



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Numerical study of the seismic performance of shape memory alloys yielding metal dampers in steel frames

Masoud Ghaderi^{1*}, Amir Ebrahim Akbari Baghal², Sajjad Piroboudaghi³

1- Instructor, faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University Ghermi Branch, Ghermi, Iran.

2- Instructor, faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University Marand Branch, Marand, Iran.

3- Assistant professor, Engineering faculty of Khoy, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

ABSTRACT

With the development of new engineering materials, such as shape memory alloys, their use in civil engineering applications has increased greatly. Thus, in the present study, the mechanical behavior of yielding metal dampers made from shape memory alloys in steel frames is investigated numerically. For the purposes of evaluating the seismic performance of the proposed new system, a nonlinear static analysis has been conducted using the ABAQUS software. Using Brinson's behavioral model with considering the phase transformations, as well as the Drucker-Prager failure criteria, we were able to simulate the superelastic behavior of shaped memory alloy materials, both of which were implemented in ABAQUS with the UMAT subroutine. We have continued this investigation by studying the effect of geometric variables on the performance of the system as well as the stiffness, ductility, and energy absorption capacity of the different specimens. The damper that we propose is capable of providing high energy absorption and can be easily replaced by other flowing metal dampers such as TADAS and ADAS. The proposed system shows a significant improvement in terms of ductility and energy absorption as compared to the braced frame with a corresponding steel damper, which can be used in various engineering applications.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 June 2022

Revise Date: 02 May 2023

Accept Date: 14 June 2023

Keywords:

Metal damper,
Shape memory alloy,
Finite element,
Energy absorption Capability,
Steel frame

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.344066.2826>

*Corresponding author: Masoud Ghaderi.
Email address: Mas_ghaderi64@iaugermi.ac.ir

مطالعه عددی عملکرد لرزه‌ای میراگر فلزی تسلیم شونده شیاردار از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

مسعود قادری^{*}، امیر ابراهیم اکبری بقال^۲، امیر افکار^۳، سجاد پیربوداکی^۴

۱- مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی گرمی، گرمی، ایران.

۲- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه آزاد اسلامی بستان‌آباد، بستان‌آباد، ایران.

۳- استادیار، گروه پژوهشی مهندسی خودرو، پژوهشکده فناوری و مهندسی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران.

۴- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی خوی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران.

چکیده

در تحقیق حاضر برای اولین بار رفتار مکانیکی میراگر فلزی تسلیم شونده شیاردار از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بررسی شده است. عملکرد لرزه‌ای سیستم جدید ارائه شده، با استفاده از روش تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون در نرم‌افزار آباکوس مطالعه شده است. رفتار سوپر الاستیک آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، با استفاده از مدل رفتاری برینسون و با لحاظ کردن تبدیلات فازی و همچنین معیار شکست دراکر-پراگر توسط زیربرنامه UMAT به نرم‌افزار آباکوس اعمال شده است. پس از صحت‌سنجی مدل المان محدود با نتایج موجود در تحقیقات، تأثیر جنس و پارامترهای هندسی عرض و تعداد شیادهای میراگر بر روی سختی، جابجایی و نیروی تسلیم، جابجایی و نیروی نهایی، شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی میراگر مطالعه شده است. همچنین، قابلیت به‌کارگیری این نوع میراگر در قاب فولادی با استفاده از روش دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی و با در نظر گرفتن هشت شتاب‌نگاشت مربوط به زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک گسل مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که شکل‌پذیری میراگر جدید ارائه شده در حدود ۵۶ بوده و از شکل‌پذیری بسیاری از میراگرهای متداول فلزی بیشتر می‌باشد. همچنین، میراگر مورد مطالعه از جذب انرژی بالایی برخوردار است و می‌تواند به راحتی جایگزین سایر میراگرهای فلزی جاری شونده از جمله ADAS و TADAS شود. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که میزان شکل‌پذیری و جذب انرژی سیستم پیشنهادی نسبت به قاب مهاربندی شده با میراگر متناظر فولادی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته و می‌تواند در کاربردهای مهندسی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: میراگر فلزی، آلیاژ حافظه‌دار شکلی، المان محدود، قابلیت جذب انرژی، قاب فولادی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2023.344066.2826	۱۴۰۲/۱۲/۲۹	۱۴۰۲/۰۳/۲۴	۱۴۰۲/۰۳/۲۴	۱۴۰۲/۰۲/۱۲	۱۴۰۲/۱۰/۱۱
مسعود قادری			*نویسنده مسئول:		
masoud.ghaderi64@iau.ac.ir			پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

در حال حاضر یکی از روش‌های مؤثر و به نسبت کم‌هزینه برای کاهش خطر زلزله در سازه‌های عمرانی، به‌کارگیری سیستم‌های استهلاک انرژی است. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر روش‌های کنترل غیرفعال برای استهلاک انرژی سازه، همچنان ارائه روش‌هایی جهت جلوگیری از خسارات لرزه‌ای در اعضای اصلی سازه ادامه دارد. بر این اساس، در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی در این زمینه ارائه شده است و با توسعه مواد نوین مهندسی ارائه راهکارهای مختلف همچنان مورد توجه محققان قرار دارد.

بر اساس طبیعت استهلاک انرژی زلزله، سیستم‌های کنترل سازه به سه دسته کنترل فعال [۱-۳]، نیمه فعال [۴] و غیرفعال [۵-۹] تقسیم‌بندی می‌شوند. بسیاری از محققان ظرفیت باربری و عملکرد قاب‌های فولادی را با استفاده از انواع تست‌های تجربی و روش‌های المان محدود مورد ارزیابی قرار دادند. بالندرا و همکاران [۱۰] یک سیستم کنترل غیرفعال دو سطحی جدید شامل زانوبند و اتصال شیاردار پیشنهاد کردند. چان و آلبرمانی [۱۱] به‌کارگیری میراگرهای شیاردار فولادی در قاب‌های فولادی را به‌صورت تجربی مطالعه کردند. نمونه‌های ساخته شده توسط آنها تحت بارگذاری یکنواخت و چرخه‌ای قرار گرفتند. نتایج تست‌های تجربی آنها دو خاصیت مهم میراگرهای فولادی که شامل اتلاف انرژی و همچنین پایداری مکانیکی می‌باشد را نشان داد. زهرائی و همکاران [۱۲] با استفاده از روش تحلیلی به بررسی ظرفیت باربری قاب‌های فولادی دارای میراگر فلزی پرداختند. ملکی و محبوب [۱۳] با به‌کارگیری دو لوله فولادی متصل به هم، میراگر جدیدی را به‌منظور بهبود جذب انرژی در انواع سازه‌های فولادی و بتنی ارائه دادند. همچنین، لی و همکاران [۱۴] تحقیقاتی را بر روی سیستم هیبریدی با استفاده از میراگرهای نواری اصطکاکی و فولادی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی انجام دادند. نتایج تجربی آنها رفتار چرخه‌ای مناسب را در اتصالات مجهز به میراگرهای جدید نشان می‌دهد. محمدی و همکاران [۱۵] رفتار مکانیکی میراگرهای فلزی TADAS را با استفاده از تست‌های تجربی و مدل‌سازی المان محدود مورد مطالعه قرار دادند. داوونی و همکاران [۱۶] سیستم اصطکاکی جدیدی را به‌منظور کاهش پاسخ لرزه‌ای قاب‌های فولادی ارائه دادند. آذندریانی و همکاران [۱۷] با استفاده از دو حلقه فولادی، میراگر جدیدی را ارائه کرده و با استفاده از روش حل عددی و تحلیلی عملکرد آن را مطالعه کردند. گیو و همکاران [۱۸] با استفاده از نوارهای فولادی میراگر فلزی جدیدی را طراحی کردند. در مدل ارائه شده آنها، نوارهای فولادی به‌عنوان عامل جذب و استهلاک انرژی عمل می‌کنند. در تحقیقی دیگر، گیو و همکاران [۱۹] با استفاده از تست‌های تجربی به بررسی عملکرد میراگرهای فلزی متشکل از لوله‌هایی که به‌صورت X شکل به هم جوش داده شده‌اند پرداختند.

در چند دهه گذشته، پیشرفت علم و فناوری برای پژوهشگران انگیزه‌ای در جهت یافتن مواد جدید از قبیل انواع مختلف نانوذرات [۲۰-۲۳]، پیزوالکتریک‌ها و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی ایجاد نموده است [۲۴-۲۶]. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به دلیل خواص فیزیکی و مکانیکی، شرایط مناسبی را برای استفاده آنها در مهندسی عمران و صنعت ساختمان ایجاد کرده است. این آلیاژها به دلیل دارا بودن خاصیت سوپراالاستیک توانایی بالایی در تحمل تنش‌های غیرالاستیک را داشته و ضمن تحمل تغییر شکل‌های بزرگ، پس از باربرداری و ایجاد شرایط لازم به شکل اولیه خود باز می‌گردند. علاوه بر این، عدم باقی گذاشتن کرنش پسماند، قابلیت استهلاک مناسب انرژی، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی از خصوصیات منحصر به فرد این آلیاژها می‌باشد. دلچه و همکاران [۲۷] خواص منحصر به فرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در تجهیزات کنترل لرزه‌ای غیرفعال شامل میراگرهای لرزه‌ای و دستگاه‌های اتلاف انرژی را به‌صورت تجربی بررسی کردند. آنها با انجام آزمایش‌های مختلف و با تغییر حالت مواد و نوع تنش وارده به اثبات خواص منحصر به فرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی شامل امکان رسیدن به رفتار هیستریزس مطلوب با ترکیب بازگشت‌پذیری و استهلاک انرژی با تغییر خواص مؤلفه‌های ترکیبی آن، مقاومت خستگی بسیار بالا در کرنش‌های بالا و همچنین دوام و کارایی طولانی آنها پرداختند. سیدکاظمی و همکاران [۲۸] با استفاده از روش المان محدود به بررسی تأثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در استهلاک انرژی و کاهش دامنه ارتعاشات قاب فولادی چندطبقه پرداختند. آنها برای انجام این کار از میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در وسط المان قطری مهاربند استفاده نمودند. میرطاهری و همکاران [۲۹] به مطالعه ضریب رفتار و تغییر مکان‌های نسبی ماندگار ساختمان بتنی مسلح شده با آلیاژ حافظه‌دار شکلی پرداختند. ارزیابی احتمالاتی ظرفیت فروریزش لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی کم‌انرژی تاب مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی توسط پورامینیان و همکاران [۳۰] به‌صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در قاب‌های ۶ طبقه به ازای شتاب‌های طیفی مختلف، سیستم مهاربندی کم‌انرژی تاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به سیستم مهاربندی کم‌انرژی تاب می‌تواند ۲۸ درصد احتمال فروریزش را کاهش دهد. با به‌کارگیری آلیاژ

