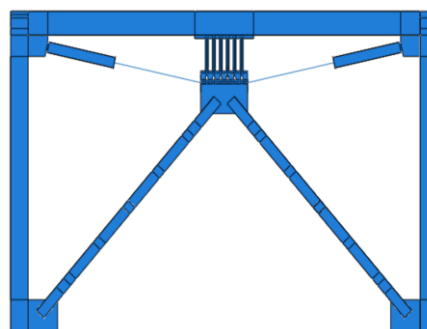
ناشی از تسلیم میراگر فولادی و تبدیل فازی در عناصر آلیاژ حافظه‌دار است. این رویکرد امکان تمرکز بر رفتار ترکیبی سیستم و بررسی نقش آلیاژ حافظه‌دار شکلی در بهبود خودبازگرداندگی و کنترل تغییر مکان‌های ماندگار را فراهم می‌سازد. لازم به ذکر است که اثرات موضعی اتصال و جزئیات پیچ و مهره یا جوش، در قالب فرض اتصال صلب ساده‌سازی شده‌اند که با هدف کاهش پیچیدگی محاسباتی و تمرکز بر پاسخ کلی سیستم اتخاذ شده است.

به‌طور کلی، دو پیشنهاد متفاوت برای افزودن آلیاژ حافظه‌دار شکلی به قاب‌ها در نظر گرفته شده است. در قاب‌های با شش صفحه میراگر، این آلیاژها یک‌بار با طول ثابت و بار دیگر با سختی ثابت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. توجه شود که آلیاژهای حافظه‌دار شکلی استفاده‌شده، تنها تحت نیروی کششی عمل می‌کنند و در برابر نیروی فشاری مقاومت ندارند. طراحی این آلیاژها به‌گونه‌ای انجام شده است که رفتار مکانیکی آن‌ها، یعنی نمودار تنش-کرنش، در شبیه‌سازی عددی قاب با نتایج حاصل از آزمایش تجربی تطابق داشته باشد. در ادامه، عملکرد سیستم‌ها از نظر پارامترهایی نظیر توانایی مرکزگرایی آلیاژ حافظه‌دار، ظرفیت استهلاک انرژی، شکل‌پذیری، مقاومت نهایی و نسبت میرایی ویسکوز معادل مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

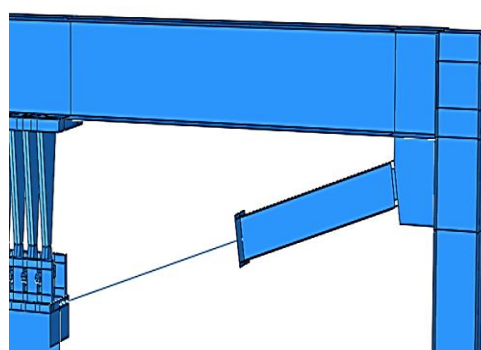
۵-۱- پیشنهاد اول

در این مدل‌ها، ویژگی‌های اصلی آلیاژ حافظه‌دار شکلی، شامل طول و سختی، به‌صورت کنترل‌شده تغییر داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که آلیاژهای حافظه‌دار در صورت داشتن طول بیشتر، عملکرد مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهند؛ چراکه با افزایش طول، کرنش در طول آلیاژ به‌صورت یکنواخت‌تری توزیع می‌شود. در نتیجه از ایجاد تمرکز تنش در نقاط خاص جلوگیری شده و بازدهی سیستم حفظ می‌شود. بر این اساس، در قاب‌هایی که طول آلیاژ به‌طور ثابت در نظر گرفته شده، از نمونه‌هایی با طول ۹۰۰ میلی‌متر استفاده شده است (مطابق جدول (۶)) و در این حالت، اگرچه طول آلیاژ ثابت مانده، اما سختی آن با تغییر سطح مقطع قابل تنظیم بوده است. به‌عبارت دیگر، افزایش یا کاهش سطح مقطع منجر به تغییر سختی مکانیکی آلیاژ شده و این امر می‌تواند بر شاخص‌هایی همچون میزان استهلاک انرژی، قابلیت بازگشت‌پذیری و رفتار چرخه‌ای سیستم تأثیرگذار باشد.

بر اساس شکل (۱۹)، برای نصب آلیاژ حافظه‌دار شکلی به قاب، ابتدا مقطع IPB 100 با استفاده از گاست‌پلیت در بخش فوقانی قاب تثبیت و متصل می‌شود. سپس، آلیاژ حافظه‌دار از یک سمت به IPB 100 و از سمت دیگر به صفحه زیرین میراگر متصل می‌شود (مطابق شکل (۲۰)). نکته مهم در این اتصال آن است که محل تقاطع آلیاژ حافظه‌دار با مهاربند باید در یک نقطه مشترک قرار گیرد تا از ایجاد لنگر اضافی در قاب جلوگیری شود. همچنین، برای مهار حرکت‌های ناخواسته، صفحه متصل به آلیاژ حافظه‌دار در برابر جابه‌جایی‌های عمودی و حرکات خارج از صفحه قاب، مقید شده است.



