

# Improving the Seismic Performance of the Butterfly Slit Damper Using a Nitinol Shape Memory Alloy in the Diagonal CBF Brace

Farzad vafadar

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, zanzan Branch, Islamic Azad University, zanzan, Iran  
Vahid Broujerdian\*

School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Ali ghamari

Department of Civil Engineering, Darreh Shahr Branch, Islamic Azad University, Darreh Shahr, Iran

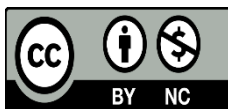
*DOI:* 10.30495/CIVIL.2024.709661

## Keywords:

Shape memory alloy,  
nitinol,  
energy absorption,  
butterfly slit damper,  
reversibility

## Abstract

Reinforcement of structures is not cost-effective despite plastic deformation in the main members. Therefore, this defect can be solved by adding dampers. The function of the damper is in such a way that before the bracing member, it surrenders and prevents the creation of a plastic joint in it. Although the existence of a damper improves the seismic behavior, it does not affect the reversibility of the structure, and their repair after an earthquake is sometimes accompanied by problems due to permanent changes in the entire structure. Shape memory alloys (SMA) as smart materials compensate for many shortcomings of current energy consuming systems. The effect of shape memory system, elastic behavior, inherent damping and high strength are the most important characteristics of these alloys. In this research, a new type of slit damper (under the title of butterfly slit damper) has been analyzed in four groups with different dimensional ratios  $h1/h$  and  $b1/b$ , with and without SMA, by adding bar-type SMA and placing it in such a way that in loads Compressive and tensile force created in the brace, there is always a tensile force in a number of SMAs. In the proposed combination, the diagonal element under the effect of tensile and compressive force causes cutting in the slit damper and tension in the SMA. The results showed that the use of SMA, in addition to increasing the hardness and resistance of the system, creates the ability to accept and eliminate the phenomenon of buckling of the brace under pressure.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

## بهبود عملکرد لرزه‌ای میراگر شکافدار پروانه‌ای با استفاده از آلباژ حافظه‌دار شکلی نایتینول در مهاربند همگرای قطری

فرزاد وفادار

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

وحید بروجردیان\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

علی قمری

گروه مهندسی عمران، واحد دره شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، دره شهر، ایران

broujerdian@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۰ شهریور ۱۴۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۲

### چکیده

مقاوم‌سازی سازه‌ها با وجود تغییرشکل پلاستیک در اعضای اصلی، مقرون به صرفه نمی‌باشد. لذا با افزودن میراگرها می‌توان این نقیصه را مرتفع نمود. عملکرد میراگر به نحوی است که قبل از عضو مهاربندی، تسلیم و مانع ایجاد مفصل پلاستیک در آن می‌شود. هرچند وجود میراگر باعث بهبود رفتار لرزه‌ای می‌گردد اما تأثیری در برگشت پذیری سازه ندارد و تعمیر آنها پس از زلزله به علت وجود تغییرشکل‌های ماندگار در کل سازه، گاهاً با مشکل همراه است. آلباژهای حافظه‌دار شکلی ( $SMA^1$ ) بعنوان مواد هوشمند بسیاری از نواقص سیستم‌های مستهلک کننده انرژی فعلی را جبران می‌نمایند. اثر سیستم حافظه‌دار شکلی، رفتارکشسان، میرایی ذاتی و مقاومت بالا از مهمترین خصوصیات این آلباژها هستند. در این تحقیق نوع جدیدی از میراگر شکافدار (تحت عنوان میراگر شکافدار پروانه‌ای) در چهار گروه با نسبت‌های مختلف ابعادی  $h_1/h$  و  $b_1/b$ ، با و بدون SMA آنالیز شده است که با افزودن SMA از نوع میله‌ای و جاگذاری آن به طوری که در بارهای فشاری و کششی ایجاد شده در مهاربند، همواره در تعدادی از SMA ها نیروی کششی در جریان باشد. در ترکیب پیشنهادی، المان قطری تحت اثر نیروی کششی و فشاری، باعث ایجاد برش در میراگر شکافدار و ایجاد کشش در SMA می‌شود. نتایج نشان داد، بکارگیری SMA علاوه بر افزایش سختی و مقاومت سیستم، باعث ایجاد قابلیت برگشت‌پذیری و حذف پدیده کمانش مهاربند در فشار می‌شود.

کلید واژگان: آلباژ حافظه‌دار شکلی، نایتینول، جذب انرژی، میراگر شکافدار، قابلیت برگشت‌پذیری.

<sup>1</sup> Shape memory alloy

## ۱- مقدمه

جان، مستهلک می‌شود و ظرفیت استهلاک انرژی‌های بزرگی را در محدوده‌ی ۶/۹ تا ۱۰/۳ کیلوژول تامین نموده است [۳-۵].

افزودن تعداد میراگرها در طبقات تا یک حد معین، در بهبود پاسخ سازه موثر بوده اما افزودن بیش از آن حد، تاثیری در بهبود پاسخ لرزه‌ای سازه ندارد. قاب‌های مجهز به SMA می‌توانند حدود ۱۶ الی ۶۰ درصد جابجایی طبقات را کاهش دهند و با افزایش تعداد طبقات، تفاوت رفتار بین SMA و فولاد معمولی کمتر می‌شود در نتیجه بادبندهای SMA برای قاب‌های با تعداد طبقات کمتر، تاثیر مثبت بیشتری دارد [۶-۷].

در مقایسه میراگر با شکاف معمولی و میراگر با شکاف غیر یکنواخت (در وسط ارتفاع نوار، مساحت مقطع کاهش یافته)، نتایج آزمایشات نشان داد ظرفیت مقاومت در نمونه پیشنهادی به مقدار قابل توجهی نسبت به شکاف معمولی افزایش یافته و شکل پذیری نیز بهبود یافته است و توزیع تنش بیشتری در کل ارتفاع نوار ایجاد شده است. اضافه کردن میله‌های SMA به میراگر شکافدار باعث کاهش در ماکزیمم و همچنین تغییر شکل پسماند می‌شود. استفاده از میراگر شکافدار در پای ستون باعث انعطاف‌پذیری ستون و افزایش مقاومت، سختی، شکل پذیری می‌گردد و همچنین رفتار هیستریزیک پایدار از خود نشان می‌دهد. مطالعه آزمایشگاهی بر روی میراگر با شکاف بیضی عملکرد بهتری از نظر ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و جذب انرژی و به ترتیب با میانگین افزایش ۷۶/۷۳، ۹۱/۱۵ و ۴۹/۱۲۹ درصدی نسبت به میراگرهای با شکاف ثابت از خود نشان دادند. در مطالعات آزمایشگاهی و عددی، طول بیشتری از نوارهای میراگر با شکاف بیضی شکل نسبت به میراگرهای با عرض یکنواخت در اتلاف انرژی و تحمل نیرو و تنش شرکت داشتند [۸-۱۱].

میراگر ترکیب شده با SMA میراگرهای غیرفعال هستند که مهمترین ویژگی آنها حافظه داری و اثر فوق الاستیک است و به طور قابل توجهی جابجایی در سازه تحت زلزله را کاهش می‌دهند. در بررسی دو سازه اسکلت فلزی ۴ و ۱۲ طبقه در موارد کنترل شده و کنترل نشده از نظر عمر، نتایج نشان داد که این میراگرها می‌توانند نسبت‌های جابجایی بین طبقه و جابجایی‌های باقیمانده را کاهش دهند. سازه ۴ طبقه تحت شتاب لرزه‌ای سطح طراحی به میزان ۳۱ و ۶۳ درصد به ترتیب این کاهش برای سازه ۱۲ طبقه به ترتیب ۳۹ درصد و ۸۳ درصد بود. همچنین برای ۴ طبقه و ۱۲ طبقه به ترتیب ۵۳ درصد و ۹۰ درصد کاهش می‌دهد. در نهایت نتایج نشان داد که هزینه کل، با افزایش ظرفیت میراگر ترکیب شده با SMA کاهش می‌یابد و تا یک ظرفیت خاص، که فراتر از آن میراگرها نقشی در کاهش کل هزینه‌های چرخه عمر ندارند [۱۲].

تحریک لرزه‌ای می‌تواند باعث آزاد شدن انرژی قابل توجهی در سازه ها شود. با استفاده از دستگاه‌های خاص می‌توان این انرژی را بدون تغییر شکل قابل توجهی در اعضای سازه مصرف و اتلاف کرد. به همین

بهبود رفتار ساختمان‌ها از طریق کاهش اثر بارهای جانبی از موضوعات مطرح و نوین در علم مهندسی سازه است که مبتنی بر کاهش انرژی وارده بر سازه از طریق استهلاک آن می‌باشد. استفاده از سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی، در ساختمان‌ها باعث می‌شود تا اعضای سازه‌ای همچنان در مرحله ارتجاعی باقی بمانند و در نتیجه از بروز تخریب جلوگیری نمایند جاذب‌های انرژی (میراگرها) به منظور کاستن از پاسخ دینامیکی سازه در برابر بار زلزله و باد استفاده می‌شود. عملکرد این وسایل موجب می‌گردد که انرژی در یافتی سایر اعضای سازه‌ای کاهش یافته و در نتیجه تغییر شکل زیادی در آنها ایجاد نشود. میراگرهای فلزی که کاربردهای مهندسی زیادی دارند باید در وهله اول قابلیت جذب انرژی زیاد تحت یک رفتار هیستریزیک را داشته باشند و دوم رفتار سازه ای آنها تحت یک مدل ریاضی مناسب قابل برآورد و پیش بینی دقیق باشد. نمونه‌ای از این وسایل، میراگر شکافدار فلزی هستند قابلیت جذب انرژی بالای این میراگر و همچنین راحتی ساخت و نصب آنها باعث شده که استفاده از آنها مورد توجه قرار گیرد. میراگر فلزی شکافدار ابزاری قابل تعویض و تعمیر می‌باشد که از یک مقطع استاندارد با تعدادی شکاف در جان آن ساخته شده است. نظر به اینکه فولاد از ظرفیت اتلاف انرژی بالایی برخوردار می‌باشد اما با ورود به ناحیه غیر خطی، سازه را با جابجایی‌های ماندگار مواجه می‌سازد. بنابراین برای جبران این ضعف ایده‌های مختلفی با رویکرد ترکیب فولاد و آلیاژهای هوشمند SMA وجود دارد. رفتار ایده‌آل آلیاژهای هوشمند SMA منجر به استفاده‌های مختلف در رشته مهندسی عمران (از جمله اتصالات پیچ و مهره‌ای، ترکیب با اعضای بتنی، مهاربندها، جداسازهای لرزه‌ای و غیره) شده است. دو خاصیت ویژه این آلیاژها، خاصیت فرا ارتجاعی و خاصیت حافظه شکلی، قادر به تحمل تبدیل فازهای معکوس میکرو مکانیکی با تغییر کریستالی اجزای آن می‌باشند. همچنین مقاومت بالای خستگی و خوردگی، قابلیت استهلاک انرژی بالا، قابلیت خود بازگشتی و پایداری رفتار تنش کرنش و ... از دیگر ویژگی‌های این مواد می‌باشند.

## ۲- تاریخچه تحقیقات پیشین

میراگر شکافدار فلزی، حلقه پایدار هیستریزیک دارد و پس از تسلیم، تمایل به سخت شدگی دارد و به تدریج باعث افزایش سختی می‌شود و همچنین طبق فرضیات در نظر گرفته شده این نوع میراگر فقط به وسیله تغییر شکل برشی، ۴۸٪ انرژی زلزله را جذب نموده است [۱]. استفاده از میراگر شکافدار فولادی در سازه‌های بتنی و مناطق با لرزه خیزی کم باعث افزایش شکل‌پذیری و همچنین استهلاک خوب انرژی می‌گردد [۲].

استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی باعث افزایش ضریب شکل‌پذیری سازه می‌شود این افزایش برای ساختمان‌های مرتفع بیشتر است. در میراگر شکافدار فلزی، انرژی ایجاد شده از طریق تسلیم خمشی اعضای

جابجایی ماندگار به مقدار قابل توجهی کمتر از قاب‌های BRB می‌باشد همچنین احتمال خرابی سازه‌ای که از مهارندهای SMA استفاده کرده اند، به مقدار قابل توجهی کمتر خواهد بود [۱۸].

در مقایسه عملکرد لرزه‌ای سیستم مهاربند همگرای قطری دارای میل مهارهای SMA با سیستم قاب خمشی، نتایج نشان داد در مهارندهایی که در آن از میل مهارهای SMA استفاده شده است، جابجایی ماندگار به شکل قابل توجهی کمتر از سیستم قاب خمشی می‌باشد [۱۹].

## ۲-۱. جمع‌بندی تحقیقات پیشین، بررسی خلاء ها و توجیه ضرورت انجام پژوهش

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که میراگرهای شکافدار عملکرد لرزه ای مطلوب در مطالعات آزمایشگاهی و عددی دارند. از طرفی استفاده از SMA به منظور بهبود رفتار سازه از جنبه بازگشت پذیری در مطالعات عددی آزمایشگاهی تصدیق شده است. استفاده از میراگر و SMA به تنهایی دارای مزایا و معایب قابل توجهی هستند لذا در این تحقیق از ترکیب آنها جهت بهره‌گیری از مزایای هر دو و مرتفع نمودن معایب آنها استفاده شده است.

در این پژوهش سیستم جدید مهاربند قطری دارای میراگر شکافدار ترکیب شده با آلیاژهای هوشمند SMA مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. در ترکیب پیشنهادی، المان قطری تحت اثر نیروی کششی و فشاری، باعث ایجاد برش در میراگر شکافدار و ایجاد کشش در SMA می‌شود. لذا با ایجاد برش در میراگر باعث تسلیم آن و افزایش قابلیت جذب انرژی سیستم می‌شود و هدف از بکارگیری SMA علاوه بر افزایش سختی و مقاومت سیستم، ایجاد قابلیت برگشت‌پذیری برای سیستم است که نوآوری این پژوهش نیز تلقی می‌گردد.

با توجه به استفاده از میراگرهای فولادی جاری شونده در اتصالات قاب خمشی و بادبندی، می‌توان تأثیر کاربرد آنها را در کاهش آسیب‌های وارده به اعضای اصلی سازه‌ای مانند تیر و ستون را مورد بررسی قرارداد. از طرف دیگر خصوصیات خود این میراگرها نیز تأثیر مهمی در پاسخ لرزه‌ای و کنترل سازه در برابر نیروهای وارده دارد. یکی از خصوصیات اصلی این میراگرها، پارامترهای هندسی آنها است و تغییر پارامترهای هندسی می‌تواند در میزان جذب انرژی توسط میراگر بسیار مؤثر باشد لذا یکی از اهداف اصلی تحقیق حاضر، بررسی تأثیر پارامترهای هندسی میراگرهای فلزی جاری شونده (مانند شکل شکاف ها، ابعاد و اندازه آنها و ...) برای دستیابی به عملکرد لرزه‌ای بهتر آنها و سپس در ترکیب با رشته‌های SMA می‌باشد. در این پژوهش در ادامه به بررسی تأثیر میراگر شکافدار بر روی رفتار بادبند و همچنین بررسی کاربرد SMA بر روی قاب پرداخته می‌شود.

## ۳- مدل‌سازی اجزای محدود و صحت‌سنجی

دلیل آسیب‌های سازه‌ای به حداقل می‌رسد، از تلفات جانی در هنگام زلزله جلوگیری می‌شود و عمر مفید سازه‌ها افزایش می‌یابد. در طول پنج دهه گذشته، به طور گسترده‌ای پذیرفته شده است که میراگرهای تسلیمی فولادی یکی از بهترین دستگاه‌های اتلاف انرژی هستند. بیان شده است که رفتار هیستریزیک میراگر تسلیم فولاد بسته به هندسه آنها می‌تواند کمی متفاوت باشد. از نقطه نظر عملی برای بهبود ایمنی لرزه‌ای سازه‌های جدید و موجود مناسب هستند. میراگرهای تسلیمی فولادی را از نظر شکل می‌توان به میراگرهای تشکیل شده از صفحات فولادی، لوله، منحنی و شکافدار تقسیم کرد. رایج‌ترین استفاده از ورق های فولادی در میراگرهایی از قبیل ADAS و TADAS و میراگرهای لوله‌ای در قاب‌های مهاربندی است، در حالی که میراگرهای U شکل، J و S شکل بیشتر در قاب‌هایی با مهاربندی شورون دیده می‌شوند. میراگرهای فولادی دارای انحناء، با زاویه ۶۰ درجه در قاب فولادی مهاربندی شده، بهترین اتلاف انرژی را داشته و استحکام قاب را بالا می‌برند [۱۳].

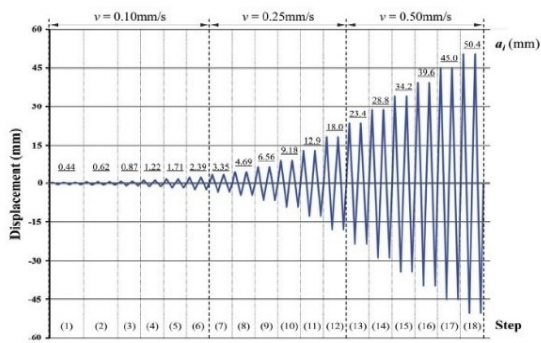
نتایج بررسی اثرات تعداد ردیف نوارها و بهینه سازی نسبت طول به عرض نشان داد که با کاهش نسبت طول به عرض نوارها ظرفیت نیروی برشی میراگرها افزایش می‌یابد اما جابجایی نسبتاً بدون تغییر باقی می‌ماند همچنین از لحاظ جذب انرژی، میراگرهای با دو ردیف نوار، رفتار نسبتاً برشی و یک ردیف نیز رفتار نسبتاً خمشی دارند [۱۴].

میراگرهای شکافدار با شکل نوارهای یکنواخت یا غیر یکنواخت وسیله‌ای مناسبی جهت اتلاف انرژی با انعطاف‌پذیری قابل قبول هستند و به طور گسترده‌ای در سال‌های اخیر برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها استفاده می‌شود. و باعث می‌شود که ظرفیت کم چرخه خستگی و اتلاف انرژی میراگرهای شکافدار می‌تواند به طور قابل توجهی بهبود یابد [۱۵].

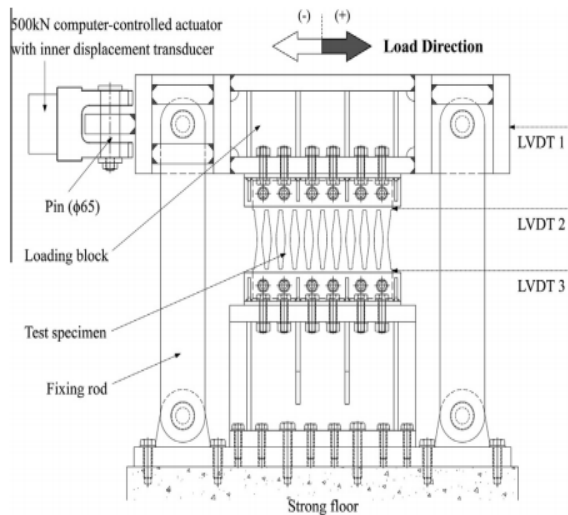
استفاده از میراگر ترکیب شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در قاب‌های فولادی با مهاربند زانویی باعث افزایش نیروی متحمل توسط المان مهاربند و همچنین کاهش تغییر شکل پسماند و افزایش استهلاک انرژی زلزله می‌گردد [۱۶].

در آلیاژهای حافظه دار شکلی، با افزایش دما، میزان مقاومت آلیاژ افزایش می‌یابد اما تأثیر چندانی روی سختی آن نمی‌گذارد. و میزان شتاب بالاترین نقطه سازه را افزایش می‌دهد ولی سایر پاسخ‌های سازه مانند جداکتر جابجایی نسبی و حداکثر کرنش SMA کاهش می‌یابد [۱۷].

در مقایسه عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربند همگرا (ترکیب شده با SMA) با قاب‌های مهاربند کمانش تاب (BRB)، نتایج نشان داد که



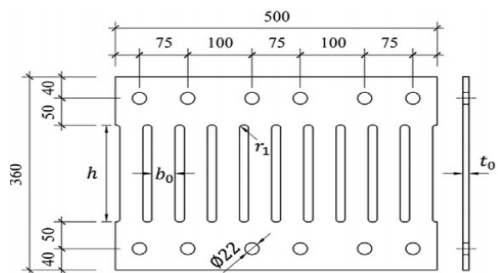
شکل ۲- پروتکل بارگذاری [۲۱].



شکل ۳- شماتیک نحوی آزمایش [۲۱].

در این پژوهش مدل‌سازی با استفاده از نرم افزار آباکوس ۱-۶،۱۸ انجام گرفت [۲۰]. با توجه به شکل‌پذیری زیاد مصالح و با فرض ثابت گرفتن حجم مصالح در تغییر شکل‌های زیاد در ساخت مدل از المان سه بعدی S4R چهار گره‌ای با فرمولاسیون هیبریدی و با متد انتگرالگیری کاهش یافته استفاده شده است. تحلیل به روش General static انجام می‌شود، اثرات غیرخطی هندسی و رفتار غیرخطی مربوط به مصالح نیز در محاسبات لحاظ می‌شوند. برای شبیه‌سازی بارگذاری تحت کنترل جابجایی به انتهای مقطع مهاربند اعمال می‌گردد، این جابجایی به صورت خطی و تدریجی به مدل وارد می‌شود.

برای اطمینان از صحت تحلیل‌های انجام شده باید یک نمونه آزمایشگاهی معتبر مدل‌سازی شده تا از این طریق نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیل مقایسه شوند و از درستی فرضیات مدل‌سازی اطمینان حاصل شود. برای انجام این کار با استفاده از نتایج آزمایشگاهی لی و همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۵ که مطالعه‌ای را بر روی میراگرهای شکاف دار تحت بارگذاری سیکلیک انجام دادند [۲۱]. مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام شد. در این تحقیق با مدل‌سازی نمونه PSD در تحقیق لی و همکاران که جزئیات آن در شکل ۱ و جدول ۱ آورده شده است، صحت مدل‌سازی مورد تایید قرار می‌گیرد. در این تحقیق مورد اشاره شرایط آزمایشگاهی تحت بارگذاری استاتیکی رفت و برگشتی مطابق پروتکل بارگذاری شکل ۲ قرار گرفته است که در حین بارگذاری با قرائت میزان نیروی وارده در برابر جابجایی نمودار نیرو-تغییر مکان آن ترسیم گردید و نیز نتایج حاکی از مطابقت صحیح مدل‌سازی در نرم افزار آباکوس دارد.



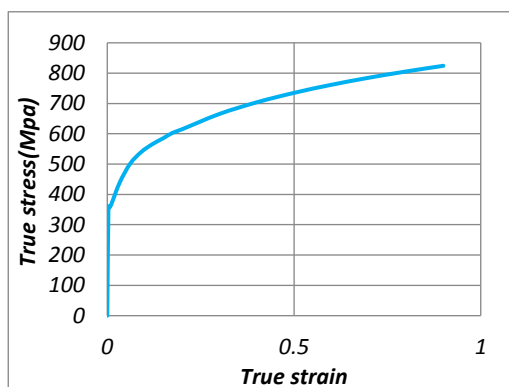
شکل ۱- شماتیک هندسی میراگر شکاف دار در پژوهش آزمایشگاهی (Chang et al) [۲۱].

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل های آزمایشگاهی (Chang-Hwan Lee et al) [۲۱].

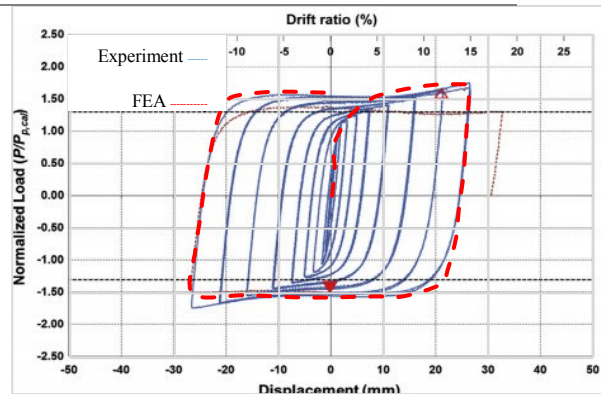
Specimen	h (mm)	$b_o$ (mm)	$b_o^*$ (mm)	$b_1$ (mm)	$t_o$ (mm)	$t_1$ (mm)	$r_1$ (mm)	$r_2$ (mm)	$r_3$ (mm)	$h/b_1$	n
PSD-5	۱۸۰	۳۶،۰	-	-	۱۰	-	۵	-	-	۵	۱۰
DSD-5	۱۸۰	۱۸،۰	-	۳۶	۱۰	-	۵	۱۰۰	۱۰۰	۵	۱۰
DSD-6	۱۸۰	۱۵،۰	-	۳۰	۱۰	-	۵	۱۰۰	۱۰۰	۶	۱۲
TSD-5	۱۸۰	۱۸،۰	۱۹	۳۶	۱۰	-	۵	۱۰۰	-	۵	۱۰
HSD-5 <sup>b</sup>	۱۸۰	۱۹،۸	۲۱	۳۶	۱۰	۱۷	۵	۱۰۰	-	۵	۶
HSD-6	۱۸۰	۱۶،۵	۱۷،۳	۳۰	۱۰	۱۷	۵	۱۰۰	-	۶	۸

که تغییر شکل از مقدار کرنش مذکور بیشتر شود، دچار تغییر شکل های ماندگار می شوند (فاز آستنیت). حال در صورتی که نیاز به بازگشت به حالت اولیه باشد با حرارت دادن می توان فاز آستنیت را به فاز مارتنزیت تبدیل کرد. در واقع تبدیل مارتنزیت به آستنیت یک نوع تغییر مکانیکی است و تغییر آستنیت به مارتنزیت یک تغییر ترمودینامیکی است. یکی از پرکاربردترین آلیاژهای حافظه دار شکلی ترکیبی از نیکل و تیتانیوم (نایتینول) است. که خواصی همچون قابلیت جذب انرژی بالا، مقاومت زیاد در برابر خوردگی و تحمل چرخه های متعدد بارگذاری و باربرداری را خواهد داشت.

آلیاژهای حافظه دار شکلی (فلز هوشمند، فلز حافظه دار، آلیاژ حافظه دار، سیم عضلانی، آلیاژ هوشمند) وقتی در معرض حرارت قرار می گیرند می توانند به شکل یا اندازه از قبل تعریف شده برگردند. به این معنی که می توانند به صورت پلاستیکی در برخی دماهای نسبتا پایین تغییر شکل داده و با قرار گرفتن در دماهای بالاتر به شکل اصلی خود بازگردند. گفته می شود که حافظه شکلی موجود در این نوع از SMAها یک طرفه است. در حالی که آنهایی که تحت تغییر شکل قرار می گیرند، پس از احیاء حافظه ی دوطرفه دارند. تعریف مشخصات آلیاژ SMA در جدول ۲ و فازهای دیاگرامی و تبدیلات دمایی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵- نمودار رابطه تنش - کرنش واقعی برای مدل فولاد



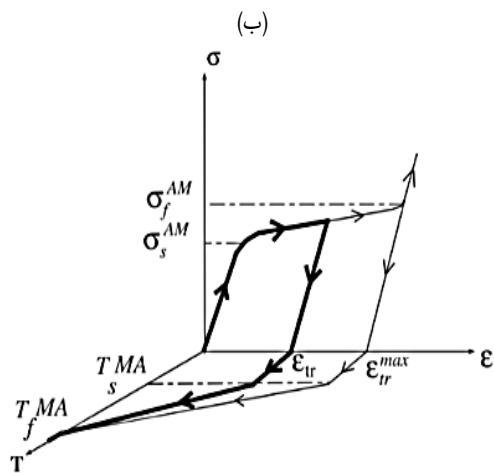
شکل ۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزاء محدود [۲۱].

همانطور که از شکل ۴ مشخص است نتایج اجزای محدود منطبق بر نتایج آزمایشگاهی بوده که نشان دهنده صحت مدل سازی می باشد. لازم به ذکر است با توجه به حجم بالای نتایج و نقاط در نمودار تنها سیکل انتهایی بر نتایج آزمایشگاهی جانمایی گردید.

#### ۴- معرفی مشخصات فولاد و آلیاژ حافظه دار شکلی (نایتینول) در این پژوهش

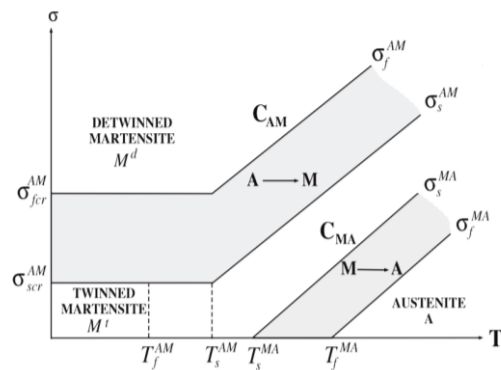
در ناحیه الاستیک خطی مدول الاستیسیته فولاد برابر  $200\text{ Gpa}$  و ضریب پواسون برابر ۰،۳ در نظر گرفته می شود. نوع مصالح در قسمت تعریف خواص مواد در نرم افزار و در بخش الاستیک ایزوتروپیک فرض می شود، برای قسمت غیرخطی رفتار ماده در مدل ها از رابطه تنش-کرنش آزمایشگاهی هایگو<sup>۳</sup> مطابق شکل ۵ استفاده می شود. سخت شدگی نیز از نوع ایزوتروپیک گرفته می شود.

آلیاژهای حافظه دار شکلی نوعی آلیاژ هستند که توانایی بازگشت به شکل و اندازه اصلی (ابتدایی) خود را هنگامی که در معرض فرایند بازیابی بین دو فاز مختلف بر اثر تغییر دما قرار می گیرند، دارند. آلیاژهای حافظه دار در صورتی که تا کرنش برگشت پذیرشان بارگذاری نگردند، دارای خاصیت فوق ارتجاعی هستند (فاز مارتنزیت). اما زمانی

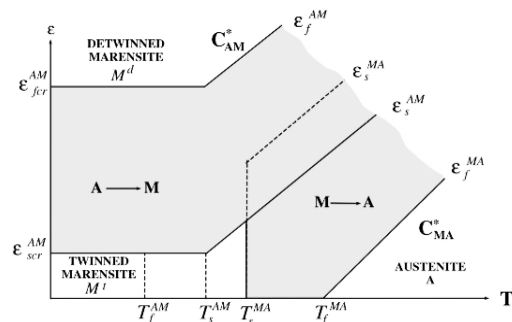


(ب)

شکل ۶- الف فازهای دیاگرام SMA (ب) نمودار فازهای اصلاح شده (ج) تبدیلات دمایی در SMA [۲۲]



(الف)



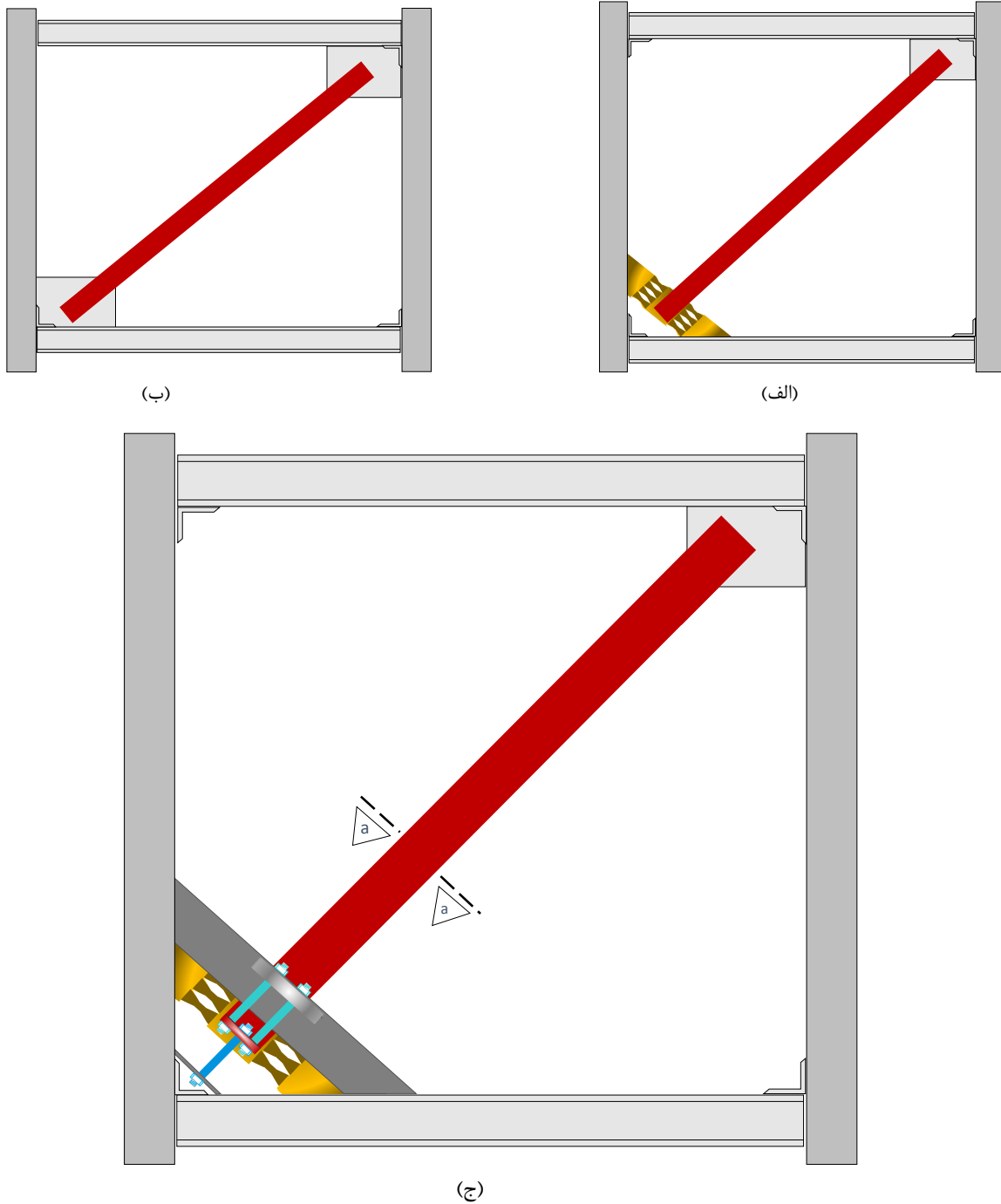
جدول ۲- خواص مصالح SMA (Jaber et al) [۲۲].

$E_M (Gpa)$	$E_A (Gpa)$	$\sigma_{MS} (Mpa)$	$\sigma_{Mf} (Mpa)$	$\sigma_{AS} (Mpa)$	$\sigma_{Af} (Mpa)$	$\epsilon_t$	$\nu_M = \nu_A$
۷۳/۲	۷۳/۲	۳۷۱	۶۱۳/۳	۵۴۸	۳۰۵/۷	۱/۰.۶۶	۰/۳

صورت وجود بار کششی در مهاربند، SMA های ۱ و ۲ به حالت کشش در می آیند (که با رنگ آبی نشان داده شده است) و عبارتی فعال می گردند همچنین در صورت وجود بار فشاری در مهاربند، SMA های ۳ و ۴ و ۵ و ۶ به حالت کشش در می آیند (که با رنگ سبز نشان داده شده است) بدین صورت با این ترکیب جدید همواره در تعدادی از SMA ها کشش به وجود می آید.

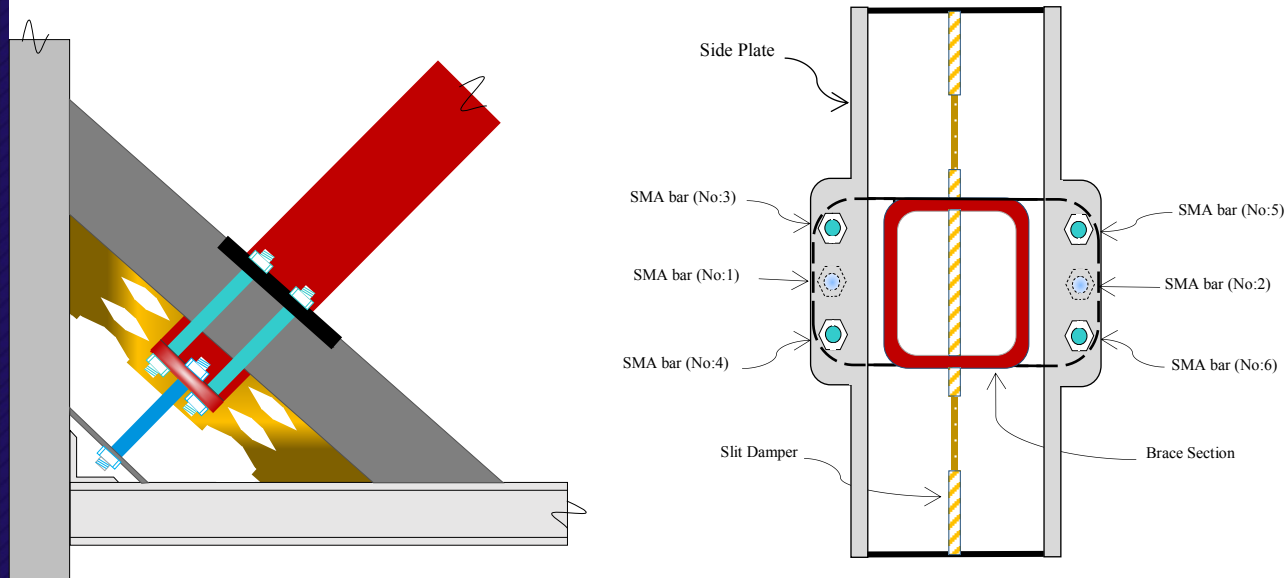
### ۵- جزئیات مدل‌های مورد بررسی در تحلیل اجزای محدود

در این تحقیق از دو طبقه بندی کلی برای بررسی رفتار کششی و فشاری مهاربند در ترکیب با میراگرهای شکافدار استفاده شده است. در سری اول نمونه‌ها بدون SMA و مابقی نمونه‌ها شامل SMA مطابق با مشخصات و جزئیات در شکل‌های ذیل استفاده گردید. نمونه‌ها بر اساس مشخصات هندسی، شامل  $b \setminus h$  و  $h \setminus h$  می‌باشد که به ترتیب معرف نسبت پهنای قسمت میانی میراگر به پهنای قسمت انتهایی و ارتفاع قسمت لاغر شده میانی به ارتفاع کلی میراگر پروانه‌ای است (شکل ۱۰). این تقسیم‌بندی‌ها با مشخصات کامل در جدول ۳ ارائه شده است. برای تعریف شرایط مرزی در هر یک از دو انتهای میراگرهای پروانه‌ای که به قاب متصل هستند درجات آزادی دورانی مقید گردیده است. بارگذاری به صورت جابجایی به انتهای مهاربند وارد می‌شود و جهت بدست آوردن ظرفیت قاب به همراه مهاربند و SMA نمودار نیرو در برابر جابجایی ترسیم می‌گردد. انواع قاب‌های مورد بررسی و جزئیات آنها در اشکال ۸ و ۷ نشان داده شده اند. و همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود در

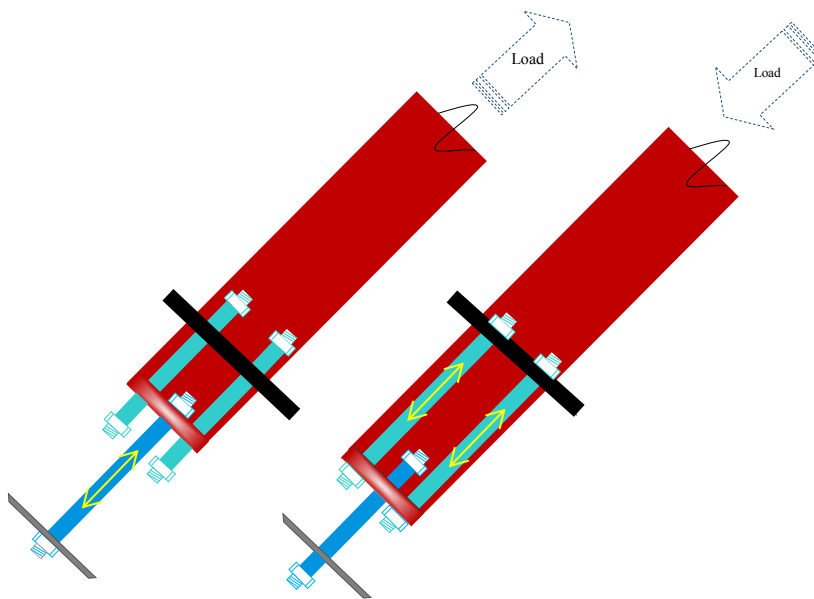


شکل ۷- قاب‌های مورد مطالعه (الف) قاب مهاربندی ساده (ب) قاب مهاربندی با میراگر شکافدار پروانه‌ای (ج) قاب مهاربندی با میراگر شکافدار پروانه‌ای و SMA

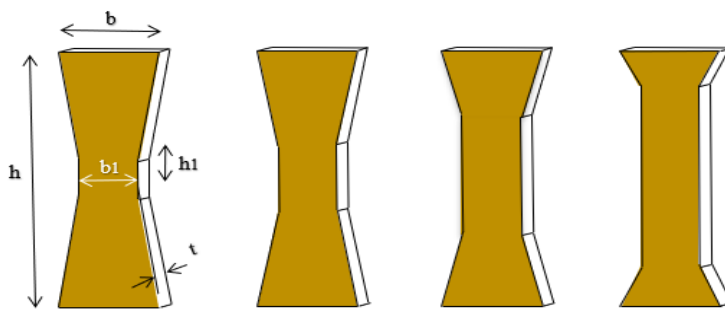




شکل ۸- بزرگنمایی قسمت اتصال و جزئیات برش a-a



شکل ۹- شماتیک اعمال بار کششی و فشاری به مهاربند و فعال شدن SMA ها



شکل ۱۰- شماتیک نوارهای مورد استفاده با نسبت‌های مختلف میراگر شکافدار (در هر یک از نوارها)

جدول ۳- مشخصات مدل‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر

Models	$h$ (mm)	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$b_1$ (mm)	$h_1$ (mm)	$h_1/h$
$b_1/b=0.1$	400	160	4	16	40	0.1
	400	160	4	16	80	0.2
	400	160	4	16	160	0.4
	400	160	4	16	320	0.8
$b_1/b=0.2$	400	160	4	32	40	0.1
	400	160	4	32	80	0.2
	400	160	4	32	160	0.4
	400	160	4	32	320	0.8
$b_1/b=0.4$	400	160	4	64	40	0.1
	400	160	4	64	80	0.2
	400	160	4	64	160	0.4
	400	160	4	64	320	0.8
$b_1/b=0.8$	400	160	4	128	40	0.1
	400	160	4	128	80	0.2
	400	160	4	128	160	0.4
	400	160	4	128	320	0.8

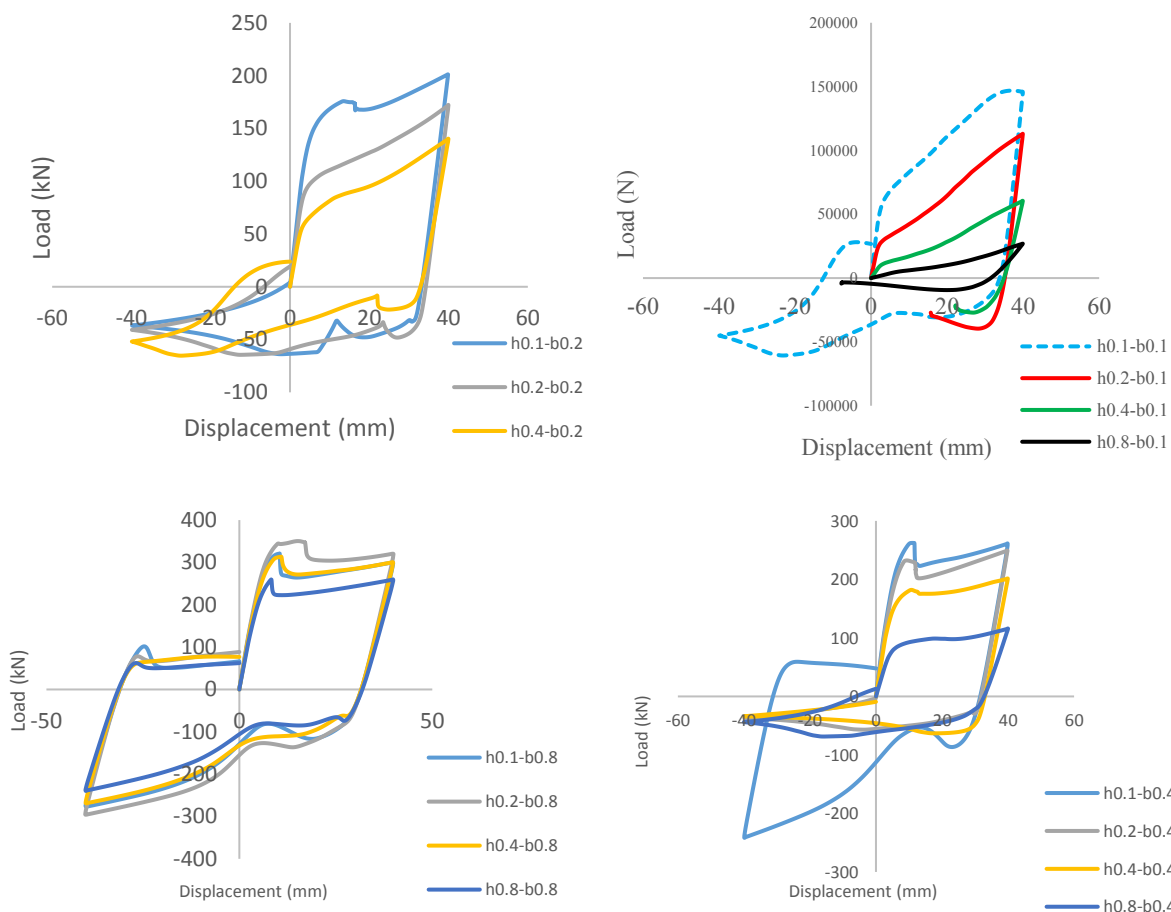
همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار نیز کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به توضیحات فوق این نتیجه استنباط می‌شود که برای یک نسبت ثابت  $b_1/b$ ، با افزایش نسبت  $h_1/h$  مقدار ظرفیت و سختی اولیه به دلیل کاهش سطح مقطع کمتر شده است. برای نسبت  $b_1/b=0.2$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه ای همانند نمودار قبل، ظرفیت کاهش پیدا کرده طوری که برای نسبت  $b_1/b=0.1$  در مقایسه با  $b_1/b=0.8$  تقریباً  $2/3$  برابر شده است. نکته قابل ذکر این است که در این حالت با افزایش نسبت  $b_1/b$  در مقایسه با نمودار قبل اختلاف بیشترین و کمترین ظرفیت در نمودار کمتر شده است. برای نسبت  $b_1/b=0.4$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه‌ای همانند حالات قبل، ظرفیت کاهش پیدا کرده طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  در مقایسه با  $h_1/h=0.8$  تقریباً  $1/5$  برابر شده است همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار نیز کاهش می‌یابد. همچنین در ناحیه فشاری به علت نسبت پایین  $b_1/b$  و تشکیل مفصل پلاستیک در میراگرهای پروانه‌ای شاهد افت شدید مقاومت و رفتار کم‌انرژی آن هستیم به استثنای نسبت  $h_1/h=0.1$  که به علت لاغری کمتر در ناحیه فشاری شاهد رفتار مشابه ناحیه کششی تحت جابجایی وارد شده هستیم. برای نسبت  $b_1/b=0.8$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  برخلاف نمودارهای قبل به علت نسبت بالاتر  $b_1/b$

## ۶- بررسی نتایج

در این تحقیق دو سری آنالیز روی نمونه‌ها انجام گردید در سری اول که نمونه‌های بدون SMA بودند آنالیز با بارگذاری یکنواخت و در سری دوم آنالیز با بارگذاری چرخه‌ای انجام شد (پروتکل بارگذاری در شکل ۲ نشان داده شده است) که نتایج آنها به تفکیک در ادامه آورده شده است. در این نمودارها محور افقی جابجایی وارد شده به انتهای مهاربند و محور قائم نیروی اعمالی به انتهای مهاربند می‌باشد.

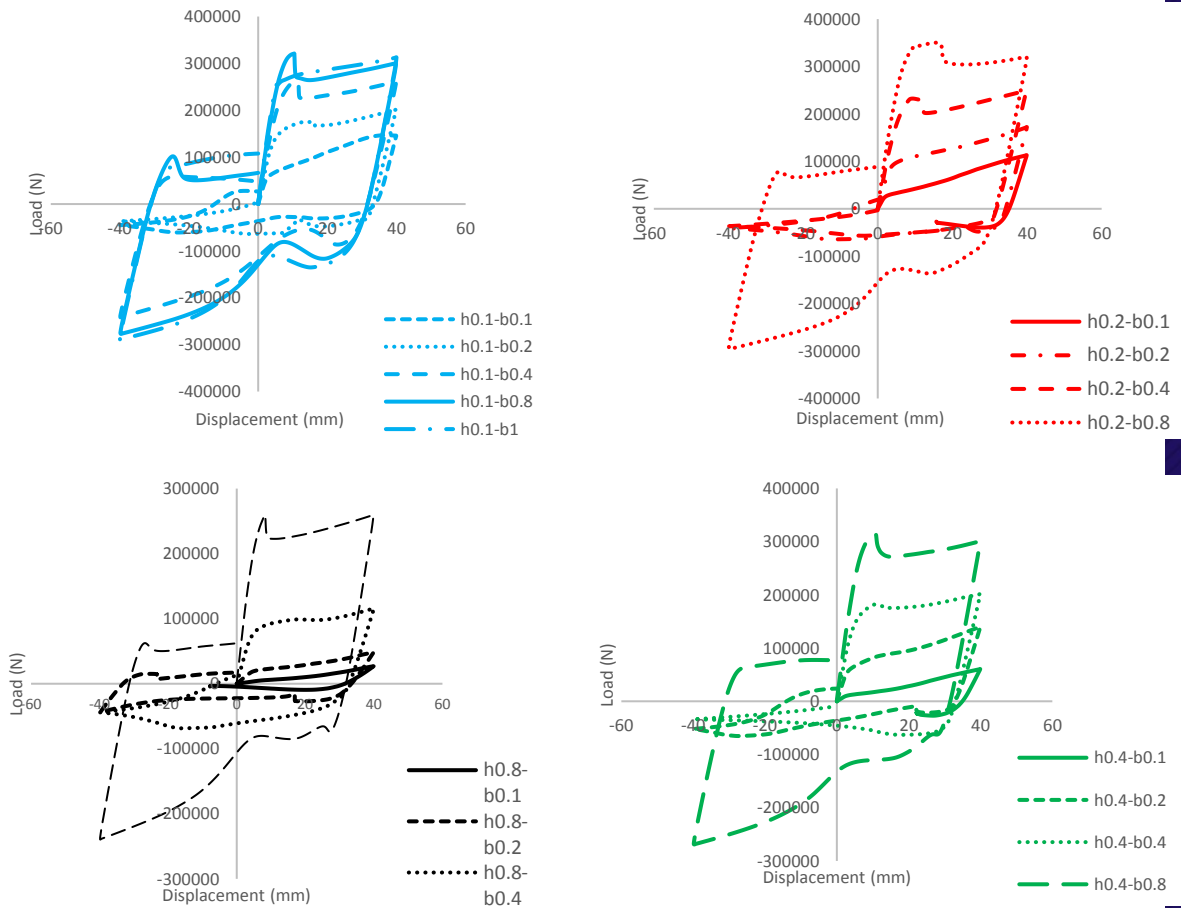
در نمودار شکل ۱۱ نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  به جهت تمایز و درک راحت‌تر با رنگ‌های مختلف نشان داده شده است. برای نسبت  $h_1/h=0.1$  و نسبت‌های مختلف  $b_1/b$  مشخص است که با افزایش نسبت  $b_1/b$  ظرفیت بیشتر شده، طوری که برای نسبت  $b_1/b=0.1$  در مقایسه با  $b_1/b=0.8$  تقریباً  $2/5$  برابر شده است همچنین با افزایش نسبت  $b_1/b$  سختی اولیه نمودار نیز افزایش می‌یابد. بنابراین این نتیجه استنباط می‌شود که برای یک نسبت ثابت  $h_1/h$ ، با افزایش نسبت  $b_1/b$  مقدار ظرفیت و سختی اولیه بیشتر شده است. همچنین برای نسبت  $b_1/b=0.1$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه‌ای، ظرفیت کاهش پیدا کرده طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  در مقایسه با  $h_1/h=0.8$  تقریباً  $7/5$  برابر شده است

$b_1$  و لاغری کمتر شاهد رفتار مشابه ناحیه کششی تحت جابجایی وارد شده و جذب انرژی بیشتری در مقایسه با نسبت‌های پایین تر  $b/b_1$  هستیم.



شکل ۱۱- نمودار هیستریزیک میراگر برای نسبت‌های متغیر  $h_1/h$  و نسبت‌های ثابت  $b_1/b$

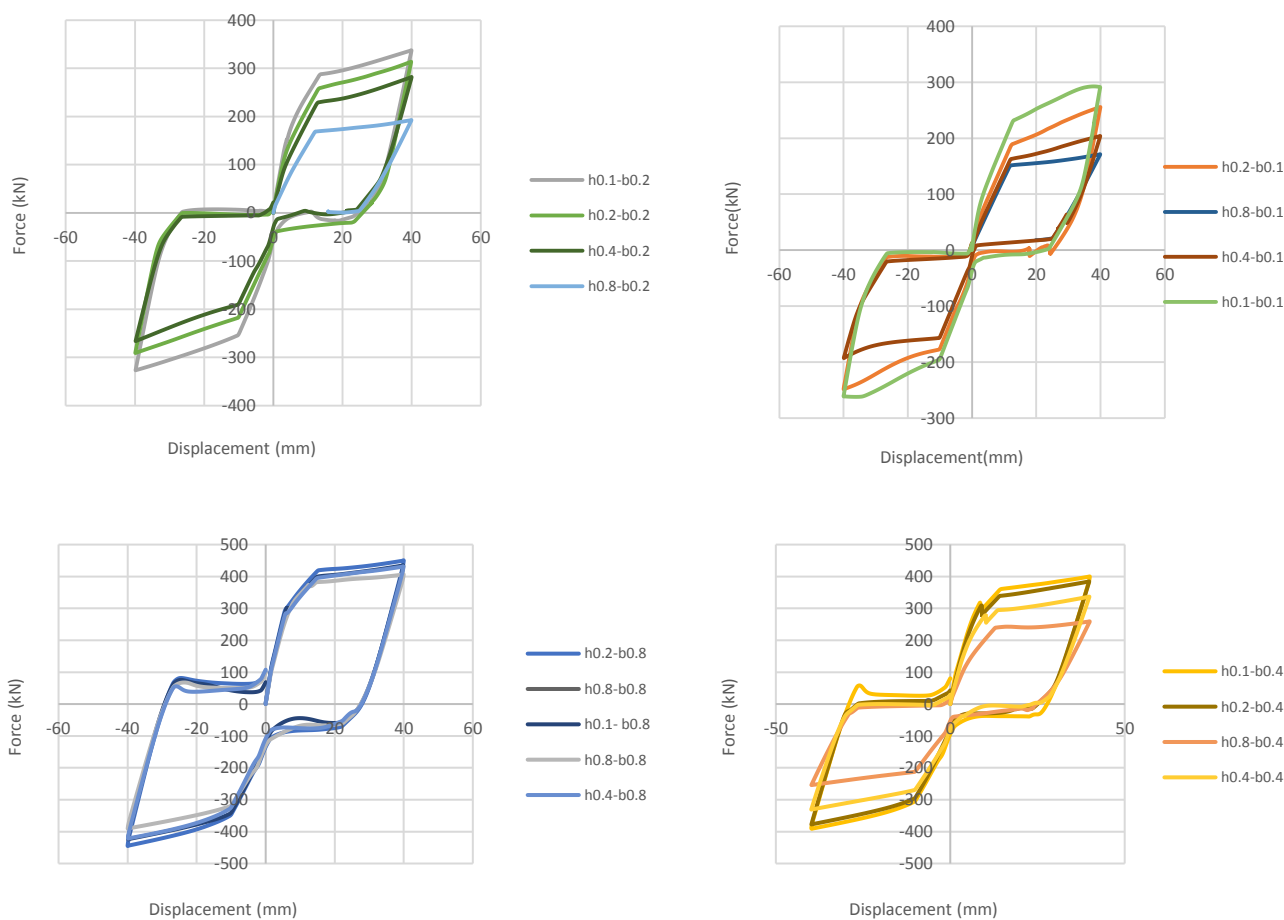
با توجه نمودار شکل ۱۲ که برای نسبت‌های مختلف  $b_1/b$  و نسبت‌های ثابت  $h_1/h$  ترسیم گردیده است مشخص است که با ثابت ماندن نسبت  $h_1/h$  و افزایش نسبت‌های  $b_1/b$  سطح زیر نمودار و در نتیجه ظرفیت جذب انرژی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲- نمودار هیستریزیک میراگر برای نسبت‌های ثابت  $h_1/h$  و نسبت‌های متغیر  $b_1/b$

رشته‌ها در فشار قرار می‌گیرند. در باربرداری نیز به دلیل نوآوری این مقاله با جانمایی خاص رشته‌های SMA تعداد دو رشته در کشش و مابقی در فشار قرار می‌گیرند. بنابراین در هر حالتی نیمی از SMA ها در کشش و مابقی در فشار قرار می‌گیرند.

در دسته دوم مدل‌ها با توجه به حضور رشته‌های SMA، به جهت هرچه بهتر نشان دادن عملکرد رشته‌های SMA در کشش و فشار بارگذاری به صورت چرخه‌ای وارد شده که پروتکل بارگذاری آن در نمودار ذیل آورده شده است. در این حالت دو رشته در کشش و مابقی



شکل ۱۳- نمودار هیستریزیک میراگر و SMA برای نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  و نسبت‌های ثابت  $b_1/b$

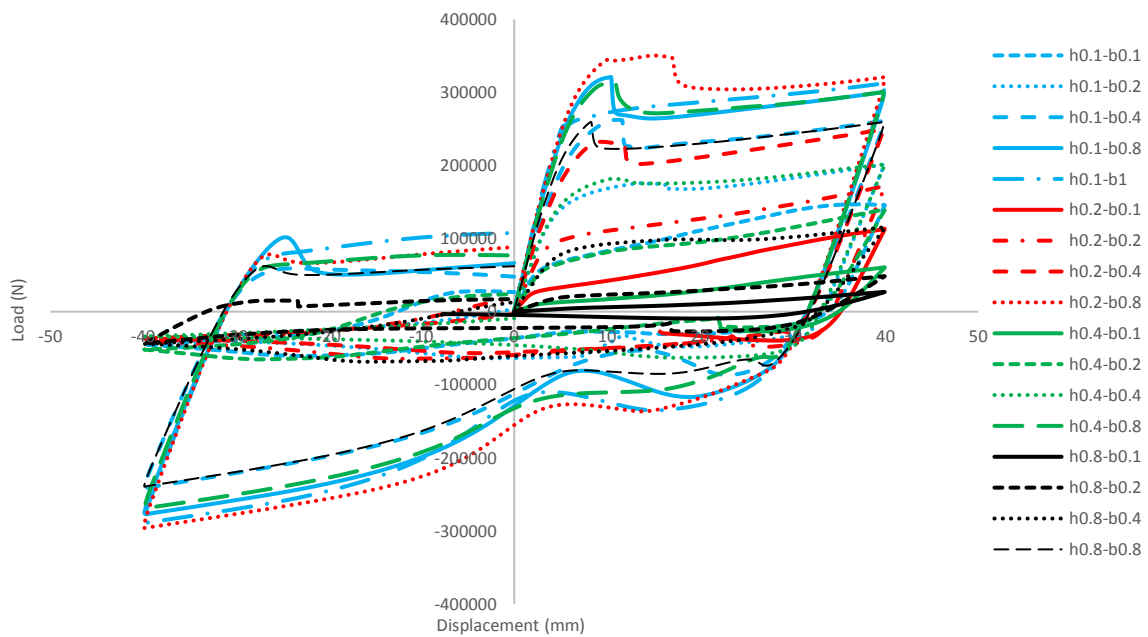
کمترین ظرفیت در نمودار تغییر محسوس نداشته است. همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار نیز کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به توضیحات فوق این نتیجه استنباط می‌شود که برای یک نسبت ثابت  $b_1/b$ ، با افزایش نسبت  $h_1/h$  مقدار ظرفیت و سختی اولیه به دلیل کاهش سطح مقطع کمتر شده است.

برای نسبت  $b_1/b=0.4$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  نیز مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه‌ای همانند نمودار قیل، ظرفیت کاهش پیدا کرده طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  در مقایسه با  $h_1/h=0.8$  تقریباً  $1/6$  برابر شده است همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار نیز کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به توضیحات فوق این نتیجه استنباط می‌شود که برای یک نسبت ثابت  $b_1/b$ ، با افزایش نسبت  $h_1/h$  مقدار ظرفیت و سختی اولیه به دلیل کاهش سطح مقطع کمتر شده است. نکته شایان به ذکر این است که در این حالت نیز با افزایش

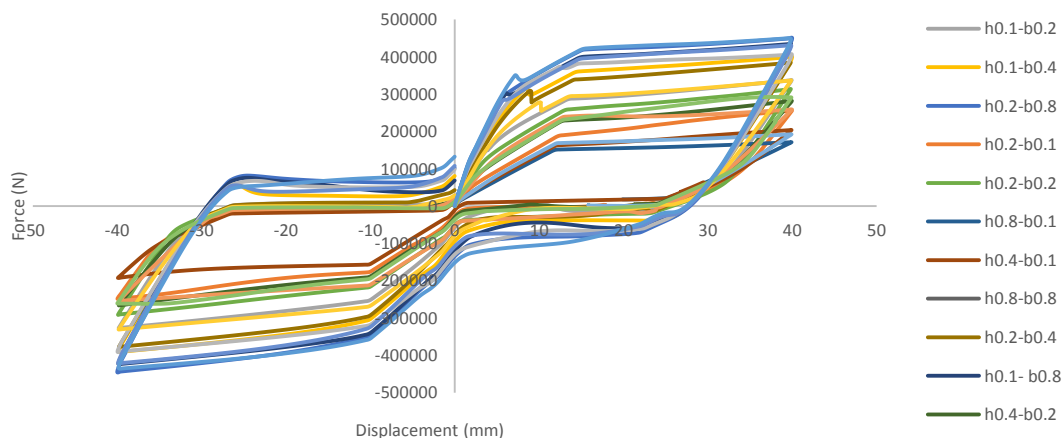
در نمودارهای شکل ۱۳ برای نسبت  $b_1/b=0.1$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه‌ای، ظرفیت کاهش پیدا کرده طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  در مقایسه با  $h_1/h=0.8$  تقریباً  $1/7$  برابر شده است همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار نیز کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به توضیحات فوق این نتیجه استنباط می‌شود که برای یک نسبت ثابت  $b_1/b$ ، با افزایش نسبت  $h_1/h$  مقدار ظرفیت و سختی اولیه به دلیل کاهش سطح مقطع کمتر شده است. همچنین برای نسبت  $b_1/b=0.2$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه‌ای همانند نمودار قیل، ظرفیت کاهش پیدا کرده طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  در مقایسه با  $h_1/h=0.8$  تقریباً  $1/7$  برابر شده است. نکته قابل ذکر این است که در این حالت با افزایش نسبت  $b_1/b$  در مقایسه با نمودار قیل اختلاف بیشترین و

همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار تغییر محسوسی نمی‌یابد. نکته شایان به ذکر این است که در این حالت با افزایش نسبت  $b_1/b$  در مقایسه با نمودارهای قبل اختلاف بیشترین و کمترین ظرفیت در نمودار تغییر ناچیزی داشته است.

نسبت  $b_1/b$  در مقایسه با نمودارهای قبل اختلاف بیشترین و کمترین ظرفیت در نمودار کمتر شده است. برای نسبت  $b_1/b=0/8$  نیز با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه‌ای همانند نمودار قبل، ظرفیت کاهش محسوسی نداشته است طوری که برای نسبت  $h_1/h=0/8$  در مقایسه با  $h_1/h=0/8$  تقریباً برابر است



شکل ۱۴- نمودار هیستریزیک میراگر برای نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  و نسبت‌های مختلف  $b_1/b$



شکل ۱۵- نمودار هیستریزیک میراگر و SMA برای نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  و نسبت‌های مختلف  $b_1/b$

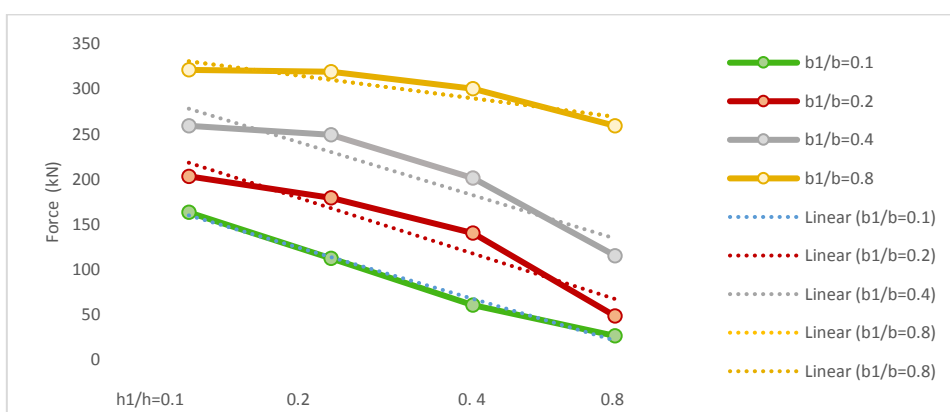
که نسبت  $b_1/b=1$  و نسبت  $h_1/h=0/8$  باشد. دلیل آن هم مشخص است زیرا در این حالت مقطع میراگر بیشترین سطح مقطع را داراست.

در نمودار های شکل ۱۴ و ۱۵ تمامی حالت‌ها به صورت همزمان آورده شده است. مشخص است که بیشترین ظرفیت مربوط به حالتی است

با توجه به نمودار شکل ۱۵ مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  نیروی تحمل شده توسط مهاربند در حالت کلی کاهش یافته است. شیب این کاهش با افزایش نسبت  $b_1/b$  نیز کاهش داشته است. بدین معنی که با افزایش نسبت  $b_1/b$ ، تغییرات نسبت  $h_1/h$  تأثیر چندانی در تغییرات نیروی تحمل شده نخواهد داشت. شیب این تغییرات برای نسبت های بالای  $b_1/b$  نظیر  $0/8$  کمتر از مابقی نسبت های  $b_1/b$  بوده است.

و در مقابل کمترین ظرفیت مربوط به حالتی است که  $b_1/b=0/1$  و نسبت  $h_1/h=0/8$  باشد.

#### ۱-۶. بررسی تغییرات نیرو برای نسبت های مختلف $h_1/h$ در حالت بدون استفاده از SMA

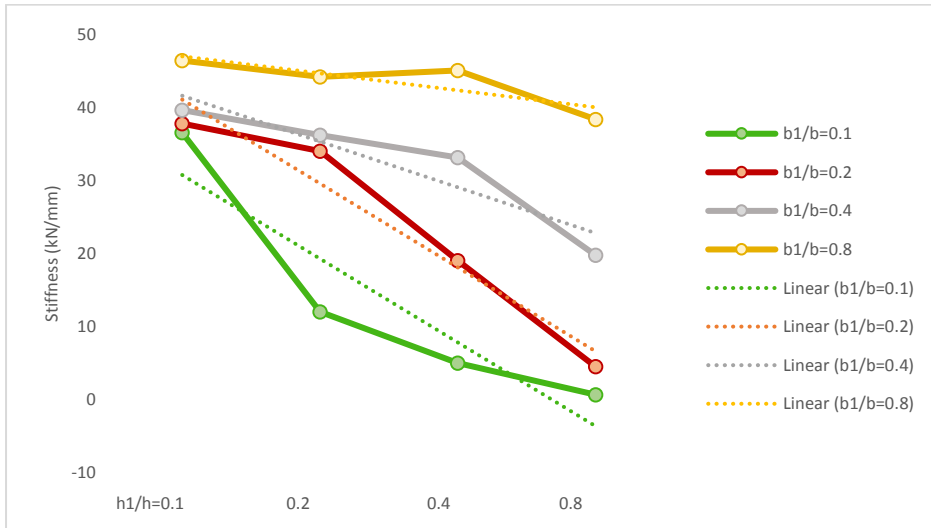


شکل ۱۶- نمودار تغییرات نیرو برای نسبت های مختلف  $h_1/h$  در حالت بدون استفاده از SMA

ولی برای نسبت  $b_1/b$  برابر  $0/8$  کمتر از مابقی نسبت ها بوده است. همچنین مشخص است با افزایش مقادیر  $b_1/b$  تغییرات سختی در نسبت های بالای  $h_1/h$  بیشتر از حالت ماقبل خود گردیده است. شیب تغییرات سختی برای نسبت  $b_1/b$  برابر  $0/8$  تقریباً یک سوم شیب تغییرات سختی برای نسبت  $b_1/b$  برابر  $0/4$  و یک پنجم شیب تغییرات سختی برای نسبت  $b_1/b$  برابر  $0/1$  و  $0/2$  می باشد.

#### ۲-۶. بررسی تغییرات سختی برای نسبت های مختلف $h_1/h$ در حالت بدون استفاده از SMA

مطابق نتایج بدست آمده از نمودار شکل ۱۷ مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه در حالت کلی کاهش یافته است. شیب این کاهش برای نسبت های  $b_1/b$  برابر  $0/1$  و  $0/2$  تقریباً یکسان

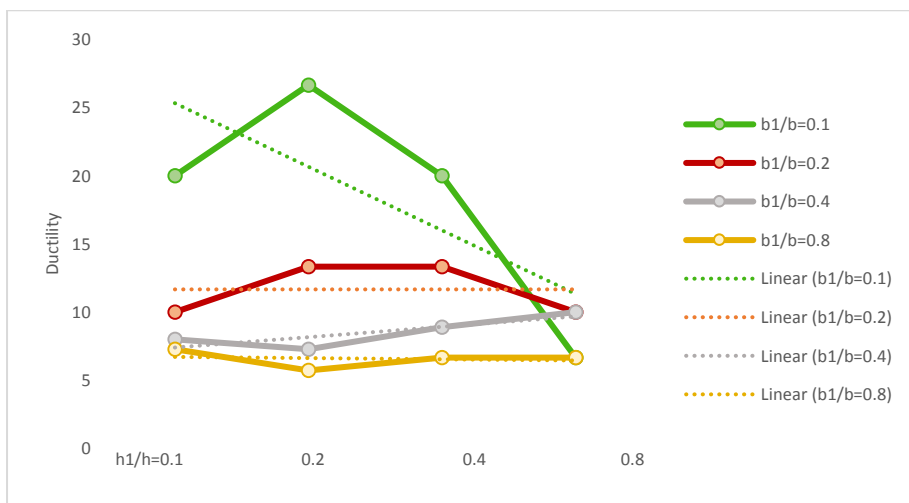


شکل ۱۷- نمودار تغییرات سختی برای نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  در حالت بدون استفاده از SMA

کلی که قابل استنباط است با افزایش نسبت  $b_1/b$  افزایش شکل پذیری در حالت کلی را شاهد هستیم. نکته‌ای که از مشاهده در نمودار استخراج می‌گردد این است که مطابق خط برازش، بیشترین شکل پذیری مربوط به حالتی است که نسبت‌های  $h_1/h$  و  $b_1/b$  هر دو برابر ۰/۱ هستند و کمترین شکل پذیری نیز مربوط به حالتی است که نسبت‌های  $h_1/h$  و  $b_1/b$  هر دو برابر ۰/۸ هستند.

### ۳-۶. بررسی تغییرات شکل پذیری برای نسبت‌های مختلف $h_1/h$ در حالت بدون استفاده از SMA

مطابق نتایج بدست آمده از نمودار شکل ۱۸ مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  شکل پذیری در حالت کلی تغییرات محسوسی نداشته است. تنها برای حالتی که نسبت  $b_1/b$  برابر ۰/۸ بود افزایش نسبت  $h_1/h$  منجر به کاهش مقادیر شکل پذیری گردید. اما نکته



شکل ۱۸- نمودار تغییرات شکل پذیری برای نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  در حالت بدون استفاده از SMA

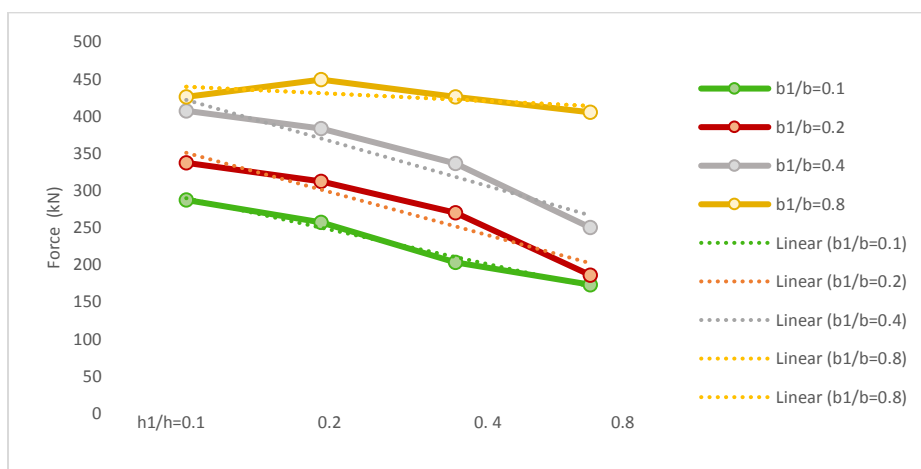
SMA



یافته است. شیب این کاهش با افزایش نسبت  $b_1/b$  نیز کاهش داشته است. بدین معنی که با افزایش نسبت  $b_1/b$ ، تغییرات نسبت  $h_1/h$  تاثیر چندانی در تغییرات نیروی تحمل شده نخواهد داشت. شیب این تغییرات برای نسبت‌های بالای  $b_1/b$  نظیر  $0.8$  تقریباً ناچیز و بصورت افقی با شیب ملایم بوده است.

#### ۴-۶. بررسی تغییرات نیرو برای نسبت‌های مختلف $h_1/h$ در حالت استفاده از SMA

با توجه به نمودار شکل ۱۹ ذیل مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  نیروی تحمل شده توسط مهاربند در حالت کلی کاهش

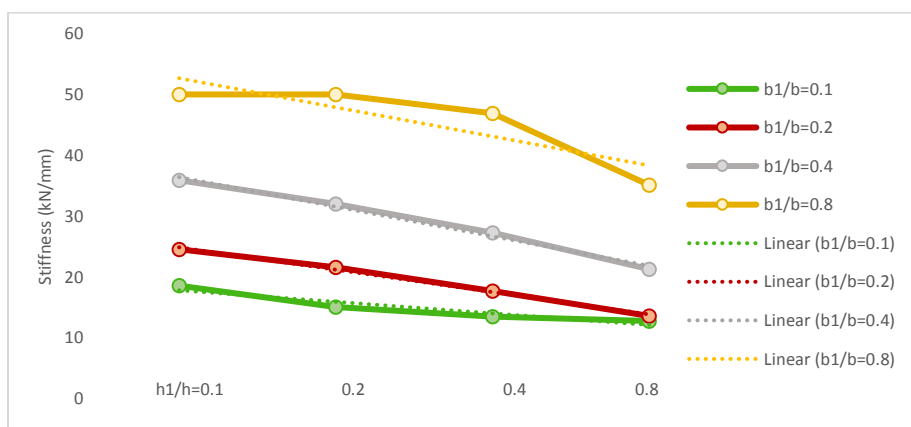


شکل ۱۹- نمودار تغییرات نیرو برای نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  در حالت استفاده از SMA

نسبت  $b_1/b$  برابر  $0.1$  متر از مابقی نسبت‌ها بوده است. همچنین مشخص است با افزایش مقادیر  $b_1/b$  تغییرات سختی بیشتر از حالت ماقبل خود گردیده است. برای مثال با تغییر نسبت  $b_1/b$  از  $0.1$  به  $0.2$  مقادیر سختی تقریباً  $43\%$  افزایش ولی با تغییر نسبت  $b_1/b$  از  $0.2$  به  $0.4$  مقادیر سختی تقریباً  $49\%$  افزایش داشته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت نسبت‌های بالای  $b_1/b$  مقادیر بالاتری از سختی اولیه را نتیجه خواهد داد.

#### ۵-۶. بررسی تغییرات سختی برای نسبت‌های مختلف $h_1/h$ در حالت استفاده از SMA

مطابق نتایج بدست آمده از نمودار شکل ۲۰ مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه در حالت کلی کاهش یافته است. شیب این کاهش برای نسبت‌های مختلف  $b_1/b$  تقریباً یکسان ولی برای

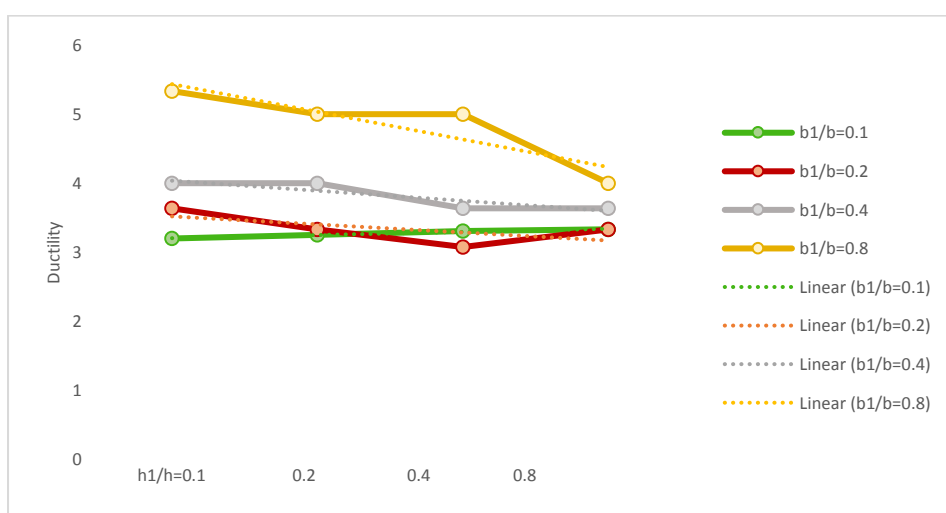


شکل ۲۰- نمودار تغییرات سختی برای نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  در حالت استفاده از SMA

نسبت  $h_1/h$  اندکی منجر به کاهش مقادیر شکل‌پذیری گردید. اما نکته کلی که قابل استنباط است با افزایش نسبت  $b_1/b$  افزایش شکل‌پذیری در حالت کلی را شاهد هستیم. نکته ای که از مشاهده در نمودار استخراج می‌گردد این است که افزایش شکل‌پذیری در حالتی که نسبت  $b_1/b$  برابر  $0/8$  بوده است بیشتر از نسبت‌های دیگر بوده است.

#### ۶-۶. بررسی تغییرات شکل‌پذیری برای نسبت‌های مختلف $h_1/h$ در حالت استفاده از SMA

مطابق نتایج بدست آمده از نمودار شکل ۲۱ مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  شکل‌پذیری در حالت کلی تغییرات محسوسی نداشته است. تنها برای حالتی که نسبت  $b_1/b$  برابر  $0/8$  بود افزایش



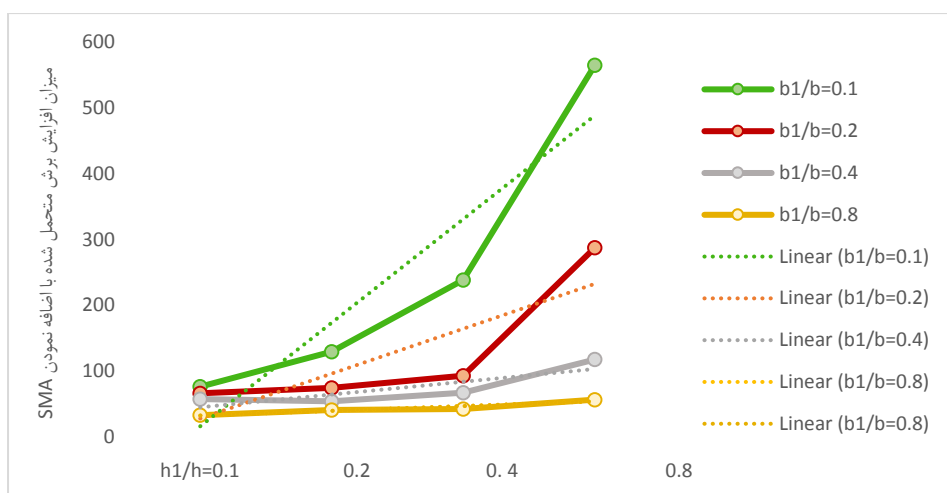
شکل ۲۱- نمودار تغییرات شکل‌پذیری برای نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  در حالت استفاده از SMA

همانطور که در نمودار شکل ۲۲ مشهود است در نگاه کلی با افزایش نسبت  $h_1/h$  مقادیر افزایش برش متحمل شده با اضافه نمودن SMA افزایش داشته است. این مقادیر افزایش برش متحمل شده با اضافه

#### ۶-۷. بررسی میزان افزایش برش متحمل شده با اضافه نمودن SMA

برش متحمل شده با اضافه نمودن SMA برای نسبت‌های پایین تر  $h_1/h$ ، کمتر و برای نسبت‌های بالاتر  $h_1/h$  بیشتر بوده است.

نمودن SMA برای نسبت های بالای  $b_1/b$  نظیر  $0.8/b_1/b$  با شیب کمتر و با کاهش نسبت  $b_1/b$  تغییرات محسوس تری در نمودار شاهد هستیم. نکته دیگر که حائز اهمیت است این است که تغییرات مقادیر افزایش



شکل ۲۲- میزان افزایش برش متحمل شده با اضافه نمودن SMA

به تو ضیحات فوق این نتیجه استنباط می شود که برای یک نسبت ثابت  $b_1/b$ ، با افزایش نسبت  $h_1/h$  مقدار ظرفیت و سختی اولیه به دلیل کاهش سطح مقطع کمتر شده است. نکته قابل ذکر این است که برای نسبت  $b_1/b=0.2$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  با افزایش نسبت  $b_1/b$  در مقایسه با نسبت‌های  $b_1/b=0.1$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  اختلاف بیشترین و کمترین ظرفیت در نمودار کمتر شده است.

۳- برای نسبت  $b_1/b=0.4$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه‌ای همانند نمودار قبل، ظرفیت کاهش پیدا کرده طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  در مقایسه با  $h_1/h=0.8$  تقریباً  $1/5$  برابر شده است همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار نیز کاهش می‌یابد. برای نسبت  $b_1/b=0.8$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه‌ای همانند حالت  $b_1/b=0.4$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$ ، ظرفیت کاهش محسوسی نداشته است طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  در مقایسه با  $h_1/h=0.8$  تقریباً برابر است همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار تغییر محسوسی نمی‌یابد.

## ۷- نتیجه گیری

۱- در این تحقیق دو سری آنالیز روی نمونه‌ها انجام گردید در سری اول که نمونه‌های بدون SMA بودند آنالیز با بارگذاری یکنواخت و در سری دوم آنالیز با بارگذاری چرخه‌ای انجام شد که نتایج آنها به تفکیک شرح داده شد. برای یک نسبت ثابت  $h_1/h$ ، با افزایش نسبت  $b_1/b$  مقدار ظرفیت و سختی اولیه بیشتر شده است. طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  و نسبت‌های مختلف  $b_1/b$  مشخص است که با افزایش نسبت  $b_1/b$  ظرفیت بیشتر شده، این مقدار برای نسبت  $b_1/b=1$  در مقایسه با  $b_1/b=0.1$  تقریباً  $2/5$  برابر شده است همچنین با افزایش نسبت  $b_1/b$  سختی اولیه نمودار نیز افزایش می‌یابد.

۲- برای نسبت‌های  $b_1/b=0.1$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه‌ای، ظرفیت کاهش پیدا کرده طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  در مقایسه با  $h_1/h=0.8$  تقریباً  $1/5$  برابر شده است. این عدد برای برای نسبت  $b_1/b=0.2$  و نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  تقریباً  $2/3$  برابر شده است. همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار نیز کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه

۸- با بررسی نمودار تغییرات نیرو برای نسبت های مختلف  $h_1/h$  در حالت بدون استفاده از SMA با افزایش نسبت  $h_1/h$  نیروی تحمل شده توسط مهاربند در حالت کلی کاهش یافته است. شیب این کاهش با افزایش نسبت  $b_1/b$  نیز کاهش داشته است. بدین معنی که با افزایش نسبت  $b_1/b$ ، تغییرات نسبت  $h_1/h$  تاثیر چندانی در تغییرات نیروی تحمل شده نخواهد داشت. شیب این تغییرات برای نسبت های بالای  $b_1/b$  نظیر  $0.8$  کمتر از مابقی نسبت های  $b_1/b$  بوده است.

۹- با بررسی نمودار تغییرات سختی برای نسبت های مختلف  $h_1/h$  در حالت بدون استفاده از SMA با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه در حالت کلی کاهش یافته است. شیب این کاهش برای نسبت های  $b_1/b$  برابر  $0.1$  و  $0.2$  تقریباً یکسان ولی برای نسبت  $b_1/b$  برابر  $0.8$  کمتر از مابقی نسبت ها بوده است. همچنین مشخص است با افزایش مقادیر  $b_1/b$  تغییرات سختی در نسبت های بالای  $h_1/h$  بیشتر از حالت ماقبل خود گردیده است. شیب تغییرات سختی برای نسبت  $b_1/b$  برابر  $0.8$  کمتر یک سوم شیب تغییرات سختی برای نسبت  $b_1/b$  برابر  $0.4$  و یک پنجم شیب تغییرات سختی برای نسبت  $b_1/b$  برابر  $0.1$  و  $0.2$  می باشد.

۱۰- با بررسی نمودار تغییرات شکل پذیری برای نسبت های مختلف  $h_1/h$  در حالت بدون استفاده از SMA با افزایش نسبت  $h_1/h$  شکل پذیری در حالت کلی تغییرات محسوس نداشتند است. تنها برای حالتی که نسبت  $b_1/b$  برابر  $0.8$  بود افزایش نسبت  $h_1/h$  منجر به کاهش مقادیر شکل پذیری گردید. اما نکته کلی که قابل استنباط است با افزایش نسبت  $b_1/b$  افزایش شکل پذیری در حالت کلی را شاهد هستیم. نکته ای که از مشاهده در نمودار استخراج می گردد این است که مطابق خط برازش، بیشترین شکل پذیری مربوط به حالتی است که نسبت های  $h_1/h$  و  $b_1/b$  هر دو برابر  $0.1$  هستند و کمترین شکل پذیری نیز مربوط به حالتی است که نسبت های  $h_1/h$  و  $b_1/b$  هر دو برابر  $0.8$  هستند.

۱۱- با بررسی نمودار تغییرات نیرو برای نسبت های مختلف  $h_1/h$  در حالت استفاده از SMA با افزایش نسبت  $h_1/h$  نیروی تحمل شده توسط مهاربند در حالت کلی کاهش یافته است. شیب این کاهش با افزایش نسبت  $b_1/b$  نیز کاهش داشته است. بدین معنی که با افزایش نسبت  $b_1/b$ ، تغییرات نسبت  $h_1/h$  تاثیر چندانی در تغییرات نیروی تحمل شده نخواهد داشت. شیب این تغییرات برای

۴- در دسته دوم که شامل SMA می باشند برای نسبت  $h_1/h=0.1$  و نسبت های مختلف  $b_1/b$  مشخص است که با افزایش نسبت  $b_1/b$  ظرفیت بیشتر شده، طوری که برای نسبت  $b_1/b=1$  در مقایسه با  $b_1/b=0.1$  تقریباً  $1/5$  برابر شده است همچنین با افزایش نسبت  $b_1/b$  سختی اولیه نمودار نیز افزایش می یابد. بنابراین برای یک نسبت ثابت  $h_1/h$ ، با افزایش نسبت  $b_1/b$  مقدار ظرفیت و سختی اولیه بیشتر شده است. نکته دیگر این که در قسمت های میانی نمودار حالت جمع شدگی وجود دارد که نشان دهنده رفتار حاکم رشته های SMA می باشد.

۵- برای نسبت  $b_1/b=0.1$  و نسبت های مختلف  $h_1/h$  مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه ای، ظرفیت کاهش پیدا کرده طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  در مقایسه با  $h_1/h=0.8$  تقریباً  $1/7$  برابر شده است همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار نیز کاهش می یابد. برای نسبت  $b_1/b=0.4$  و نسبت های مختلف  $h_1/h$  مشخص است که با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه ای همانند حالت قبل، ظرفیت کاهش پیدا کرده طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  در مقایسه با  $h_1/h=0.8$  تقریباً  $1/6$  برابر شده است همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار نیز کاهش می یابد.

۶- برای نسبت  $b_1/b=0.8$  و نسبت های مختلف  $h_1/h$  با افزایش نسبت  $h_1/h$  به دلیل کاهش سطح مقطع میراگر پروانه ای همانند نمودار قبل، ظرفیت کاهش محسوس نداشتند است طوری که برای نسبت  $h_1/h=0.1$  در مقایسه با  $h_1/h=0.8$  تقریباً برابر است همچنین با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه نمودار تغییر محسوس نمی یابد. نکته شایان به ذکر این است که در این حالت با افزایش نسبت  $b_1/b$  در مقایسه با نمودارهای قبل اختلاف بیشترین و کمترین ظرفیت در نمودار تغییر ناچیزی داشته است.

۷- در نمونه های دارای نسبت  $h_1/h$  کمتر و  $b_1/b$  بیشتر، تنش ها در سراسر میراگر توزیع نسبتاً یکنواخت تری در مقایسه با نمونه های با نسبت  $h_1/h$  بزرگتر و  $b_1/b$  کمتر دارد. همچنین در نمونه های لاغرتر (نمونه های با نسبت  $h_1/h$  بزرگتر و  $b_1/b$ ) کرنش های پلاستیک تمرکز بیشتری در بخش های میانی دارد. لذا هرچه قدر نمونه ها در بخش های میانی لاغری بیشتری داشته باشند از حیث تمرکز تنش و کرنش پلاستیک بحرانی تر محسوب می شوند.

real time speed tests for hysteretic steel damper. Proceedings of STESSA. 1997;97:778-85.

[2] Benavent-Climent A. A brace-type seismic damper based on yielding the walls of hollow structural sections. Engineering Structures. 2010 Apr 1;32(4):1113-22.

[3] McCormick J, DesRoches R, Fugazza D, Auricchio F. Seismic assessment of concentrically braced steel frames with shape memory alloy braces. Journal of Structural Engineering. 2007 Jun;133(6):862-70.

[4] Ghaffarzadeh H, Mansouri A. Investigation of the behavior factor in SMA braced frames. In The 14th World Conference on Earthquake Engineering 2008 Oct (pp. 12-17).

[5] Chan RW, Albermani F. Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. Engineering Structures. 2008 Apr 1;30(4):1058-66.

[6] Khoshnodian, f. Kiani, M. "Study of slotted damper (SSD) performance in steel structures with flexural frame system" First National Conference on Structures, Earthquake and Geotechnics. Mazandaran, Babolsar. 2010.

[7] Asgarian B, Moradi S. Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces. Journal of Constructional Steel Research. 2011 Jan 1;67(1):65-74.

[8] Lee CH, Lho SH, Kim DH, Oh J, Ju YK. Hourglass-shaped strip damper subjected to monotonic and cyclic loadings. Engineering Structures. 2016 Jul 15;119:122-34.

[9] Naeem A, Eldin MN, Kim J, Kim J. Seismic performance evaluation of a structure retrofitted using steel slit dampers with shape memory alloy bars. International Journal of Steel Structures. 2017 Dec;17:1627-38.

[10] Liu Y, Guo Z, Liu X, Chicchi R, Shahrooz B. An innovative resilient rocking column with replaceable steel slit dampers: Experimental program on seismic performance. Engineering Structures. 2019 Mar 15;183:830-40.

[11] Nik HK, Kafi MA. Introduction of New Steel Slit Dampers with Elliptical Slit in Bracing Connection and Comparison with Steel Slit Dampers with Constant Slit Width by Experimental and Numerical Study. 2020, 19(6):219-232 URL: <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-34365-fa.html>

[12] Aghajani M, Asadi P. Life-cycle cost analysis of steel frames with shape-memory alloy based dampers. In Structures 2023 Jun 1 (Vol. 52, pp. 794-812). Elsevier.

[13] Behnamfar F, Almohammad-albakkar M. Development of Steel Yielding Seismic Dampers

نسبت‌های بالای  $b_1/b$  نظیر  $0/8$  تقریباً ناچیز و بصورت افقی با شیب ملایم بوده است.

۱۲- با بررسی نمودار تغییرات سختی برای نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  در حالت استفاده از SMA با افزایش نسبت  $h_1/h$  سختی اولیه در حالت کلی کاهش یافته است. شیب این کاهش برای نسبت‌های مختلف  $b_1/b$  تقریباً یکسان ولی برای نسبت  $b_1/b$  برابر  $0/1$  کمتر از مابقی نسبت‌ها بوده است. همچنین مشخص است با افزایش مقادیر  $b_1/b$  تغییرات سختی بیشتر از حالت ماقبل خود گردیده است. برای مثال با تغییر نسبت  $b_1/b$  از  $0/1$  و  $0/2$  مقادیر سختی تقریباً  $43\%$  افزایش ولی با تغییر نسبت  $b_1/b$  از  $0/2$  به  $0/4$  مقادیر سختی تقریباً  $49\%$  افزایش داشته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت نسبت های بالای  $b_1/b$  مقادیر بالاتری از سختی اولیه را نتیجه خواهد داد.

۱۳- با بررسی نمودار تغییرات شکل پذیری برای نسبت‌های مختلف  $h_1/h$  در حالت استفاده از SMA با افزایش نسبت  $h_1/h$  شکل پذیری در حالت کلی تغییرات محسوس نداشتند. تنها برای حالتی که نسبت  $b_1/b$  برابر  $0/8$  بود افزایش نسبت  $h_1/h$  اندکی منجر به کاهش مقادیر شکل پذیری گردید. اما نکته کلی که قابل استنباط است با افزایش نسبت  $b_1/b$  افزایش شکل‌پذیری در حالت کلی را شاهد هستیم. نکته‌ای که از مشاهده در نمودار استخراج می‌گردد این است که افزایش شکل‌پذیری در حالتی که نسبت  $b_1/b$  برابر  $0/8$  بوده است بیشتر از نسبت‌های دیگر بوده است.

۱۴- با بررسی نمودار میزان افزایش برش متحمل شده با اضافه نمودن SMA نسبت به حالت بدون SMA با افزایش نسبت  $h_1/h$  مقادیر افزایش برش متحمل شده با اضافه نمودن SMA افزایش داشته است. این مقادیر افزایش برش متحمل شده با اضافه نمودن SMA برای نسبت‌های بالای  $b_1/b$  نظیر  $0/8$  با شیب کمتر و با کاهش نسبت  $b_1/b$  تغییرات محسوس‌تری در نمودار شاهد هستیم. نکته دیگر که حائز اهمیت است این است که تغییرات مقادیر افزایش برش متحمل شده با اضافه نمودن SMA برای نسبت‌های پایین‌تر  $h_1/h$ ، کمتر و برای نسبت‌های بالاتر  $h_1/h$  بیشتر بوده است.

## مراجع

[1] Wada A, Huang YH, Yamada T, Ono Y, Sugiyama S, Baba M, Miyabara T. Actual size and

steel frames considering SMA brace failure. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018 Dec;16:5937-62.

[20] Abaqus 6.18 , Analysis User's Manual. Providence, RI: Dassault Systèmes. 2018.

[21] Lee CH, Ju YK, Min JK, Lho SH, Kim SD. Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings. *Engineering Structures*. 2015 Sep 15;99:192-204.

[22] Jaber MB, Smaoui H, Terriault P. Finite element analysis of a shape memory alloy three-dimensional beam based on a finite strain description. *Smart materials and structures*. 2008 May 27;17(4):045005.

Used to Improve Seismic Performance of Structures: A Comprehensive Review. *International Journal of Engineering*. 2023 Apr 1;36(4):746-75.

[14] Kafi MA. The geometric shape effect of steel slit dampers in their behavior. *Magazine of Civil Engineering*. 2019(3 (87)):3-17.

[15] Kiani BK, Hashemi BH, Torabian S. Optimization of slit dampers to improve energy dissipation capacity and low-cycle-fatigue performance. *Engineering Structures*. 2020 Jul 1;214:110609.

[16] Banihashem SM, Rezapour M, Attarnejad R, Sanei M. Evaluating the Effectiveness of a New Self-Centering Damper on a Knee Braced Frame. *Shock and Vibration*. 2023 Mar 29;2023.

[17] Mirzahosseini M, Gerami M. The effect of temperature on seismic response of Cu-Al-Mn SMA braced frame. *International Journal of Civil Engineering*. 2018 Dec;16:1687-97.

[18] Qiu C, Zhang Y, Li H, Qu B, Hou H, Tian L. Seismic performance of Concentrically Braced Frames with non-buckling braces: A comparative study. *Engineering Structures*. 2018 Jan 1;154:93-102.

[19] Shi F, Saygili G, Ozbulut OE. Probabilistic seismic performance evaluation of SMA-braced