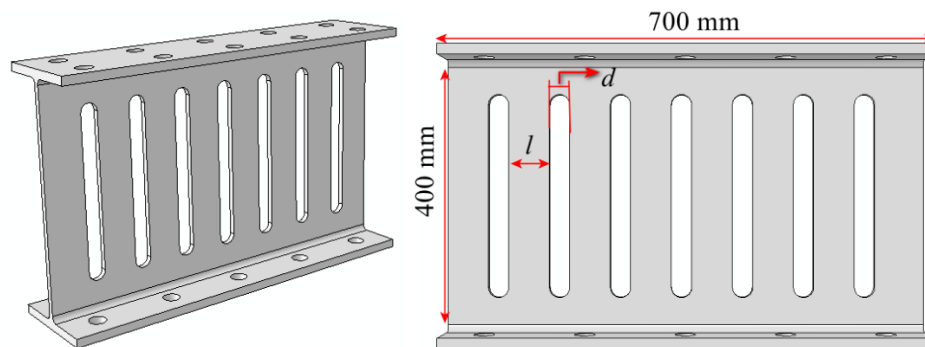
حافظه دار شکلی در این قاب‌ها می‌توان هزینه بازیابی سیستم خسارت دیده ساختمانی را کاهش داده و سیستم برگشت پذیرتری داشت. در مطالعه هاشمی و همکاران [۳۱] رفتار لرزه‌ای سازه‌های مجهز به مهاربند کمانش تاب بررسی شده و تأثیر اضافه کردن آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم مهاربندی کمانش تاب مورد مطالعه قرار گرفت. میرزائی و همکاران [۳۲] به تعیین بهینه پارامترهای میراگر جدید SMA تحت تأثیر حرکت زمین لرزه‌ای پرداختند. آنها قابلیت به کارگیری میراگر جدید ارائه شده را در قاب‌های فولادی ۴ و ۹ طبقه مورد ارزیابی قرار دادند. گیر و همکاران [۳۳] به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی مجهز به میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی و مقایسه عملکرد آن با میراگر تسلیمی متداول پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که میراگر SMA با رفتار فوق الاستیسیته به طور قابل توجهی بازده کنترل جابه‌جایی سازه را نسبت به میراگر تسلیمی فولادی بهبود می‌بخشد و همچنین مقدار قابل توجهی کاهش در مقدار بیشینه شتاب مطلق سازه را فراهم می‌کند. چن و همکاران [۳۴] به ارائه نوع جدیدی از میراگر اصطکاکی مرکزی با استفاده از میله‌های آلیاژ حافظه شکلی به منظور بهبود رفتار چرخه‌ای و شکل پذیری سازه پرداختند. آنها با استفاده از تست‌های تجربی و روش المان محدود به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد میراگر جدید ارائه شده پرداختند. نوع جدیدی از میراگر خودمحور که از پیچ و مهره‌های SMA و مکانیسم اصطکاک متغیر بهره می‌برد و میراگر اصطکاک-لغزشی SMA نامیده می‌شود، توسط کیو و همکاران [۳۵] ارائه شده است. آنها ابتدا معادلات نظری حاکم بر رابطه نیرو - جابه‌جایی، سختی معادل و میرایی ویسکوز معادل را استخراج کردند و سپس، قابلیت کاربرد چنین میراگری را در سازه‌های فولادی مورد بحث قرار دادند. دیزجی [۳۶] به ارائه سیستم استهلاک جدیدی بر مبنای استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پرداخت. میراگر ارائه شده شامل میله‌های SMA می‌باشد که به همراه مکانیزم اصطکاکی باعث اتلاف انرژی می‌گردد. در نهایت او رفتار سازه مجهز به میراگر جدید را تحت تأثیر ۴۴ شتاب‌نگاشت مختلف مطالعه کرده و نشان داد که میراگر جدید ارائه شده دارای عملکرد لرزه‌ای بسیار مطلوبی می‌باشد. چن و همکاران [۳۷] با به کارگیری میله‌های SMA سیستم مهاربندی جدیدی را به منظور اتلاف انرژی لرزه‌ای در سازه‌های فولادی ارائه کردند. وانگ و ژو [۳۸] رفتار چرخه‌ای میراگرهای SMA میله‌ای را به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان دهنده سختی پس از تسلیم بسیار بالا و رفتار خستگی عالی برای میله‌های SMA تحت اثر بارهای چرخه‌ای می‌باشد. بر اساس مطالعات مروری انجام شده توسط بیلاح و همکاران [۳۹]، آرویند و همکاران [۴۰] و فنگ [۴۱] مشاهده می‌شود در سال‌های اخیر میراگرهای مختلف جدیدی بر مبنای استفاده از مواد نوین SMA به منظور استفاده در کاربردهای سازه‌ای ارائه شده است و همچنان ارائه میراگر جدید با قابلیت بالا مورد توجه بسیاری از محققان می‌باشد.

بررسی جامع مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون استفاده از میراگرهای فلزی شیاردار تسلیم شونده از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) به منظور ارائه سیستم غیرفعال جاذب انرژی در سطوح مختلف بارگذاری لرزه‌ای در قاب‌های فولادی بررسی نشده است. بر این اساس، در تحقیق حاضر با هدف بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده، با اضافه کردن میراگرهای فلزی شیاردار SMA، عملکرد این سازه‌ها به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از اطمینان از صحت مدل المان محدود، به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی مختلف بر قابلیت جذب انرژی و سختی میراگر پرداخته شده است. در نهایت، با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی و با در نظر گرفتن شتاب‌نگاشت زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک گسل قابلیت به کارگیری این نوع میراگر در یک قاب فولادی یک طبقه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مدل المان محدود

۲-۱ میراگر تسلیم شونده شیاردار SMA

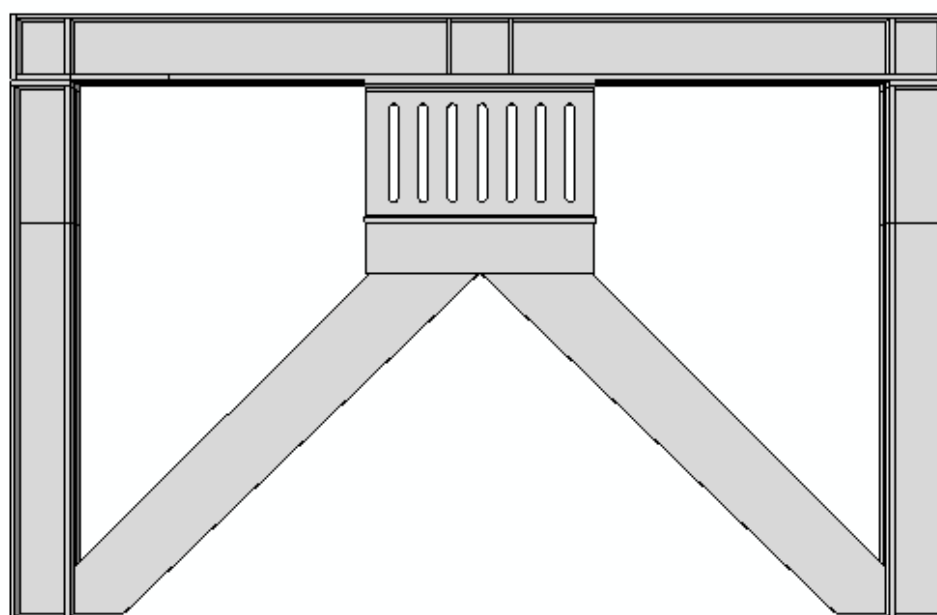
مطابق شکل ۱ میراگر تسلیم شونده شیاردار SMA ارائه شده از ورق پایه از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به طول ۷۰۰ میلی‌متر و عرض ۴۰۰ میلی‌متر به همراه شیارهای بیضوی شکل ۳۰۰ میلی‌متر، عرض d تشکیل شده و فاصله بین آنها l می‌باشد؛ بنابراین، سه پارامتر اصلی شامل اندازه عرض شیار d ضخامت t و تعداد شیارهای بیضوی در طراحی میراگر فلزی جاری شونده ارائه شده مؤثر هستند. بر این اساس، قابلیت جذب انرژی توسط این میراگر به این پارامترها وابسته خواهد بود که در ادامه مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.



شکل ۱ میراگر فلزی جاری شونده شیاردار تحت بررسی در تحقیق حاضر

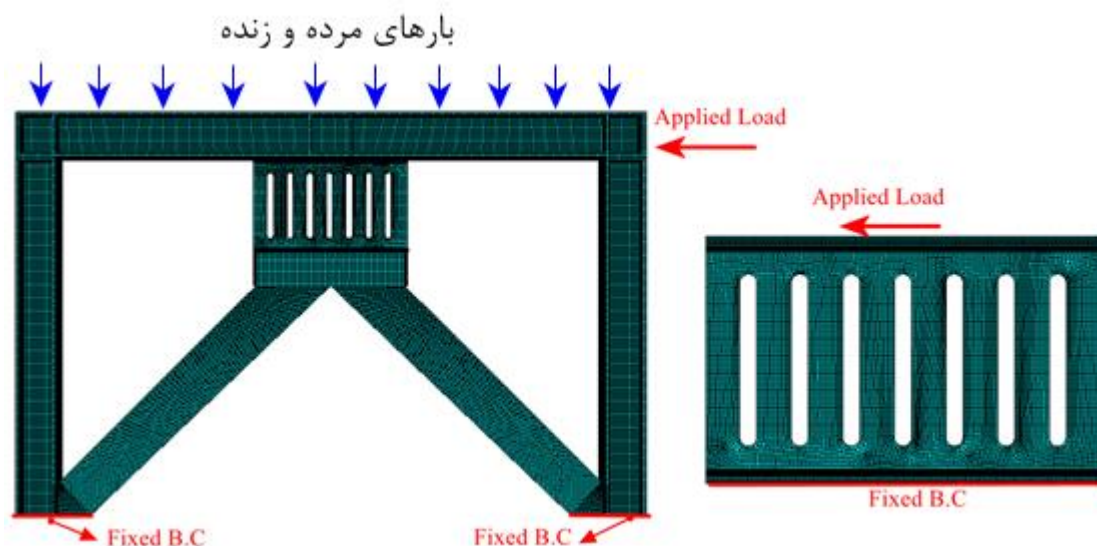
۲-۲ قاب فولادی مجهز به میراگر تسلیمی شیاردار SMA

در این مقاله سیستم میراگر فلزی جاری شونده شیاردار SMA، به منظور استهلاک انرژی در قاب‌های فولادی ارائه شده است که نحوه قرارگیری آن در قاب فولادی در شکل ۲ نشان داده شده است. مطالعه بر روی یک قاب فولادی یک دهانه با ارتفاع ۲/۵ متر و طول دهانه ۳/۵ متر با ابعاد هندسی و مشخصات سطح مقطع نشان داده شده در شکل ۲ انجام پذیرفته است. این قاب براساس مبحث دهم طراحی و بارگذاری آن بر اساس مبحث ششم مقررات ملی صورت پذیرفته است. سازه مورد بررسی در پهنه با خطر نسبی خیلی زیاد (شتاب طرح $A=0.35$)، ضریب رفتار $R=7$ ، ضریب اهمیت $I=1$ و بر روی خاک نوع ۳ طراحی شده است. مطابق استاندارد ۲۸۰۰، ضریب بزرگنمایی تغییرمکان (C_d) برابر ۰/۱۳۷۰ در نظر گرفته شده است. مقاطع تیر و ستون‌ها به ترتیب W12X35 و W12X79 می‌باشد. بار مرده برابر ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و مقدار بار زنده برابر ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در طراحی قاب‌ها در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که از شکل ۲ مشاهده می‌شود، میراگر پیشنهادی بین مهاربند قطری و تیر قرار گرفته است. این میراگر می‌تواند با استفاده از اتصالات پیچ‌مهره و یا به صورت جوش به مهاربندی قطری متصل شود. با توجه به اینکه میراگر ارائه شده به‌عنوان یک فیوز عمل می‌کند و به‌صورت یک المان شکل‌پذیر دارای رفتار غیرخطی می‌باشد، قابلیت بالایی در جذب انرژی خواهد داشت؛ بنابراین، به‌منظور عملکرد مناسب این میراگر، هسته مرکزی آن جهت داشتن شکل‌پذیری و مقاومت بالا بایستی به‌صورت مناسبی طراحی شود.



شکل ۲ نحوه قرارگیری میراگر SMA در قاب فولادی

جهت انجام تحلیل‌ها از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده و تحلیل‌ها با استفاده از آنالیز استاتیکی غیرخطی بارافزون و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی و با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی‌های هندسی و مادی انجام پذیرفته است. برای مش‌بندی تمام اجزای مدل از المان‌های سه‌بعدی هشت‌گره‌ای غیرخطی استفاده شده است. تعداد مناسب المان‌ها بعد از آنالیز حساسیت به مش انتخاب شده و اندازه مش مورد استفاده برای میراگر در حدود 0.1 سانتی‌متر و برای قاب فولادی 2 سانتی‌متر می‌باشد. در شکل ۳ مدل مش‌بندی شده به همراه شرایط مرزی و بارگذاری اعمالی نشان داده شده است. بارگذاری به صورت جابه‌جایی-کنترل و با نرخ 0.1 mm/min در موقعیت نشان داده شده در شکل ۳ به قاب فولادی اعمال شده است. همچنین، حداکثر جابه‌جایی افقی اعمالی به میراگر برابر 10 mm بوده است. نیروی ناشی از وزن به صورت نیروی ثقل و بارهای مرده و زنده به صورت نیروی فشاری به سطح بالایی تیر اعمال شده است.