شکل ۱۹- نحوه قرارگیری آلیاژ حافظه‌دار در سیستم

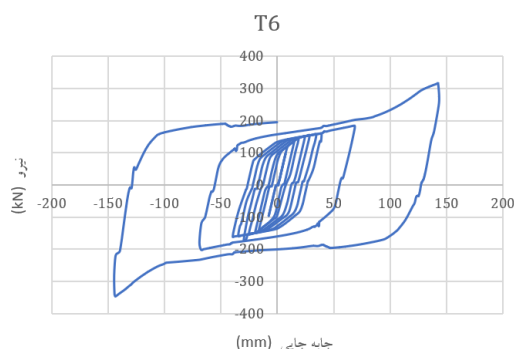


شکل ۲۰- جزئیات اتصال آلیاژ حافظه‌دار

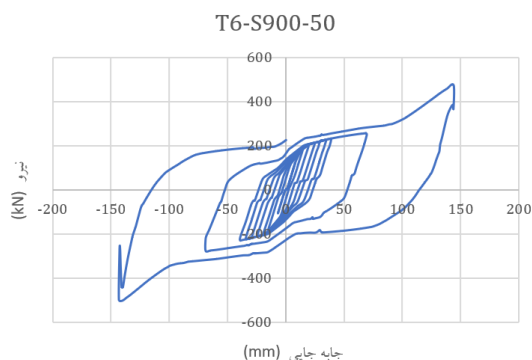
در مدل عددی ارائه‌شده، اندرکنش بین آلیاژ حافظه‌دار شکلی و میراگر صفحه‌ای فولادی از طریق اتصال مستقیم گرهی شبیه‌سازی شده است. به‌گونه‌ای که انتهای آلیاژ حافظه‌دار به نقاط اتصال میراگر فولادی مقید شده و انتقال نیرو بین این دو جزء به‌صورت کامل و بدون لغزش در نظر گرفته شده است. این فرض بیانگر یک اتصال صلب و پیوسته بوده و با نحوه اتصال فیزیکی اجزا در نمونه‌های آزمایشگاهی و طرح‌های اجرایی پیشنهادی مطابقت دارد. در این مدل، هیچ‌گونه جداشدگی یا لغزش نسبی بین آلیاژ حافظه‌دار و میراگر مجاز نبوده و رفتار غیرخطی سیستم

جدول ۶- مشخصات آلیاژ حافظه‌دار با طول ثابت ۹۰۰ میلی‌متر

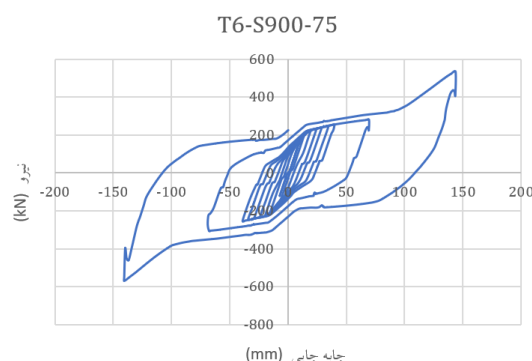
تعداد صفحات میراگر	سختی آلیاژ (N/mm)	ضریب کشسانی (MPa)	طول آلیاژ (mm)	سطح مقطع آلیاژ (mm ²)
۶	۱۷۰۵/۶	۳۰۷۰۰	۹۰۰	۵۰
۶	۲۵۵۸/۳	۳۰۷۰۰	۹۰۰	۷۵
۶	۳۴۱۱/۱	۳۰۷۰۰	۹۰۰	۱۰۰
۶	۴۲۶۳/۹	۳۰۷۰۰	۹۰۰	۱۲۵
۶	۵۱۱۶/۷	۳۰۷۰۰	۹۰۰	۱۵۰



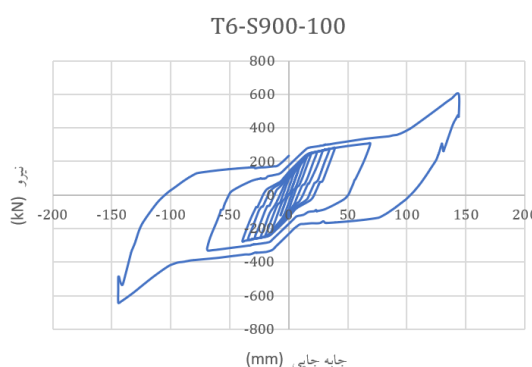
الف) مدل دارای شش صفحه میراگر و بدون آلیاژ



ب) مدل دارای شش صفحه میراگر و آلیاژ با طول ۹۰۰ میلی‌متر و مساحت ۵۰ میلی‌متر مربع



پ) مدل دارای شش صفحه میراگر و آلیاژ با طول ۹۰۰ میلی‌متر و مساحت ۷۵ میلی‌متر مربع



ت) مدل دارای شش صفحه میراگر و آلیاژ با طول ۹۰۰ میلی‌متر و مساحت ۱۰۰ میلی‌متر مربع