شکل ۳ مدل مش‌بندی شده به همراه شرایط مرزی و بارگذاری اعمالی میراگر SMA و قاب فولادی مجهز به میراگر SMA

تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی کامل‌ترین تحلیل می‌باشد که در آن هم بارگذاری ساختمان تا حد امکان به واقعیت نزدیک بوده و هم رفتار سازه غیرخطی بوده و با توجه علم حال حاضر تا حد امکان نزدیک رفتار واقعی مصالح، مقطع، المان و کل سازه می‌باشد. با فرض رفتار غیرخطی مصالح در صورتی که بارگذاری لرزه‌ای سازه به صورت تحریک شتاب‌دار فونداسیون باشد تحلیل مورد نظر از نوع تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی است که به اختصار تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نام دارد. به دلیل تغییرشکل‌های بزرگ و عدم وجود رفتار خطی مصالح دیگر اصل جمع آثار قوا در این تحلیل برقرار نبوده لذا در این تحلیل استفاده از ترکیب بارهای طراحی با همان مفاهیم قبلی بی‌معنی خواهد بود. در آنالیز تاریخچه زمانی، آثار مودهای بالاتر و تغییرات در الگوی بار اینرسی به علت نرم‌شدگی سازه در خلال زلزله به طور خودکار در نظر گرفته می‌شود [۴۲]. با توجه به اینکه تحلیل‌های انجام شده به صورت استاتیکی و دینامیکی غیرخطی می‌باشد، بنابراین در انجام تحلیل‌ها اثرات غیرخطی‌های هندسی ناشی از تغییرشکل‌های بزرگ و غیرخطی‌های مادی ناشی از رفتار پلاستیک و سوپراستیک مواد در نظر گرفته شده است.

شتاب‌نگاشت‌ها با توجه به فاصله‌ای که از گسل ثبت شده‌اند به دو دسته نزدیک به گسل و دور از گسل تقسیم می‌شوند. معمولاً چنانچه شتاب‌نگاشتی توسط ایستگاهی ثبت شود که فاصله آن ایستگاه از گسل کمتر از 20 کیلومتر باشد به آن شتاب‌نگاشت نزدیک به گسل می‌گویند و بیشتر از آن را دور از گسل می‌نامند. فاصله از گسل موضوع بسیار مهمی در انتخاب شتاب‌نگاشت است چرا که می‌تواند پاسخ‌های بسیار متفاوتی بر روی سازه داشته باشد. در تحقیق حاضر، برای تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی از 4 شتاب‌نگاشت در حوزه دور و 4 شتاب‌نگاشت در حوزه نزدیک استفاده شده است که مشخصات این شتاب‌نگاشت‌ها در جدول ۱ آمده است. تاریخچه زمانی این شتاب‌نگاشت‌ها به صورت تحریک پایه به محل تکیه‌گاه‌های ستون‌های قاب و در راستای افقی اعمال می‌شود.

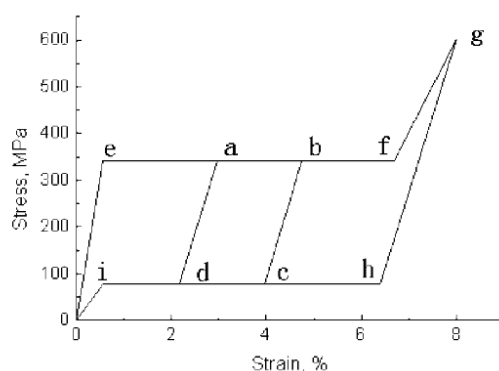
جدول ۱ مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل‌های غیرخطی تحقیق حاضر

شماره	حوزه	سال	نام	عمق (کیلومتر)	M	PGA (g)
۱	نزدیک	۱۹۷۱	San Fernando	۱/۸	۶/۶	۱/۴۳
۲	نزدیک	۱۹۹۵	Kobe	۴/۳۹	۷/۲	۰/۵۱
۳	نزدیک	۱۹۹۴	Northridge	۵/۳۶	۶/۸	۰/۶۵
۴	نزدیک	۱۹۸۹	Loma Prieta	۴/۳۹	۷/۳	۰/۸۴
۵	دور	۱۹۹۵	Kobe	۹۵/۶	۶/۵	۰/۱۴
۶	دور	۱۹۹۰	Manjil	۴۹/۹۷	۷/۴	۰/۱۳
۷	دور	۱۹۷۸	Tabas	۹۱/۱۴	۷/۸	۰/۱۱
۸	دور	۱۸۵۵	Tur Bursa	۶۰/۴۳	۷/۲	۰/۱۲

به منظور شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح فولادی، سخت‌شوندگی ماده با استفاده از مدل سخت‌شوندگی ترکیبی همسانگرد-جنبشی در نظر گرفته شده است. جنس تمامی اجزای مورد استفاده در قاب فولادی یکسان فرض شده است. همچنین، به منظور مقایسه تأثیر استفاده از مواد SMA مقایسه بین نتایج این مواد با فولاد نیز ارائه شده است که مشخصات فولاد دقیقاً مشابه خواص مکانیکی اجزای اصلی قاب فولادی می‌باشد. تنش-کرنش فولاد به صورت سه خطی^۱ در نظر گرفته شده و مدل پلاستیسیته بر اساس سطح تسلیم فون-میسز^۲ و قانون جریان متناظر استفاده شده است [۴۳]. برای ناحیه الاستیک، مدول الاستیک و ضریب پواسون به ترتیب برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ در نظر گرفته شده است. همچنین، شیب ناحیه سخت‌شوندگی کرنش برابر ۲/۴ گیگاپاسکال و تنش تسلیم فولاد مورد استفاده برابر ۳۵۵ مگاپاسکال می‌باشد [۱۷]. همچنین، تنش نهایی یا حد گسیختگی فولاد برابر ۵۹۸ مگاپاسکال می‌باشد.

مدل رفتاری آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر اساس شکل ۴ توسط زیربرنامه UMAT به نرم‌افزار ABAQUS معرفی شده است. زمانی که در میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی به دلیل نوسان سازه، تغییر شکل محوری ایجاد می‌شود. منحنی o-e-g-h-i یک سیکل از رفتار میراگر را نشان می‌دهد و مساحت زیر نمودار آن، انرژی اتلاف شده توسط آلیاژ خواهد بود. لذا در این تحقیق، میراگر SMA طوری در نظر گرفته می‌شود که رابطه تنش-کرنش آن به صورت منحنی شکل ۴ باشد و برای معرفی آن از مدل رفتاری برینسون استفاده می‌شود که توسط زیربرنامه UMAT کدنویسی می‌شود. پارامترهای مورد نیاز برای مصالح در این زیربرنامه، شامل مدول یانگ برای هر دو فاز آستنیت و مارتنزیت، ضرایب انبساط حرارتی، دماهای شروع و پایان فازهای آستنیت و مارتنزیت در تنش صفر، حداکثر کرنش تبدیل تک‌محوری، ضرایب تأثیر تنش در حالت‌های آستنیت و مارتنزیت و ثابت‌های سخت‌شوندگی (بسته به مدل) می‌باشد. ثوابت مورد نظر برای آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیکل-تیتانیوم بر اساس مطالعه کیم و همکاران [۴۴] می‌باشد که در جدول ۲ آمده است.

¹ Trilinear² Von-Mises Yield Surface



شکل ۴ نمودار تنش-کرنش آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیکل-تیتانیوم [۴۵]

جدول ۲ خواص مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی Ni-Ti [۴۴]

مقدار	خواص مکانیکی
۵۰ GPa	مدول الاستیک فاز مارتنزیت
۶۰ GPa	مدول الاستیک فاز آستینیت
۹۰ MPa	تنش شروع تبدلات فازی
۳۸۰ MPa	تنش اتمام تبدلات فازی
۶۰/۵۷ °C	دمای اتمام فاز آستینیت
۴۶/۴۱ °C	دمای شروع فاز آستینیت
۲۶/۳۵ °C	دمای شروع فاز مارتنزیت
-۵ °C	دمای اتمام فاز مارتنزیت
۴/۸%	حداکثر تنش پسماند
۵/۵۶ MPa/°C	CAf
۶/۳۰ MPa/°C	CAs
۴/۱۳ MPa/°C	CMf
۳/۷۵ MPa/°C	CMs
۱/۰۱ MPa/°C	مدول الاستیک حرارتی

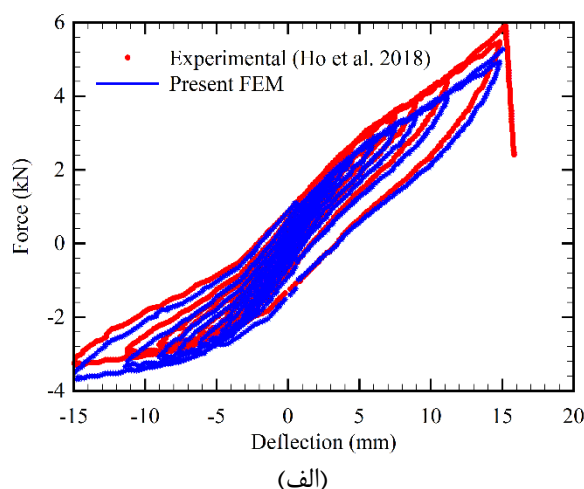
۳- بررسی نتایج

در این قسمت به بررسی نتایج تحلیل‌های المان محدود انجام پذیرفته بر روی میراگر SMA و عملکرد آن بر روی یک نمونه قاب فولادی مهاربندی شده پرداخته می‌شود. همچنین، تأثیر استفاده از مواد SMA با فولاد نیز مورد مقایسه قرار داده می‌شود. بدین منظور، در ابتدا به مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی ضخامت t و تعداد شیارهای بیضوی، N ، بر عملکرد میراگر پیشنهادی پرداخته می‌شود. سختی اولیه، جابه‌جایی تسلیم، نیروی تسلیم، شکل‌پذیری ($\mu = \Delta_{max} / \Delta_y$)، حداکثر ظرفیت نیرویی و انرژی استهلاک شده به‌عنوان پارامترهای تحت بررسی انتخاب شده‌اند.

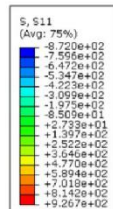
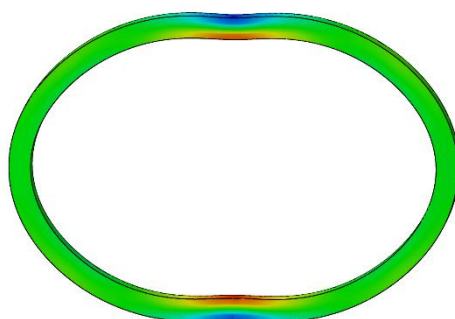
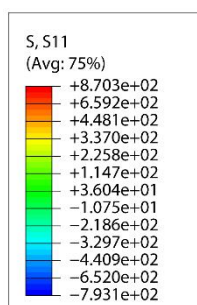
نیروی تسلیم یک پارامتر مهم در طراحی سازه‌های مجهز به میراگر فلزی است. اگر نیروی آستانه تسلیم بسیار زیاد باشد، ممکن است در یک زلزله متوسط میراگرها لغزش نکرده و با تشکیل نواحی غیرخطی در سایر المان‌ها باعث خرابی بیشتر در سازه شود. از سوی دیگر، اگر نیروی تسلیم بیش از حد کم باشد در این صورت با توجه به ضعیف بودن میراگر، انرژی تلف شده توسط آن ناچیز خواهد بود و در این حالت قاب مانند یک قاب خمشی رفتار می‌کند. بین این دو حالت حدی، مشخصه‌های میراگر را می‌توان طوری طراحی کرد که بیشترین میزان اتلاف انرژی در آن رخ دهد که در این صورت مشخصات هندسی بهینه برای میراگر به دست می‌آید. بدین منظور، در این بخش ابتدا مطالعه پارامتریک بر روی عملکرد میراگر ارائه شده انجام پذیرفته و سپس میراگری که بیشترین جذب انرژی و مشخصات عملکردی مطلوب داشته باشد تعیین می‌شود. در نهایت، کارایی این میراگر در یک قاب فولادی مطالعه می‌شود.