نمودارهای نیرو-جاب‌جایی مربوط به مدل‌های بررسی‌شده در شکل (۲۱) نمایش داده شدند. همان‌طور که مشخص است، مدل‌هایی که در آن‌ها طول آلیاژ حافظه‌دار شکلی ثابت در نظر گرفته شده، با افزایش سختی آلیاژ عملکرد سازه‌ای بهتری از خود نشان داده‌اند. به‌طور خاص، با افزایش سختی این آلیاژها، مقاومت نهایی قاب افزایش یافته است. به این معنا که سازه توان بیش‌تری برای تحمل نیروهای وارده پیش از رسیدن به مرحله گسیختگی از خود نشان داده است. علاوه بر این، میزان جاب‌جایی ماندگار کاهش پیدا کرده و منحنی نیرو-تغییر مکان به شکل پرچمی شده که نشان‌دهنده بهبود پایداری و کاهش تغییر شکل‌های دائمی پس از بارگذاری‌های تکرارشونده است. این رفتار مطلوب را می‌توان به ویژگی‌های ذاتی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، مانند خاصیت فوق‌ارتجاعی و توانایی بازیابی شکل اولیه، نسبت داد. در واقع، سخت‌تر شدن آلیاژ موجب کاهش رفتار غیرکشسان و تقویت قابلیت بازگردانی به حالت اولیه در سیستم شده است، که این مسئله در کاهش آسیب‌های سازه‌ای در بارهای چرخه‌ای بسیار مؤثر است. چنین عملکردی به‌ویژه در حوزه طراحی لرزه‌ای، ساخت میراگرها و افزایش دوام و پایداری سازه‌ها در برابر نیروهای دینامیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای بررسی دقیق‌تر این نتایج، جدول (۷) شامل داده‌های عددی مربوط به مقاومت نهایی، جاب‌جایی باقی‌مانده و سایر پارامترهای مؤثر ارائه شده است.

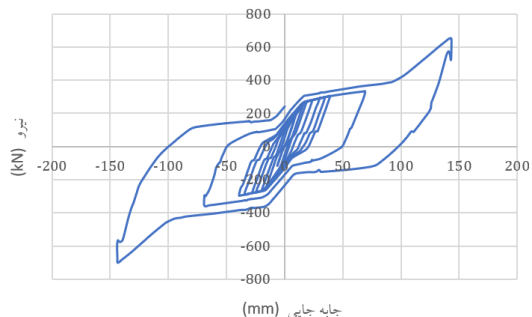
بین ۴۹/۲ تا ۱۲۲/۷ درصد متغیر بوده و نشان‌دهنده نقش مؤثر آلیاژ حافظه‌دار در افزایش ظرفیت باربری سیستم است. دلیل این بهبود، خاصیت فوق‌ارتجاعی و رفتار شبه‌کشسان آلیاژ تحت بارهای چرخه‌ای است.

نسبت میرایی ویسکوز معادل: با سخت‌تر شدن آلیاژ، این نسبت کاهش یافته که بیانگر کاهش نقش میرایی ویسکوز در پاسخ سیستم است. کاهش بین ۵۶/۳ تا ۷۷/۵ درصد است و می‌توان نتیجه گرفت که رفتار کشسان سیستم در مقایسه با رفتار ویسکوز غالب‌تر شده است.

شکل‌پذیری: در سطوح سختی پایین‌تر (سطح مقطع ۵۰ و ۷۵ میلی‌متر مربع)، شکل‌پذیری تا ۲۰/۲ افزایش یافته و سیستم توانسته کرنش‌های بیش‌تری را تحمل کند. در مقابل، با افزایش بیش‌تر سختی، شکل‌پذیری کاهش یافته و در سطح مقطع‌های بزرگ‌تر (۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر مربع) بین ۲/۹ تا ۷۲/۳ درصد افت داشته است. این افت نشان‌دهنده تمایل سیستم به رفتار تردتر در سختی‌های بالا است.

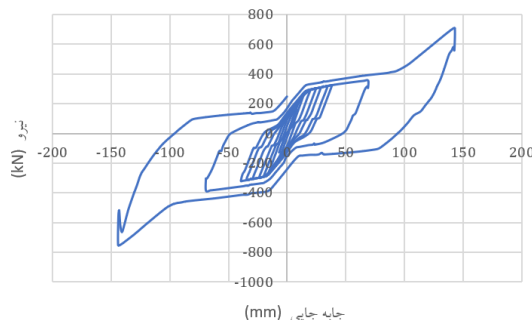
جابه‌جایی ماندگار: نمودار تغییرات جابه‌جایی ماندگار نسبت به چرخه‌های بارگذاری نشان می‌دهد در چرخه‌های ابتدایی، کاهش محدودی در جابه‌جایی ماندگار مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از فعال‌سازی ناقص خاصیت بازگشت‌پذیری آلیاژ باشد. با افزایش سطح مقطع آلیاژ (از ۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر مربع)، میزان کاهش جابه‌جایی ماندگار بین حدود ۱۰ تا ۲۶ درصد نسبت به حالت بدون آلیاژ گزارش شده است. این پارامترها برای مدل‌های مختلف در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) نشان داده شده است. لازم به ذکر است این پارامترها با استفاده از نرم‌افزار تحلیل چرخه هیستریزس محاسبه شده‌اند. ابتدا داده‌های نمودار نیرو-تغییر مکان در نرم‌افزار فراخوانده شده و پس از تحلیل، این پارامترها را محاسبه می‌کند.