۱-۳ صحت‌سنجی نتایج

با توجه به اینکه تاکنون عملکرد مکانیکی و جذب انرژی میراگرهای فلزی شیاردار تسلیم شونده از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بررسی نشده است بر این اساس، به منظور انجام صحت‌سنجی مدل المان محدود، از نتایج تست‌های تجربی و مدل المان محدود رینگ دایروی شکل SMA تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام شده توسط هو و همکاران [۴۶] استفاده شده است. در شبیه‌سازی مشخصات هندسی و مکانیکی دقیقاً مشابه مرجع مذکور انتخاب شده است. بدین منظور، شعاع داخلی و خارجی رینگ از جنس آلیاژهای Ni-Ti به ترتیب برابر 62 mm و 70 mm با عمق 10 mm انتخاب شده است. در شکل ۵ منحنی تنش-کرنش خمشی رینگ SMA و مقایسه تغییر شکل نهایی رینگ SMA به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج تجربی مرجع [۴۶] مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده تطابق قابل قبول بین مدل المان محدود و تست‌های تجربی می‌باشد. خطای بین حداقل و حداکثر نیروی به دست آمده از تحقیق حاضر با نتایج تجربی به ترتیب برابر ۱۱ درصد و ۱۲ درصد به دست می‌آید.



(الف)



(ج)

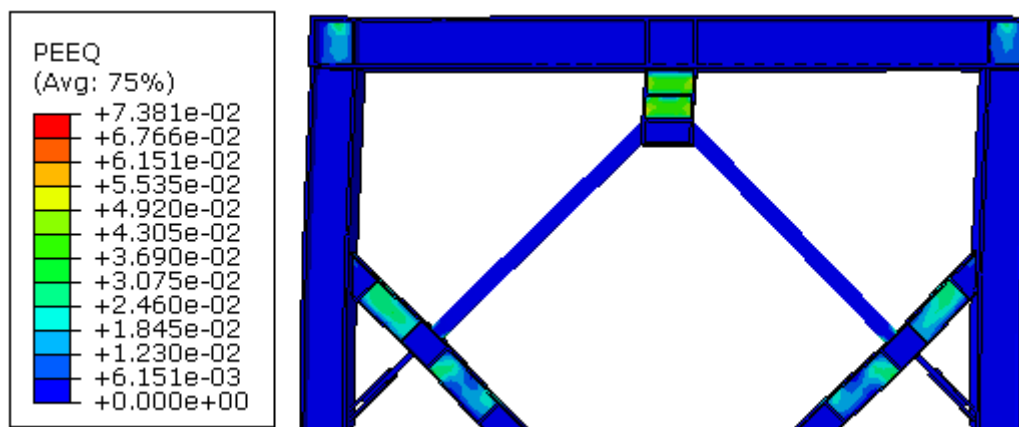
(ب)

شکل ۵ (الف) منحنی تنش-کرنش خمشی رینگ دایروی شکل SMA و (ب) تغییر شکل نهایی رینگ SMA به دست آمده از نتایج المان محدود مرجع [۵۶] و (ج) تغییر شکل نهایی رینگ SMA به دست آمده از نتایج المان محدود تحقیق حاضر

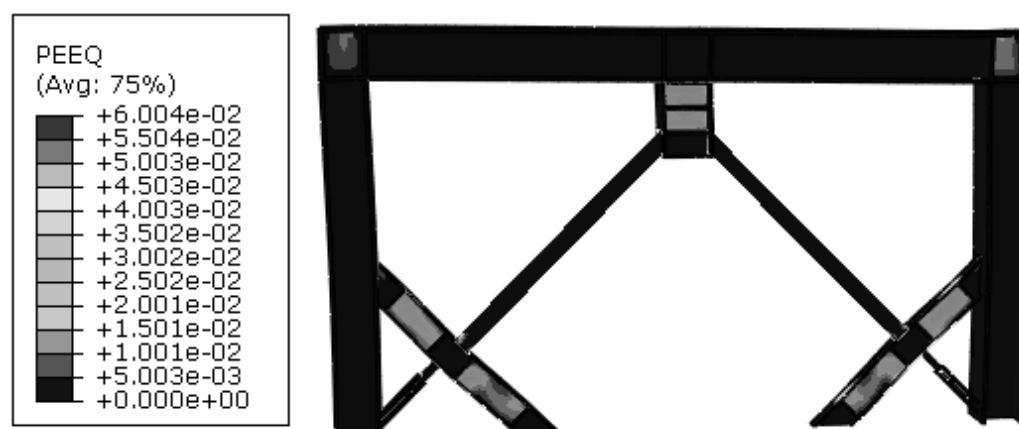
به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی المان محدود، قاب فولادی ارائه شده در مرجع [۴۷] به منظور بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی با مهاربندی زانویی شورون^۳ مورد بررسی قرار داده می‌شود. در مرجع مذکور مطالعه تجربی و المان محدود بر روی قاب فولادی به طول 2.7 m و ارتفاع 1.65 m در نظر گرفته شده است. برای مهاربندها از مقطع BOX100*5 برای تیر از پروفیل IPBL200 و برای ستون‌ها از پروفیل IPBL180 استفاده شده است. همچنین، جنس تمامی اعضا از فولاد ST37 با مدول الاستیک 210 GPa، ضریب پواسون ۰/۳ و

³ Knee Braced Frames

تنش تسلیم 240 MPa می باشد. همچنین، بارگذاری به صورت نیروی افقی به قسمت بالایی ستون سمت چپ اعمال شده است. در شکل ۶ نتایج توزیع تغییر شکل در قاب فولادی مرجع [۴۷] و شبیه سازی تحقیق حاضر آورده شده است. همچنین، منحنی نیرو-جابجایی از رسم جابجایی افقی موقعیت بالایی ستون برحسب نیروی کل برشی ایجاد شده در پای ستون ها استخراج و در شکل ۷ منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از تحقیق حاضر و نتایج مرجع [۴۷] برای مقایسه آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود، مدل سازی ارائه شده در تحقیق حاضر از دقت بسیار بالایی برخوردار است. حداکثر خطای تنش پسماند پلاستیک مدل تحقیق حاضر با نتایج مرجع [۴۷] در حدود ۲۳ درصد بوده و خطای ظرفیت باربری کمتر از ۱۰ درصد می باشد.

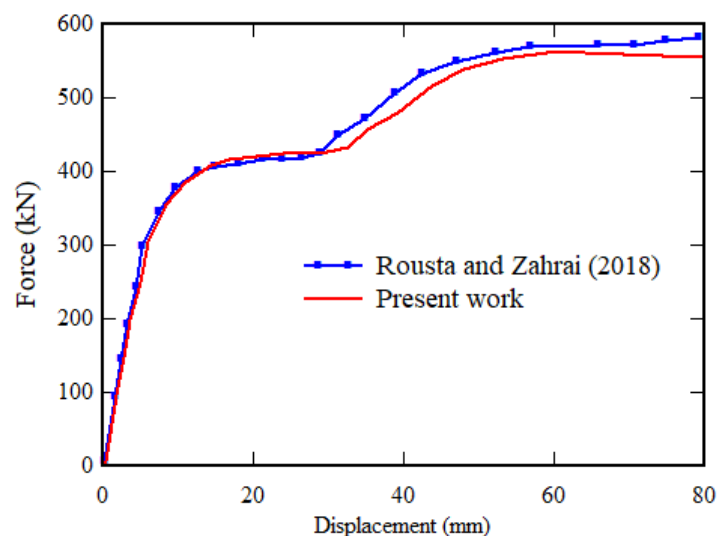


(الف)



(ب)

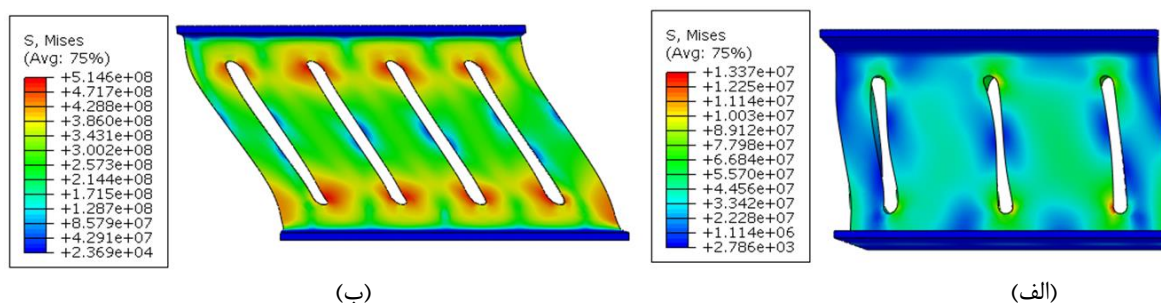
شکل ۶ (الف) توزیع تنش پلاستیک در قاب فولادی به دست آمده از تحقیق حاضر و (ب) نتایج مرجع [۴۷]

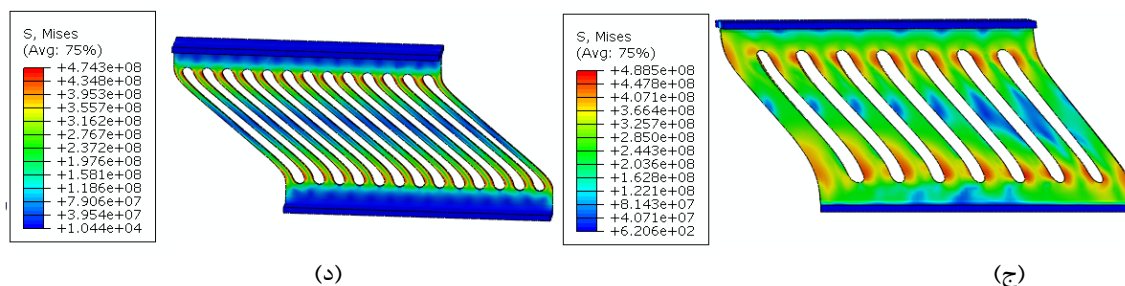


شکل ۷ مقایسه منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده از نتایج تحقیق حاضر و نتایج مرجع [۵۷]

۳-۲ عملکرد میراگر تسلیم شونده SMA

در شکل ۸ مکانیزم تغییر شکل تعدادی از نمونه‌های مختلف میراگر SMA ارائه شده به ازای مقادیر مختلف تعداد شیارهای موجودی (یعنی ۳، ۴، ۷ و ۱۳) و با در نظر گرفتن مقدار ثابت ضخامت، ابعاد ورق پایه و نیروی افقی اعمالی به انتهای نمونه‌ها برابر با 1.2 kN نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که اندازه شیارها و تعداد آنها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تغییر شکل و حداکثر تنش ایجاد شده در این نوع میراگرها دارد. رفتار نمونه دارای ۳ شیار در ناحیه الاستیک قرار داشته و با توجه به اینکه مقدار تنش ایجاد شده در این نمونه کمتر از ۹۰ مگاپاسکال (تنش شروع تبدلات فازی جدول ۲) می‌باشد، بنابراین تبدیلات فاز آستینیت به مارتنزیت در این حالت ایجاد نخواهد شد. با افزایش تعداد شیارها تنش افزایش و سپس با بیشتر شدن آن، تنش مجدداً کاهش می‌یابد. به‌ازای تعداد شیارهای ۴، ۷ و ۱۳ حداکثر تنش ایجاد شده در میراگر SMA به ترتیب برابر ۵۱۴، ۴۸۸ و ۴۷۴ مگاپاسکال به دست می‌آید. بر این اساس، می‌توان گفت که در این نوع میراگرها تعداد شیارها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد سیستم داشته و به‌ازای تعداد مناسب شیارها می‌توان تبدیلات فاز آستینیت به مارتنزیت را در مواد حافظه‌دار شکلی به وجود آورد و با استفاده از این قابلیت میزان استهلاک انرژی را افزایش داد. بنابراین، انتخاب مناسب پارامترهای این نوع میراگر می‌تواند باعث بهبود قابل ملاحظه‌ای در رفتار لرزه‌ای آن بشود.





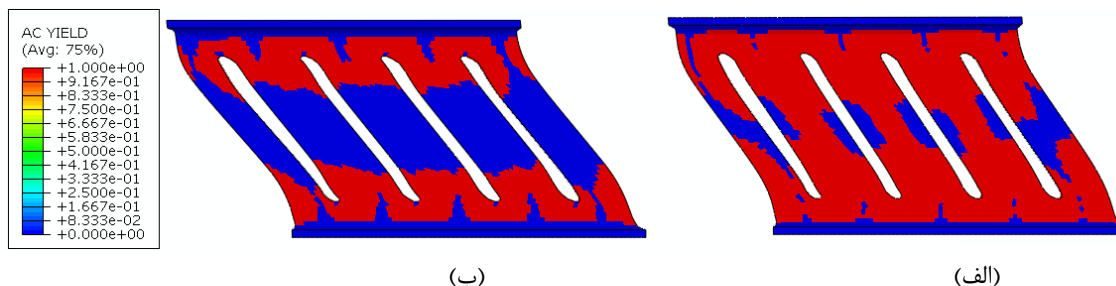
شکل ۸ کانتور توزیع تنش تعدادی از نمونه‌های مختلف میراگر SMA ارائه شده به‌ازای نیروی افقی اعمالی به انتهای نمونه‌ها برابر با 1.2 kN و مقادیر مختلف تعداد شیارهای موجودی (الف) ۳، (ب) ۴، (ج) ۷ و (د) ۱۳ شیار

در جدول ۳ برخی از مشخصه‌های مکانیکی میراگر SMA تحت بررسی مانند حداکثر جابه‌جایی، شکل‌پذیری، انرژی کل جذب شده، جرم میراگر با مشخصه‌های تعدادی از میراگرهای فلزی ارائه شده در تحقیقات پیشین مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود میراگر SMA ارائه شده در حالت کلی مشخصه‌های عملکردی بسیار مناسبی نسبت به بسیاری از میراگرهای فلزی جاری شونده متداول دارد. یکی دیگر از مزیت‌های میراگر جدید ارائه شده شکل‌پذیری بالای آن می‌باشد که در حدود ۵۶ بوده و از شکل‌پذیری بسیاری از میراگرهای فلزی بیشتر هست. همچنین، میراگر مورد مطالعه از جذب انرژی بالایی برخوردار است و می‌تواند به‌راحتی جایگزین سایر میراگرهای فلزی جاری شونده از جمله ADAS و TADAS شود. نتایج نشان می‌دهد میراگر DPD به لحاظ جذب انرژی عملکرد بهتری از میراگر ارائه شده در تحقیق حاضر دارد. ولی، نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که شکل‌پذیری میراگر تحقیق حاضر در حدود ۵۵ درصد بیشتر از آن می‌باشد. بنابراین، این میراگر به لحاظ شکل‌پذیری بهتر از میراگر DPD است و در مواردی که نیاز به شکل‌پذیری بالا برای میراگر می‌باشد، میراگر تحقیق حاضر گزینه بسیار مناسبی می‌باشد.

جدول ۳ مقایسه مشخصه‌های عملکردی میراگر SMA شده و برخی از میراگرهای فلزی جاری شونده متداول

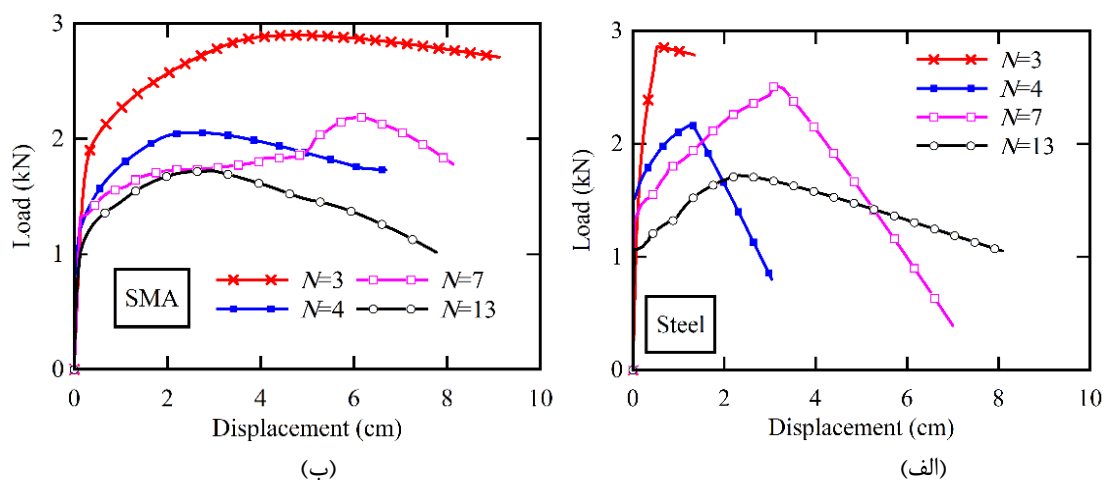
Parameter	Metal yield damper						
	Proposed damper (N=7)	DPD [48]	TADAS [49]	SD [11]	SPD [50]	ShPD [51]	SDRDs [17]
Construction cost	Low	Very low	High	Low	Very low	Low	high
Ductility	۵۶	۳۶	۲۹	۱۲	--	۱۴-۲۰	۶/۷-۱۳/۳
Total dissipated energy (kJ)	۱۰/۳۵	۲۲/۷-۴۹/۲	--	۶/۹-۱۰/۳	--	۵/۸-۶/۵	۲۸-۱۵۸
Height (mm)	۴۰۰	۱۱۰-۱۴۰	۳۰۴	۱۶۲	۱۱۴-۱۴۰	۱۰۰-۱۲۰	۸۶۰
Mass (kg)	۴/۱	۲/۱-۶۶	۹۵/۸	۳/۱	۰/۷-۱/۰	۱/۶	۱۳/۹

به‌منظور مقایسه عملکرد میراگر SMA با میراگر فولادی متناظر، در شکل ۹ نواحی ناحیه پلاستیک هر دو میراگر به‌ازای مقدار نیروی اعمالی ۲ کیلو نیوتن نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که به‌ازای مشخصات یکسان میراگر، نواحی تسلیم میراگر SMA در حدود ۱۴۶ درصد بیشتر از نواحی تسلیم میراگر فولادی متناظر است. با توجه به اینکه مکانیزم استهلاک انرژی در میراگرهای فلزی در نتیجه اتلاف انرژی در اثر تغییر شکل‌های پلاستیک می‌باشد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میراگر SMA عملکرد لرزه‌ای بسیار مناسبی نسبت به میراگرهای فولادی متناظر خواهد داشت.

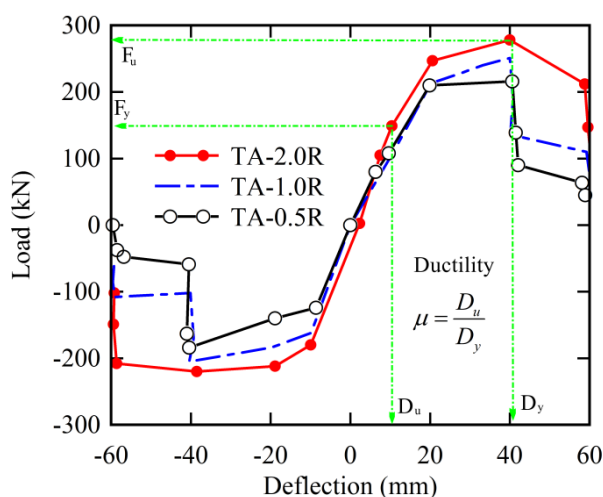


شکل ۹ نواحی ناحیه پلاستیک میراگر شیاردار تحت بررسی به ازای نیروی اعمالی ۲ kN (الف) میراگر SMA و (ب) میراگر فولادی متناظر

در شکل ۱۰ منحنی نیرو-جابجایی برای میراگر شیاردار SMA به ازای مقادیر مختلف تعداد شیار آورده شده و نتایج مربوط به میراگر فولادی متناظر نیز نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می شود که در حالت کلی حداکثر نیروی میراگرهای فولادی بیشتر از میراگر SMA متناظر می باشد. به عنوان مثال، در حالت $N=3$ حداکثر نیروی میراگر فولادی و SMA به ترتیب برابر ۳/۴۲ kN و ۲/۹۱ kN می باشد که نشان می دهد حداکثر نیروی میراگر فولادی در حدود ۱۸ درصد بیشتر از نیروی میراگر SMA متناظر می باشد. هر چند در همه حالت های تحت بررسی حداکثر نیروی میراگرهای فولادی بیشتر از میراگر SMA می باشد، ولی پارامتر بسیار مهم در میراگرهای فلزی تسلیمی، قابلیت جذب انرژی است که از مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی به دست می آید. بر این اساس، در جدول ۴ قابلیت جذب انرژی و حداکثر نیروی انواع مختلف میراگرهای شیاردار فولادی SMA نشان داده شده است. با توجه به جدول ۴ مشاهده می شود که هر چند حداکثر نیروی میراگرهای فولادی بزرگ تر از مقادیر متناظر میراگر SMA می باشد، ولی میزان جذب انرژی در میراگرهای SMA به طور قابل ملاحظه ای بیشتر می باشد که این نتیجه در اثر خواص سوپرالاستیک و تبدیلات فازی در آلیاژهای حافظه دار شکلی می باشد. علاوه بر این، نتایج نشان می دهد که ظرفیت استهلاک انرژی میراگر SMA با ۳ و ۷ شیار به ترتیب برابر ۱۰/۳۵ kJ و ۹/۹۳ kJ می باشد. هر چند قابلیت استهلاک انرژی به ازای $N=3$ بیشتر می باشد ولی با توجه به اینکه با افزایش تعداد شیار میزان مواد مورد استفاده کمتر شده و وزن میراگر کاهش می یابد بنابراین حالت مناسب میراگر SMA به ازای $N=7$ می باشد. همچنین در جدول ۵ سختی اولیه، جابجایی تسلیم، نیروی تسلیم و شکل پذیری چند نمونه از میراگر SMA و میراگر فولادی متناظر نشان داده شده است. شکل پذیری $(\mu = D_{max} / D_y)$ به صورت نسبت جابجایی متناظر با حداکثر ظرفیت باربری (Fu) به جابجایی تسلیم متناظر با نیروی تسلیم (Fy) به دست می آید [۵۲] که این پارامترها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. سختی اولیه نیز به صورت شیب خط مماس بر بخش خطی منحنی نیرو-جابجایی تعریف می شود. نتایج نشان می دهد که در حالت کلی سختی اولیه میراگرهای فولادی بیشتر از میراگر SMA متناظر می باشد که این امر به دلیل بیشتر بودن مدول یانگ فولاد نسبت به مدول یانگ SMA می باشد. بعلاوه مشاهده می شود که بیشترین شکل پذیری مربوط به نمونه های میراگرهای SMA بوده و برای میراگر با تعداد ۷ شیار ضریب شکل پذیری برابر ۵۶/۵۴ به دست می آید که در حدود ۲/۲ برابر نسبت به نمونه فولادی بیشتر می باشد. نتایج نشان داده شده در جدول ۵ نشان می دهد که با بیشتر شدن تعداد شیارها تا ۷ عدد، سختی جانبی میراگر افزایش یافته ولی به ازای شیارهای بیشتر از این مقدار، سفتی مجدداً روند کاهشی به خود می گیرد. بنابراین، ساختارهای شیاردار به دلیل مکانیزم های مختلف انتقال نیرو می توانند مشابه سازه های خرپایی عمل کرده و سبب افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل بشوند. همچنین، سختی اولیه قاب نیز با افزایش تعداد شیارها پیدا کرده است و رابطه مستقیم شکل پذیری با سختی را ارضا می کند. هرچه ضریب شکل پذیری یک سازه بیشتر باشد، میزان جذب انرژی نیز بالاتر بوده و در نتیجه مقدار ضریب رفتار بزرگ تر خواهد بود.