T6-S900-125



ث) مدل دارای شش صفحه میراگر و آلیاژ با طول ۹۰۰ میلی‌متر و مساحت ۱۲۵ میلی‌متر مربع

T6-S900-150



ج) مدل دارای شش صفحه میراگر و آلیاژ با طول ۹۰۰ میلی‌متر و مساحت ۱۵۰ میلی‌متر مربع

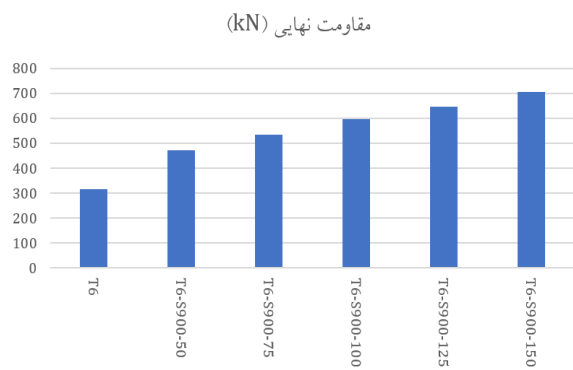
شکل ۲۱- نمودار نیرو-جابه‌جایی برای مدل‌های دارای آلیاژهای حافظه‌دار با سختی مختلف

اتلاف انرژی: با افزایش سختی آلیاژ، توانایی سیستم در جذب انرژی افزایش یافته است. همچنین در مقایسه با مدل بدون پایه (بدون آلیاژ)، افزایش میراشدن انرژی در بازه‌ای بین ۸/۲ تا ۸۱/۹ درصد گزارش شده که نشان‌دهنده بهبود چشم‌گیر در عملکرد چرخه‌ای است.

مقاومت نهایی: روند افزایش سختی آلیاژ موجب ارتقای قابل توجه مقاومت نهایی سیستم شده است. این افزایش در بازه‌ای

جدول ۷- پارامترهای محاسبه‌شده برای مدل‌های با شش صفحه میراگر و آلیاژ حافظه‌دار با طول ۹۰۰ میلی‌متر

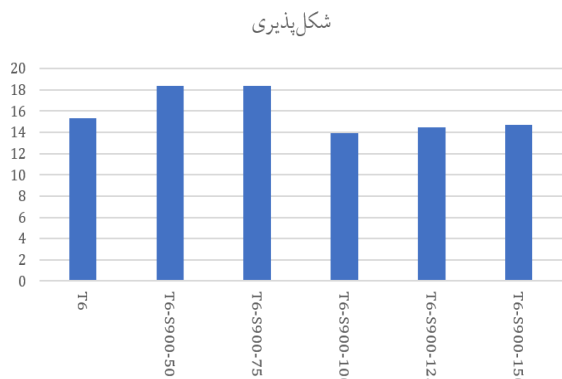
مدل‌های عددی	انرژی تلف‌شده (kN.mm)	مقاومت نهایی (kN)	جابه‌جایی نهایی (mm)	جابه‌جایی تسلیم (mm)	نسبت میرایی ویسکوز معادل
T6	۱۸۹۲۷۴/۹۸	۳۱۷/۲۷	۱۴۵	۹/۵	۰/۳۹
T6-S900-50	۲۰۷۱۷۹/۳۱	۴۷۳/۲۱	۱۴۵	۷/۹	۰/۲۶
T6-S900-75	۲۰۹۷۳۹/۱۴	۵۳۴/۱۳	۱۴۵	۷/۹	۰/۲۴
T6-S900-100	۲۱۵۳۸۴/۰۴	۵۹۹/۸۵	۱۴۵	۱۰/۴	۰/۲۴
T6-S900-125	۲۲۰۷۴۴/۸۹	۶۴۸/۵۸	۱۴۵	۱۰	۰/۲۲
T6-S900-150	۲۲۵۸۱۶/۷۹	۷۰۶/۶۱	۱۴۵	۹/۸	۰/۱۹



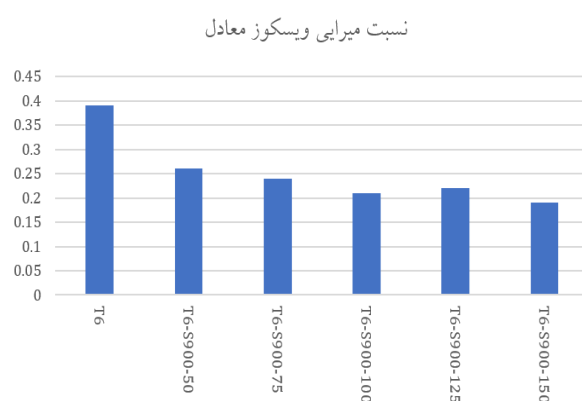
(ب)



(الف)

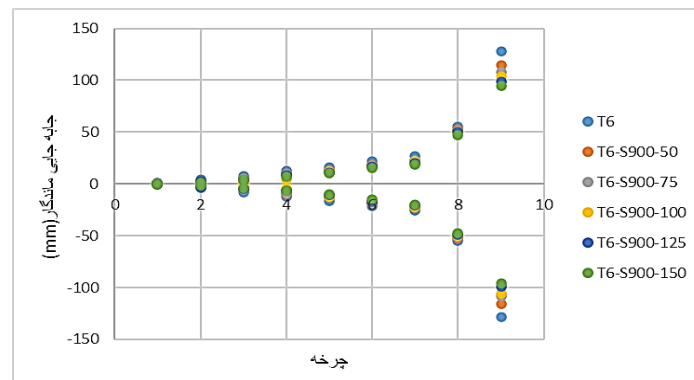


(ت)



(پ)

شکل ۲۲- نمودارهای (الف) میراشدن انرژی، (ب) مقاومت نهایی، (پ) نسبت میرایی ویسکوز معادل و (ت) شکل پذیری برای مدل های دارای شش صفحه میراگر و آلیاژ حافظه دار با طول ۹۰۰ میلی متر و سختی متفاوت



شکل ۲۳- نمودار جابه جایی ماندگار-چرخه برای مدل های دارای شش صفحه میراگر و آلیاژ حافظه دار با طول ۹۰۰ میلی متر و سختی متفاوت

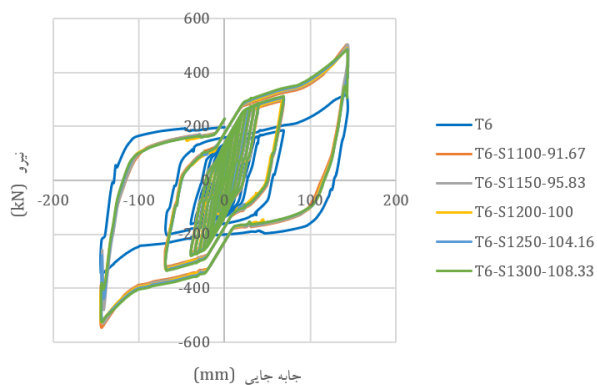
۵-۲- پیشنهاد دوم

در این حالت طول و سطح مقطع آلیاژ طوری تغییر می‌کنند که سختی آلیاژ ثابت بماند. در جدول (۸) مشخصات آلیاژ ذکر شده است.

جدول ۸- مشخصات آلیاژ حافظه‌دار

سختی آلیاژ (kN/mm)	ضریب کشسانی (MPa)	طول آلیاژ (mm)	سطح مقطع آلیاژ (mm ²)
۲۵۵۸/۳	۳۰۷۰۰	۱۱۰۰	۱۱۱/۱
۲۵۵۸/۳	۳۰۷۰۰	۱۱۵۰	۱۱۸/۱
۲۵۵۸/۳	۳۰۷۰۰	۱۲۰۰	۱۲۵
۲۵۵۸/۳	۳۰۷۰۰	۱۲۵۰	۱۳۱/۹
۲۵۵۸/۳	۳۰۷۰۰	۱۳۰۰	۱۳۸/۹