شکل ۱۰ منحنی نیرو-جابجایی میراگر شیاردار فلزی به‌ازای مقادیر مختلف تعداد شیارها (الف) میراگر فولادی و (ب) میراگر SMA



شکل ۱۱ نحوه محاسبه شکل‌پذیری از روی منحنی نیرو-جابجایی [۵۲]

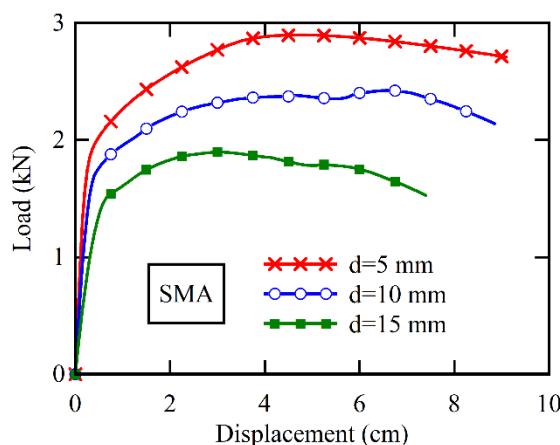
جدول ۴ قابلیت جذب انرژی و حداکثر نیروی انواع مختلف میراگرهای شیاردار فولادی SMA

میراگر فولادی		میراگر SMA		تعداد شیار	ردیف
جذب انرژی (kJ)	حداکثر نیرو (kN)	جذب انرژی (kJ)	حداکثر نیرو (kN)		
۱/۴۹	۳/۴۲	۱۰/۳۵	۲/۹۱	۳	۱
۳/۳۱	۲/۶۰	۴/۱۵	۲/۰۵	۴	۲
۷/۲۵	۳/۰۳	۹/۹۳	۲/۱۹	۷	۳
۳/۸۸	۲/۰۷	۴/۸۸	۱/۷۲	۱۳	۴

جدول ۵ سختی اولیه، جابه‌جایی تسلیم، نیروی تسلیم و شکل‌پذیری انواع مختلف میراگرهای شیاردار فولادی SMA

میراگر فولادی					SMA میراگر					تعداد شیار	ردیف
شکل‌پذیری (μ)	نیروی تسلیم، F_y (kN)	جابه‌جایی نهایی، D_{max} (cm)	جابه‌جایی تسلیم، D_y (cm)	سختی اولیه (kN/cm)	شکل‌پذیری (μ)	نیروی تسلیم، F_y (kN)	جابه‌جایی نهایی، D_{max} (cm)	جابه‌جایی تسلیم، D_y (cm)	سختی اولیه (kN/cm)		
۲/۳۰	۲/۰۳	۰/۵۳	۰/۲۳	۸/۸۲	۱۹/۳۶	۱/۷۵	۴/۸۴	۰/۲۵	۷	۳	۱
۱۶/۲۵	۱/۵۳	۱/۳	۰/۰۸	۱۹/۱۲	۱۹/۷۶	۱/۲۴	۲/۵۷	۰/۱۳	۹/۵	۴	۲
۲۵/۸۳	۱/۴۸	۳/۱	۰/۱۲	۱۲/۳۳	۵۶/۵۴	۱/۳۲	۶/۲۲	۰/۱۱	۱۲	۷	۳
۲۵/۶۷	۱/۰۸	۲/۳۱	۰/۰۹	۱۲/۰۰	۳۰/۲۰	۱/۰۳	۳/۰۲	۰/۱۰	۱۰/۳	۱۳	۴

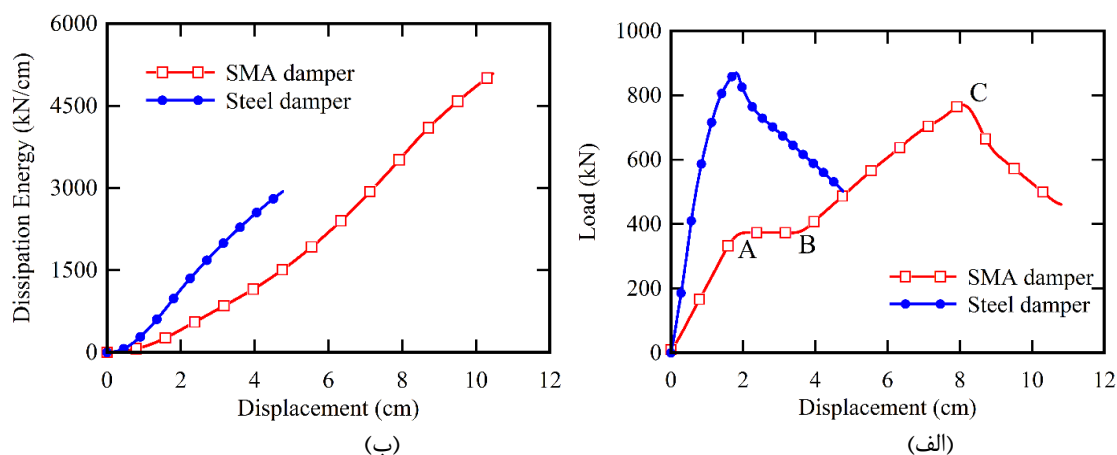
در شکل ۱۲ تأثیر عرض شیارهای بر روی منحنی نیرو-جابه‌جایی میراگر SMA به ازای $N=3$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عرض شیارها سختی اولیه و ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. چنانچه با افزایش عرض میراگر از ۵ میلی‌متر تا ۱۰ میلی‌متر، سختی اولیه در حدود ۷ درصد و نیروی تسلیم در حدود ۱۸ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲ تأثیر عرض شیارهای بر روی منحنی نیرو-جابه‌جایی میراگر SMA به ازای $N=3$

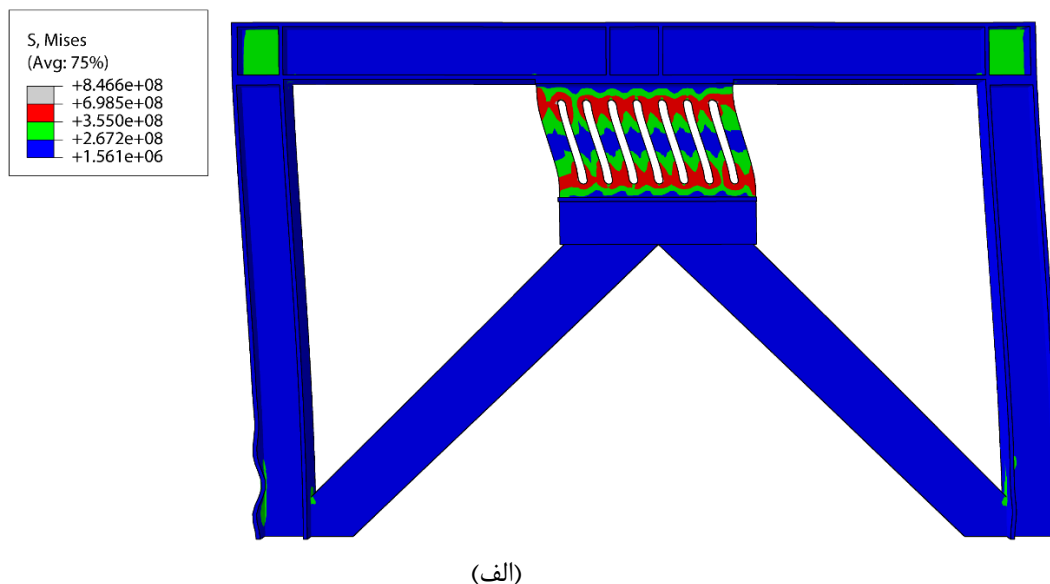
۳-۳ رفتار قاب فولادی مجهز به میراگر SMA شیاردار

در این بخش به بررسی تأثیر میراگر SMA بر عملکرد یک قاب فولادی پرداخته می‌شود. نمودار بار-تغییر مکان ناشی از تحلیل استاتیکی غیرخطی حاوی اطلاعات ارزشمندی است که پس از تحلیل غیرخطی در اختیار محققان قرار می‌گیرد. بنابراین در شکل ۱۳ نمودار نیرو-جابه‌جایی و انرژی استهلاک شده برای سازه مورد بررسی نشان داده شده است. مقایسه نمودارهای نیرو-جابه‌جایی سازه‌های دارای میراگر SMA و میراگر فولادی نشان می‌دهد که میراگر SMA ارائه شده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر بهبود عملکرد قاب‌های فولادی دارد. نتایج نشان می‌دهد که میراگر SMA باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در شکل‌پذیری و جذب انرژی سازه می‌گردد. با توجه به شکل ۱۳ الف مشاهده می‌شود که جابه‌جایی متناظر با حداکثر نیرو و شکل‌پذیری قاب دارای میراگر SMA به ترتیب در حدود ۴/۵ برابر و ۳/۸ برابر نسبت به قاب دارای میراگر فولادی افزایش می‌یابد. شکل ۱۳ ب میزان انرژی مستهلاک شده برای قاب فولادی مهاربندی شده با میراگر شیاردار SMA و فولادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میراگر SMA باعث بهبود قابل ملاحظه‌ای در استهلاک انرژی شده و جذب انرژی را در حدود ۷۵ درصد بهبود می‌بخشد.

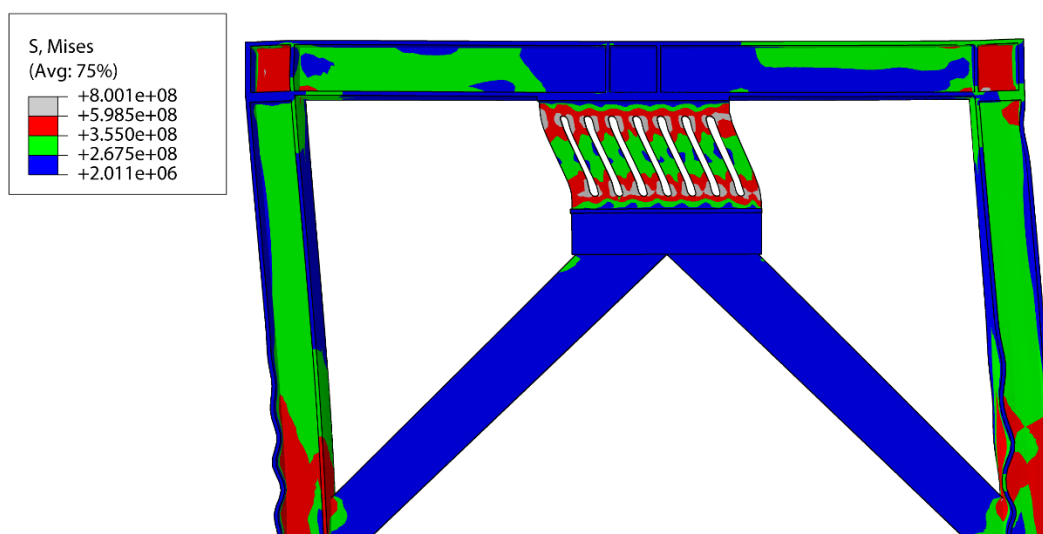


شکل ۱۳ (الف) نمودار نیرو-جابجایی قاب مجهز به میراگر SMA شیاردار و (ب) انرژی اتلاف شده

همچنین، نتایج تغییرشکل در این قاب به ازای جابجایی افقی 4 cm که در شکل ۱۴ آمده است، نشان می‌دهد که میراگر SMA باعث کاهش محسوسی در تغییرشکل‌های قاب می‌شود که نشان دهنده عملکرد مناسب این میراگر طراحی شده در قاب است. با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که در این جابجایی که بیشتر از حد دریفت مجاز قاب طراحی شده می‌باشد، اعضای اصلی قاب مجهز به میراگر SMA هنوز وارد ناحیه تسلیم نشده و تنها کمانش موضعی در پای ستون‌ها اتفاق افتاده است. اما برای قاب فولادی وضعیت بحرانی بوده و به ازای جابجایی افقی اعمالی برابر 4 cm، علاوه بر کمانش موضعی در ستون‌های قاب بخش‌های زیادی از تیر و ستون‌ها نیز وارد ناحیه پلاستیک شده‌اند. این نتایج نشان دهنده تأثیر بسیار مطلوب استفاده از میراگرهای SMA در قاب‌های فولادی می‌باشد. طبق انتظار بیشترین تنش پلاستیک فقط در نواحی میراگر SMA گسترش پیدا کرده و نشان از عملکرد مطلوب این سیستم دارد، یعنی در نواحی اتصالات و ورق اتصال مهاربند به قاب و حتی در خود مهاربند نیز کرنش پلاستیک رخ نداده است و آسیبی را در این نواحی نشان نمی‌دهد. وقوع تنش‌های پلاستیک در میراگر سبب افزایش استهلاک انرژی و میرایی معادل می‌شود.



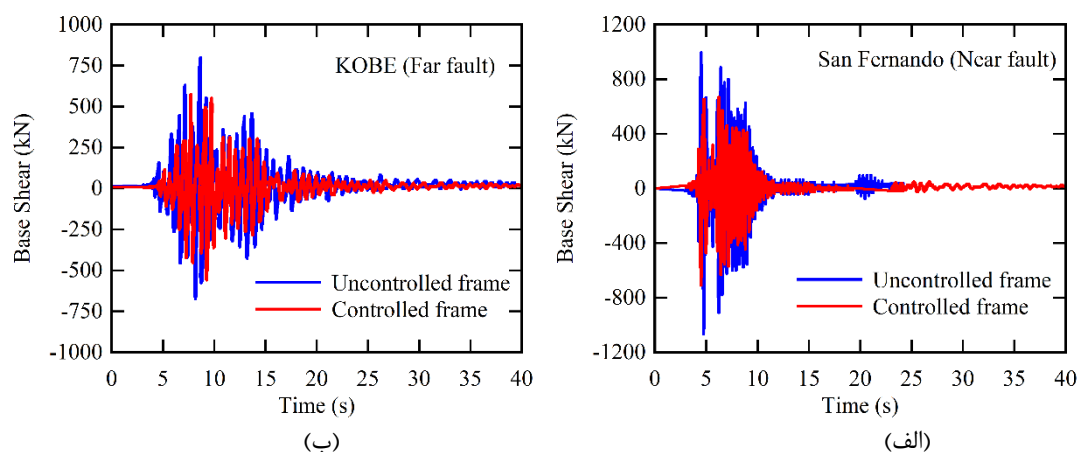
(الف)



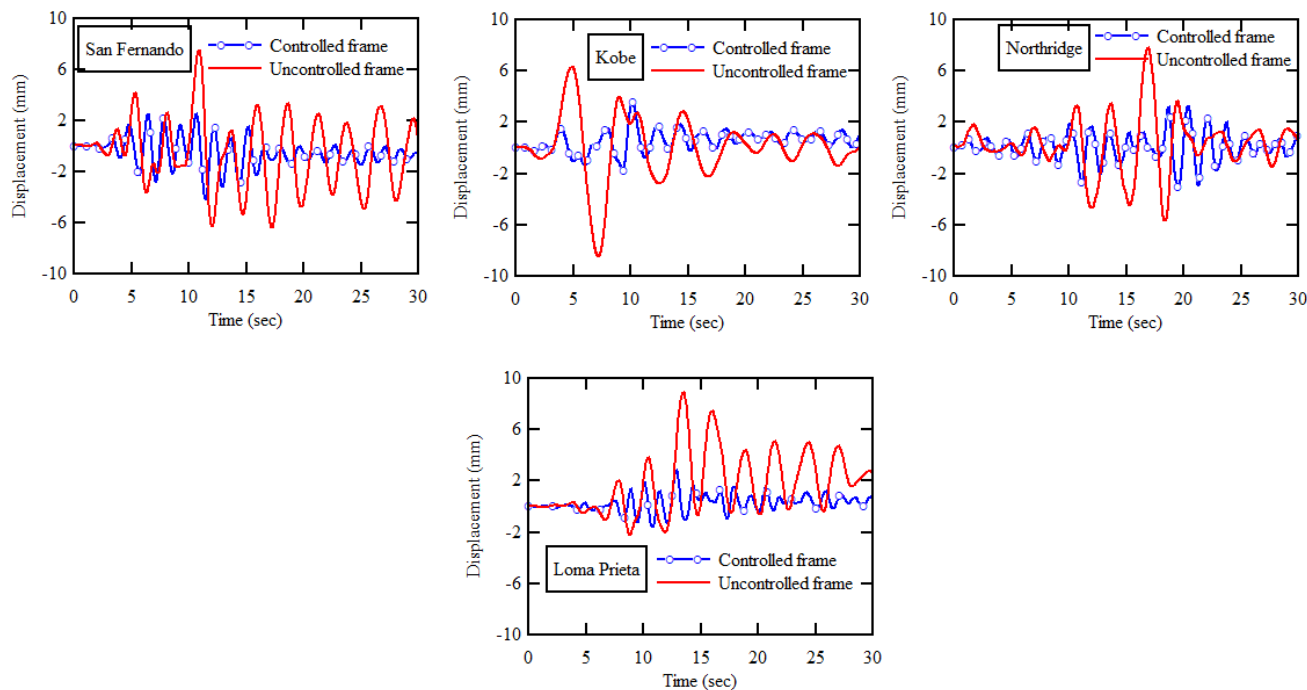
(ب)

شکل ۱۴ تغییر شکل و توزیع تنش در قاب فولادی مجهز به میراگر شیاردار به ازای جابجایی افقی 4 cm میراگر SMA (الف) و میراگر فولادی (ب)

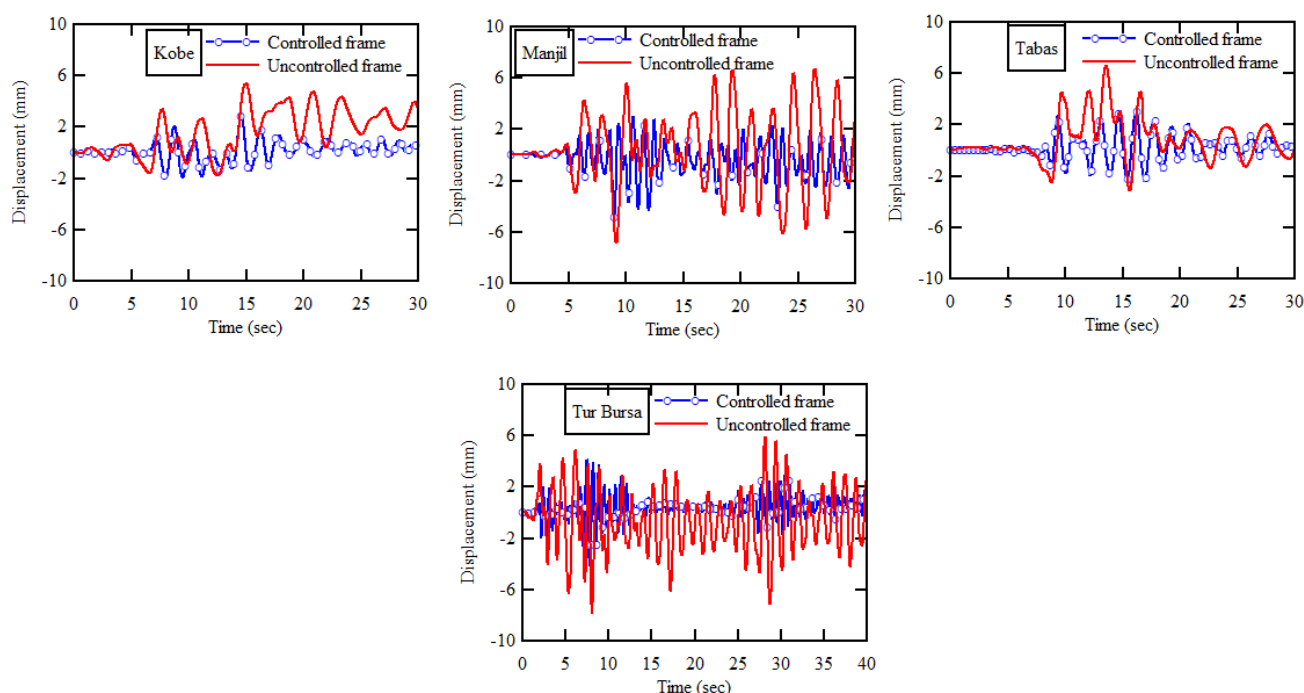
با استفاده از نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، در شکل ۱۵ مقایسه نیروی برش پایه و در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مقایسه جابجایی انتهای ستون برای قاب فولادی تحت بررسی در حضور میراگر SMA و در غیاب آن را تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک نشان داده شده است. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که در حالت کلی سازه‌های مجهز میراگر SMA نیروی برش پایه کمتری را نسبت به سازه‌های فولادی بدون میراگر متحمل می‌شوند که این نتیجه نشان دهنده عملکرد مطلوب میراگر تسلیمی شیاردار SMA ارائه شده در این تحقیق می‌باشد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که سازه‌های واقع در حوزه نزدیک گسل، مقدار نیروی بیشتری را نسبت به حالتی که سازه‌ها در حوزه دور واقع می‌شوند، تجربه نموده‌اند. تحت اثر شتاب‌نگاشت زلزله حوزه نزدیک سان‌فرناندو، استفاده از میراگر جدید ارائه شده باعث کاهش ۳۷ درصدی در حداکثر نیروی برش پایه می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ابتدای زلزله حوزه نزدیک، برش پایه به‌صورت ناگهانی به سازه وارد شده و پس از پایان پالس موجود در رکورد زلزله، برش پایه به شدت کاهش می‌یابد. ولی در زلزله حوزه دور به دلیل توزیع یکنواخت‌تر انرژی در طول زلزله، برش پایه در طول زمان زلزله به‌صورت رفت و برگشتی تغییر می‌کند و هر چند برش پایه حداکثر تحت اثر زلزله حوزه دور کم می‌باشد، ولی تعداد قله‌های تاریخچه زمانی برش پایه تحت اثر زلزله حوزه دور بیشتر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود عملکرد میراگر ارائه شده در کاهش جابجایی، در قاب فولادی مورد بررسی و تحت کلیه شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر، مناسب است. در جدول ۶ تأثیر میراگر SMA بر کاهش حداکثر دامنه قاب فولادی به ازای شتاب‌نگاشت‌های مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از میراگر SMA پیشنهادی به ازای شتاب‌نگاشت‌های مختلف تحت بررسی، حداکثر دامنه نوسانات را حداقل ۳۰ درصد و حداکثر ۶۷ درصد کاهش می‌دهد. با مقایسه نتایج بین قاب‌های مهار شده با میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی و قاب مهار نشده می‌توان اثر بخشی این نوع میراگرها را در کاهش پاسخ سازه و استهلاک انرژی ورودی ناشی از تحریک زمین، مشاهده نمود.



شکل ۱۵ تاریخچه زمانی برش پایه ایجاد شده در سازه تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و حوزه نزدیک گسل برای قاب فولادی تحت بررسی (الف) حوزه نزدیک گسل و (ب) حوزه دور از گسل



شکل ۱۶ تاریخچه زمانی برش پایه ایجاد شده در سازه تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک گسل برای قاب فولادی تحت بررسی در حضور میراگر SMA و در غیاب آن



شکل ۱۷ تاریخچه زمانی برش پایه ایجاد شده در سازه تحت اثر زلزله‌های حوزه دور از گسل برای قاب فولادی تحت بررسی در حضور میراگر SMA و در غیاب آن

جدول ۶ تأثیر میراگر SMA بر کاهش حداکثر دامنه قاب فولادی به ازای شتاب‌نگاشت‌های مختلف

شماره	حوزه	سال	نام زلزله	حداکثر جابجایی		درصد کاهش
				مهاربندی شده	مهاربندی نشده	
۱	نزدیک	۱۹۷۱	San Fernando	۷/۵۶	۲/۵۵	۶۶/۳
۲	نزدیک	۱۹۹۵	Kobe	۶/۳۲	۳/۵۷	۴۳/۵
۳	نزدیک	۱۹۹۴	Northridge	۷/۸۰	۳/۲۷	۵۸/۱
۴	نزدیک	۱۹۸۹	Loma Prieta	۸/۹۳	۲/۸۸	۶۷/۷
۵	دور	۱۹۹۵	Kobe	۵/۴۰	۲/۸۷	۴۳/۶
۶	دور	۱۹۹۰	Manjil	۶/۷۵	۳/۰۴	۵۴/۹
۷	دور	۱۹۷۸	Tabas	۶/۶۵	۳/۲۳	۵۱/۴
۸	دور	۱۸۵۵	Tur Bursa	۵/۹۲	۴/۱۲	۳۰/۴

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر عملکرد سیستم کنترل غیرفعال میراگرهای فلزی جاری شونده شیاردار از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با استفاده از روش عددی مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور بررسی عملکرد سیستم و اثر پارامترهای مختلف بر قابلیت جذب انرژی آن از روش تحلیل المان محدود غیرخطی در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد. خلاصه‌ای از نتایج تحقیق حاضر عبارت است از:

(۱) میراگر SMA نسبت به میراگر فولادی متناظر دارای استهلاک انرژی بیشتر و در شرایط یکسان می‌تواند باعث افزایش حدود ۵/۹ برابر می‌تواند جذب انرژی شود.

(۲) مشاهده می‌شود که بیشترین شکل‌پذیری مربوط به نمونه میراگرهای SMA بوده و برای میراگر با تعداد ۷ شیاردار ضریب شکل‌پذیری برابر ۵۶/۵۴ به دست می‌آید که در حدود ۲/۲ برابر نسبت به نمونه فولادی بیشتر می‌باشد.

۳) مقایسه مشخصه‌های عملکردی میراگر SMA ارائه شده با برخی از میراگرهای فلزی جاری شونده متداول نشان می‌دهد که میراگر SMA در حالت کلی مشخصه‌های عملکردی بسیار مناسبی نسبت به بسیاری از میراگرهای فلزی جاری شونده موجود دارد.

۴) نتایج امکان استفاده از میراگر SMA پیشنهادی در سازه‌ها به‌عنوان مستهلک‌کننده انرژی را مورد تأیید قرار می‌دهند. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده در چارچوب دامنه فرض‌های این مطالعه اعتبار داشته و تعمیم آن به حالت‌های کلی‌تر نیازمند بسط عمیق‌تر مطالعه مذکور است. بر این اساس، در ادامه تحقیق حاضر می‌توان با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، پارامترهای بهینه میراگر جدید ارائه شده را به منظور دستیابی به بهترین عملکرد لرزه‌ای تعیین نمود. همچنین، با استفاده از منحنی هیستریزیس میراگر ارائه شده می‌توان تأثیر این نوع میراگرها و نحوه استفاده از آنها را در قاب‌های فولادی با تعداد دهانه و طبقات مختلف مورد مطالعه قرار داد.

مراجع

- [1] Hochrainer, M.J., *Active Tuned Liquid Column Gas Damper in Structural Control, Dynamics of Civil Structures, Volume 2*. 2015, Springer. p. 467-473.
- [2] Rezaee, M. and V. Arab Maleki, *Passive Vibration Control of the Fluid Conveying Pipes using Dynamic Vibration Absorber*. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 2019. **51**(3): p. 111-120.
- [3] Omidi, E. and N. Mahmoodi, *Hybrid positive feedback control for active vibration attenuation of flexible structures*. 2015.
- [4] Nasrabadi, M., A.V. Sevbitov, V.A. Maleki, N. Akbar, and I. Javanshir, *Passive fluid-induced vibration control of viscoelastic cylinder using nonlinear energy sink*. Marine Structures, 2022. **81**: p. 103116.
- [5] Latour, M. and G. Rizzano, *Design of X-shaped double split tee joints accounting for moment–shear interaction*. Journal of Constructional Steel Research, 2015. **104**: p. 115-126.
- [6] Mori, C., S. Sorace, and G. Terenzi, *Seismic assessment and retrofit of two heritage-listed R/C elevated water storage tanks*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015. **77**: p. 123-136.
- [7] Saeedi, F., N. Shabakhty, and S.R. Mousavi, *Seismic assessment of steel frames with triangular-plate added damping and stiffness devices*. Journal of Constructional Steel Research, 2016. **125**: p. 15-25.
- [8] Zahrai, S.M., B.G. Khalili, and S.A. Mousavi, *Seismic behavior of steel frames with lightweight-low strength industrialized infill walls*. Earthquakes and Structures, 2015. **9**(6): p. 1273-1290.
- [9] Zhu, Q. and X. Lu. *A Novel Multilevel Energy Dissipative Device as an Alternative for Seismic Protection of Structures*. in *IABSE Symposium Report*. 2015. International Association for Bridge and Structural Engineering.
- [10] Balendra, T., C.H. Yu, and F.L. Lee, *An economical structural system for wind and earthquake loads*. Engineering Structures, 2001. **23**(5): p. 491-501.
- [11] Chan, R.W. and F. Albermani, *Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation*. Engineering Structures, 2008. **30**(4): p. 1058-1066.
- [12] Zahrai, S.M., S.A. Mousavi, and M. Saatcioglu, *Analytical study on seismic behavior of proposed hybrid tension-only braced frames*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2017. **26**(3): p. e1310.
- [13] Maleki, S. and S. Mahjoubi, *Infilled-pipe damper*. Journal of Constructional Steel Research, 2014. **98**: p. 45-58.
- [14] Lee, C.-H., J. Kim, D.-H. Kim, J. Ryu, and Y.K. Ju, *Numerical and experimental analysis of combined behavior of shear-type friction damper and non-uniform strip damper for multi-level seismic protection*. Engineering Structures, 2016. **114**: p. 75-92.
- [15] Mohammadi, R.K., A. Nasri, and A. Ghaffary, *TADAS dampers in very large deformations*. International Journal of Steel Structures, 2017. **17**(2): p. 515-524.
- [16] Downey, A., C. Theisen, H. Murphy, N. Anastasi, and S. Laflamme, *Cam-based passive variable friction device for structural control*. Engineering Structures, 2019. **188**: p. 430-439.
- [17] Azandariani, M.G., A.G. Azandariani, and H. Abdolmaleki, *Cyclic behavior of an energy dissipation system with steel dual-ring dampers (SDRDs)*. Journal of Constructional Steel Research, 2020. **172**: p. 106145.
- [18] Guo, W., C. Ma, Y. Yu, D. Bu, and C. Zeng, *Performance and optimum design of replaceable steel strips in an innovative metallic damper*. Engineering Structures, 2020. **205**: p. 110118.

- [19] Guo, W., X. Wang, Y. Yu, X. Chen, S. Li, W. Fang, C. Zeng, Y. Wang, and D. Bu, *Experimental study of a steel damper with X-shaped welded pipe halves*. Journal of Constructional Steel Research, 2020. **170**: p. 106087.
- [20] Hoseinzadeh, M., R. Pilafkan, and V.A. Maleki, *Size-dependent linear and nonlinear vibration of functionally graded CNT reinforced imperfect microplates submerged in fluid medium*. Ocean Engineering, 2023. **268**: p. 113257.
- [21] Pourreza, T., A. Alijani, V.A. Maleki, and A. Kazemi, *The effect of magnetic field on buckling and nonlinear vibrations of Graphene nanosheets based on nonlocal elasticity theory*. International Journal of Nano Dimension, 2022. **13**(1): p. 54-70.
- [22] Zhou, Z., E. Davoudi, and B. Vaferi, *Monitoring the effect of surface functionalization on the CO₂ capture by graphene oxide/methyl diethanolamine nanofluids*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021. **9**(5): p. 106202.
- [23] Fatholahi, M., A. Anvari, O.A. Akbari, F. Montazerifar, H. Ghaedamini, D. Toghraie, and S. Nouraei, *Numerical investigation of mixed convection of nanofluid flow in oblique rectangular microchannels with nanofluid jet injection*. The European Physical Journal Plus, 2021. **136**(10): p. 1062.
- [24] Altas, E., F. Khosravi, H. Gokkaya, V.A. Maleki, Y. Akinay, O. Ozdemir, O. Bayraktar, and H. Kandas, *Finite element simulation and experimental investigation on the effect of temperature on pseudoelastic behavior of perforated Ni-Ti shape memory alloy strips*. Smart Materials and Structures, 2022. **31**(2): p. 025031.
- [25] Maleki, V.A. and N. Mohammadi, *Buckling analysis of cracked functionally graded material column with piezoelectric patches*. Smart Materials and Structures, 2017. **26**(3): p. 035031.
- [26] Maleki, F.K., M.K. Nasution, M.S. Gok, and V.A. Maleki, *An experimental investigation on mechanical properties of Fe₂O₃ microparticles reinforced polypropylene*. Journal of Materials Research and Technology, 2022. **16**: p. 229-237.
- [27] Dolce, M. and D. Cardone, *Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension*. International journal of mechanical sciences, 2001. **43**(11): p. 2657-2677.
- [28] Seyedkazemi, A., m. esmaeili, s. etkfar ardabili, and m. hoseinali beygi, *The Effect of SMA Damper on Energy Dissipation and Eduction of Vibration Amplitude of Multi-Story Steel Frames*. Analysis of Structure and Earthquake, 2017. **13**(2): p. 11-23.
- [29] Mirtaeheri, M., M. rajabi, h. mirzaeefard, and M. Nazerian, *Study Of structural Behaviour And Residual Drift Of Concrete frames Reinforced With Shape Memory Alloy Rebar*. Journal of Structural and Construction Engineering, 2019. **6**(Issue 3): p. 121-136.
- [30] Pouraminian, M., S.V. Hashemi, A. Sadeghi, and S. Pourbakhshian, *Probabilistic Assessment the Seismic Collapse Capacity of Buckling-Restrained Braced Frames Equipped with Shape Memory Alloys*. Journal of Structural and Construction Engineering, 2021. **8**(Special Issue 2): p. 129-149.
- [31] Hashemi, S.V., M. Pouraminian, A. Sadeghi, and S. Pourbakhshian, *Seismic Performance of Buckling Restrained Braced Frames with Shape Memory Alloy Subjected to Mainshock-Aftershock Near-Fault Ground Motion*. Modares Civil Engineering journal, 2021. **21**(4): p. 35-50.
- [32] Mirzai, N.M., I. Mansouri, J. Tezcan, P.O. Awoyera, and J.W. Hu. *Estimating optimum parameters of a new SMA damper under different earthquake ground motions*. in *Structures*. 2021. Elsevier.
- [33] Gur, S., K. Roy, and P. Singh, *Seismic performance assessment of adjacent building structures connected with superelastic shape memory alloy damper and comparison with yield damper*. Structural Control and Health Monitoring, 2022. **29**(5): p. e2926.
- [34] Chen, J., W. Wang, and C. Fang, *Manufacturing, testing and simulation of novel SMA-based variable friction dampers with enhanced deformability*. Journal of Building Engineering, 2022. **45**: p. 103513.
- [35] Qiu, C., J. Liu, and X. Du, *Cyclic behavior of SMA slip friction damper*. Engineering Structures, 2022. **250**: p. 113407.
- [36] Dizaji, F.S. *A novel passive structural control device using high-performance NiTiHfPd material*. in *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems XVI*. 2022. SPIE.
- [37] Chen, Z.-P., S. Zhu, H. Yu, and B. Wang, *Development of novel SMA-based D-type self-centering eccentrically braced frames*. Engineering Structures, 2022. **260**: p. 114228.
- [38] Wang, B. and S. Zhu, *Cyclic behavior of iron-based shape memory alloy bars for high-performance seismic devices*. Engineering Structures, 2022. **252**: p. 113588.
- [39] Billah, A.M., J. Rahman, and Q. Zhang. *Shape memory alloys (SMAs) for resilient bridges: A state-of-the-art review*. in *Structures*. 2022. Elsevier.
- [40] Arvind, R. and M.H. Santhi, *A State of Art Review on Hybrid Passive Energy Dissipating Devices*. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2022: p. 1-24.

- [41] Fang, C., *SMA for infrastructures in seismic zones: A critical review of latest trends and future needs*. Journal of Building Engineering, 2022: p. 104918.
- [42] Nguyen, P.-C., T.-T. Tran, and T. Nghia-Nguyen, *Nonlinear time-history earthquake analysis for steel frames*. Heliyon, 2021. **7**(8): p. e06832.
- [43] Mohebkah, A. and M.G. Azandariani, *Lateral-torsional buckling resistance of unstiffened slender-web plate girders under moment gradient*. Thin-Walled Structures, 2016. **102**: p. 215-221.
- [44] Kim, Y.-J., C.-H. Lee, J.-H. Kim, and J.H. Lim, *Numerical modeling of shape memory alloy plates considering tension/compression asymmetry and its verification under pure bending*. International Journal of Solids and Structures, 2018. **136**: p. 77-88.
- [45] Han, Y.L., Q. Li, A.Q. Li, A. Leung, and P.H. Lin, *Structural vibration control by shape memory alloy damper*. Earthquake engineering & structural dynamics, 2003. **32**(3): p. 483-494.
- [46] Ho, H.V., E. Choi, W.J. Kim, and J. Choi, *Evaluating the Symmetric Behavior of Single Superelastic SMA Rings with Circular and Elliptic Shapes*. International Journal of Steel Structures, 2022. **22**(5): p. 1283-1305.
- [47] Rousta, A.M. and S.M. Zahrai, *Parametric study of a proposed hybrid damping system: KE+ VLB in Chevron braced frames I*. Acta Tech, 2018. **63**: p. 1-16.
- [48] Maleki, S. and S. Mahjoubi, *Dual-pipe damper*. Journal of Constructional Steel Research, 2013. **85**: p. 81-91.
- [49] Tsai, K.-C., H.-W. Chen, C.-P. Hong, and Y.-F. Su, *Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction*. Earthquake spectra, 1993. **9**(3): p. 505-528.
- [50] Maleki, S. and S. Bagheri, *Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study*. Journal of Constructional Steel Research, 2010. **66**(8-9): p. 1088-1095.
- [51] Li, Z., F. Albermani, R.W. Chan, and S. Kitipornchai, *Pinching hysteretic response of yielding shear panel device*. Engineering structures, 2011. **33**(3): p. 993-1000.
- [52] Jalali, A. and A. Taghizadeh. *Experimental study of the effects of using ultra-high strength reinforcing rebar and UHPFRC on cyclic behavior of reinforced concrete beams*. in Structures. 2022. Elsevier.