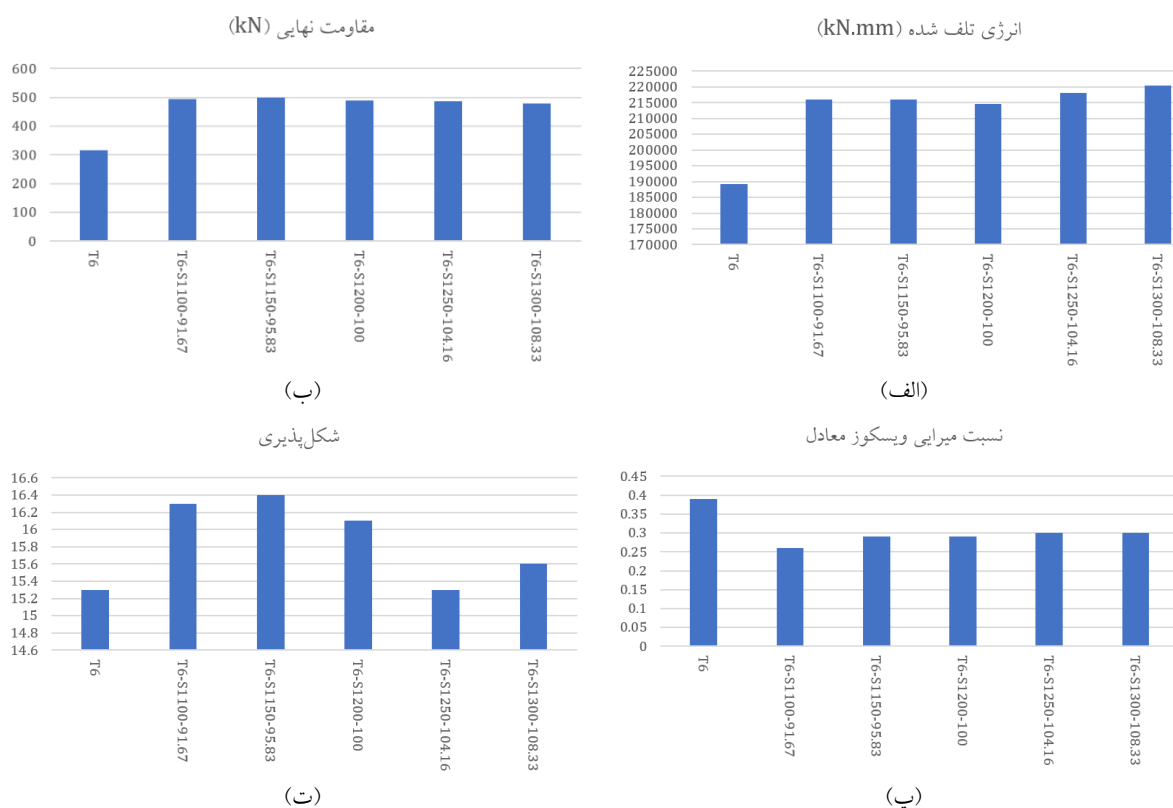
در شکل (۲۴)، نمودارهای نیرو-جاب‌جایی مربوط به مدل‌های با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی با سختی ثابت ارائه شدند. این نمودارها برای بررسی تأثیر استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار بر رفتار چرخه‌ای سیستم مهاربندی تحلیل شدند. با توجه به این که در این مدل‌ها سختی آلیاژ حافظه‌دار ثابت فرض شده، منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی تقریباً کاملاً بر هم منطبق هستند. این انطباق نشان می‌دهد که در مقیاس کلان (ماکروسکوپی)، تغییر در سختی آلیاژ تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار کلی نیرو-جاب‌جایی سیستم ندارد؛ با این حال، در مقیاس ریز (میکروسکوپی)، میزان تنش وارد شده به آلیاژ در مدل‌های مختلف متفاوت است. این تفاوت‌های تنش می‌تواند بر میزان تغییر فاز در آلیاژ حافظه‌دار و همچنین بر ویژگی بازگشت‌پذیری آن تأثیر بگذارد. در جدول (۹) این پارامترها برای مدل‌های مختلف ذکر شدند.



شکل ۲۴- نمودار نیرو-جاب‌جایی مدل‌های دارای شش صفحه میراگر و سختی ثابت ۲۵۵۸/۳ آلیاژ حافظه‌دار

جدول ۹- پارامترهای محاسبه‌شده برای مدل‌های با شش صفحه میراگر و آلیاژ حافظه‌دار با سختی ۲۵۵۸/۳ نیوتون بر میلی‌متر

مدل‌های عددی	انرژی تلف شده (kN.mm)	مقاومت نهایی (kN)	جاب‌جایی نهایی (mm)	جاب‌جایی تسلیم (mm)	شکل‌پذیری	نسبت میرایی ویسکوز معادل
T6-S1100-91.67	۲۱۵۹۲۶/۰۱	۴۹۵/۶۸	۱۴۵	۸/۹	۱۶/۳	۰/۲۶
T6-S1150-95.83	۲۱۵۹۹۸/۸۹	۵۰۰/۳۳	۱۴۵	۸/۹	۱۶/۴	۰/۲۹
T6-S1200-100	۲۱۴۶۸۵/۶۰	۴۹۰/۰۵	۱۴۵	۹	۱۶/۱	۰/۲۹
T6-S1250-104.16	۲۱۸۲۰۶/۴۲	۴۸۶/۰۲	۱۴۵	۹/۵	۱۵/۳	۰/۳۰
T6-S1300-108.33	۲۲۰۳۵۱/۳۴	۴۷۹/۸۷	۱۴۵	۹/۳	۱۵/۶	۰/۳۰



شکل ۲۵- نمودارهای الف) اتلاف انرژی، ب) مقاومت نهایی، پ) نسبت میرایی و یسکوز معادل و ت) شکل پذیری برای مدل‌های دارای شش صفحه میراگر و آلیاژ حافظه دار با سختی ثابت ۲۵۵۸/۳ نیوتون بر میلی‌متر

سخت‌تر شدن آلیاژ، سهم رفتار الاستیک در پاسخ سیستم افزایش و سهم میرایی و یسکوز کاهش می‌یابد.

شکل پذیری: میزان شکل‌پذیری سیستم نیز بسته به سختی آلیاژ حافظه‌دار، متفاوت بوده است؛ در مدل‌های T6-S1200-100، T6-S1150-95.83، T6-S1100-91.67 و T6-S1300-108.33 به ترتیب افزایش شکل‌پذیری برابر با ۶/۴٪، ۶/۹٪، ۵/۲٪ و ۲٪ مشاهده شد. تنها مدل T6-S1250-104.16 کاهش جزئی (۰/۳٪) در شکل‌پذیری را تجربه کرده است. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش سختی آلیاژ حافظه‌دار تا یک حد مشخص، می‌تواند موجب بهبود شکل‌پذیری شود؛ اما در مقادیر بالای سختی، رفتار سیستم تردتر شده و انعطاف‌پذیری آن کاهش می‌یابد.

جابه‌جایی ماندگار: با این که سختی آلیاژ در تمامی مدل‌ها ثابت در نظر گرفته شده، اما کاهش طول آلیاژ موجب بهبود عملکرد بازگشت‌پذیری آن شده و جابه‌جایی ماندگار کاهش یافته است. به‌طور دقیق‌تر، کاهش جابه‌جایی ماندگار در مدل‌هایی با طول‌های ۱۱۰۰، ۱۱۵۰، ۱۲۰۰، ۱۲۵۰ و ۱۳۰۰ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۱۱/۴، ۱۱/۳، ۹/۴، ۹/۱ و ۸/۳ درصد نسبت به مدلی بدون آلیاژ گزارش شده است.

اتلاف انرژی: در مقایسه با مدل پایه (بدون آلیاژ حافظه‌دار)، تمامی مدل‌های دارای آلیاژ، عملکرد بهتری از نظر جذب انرژی نشان دادند. بیش‌ترین افزایش در ظرفیت میرایی انرژی، مربوط به مدل T6-S1300-108.33 با ۱۶/۴ درصد و کم‌ترین آن مربوط به T6-S1200-100 با ۱۳/۵ درصد بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که طول و سختی آلیاژ بر توان جذب انرژی مؤثر هستند، اما این تأثیر در تمامی مدل‌ها یکنواخت نیست و دارای نوسان است.

مقاومت نهایی: تمامی قاب‌های مجهز به آلیاژ حافظه‌دار، شاهد افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت نهایی بودند. بیش‌ترین میزان این افزایش در مدل T6-S1100-91.67 با ۵۸/۷ درصد و کم‌ترین آن در مدل T6-S1300-108.33 با ۵۱/۳ درصد مشاهده شده است. این روند نزولی بیانگر آن است که با افزایش طول آلیاژ، میزان اثرگذاری آن بر ظرفیت باربری نهایی کاهش می‌یابد.

نسبت میرایی و یسکوز معادل: با بالارفتن سختی آلیاژ حافظه‌دار، نسبت میرایی و یسکوز معادل به‌طور محسوسی کاهش یافته است. بیش‌ترین کاهش در مدل T6-S1100-91.7 با ۳۲ درصد و کم‌ترین کاهش در مدل T6-S1300-108.3 با ۳۲/۱ درصد ثبت شده است. این کاهش بیانگر آن است که با

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در کنار میراگرهای صفحه‌ای تسلیم‌شونده بر عملکرد چرخه‌ای قاب‌های مهاربندی فولادی بررسی شد. مجموعه‌ای از مدل‌ها با ترکیب‌های مختلف طول (۹۰۰ تا ۱۳۰۰ میلی‌متر) و سطح مقطع (۵۰ تا ۱۵۰ میلی‌مترمربع) آلیاژ تحلیل شدند تا تأثیر معیارهای مکانیکی آلیاژ بر پاسخ چرخه‌ای سیستم ارزیابی شود. نتایج به‌دست‌آمده را می‌توان به‌شرح زیر جمع‌بندی نمود:

استفاده از آلیاژ حافظه‌دار موجب افزایش مقاومت نهایی تا ۱۲۲/۷ درصد و افزایش میرا شدن انرژی تا ۸۱/۹ درصد نسبت به سیستم فاقد آلیاژ شد. در مدل‌هایی با طول ثابت (۹۰۰ میلی‌متر) و سختی متغیر، با افزایش سطح مقطع از ۵۰ به ۱۵۰ میلی‌مترمربع، جابه‌جایی ماندگار بین ۱۰/۱ تا ۲۶/۱ درصد کاهش یافت و نمودار نیرو-تغییر مکان به سمت رفتار پرچمی نزدیک شد که نشان‌دهنده بهبود ویژگی خودبازگرداندگی سیستم است.

در حالتی که سختی ثابت و طول متغیر بود (۱۱۰۰ تا ۱۳۰۰ میلی‌متر)، با کاهش طول آلیاژ از ۱۳۰۰ به ۱۱۰۰ میلی‌متر، میزان جابه‌جایی ماندگار از ۸/۰ درصد به ۱۱/۴ درصد کاهش و مقاومت نهایی از ۵۱/۳ درصد به ۵۸/۷ درصد افزایش یافت. نسبت میرایی ویسکوز معادل در حضور آلیاژ، کاهش قابل‌توجهی داشت.

در سختی‌های بالا، این نسبت تا ۷۷/۵ درصد کاهش یافت که ناشی از افزایش سهم رفتار ارتجاعی سیستم بود. از نظر شکل‌پذیری، سختی‌های پایین (مانند سطح مقطع ۵۰ و ۷۵ میلی‌مترمربع) موجب افزایش شکل‌پذیری تا ۲۰/۲ درصد شدند، اما در سطح مقطع‌های بزرگ‌تر، شکل‌پذیری تا ۷۲/۳ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده تمایل سیستم به رفتار تردتر در سختی‌های زیاد است.

در مجموع، استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در کنار میراگرهای فولادی، راهکاری مؤثر برای افزایش مقاومت، کاهش تغییر شکل ماندگار و بهبود جذب انرژی سازه‌ها در برابر بارهای چرخه‌ای محسوب می‌شود. با این حال، انتخاب دقیق طول و سختی آلیاژ نقش تعیین‌کننده‌ای در بهینه‌سازی عملکرد دارد و باید متناسب با نیاز پروژه طراحی شود.

construction", Earthquake Spectra, 9(3), pp.505-528.

۷- منابع

- [15] Saeedi, F., Shabakhty, N., and Mousavi, S.R. (2016), "Seismic assessment of steel frames with triangular-plate added damping and stiffness devices", Journal of Constructional Steel Research, 125, pp.15-25.
- [16] Behnamfar, F., and Almohammad-Albakkar, M. (2023), "Development of steel yielding seismic dampers used to improve seismic performance of structures: A comprehensive review", International Journal of Engineering, 36(4), pp.746-775.
- [17] DesRoches, R., McCormick, J., and Delemont, M. (2004), "Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars", Journal of Structural Engineering, 130(1), pp.38-46.
- [18] Mohammadi, R.K., Nasri, A., and Ghaffary, A. (2017), "TADAS dampers in very large deformations", International Journal of Steel Structures, 17(2), pp.515-524.
- [19] American Society of Civil Engineers. (2023), Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (ASCE/SEI 41-23). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- [1] Spencer Jr, B.F., and Nagarajaiah, S. (2003), "State of the art of structural control", Journal of Structural Engineering, 129(7), pp.845-856.
- [2] Soong, T.T., and Spencer Jr, B.F. (2002), "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice", Engineering Structures, 24(3), pp.243-259.
- [3] Saaed, T.E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J.E., and Hedlund, H. (2015), "A state-of-the-art review of structural control systems", Journal of Vibration & Control, 21(5), pp.919-937.
- [4] Ghasemieh, M., and Rezapour, M. (2016), "Application of shape memory alloys in structural engineering", Tehran: Tehran Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR).
- [5] Ocel, J., DesRoches, R., Leon, R.T., Hess, W.G., Krumme, R., Hayes, J.R., and Sweeney, S. (2004), "Steel beam-column connections using shape memory alloys", Journal of Structural Engineering, 130(5), pp.732-740.
- [6] Asgarian, B., and Moradi, S. (2011), "Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces", Journal of Constructional Steel Research, 67(1), pp.65-74.
- [7] DesRoches, R., McCormick, J., and Delemont, M. (2004), "Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars", Journal of Structural Engineering, 130(1), pp.38-46.
- [8] McCormick, J., DesRoches, R., Fugazza, D., and Auricchio, F. (2007), "Seismic assessment of concentrically braced steel frames with shape memory alloy braces", Journal of Structural Engineering, 133(6), pp.862-870.
- [9] Ghassemieh, M., and Kari, A. (2013), "Application of shape memory alloys in seismic control of steel structures", Advances in Materials Science and Applications, 2(2), pp.66-72.
- [10] Ghassemieh, M., Bahaari, M.R., Ghodrati, S.M., and Nojumi, S.A. (2012), "Improvement of concrete shear wall structures by smart materials", Open Journal of Civil Engineering, 2(3), pp.87.
- [11] Motahari, S.A., Ghassemieh, M., and Abolmaali, S.A. (2007), "Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations", Journal of Constructional Steel Research, 63(12), pp.1570-1579.
- [12] Kari, A., Ghassemieh, M., and Badarloo, B. (2019), "Development and design of a new self-centering energy-dissipative brace for steel structures", Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 30(6), pp.924-938.
- [13] Bergman, D.M., and Goel, S.C. (1987), "Evaluation of cyclic testing of steel-plate devices for added damping and stiffness", Department of Civil Engineering, University of Michigan.
- [14] Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P., and Su, Y.F. (1993), "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant