**یادداشت تحقیقاتی**

مجله علمی – پژوهشی

مهندسی عمران مدرس

دوره بیست یکم، شماره 4، سال1400

**عملکرد لرزه­ای قاب‌های مهاربندی کمانش‌تاب دارای آلیاژ حافظه­دار شکلی تحت زلزله و پس­لرزه متوالی** نزدیک به گسل

سیده **وحیدسیده وحیده هاشمی1، مجید پورامینیان 2\*، عباسعلی صادقی3، سمیه پوربخشیان2**

1. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

2. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر

3. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی

\*[**m.pouraminian@iauramsar.ac.ir**](mailto:m.pouraminian@iauramsar.ac.ir)

تاریخ دریافت: 20/5/99 تاریخ پذیرش:27/11/99

چکیده

در دنیای امروز، با پیشرفت سریع علم و تکنولوژی، هر روزه مواد و مصالح جدیدی پا به عرصه ظهور می­گذارد، که آلیاژ حافظه­دار شکلی (SMA) از جمله این مواد است. ازآنجایی‌که استفاده از سیستم قاب با مهاربندهای مرسوم به دلیل محدودیت‌هایی نظیر شکل­پذیری پایین، کمانش مهاربند در فشار و کاهش ظرفیت باربری جوابگوی نیاز سازه نیست، لذا استفاده از مهاربندکمانش ­تاب (BRB) و آلیاژ حافظه­دار شکلی در سیستم مهاربندی می‌تواند راه گشا باشد. بنابراین در جهت افزایش استهلاک انرژی ناشی از زلزله، استفاده از مهاربندکمانش ­تاب به همراه آلیاژ حافظه­دار شکلی (BRB-SMA) توصیه می­شود. سیستم مهاربندی BRB-SMA باعث میرایی، اتلاف انرژی و کاهش تغییرشکل­های ماندگار در سازه می­گردد. در ابتدا، مهاربندهای کمانش تاب به‌عنوان میراگرهای هیسترتیک در کشورهایی چون ژاپن، آمریکا و ایتالیا مورد توجه مهندسین قرار گرفته­اند. این مهاربندها با رفتار یکسان در کشش و فشار توانایی جذب و اتلاف مقدار زیادی از انرژی ورودی زلزله را به سازه دارند. مصالح نوین SMA، آلیاژهایی با ویژگی‌های ویژه – حافظه­ی شکلی و رفتار فوق الاستیک – می­باشند. به علت رفتار فوق الاستیک، این مواد قادر به بازگشت به شکل اولیه خود می­باشند که این امر سبب کاهش تغییرمکان باقیمانده طبقات پس از زلزله می­شود.در این مقاله، رفتار لرزه­ای سازه­های مجهز به مهاربند کمانش ­تاب بررسی می­شود و تأثیر اضافه کردن SMA در سیستم مهاربندی کمانش تاب موردمطالعه قرار می­گیرد. بدین منظور، سه ساختمان سه بعدی با تعداد طبقات 3 ، 6 و 9 بر اساس ضوابط آئین­نامه­ای طراحی و سپس قاب محور کناری با استفاده از نرم­افزارOpenSees به‌صورت دو بعدی مدل­سازی شده­اند. در ادامه، رفتار غیر ارتجاعی قاب­ها، که در دهانه­های مختلف دارای مهاربند کمانش ­تاب می­باشند، در دو حالت با و بدون SMA با استفاده از تحلیل­های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت 3 رکورد نزدیک به گسل شامل زلزله­ی اصلی و پس­لرزه بررسی‌شده­اند. نتایج نشان داد که بیشترین پاسخ­های سازه­ای جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای، جابه‌جایی بام، برش پایه، شتاب بام و منحنی هیسترزیس در مدل­های مجهز به میله­های SMA به‌طور میانگین کاهش‌یافته است که به دلیل خاصیت فوق الاستیک و میرایی و در نتیجه­ی آن استهلاک انرژی زلزله می­باشد. مقایسه نتایج تحت لرزه اصلی و پس­لرزه با توجه به ماهیت پس­لرزه نشان داد که، میزان کاهش پاسخ­های لرزه­ای در لرزه­ی اصلی با در نظر گرفتن SMA، به­صورت میانگین بیشتر از پس­لرزه می­باشد.همچنین با افزایش ارتفاع، پاسخ­های لرزه­ای در قاب­های مجهز به SMA به میزان بیشتری بهبود یافته­اند.  با به کارگیری آلیاژ حافظه‌دار شکلی در این قاب­ها می­توان هزینه بازیابی سیستم خسارت دیده ساختمانی را کاهش داده و سیستم برگشت پذیرتری داشت.

**واژگان کلیدی:** مهاربند کمانش ­تاب (BRB)، آلیاژ حافظه­دار شکلی (SMA)**،** زلزله‌ اصلی و پس­لرزه، نرم‌افزارOpenSees، تحلیل­ دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی، برگشت­پذیری.

# 1- مقدمه

با توجه به وقوع زلزله‌های قوی در کشورهای زلزله­خیز، بحث کنترل لرزه‌ای ساختمان‌ها در مقابل زلزله همواره چالش مهمی برای مهندسین سازه و زلزله بوده ‌است. در این میان در ادبیات فنی روش­های متنوعی برای کنترل رفتار لرزه­ای سازه­های گوناگون پیشنهاد شده است. مبنای کنترل رفتار سازه­ها تحت زلزله­های مختلف، اتلاف انرژی لرزه­ای و مصون ماندن المان­های اصلی آن­ها هست. در این راستا، استفاده از مهاربندها به منظور کمتر کردن آثار نیروهای زلزله و باد، یکی از موفق­ترین راهکارها بوده است. هنگامی که مهاربندها در معرض نیروهای فشاری بزرگ قرار می‌گیرند، در آن­ها تغییرشکل کمانشی به وجود آمده و رفتار چرخه­ای نامتقارن را در فشار و کشش نشان می­دهند. مطالعات بسیاری صرف بهسازی این مهاربندها برای رسیدن به یک رفتار الاستوپلاستیک ایده­آل شده است. برای رسیدن به این هدف لازم است تا با استفاده از سازوکار مناسبی از کمانش فشاری مهاربند که مانع از استهلاک انرژی مناسب در قاب شده جلوگیری، و امکان تسلیم فشاری فولاد فراهم شود. این سیستم مهاربند کمانش تاب یا به‌اختصار (BRB[[1]](#footnote-1)­) نامیده می­شود. اگر بتوان این سیستم مهاربندی را به وسیله مصالح دارای خاصیت ارتجاعی بالا و کرنش ماندگار اندک، مانند آلیاژهای حافظه­دار شکلی ([[2]](#footnote-2)SMA) مسلح کرد، می­توان به یک سیستم با برگشت­پذیری بالا دست ‌یافت [1].

در سال­های اخیر، توجه پژوهشگران به استفاده از آلیاژهای حافظه­دار شکلی در سیستم­های مهاربندی معطوف شده است. در ادامه، پیشینه پژوهش در زمینه سیستم BRB-SMA ارائه شده است. عسگریان و مرادی (2011)، مطالعات متعددی برای بررسی قابلیت کاربرد این آلیاژها در مهندسی سازه و زلزله انجام دادند که نشان می­دهد استفاده از این آلیاژها در سازه­ها و به ‌ویژه در قاب‌های مهاربندی‌شده می‌تواند موجب کاهش تغییرشکل­های ماندگار پس از زلزله شود [2]. ماوریا و همکاران (2016)، مهاربندهای کمانش تاب کوچکی با هسته کوچک‌تر و طول کوتاه پیشنهاد کردند که می­توانند در سازه به‌عنوان فیوز و میراگر به کار روند [3]. اوزجلیک و همکاران در (2017)، مهاربند کمانش تابی با شرایط اتصال متفاوت را به‌ صورت تست­های آزمایشگاهی پیشنهاد کردند. نوآوری این پژوهش ایجاد محدودیت­های بیشتر در بخش­های مختلف اتصال مصالح به هم است. این قیود باعث کاهش نقص­های موضعی و کمانش­های آنی در بعضی بخش­های مهاربند می­شود [4]. شن و همکاران (2017)، عملکرد لرزه‌ای قاب‌های با مهاربندهای هم‌محور را با و بدون مهاربندهای کمانش­تاب مطالعه کردند. نتایج این مقاله نشان داده است که قاب‌های با مهاربندهای کمانش­ تاب تغییرشکل نسبی بین طبقه‌های ماندگار را کنترل نموده و ظرفیت تسلیم و فروریزش سازه را افزایش داده­اند [5]. میرزا حسینی و گرامی (2018)، سازه مهاربندی یک طبقه یک دهانه دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی پایه مسی نوین را در دماهای مختلف (0، 20، 20،40- و 40-) تحت 7 زلزله نزدیک گسل مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی قرار داده­اند. نتایج نشان داد که کاهش دما، باعث می­شود که آلیاژ حافظه­دار شکلی بیشتر باعث کاهش پاسخ‌های لرزه­ای مانند جابه‌جایی نسبی شود. در ضمن در دماهای پایین عملکرد لرزه­ای آلیاژهای حافظه­دار شکلی پایه مسی بهتر است [6]. لی و همکاران در سال 2018، نوعی میراگر سربی-آلیاژ حافظه‌دار شکلی را به ‌صورت آزمایشگاهی ابداع نموده­اند. ابتدا این نوع میراگر تحت بارگذاری چرخه­ای قرار گرفته و سپس منحنی‌های هیسترزیس و پوش­آور به ‌دست‌آمده است. سپس این نوع میراگر را در نرم‌افزار OpenSees مدل­سازی نمودند [7]. قلهکی و همکاران (2018)، نمونه‌های دیوار برشی فولادی سه طبقه با ورق نازک با مقیاس یک سوم، دارای درصدهای مختلف از آلیاژ حافظه‌دار شکلی، تحت بار دوره‌ای در نرم‌افزار تحلیلی Openseesقرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که  با افزایش درصد آلیاژ مصرفی شکل‌پذیری نیز افزایش یافته است [8]. میرزایی و همکاران (2018)، از آلیاژ حافظه­دار شکلی در قاب­های با مهاربندهای هم‌محور با عضو قائم استفاده کردند و نتایج نشان داد که استفاده از آلیاژ حافظه­دار شکلی باعث اتلاف انرژی زلزله می‌شود [9]. سانژینگ و همکاران (2018)، با به کار بردن آلیاژ حافظه­دار در قاب­های با مهاربندهای شورون هشتی کمانش‌تاب، عملکرد قاب­های با مهاربندهای کمانش­تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه­دار را مطالعه کردند. در این پژوهش، عدم توانایی مهاربندهای کمانش­تاب در مهار جابه‌جایی نسبی­های پسماند بیان ‌شده است، همچنین از توانایی این مهاربندها در کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات تحت تحلیل­های لرزه­ای عنوان‌ شده است [10]. همچنین نظری مفرد (2019)، در دو سازه 4 و 8 طبقه، آلیاژ حافظه‌دار شکلی را در هسته مهاربند کمانش تاب بکار بردند. سپس با انجام تحلیل پوش‌آور و دینامیکی افزایشی عملکرد لرزه‌ای آن را تحت 6 شتاب‌نگاشت زلزله ارزیابی کردند [11]. علیلو و پورامینیان در سال 2019، به برررسی منحنی­های شکنندگی لرزه­ای قاب خمشی بتن­آرمه مجهز به میراگرهای ویسکوالاستیک با استفاده از روش‌های [[3]](#footnote-3)FNA و [[4]](#footnote-4)NLTHA پرداخته­اند. نتایج نشان داد که زمان اجرا در روش FNA کاهش ‌یافته است [12]. صادقی و همکاران در سال 2020، عملکرد سازه‌های قاب خمشی فولادی سه‌بعدی با شکل‌پذیری ویژه 4، 8 و 12طبقه دارای مصالح زوال­پذیر را بررسی نموده­اند. نتایج نشان داد که ظرفیت فروریزش سازه‌های 4، 8 و 12 طبقه تحت زلزله‌های دور از گسل بیشترین و تحت زلزله‌های نزدیک گسل با پالس کمترین است و در بین آن‌ها سازه‌ کوتاه مرتبه‌ 4 طبقه، ظرفیت فروریزش کمتری دارد [13]. صابری و همکاران در سال 2020، عملکرد قاب­های خمشی فولادی 3، 6 و ۹ طبقه را توسط تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی بار افزون و دینامیکی افزایشی مورد ارزیابی قرار داده­اند. از تحلیل‌های غیرخطی بار افزون با سه الگوی مختلف بار جانبی به‌ منظور تعیین موقعیت محتمل مفاصل پلاستیک در لحظه‌ فروریزش استفاده‌ کردند تا بتوانند با بهره‌گیری از آن‌ها، سازوکار‌های خرابی محتمل قاب‌های مذکور را مشخص نموده و از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایشی به‌ منظور ارزیابی شدت‌های لرزه‌ای متناظر با شکل‌گیری هر یک از سازوکار‌های خرابی استفاده‌ کنند [14]. مهدی­زاده و همکاران (2020)، نقش شکل­پذیری در ظرفیت فروریزش قاب­های خمشی فولادی 5 طبقه را به ‌صورت احتمالاتی بررسی کردند [15]. هاشمی و همکاران (2020)، عملکرد مهاربند‌های کمانش تاب را در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی بررسی نمودند. نتایج نشان داد که ظرفیت فروریزش قاب‌های دارای مهاربند مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به مهاربند کمانش تاب بیش‌تر است [16]. صابری و همکاران (2020)، به بررسی تأثیر جنس، ضخامت و سوراخدار بودن صفحات کناری بر عملکرد چرخه‌ای اتصال خمشی پرداخته می‌شود. برای این منظور علاوه بر استفاده از صفحات کناری از جنس فولاد نرمه و فولاد پر مقاومت کم آلیاژ، از آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیکل- تیتانیوم نیز استفاده ‌شده است تا اثر فوق الاستیک این آلیاژ بر عملکرد اتصال هم بررسی شود. نتایج حاکی از افزایش ظرفیت و شکل‌پذیری اتصالات با صفحه‌ کناری از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی بوده است. بر اساس نتایج به ‌دست ‌آمده با تغییر پیکربندی و ایجاد برش در اتصال به ‌شکل کلی ظرفیت اتصال در دوران 04/0 رادیان (حد پذیرش قاب‌های خمشی) کاهش‌یافته و تمرکز تنش در گوشه‌های برش خورده بیشترین تأثیر را در گسیختگی صفحات کناری دارند [17]. هاشمی و همکاران (2021)، عملکرد قاب‌های دارای مهاربندهای کمانش تاب در دو حالت با و بدون آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی بررسی‌ شده است. برای توسعه منحنی‌های شکنندگی از 7 شتاب‌نگاشت تکان قوی شامل زلزله‌ اصلی و پس‌لرز‌ه‌های متوالی استفاده‌ شده است. نتایج نشان داد که قابِ دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی بیشتر دارای محدوده‌ عملکردی [[5]](#footnote-5)IO و ­ [[6]](#footnote-6)LSاست و احتمال رخداد سطح عملکردی آستانه‌ فروریزش 38 درصد و در حالت بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی دارای محدوده‌ی عملکردCP [[7]](#footnote-7) و با احتمال 65 درصد خواهد بود [18]. با توجه به اینکه فلسفه طراحی لرزه‌ای در آیین‌نامه‌ها برمبنای رفتار غیرخطی سازه­ها حین وقوع زلزله است. پس این امر سبب می­شود تا سیستم­های سازه­ای پس از زلزله­های با شدت متوسط و یا بالا دچار تغییرشکل­های گسترده شده و به ‌این‌ترتیب پس از وقوع زلزله قابل بازسازی نبوده و یا بازسازی آن بسیار پرهزینه و غیراقتصادی باشد. با توجه به اينكه آلياژ حافظه‌دار مشكل تغييرشكل­هاي ماندگار سازه را تا حدودي مرتفع می‌کند. بنابراین در این مقاله، به عنوان نوآوری، رفتار لرزه­ای سازه­های دارای مهاربند کمانش تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی بررسی می­شود و تأثیر اضافه کردن SMA در سیستم BRB تحت 3 رکورد زلزله­ی نزدیک به گسل شامل توالی زلزله اصلی و پس­لرزه تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی می­شوند.

**2- معرفی مهاربند کمانش تاب و آلیاژ حافظه­دار شکلی**

یکی از رایج­ترین سیستم­های مقاوم در برابر نیروهای جانبی، مهاربند است. شکل (1) مقایسه­ای بر رفتار مهاربندهای هم‌محور متداول و مهاربندهای کمانش تاب است [16]. ﻫﺴﺘﻪ ﻓﻮﻻدی در ﻣﻬﺎرﺑﻨﺪﻫﺎی کمانش تاب ﺑﻪ ﺳﻪ ﺑﺨﺶ تقسیم‌شده اﺳﺖ: ﻧﺎﺣﯿﻪ ﺗﺴﻠﯿﻢ، ﻧﺎﺣﯿﻪ اﻧﺘﻘﺎل و ﻣﻨﻄﻘﻪ اتصال. ﻧﺎﺣﯿﻪ ﺗﺴﻠﯿﻢ، ﻗﺴﻤﺘﯽ از ﻃﻮل ﻫﺴﺘﻪ ﻣﻬﺎرﺑﻨﺪ اﺳﺖ ﮐﻪ در آن ﻫﻤﻪ ﻧﯿﺮوﻫﺎی لرزه‌ای از ﻃﺮﯾﻖ ﺟﺎری ﺷﺪن ﻫﺴﺘﻪ در ﮐﺸﺶ و ﻓﺸﺎر، مستهلک‌شده و از ﺑﯿﻦ می‌روند. اﯾﻦ ﻣﻨﻄﻘﻪ دارای ﻋﺮض ﻣﻘﻄﻊ کاهش‌یافته اﺳﺖ ﺗﺎ ﻣﻄﻤﺌﻦ شویم ﮐﻪ ﺗﺴﻠﯿﻢ در این ﻧﺎﺣﯿﻪ رخ می­دﻫﺪ. اﻃﺮاف ﻫﺴﺘﻪ ﺗﻮﺳﻂ اﺟﺰای ﻣﺤﺪود ﮐﻨﻨﺪه کاملاً ﭘﻮﺷﺎﻧﺪه ﻣﯽ­ﺷﻮد ﺗﺎ از ﮐﻤﺎﻧﺶ ﮐﻠﯽ یا ﻣﻮﺿﻌﯽ ﻣﻬﺎرﺑﻨﺪ در ﻧﺎﺣﯿﻪ ﺗﺴﻠﯿﻢ ﺟﻠﻮﮔﯿﺮی ﺷﺪه و به‌طور ﮐﺎﻣﻞ اﻣﮑﺎن ﺗﺴﻠﯿﻢ ﻓﺸﺎری ﻫﺴﺘﻪ ﻓﺮاﻫﻢ ﺷﻮد. ﻧﺎﺣﯿﻪ اﻧﺘﻘﺎل ﻗﺴﻤﺘﯽ از ﻫﺴﺘﻪ ﻣﻬﺎرﺑﻨﺪ اﺳﺖ ﮐﻪ کاملاً در دو ﻃﺮف ﻧﺎﺣﯿﻪ ﺗﺴﻠﯿﻢ ﻗﺮار ﮔﺮﻓﺘﻪ اﺳﺖ. اﯾﻦ ﻗﺴﻤﺖ­ﻫﺎ دارای ﻋﺮض ﻣﻘﻄﻊ ﺑﯿﺸﺘﺮ از ﻧﺎﺣﯿﻪ ﺗﺴﻠﯿﻢ اﺳﺖ و ﺑﻪ ﻫﻤﺎن ﺷﮑﻞ ﺗﻮﺳﻂ اﺟﺰای ﻣﺤﺪود ﮐﻨﻨﺪه، ﻓﺮا ﮔﺮﻓﺘﻪ ﺷﺪه­اند. ﻣﻨﻄﻘﻪ اﺗﺼﺎل ﺑﺨﺸﯽ از ﻣﻬﺎرﺑﻨﺪ اﺳﺖ ﮐﻪ ﺧﺎرج از ﻧﺎﺣﯿﻪ ﻣﺤﺪود ﺷﺪه ﻗﺮار ﮔﺮﻓﺘﻪ اﺳﺖ و ﺑﺮای اﺗﺼﺎل ﻣﻬﺎرﺑﻨﺪ ﺑﻪ ﺳﺎﯾﺮ المان‌های ﻗﺎب ﻣﻮرد اﺳﺘﻔﺎده ﻗﺮار ﻣﯽ­ﮔﯿﺮد. قاب‌های دارای مهاربندهای کمانش تاب، حالت خاصی از مهاربندهای هم‌محور یا همگرا هستند که شکل­پذیری بیشتری داشته و از توانایی جذب انرژی بالایی برخوردارند. هسته مهاربندهای کمانش تاب مطابق شکل (2) ارائه ‌شده است [1].

**شکل 1.** منحنی هیسترزیس مهاربند مقید در برابر کمانش و مهاربند معمولی [16].

|  |
| --- |
|  |
| **Fig. 1.** Hysteresis curve of BRB and conventional brace [16]. |

**شکل 2.** شمای کلی مهاربند کمانش تاب [11].

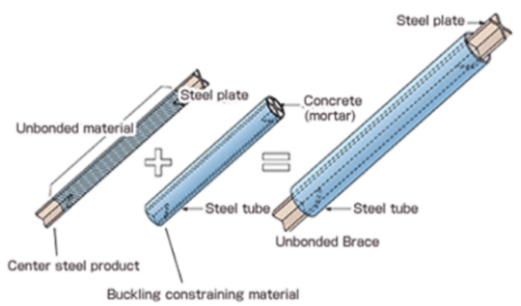


Fig. 2. General schematic view of buckling restrained brace [11].

سیستم­های هوشمند در مهندسی سازه به سیستم­هایی اطلاق می­شود که به طور خودکار قابلیت برابری رفتار سازه در پاسخ به بارگذاری غیر مترقبه را دارند تا بدین وسیله ایمنی، افزایش عمر و کارایی سازه تأمین شود. یکی از تکنولوژی­های جدیدی که امکان دستیابی به این اهداف را میسر می­سازد، ساخت و توسعه مواد هوشمند مانند آلیاژهای حافظه­دار شکلی است که به علت دارا بودن ویژگی‌های میکروسکوپی و مایکروسکوپی ممتازی همچون ظرفیت میرایی بالا، دوام، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی، خاصیت فوق ارتجاعی یا شبه ارتجاعی، تغییرشکل­ها و کرنش­های بزرگ و برگشت­پذیر که در مصالح سنتی موجود نیست، کاربردهای زیادی در زمینه­های مختلف علوم و صنعت پیدا کرده­اند [19]. کاربرد الیاف حافظه‌دار شکلی در سیستم‌‌‌‌‌‌‌‌های جداگر ‌لرز‌‌‌‌‌‌ه‌ای، میراگر‌‌‌‌‌‌‌‌های انرژی‌‌، اتصالات سازه­ای، بتن مسلح هوشمند و کامپوزیت‌‌‌‌‌‌‌‌ها از جمله کاربرد‌‌‌‌‌‌های آلیاژهای حافظه­دار است. فاز غالب در این آلیاژها، وابسته به دما و تنش‌های اعمالی است و با توجه به ترکیب شیمیایی و فرآیندهای ترمومکانیکی زمان ساخت، تنظیم می­شوند. فاز پایدار در دمای بالا آستنیت[[8]](#footnote-8) و فاز پایدار در دمای پایین مارتنزیت[[9]](#footnote-9) نامیده می­شود. ساختار کریستالی آستنیت به ‌صورت مکعبی است و دارای فاز دمایی بالا و استحکام بالا است. مارتنزیت دارای فاز دمایی پایین، ساختار مونوکلینیک و تقارن کمتر نسبت به آستنیت است. این دو فاز با اعمال دما یا تنش، قابل تبدیل به همدیگر می­شوند و تمامی ویژگی‌های مکانیکی، الکتریکی و حرارتی آلیاژهای حافظه­دار شکلی را تحت تأثیر قرار می دهد. (شکل 3) [20].

**شکل 3**. فازهای اصلی در آلیاژهای حافظه­دار شکلی [20].

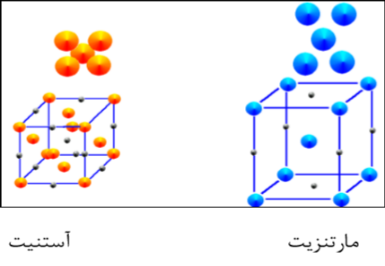


Fig. 3. Original phases in shape memory alloys [20].

**3-درستی‌آزمایی و مدل­سازی قاب­ها**

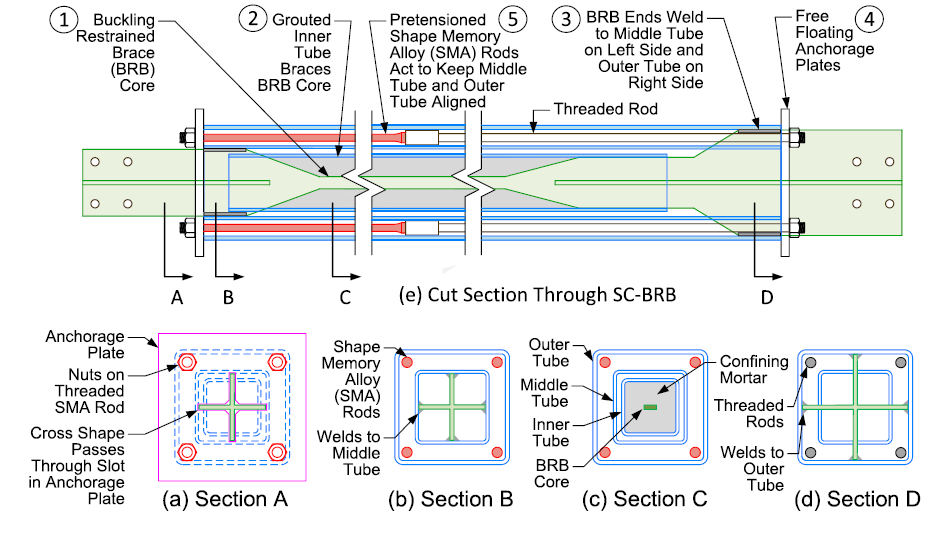
در این مقاله، به‌ منظور انجام تحلیل­های غیرخطی از نرم‌افزار کدبازOpenSees استفاده ‌شده است. این نرم‌افزار اجزای محدود است که به وسیله مازونی و همکاران تهیه‌شده است و همچنان درحال‌توسعه می­باشد [21]. این نرم­افزار مجموعه کاملی از انواع المان­ها، مصالح و روش­های مختلف تحلیل است. نرم­افزار OpenSees به شکل تخصصی در حوزه سیستم­های عملکردی خاک و سازه تحت زلزله ارائه ‌شده است و با این هدف از سال 1990 تاکنون درحال‌توسعه است. این نرم­افزار به­صورت رایگان قابل ‌دسترسی است. نرم­افزار مذکور در زمینه­های مختلف مدل‌سازی و تحلیل سازه­ها در سرتاسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. مفاهیم اساسی برنامه با استفاده از مفسر این برنامه قابل توجیه است. مفسر یک فرم گسترش ‌یافته‌ای از زبان متنی Tcl است. مفسر برای انجام عملیات تحلیل اجزای محدود دستورات لازم را به Tcl اضافه می­کند [21].در ادامه، درستی‌آزمایی نمونه آزمایشگاهی BRB-SMA در نرم­افزار، طراحی و مدل­سازی قاب‌های مورد مطالعه ارائه شده است.

**3-1- درستی‌آزمایی** **مدل تحلیلی** **BRB-SMA**

به­منظور درستی‌آزمایی مدل‌سازی و شبیه‌سازی در نرم­افزار OpenSees از مدل آزمایشگاهی شامل مهاربند کمانش تاب با میله‌های SMA، ارائه ‌شده در مطالعه میلر و همکاران استفاده‌ شده است [22]. سیستم در شکل (4) توصیف‌ شده است. در بطن این سیستم هسته BRB قرار گرفته است که توسط ملات درون غلاف پوشانده شده است. جوش هسته میانی با غلاف‌های بیرونی و میانی از طریق المان Gap مدل‌سازی شده است که منجر به عملکرد مناسب آلیاژهای حافظه­دار شکلی با المان سازه‌ای شده است.

برای مدل‌سازی مهاربند کمانش تاب درOpenSees از المان خرپایی Corot Truss بهره برده می­شود که عملکرد هم‌زمان میله‌های آلیاژ حافظه­دار شکلی و همچنین تیوپ‌های داخلی و میانی و بیرونی در آن گذاشته ‌شده است. برای جلوگیری از کمانش مهاربند موردنظر در مدل آزمایشگاهی از ملات استفاده ‌شده است، همچنین 4 میله SMA به کار برده شده نیز در شکل (4) نشان داده ‌شده است.

**شکل 4.** مدل آزمایشگاهی مهاربند کمانش تاب مجهز به میله­های SMA [22].



**Fig. 4.** Experimental model of buckling restrained brace with SMA bars [22].

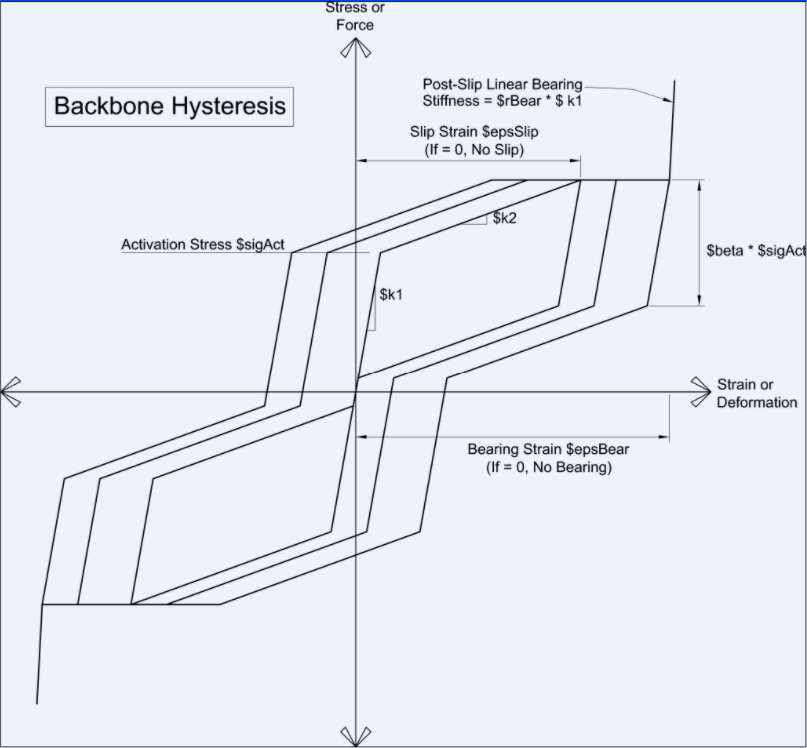
رفتار آلیاژ حافظه­دار شکلی مورد استفاده در این پژوهش مطابق شکل (5) در اثر بارگذاری و باربرداری بدون کرنش پسماند است. مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه­دار شکلی نیز بر اساس منحنی رفتاری مطابق جدول (1) ارائه ‌شده است.

**جدول 1.** مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه­دار بر اساس منحنی رفتار ارائه‌شده در مرجع [19].

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **β** | **تنش فعال­سازی**  **(N/m2)** | **سختی نهایی**  **(K2)**  **(N/m2)** | **سختی اولیه**  **(K1)**  **(N/m2)** | **مصالح** |
| **0.5** | 268895640 | 2080412987 | 63431792000 | SMA |

**Table. 1.** Mechanical specification of memory alloy according to presented behavioral curve [19].

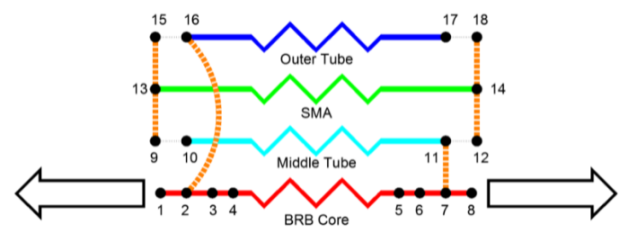
**شکل 5.** رفتار آلیاژ حافظه­دار بر اساس شبیه­سازی با دستور Self-Centering در نرم‌افزار OpenSee[21].



**Fig. 5.** The behavior of the memory alloy is based on simulation with the Self Centering command in the OpenSees software [21].

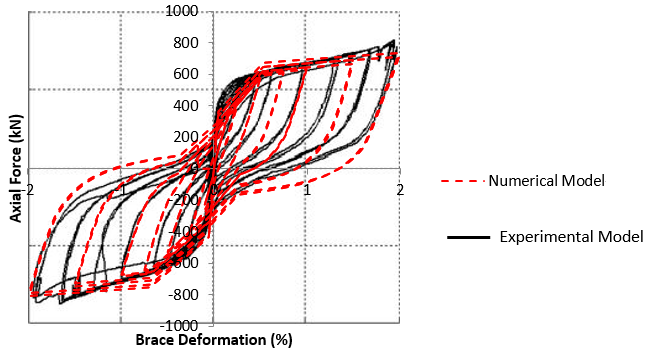
مدل آزمایشگاهی مهاربند صلیبی‌شکل است و هسته آن مستطیل شکل است. آزمایش بار محوری برای این مدل آزمایشگاهی انجام‌ گرفته و نمودارهای هیسترزیس آن نشان داده ‌شده است. شکل (5) و همان‌گونه که مشاهده می‌شود رفتار پرچمی شکل از خود نشان می­دهد. به منظور شبیه­سازی اتصال بین غلاف‌های داخلی، میانی، بیرونی و میله آلیاژ حافظه­دار در نرم‌افزار از المان‌های گپ استفاده ‌شده است. نمودار شماتیک مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار مطابق شکل (6) ارائه ‌شده است. از المان Gap element بین میله SMA و غلاف بیرونی و داخلی استفاده‌ شده است. المان Gap به ‌عنوان المان Zero length با سختی کم اما غیر صفر در حالت فشاری تعریف ‌شده است. هم­پوشانی نمودارهای هیسترزیس نیروی محوری-تغییر شکل مهاربند مدل آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی‌شده در این مقاله در شکل (7) ارائه ‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می­شود با مدل‌سازی این مهاربند در نرم­افزار OpenSees نتایج قابل قبولی در ارزیابی درستی مدل‌سازی به‌ دست ‌آمده است. ضمنا درصد خطای پارامترهای مورد مطالعه در نمونه تحلیلی و آزمایشگاهی مطابق جدول (2) ارائه شده است.

**شکل 6.** نمودار شماتیک مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار OpenSees**.**



**Fig. 6.** Schematic diagram of OpenSees numerical model.

**شکل 7.** مقایسه نتیجه تحلیل رایانه­ای و آزمایشگاهی.



**Fig. 7.** Results comparison of computer Analysis and experiment analysis.

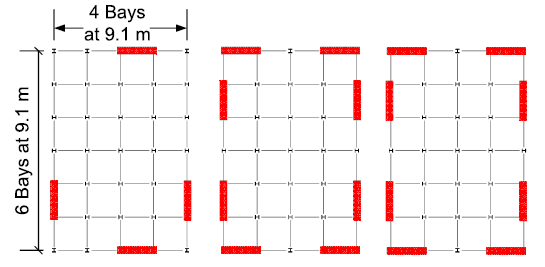
**جدول 2.** درصد خطای پارامترهای موردمطالعه در نمونه تحلیلی و آزمایشگاهی

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| سختی اولیه (kN/m) | نیروی نهایی (kN) | نیروی تسلیم (kN) | پارامترهای موردمطالعه |
| 112000 | 538 | 326 | نمونه­ی آزمایشگاهی |
| 107000 | 529 | 319 | نمونه­ی تحلیلی |
| 5/4 % | 9/2 % | 4/4 % | درصد خطا |

**Table. 2.** The error rate of studied parameters in analytical and Experimental models.

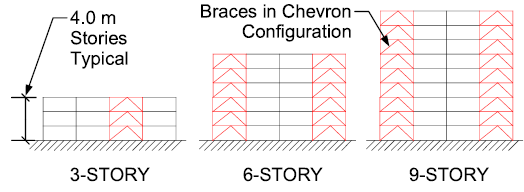
**3-2- طراحی و مدل­سازی قاب­ها**

در این مقاله، عملکرد سازه­های دارای سیستم مهاربندی کمانش تاب با و بدون SMA تحت زلزله و پس­لرزه­ متوالی نزدیک به گسل بررسی می­شود. به‌ منظور نیل به این هدف، ابتدا پلان و پیکربندی مدل­های موردنظر در این مقاله بر اساس سازه­های معرفی‌شده در مطالعه میلر و همکاران ارائه شد [22]. سپس مقاطع سه سازه 3، 6 و 9 طبقه به صورت سه بعدی بر اساس آئین‌نامه­ها‌ی داخلی (مبحث ششم و دهم مقررات ملی [23 و 24]) و استاندارد2800 ویرایش چهارم [25] طراحی شد. بارگذاری ثقلی مرده و زنده طبقات به ترتیب 600 و 200 کیلوگرم بر مترمربع اعمال شده­اند و نسبت میرایی رایلی به صورت (05/0= ξ) برای تمام مدهای ارتعاشی سازه لحاظ شده و اثر المان­های غیرسازه­ای در نظر گرفته نشده است. کلیه ضوابط لرزه­ای برای سازه مذکور لحاظ شده است. تعداد دهانه‌ها در یک راستا 4 و در راستای دیگر 6 هستند. فاصله دهانه­ها 1/9 متر و ارتفاع طبقات 4 متر است. در ادامه، به منظور انجام تحلیل­های دینامیکی غیرخطی مدل­های موردنظر ، قاب‌های دو بعدی محور کناری سازه­های 3، 6 و 9 طبقه­ی 4 دهانه، استخراج‌شده­اند. مطابق شکل‌های (8 و 9) به ترتیب پلان و نمای سازه­های مورد مطالعه نشان داده شده است. ضمنا جزئیات مقاطع طراحی شده قاب­های مذکور نیز مطابق جدول (3) نشان داده می­شود.

**شکل 8.** پلان سازه­های سه بعدی مورد استفاده در این مقاله**.**

**Fig. 8.** The plan of three dimensional structures in this study.

**شکل 9.** قاب کناری استخراج‌شده از سازه­های سه بعدی موردنظر.



**Fig. 9.** The extracted side axis frame from the desired three dimensional of studied structures.

**جدول 3.** جزئیات اندازه مقاطع اعضا در قاب­های مورد مطالعه

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| مساحت SMA  (mm2) | مساحت هسته BRB  (mm2) | تیر | ستون | طبقات |
| 1800 | 1950 | IPE200 | IPB200 | 1 |
| 1710 | 1835 | IPE180 | IPB200 | 2 |
| 1550 | 1680 | IPE180 | IPB200 | 3 |
| مساحت SMA  (mm2) | **مساحت هسته BRB**  **(mm2)** | **تیر** | **ستون** | **طبقات** |
| 1910 | 2180 | IPE400 | IPB400 | 1 |
| 1770 | 1950 | IPE350 | IPB400 | 2 |
| 1650 | 1890 | IPE350 | IPB320 | 3 |
| 1570 | 1810 | IPE270 | IPB300 | 4 |
| 1440 | 1750 | IPE270 | IPB250 | 5 |
| 1320 | 1620 | IPE220 | IPB200 | 6 |
| مساحت SMA  (mm2) | **مساحت هسته BRB**  **(mm2)** | **تیر** | **ستون** | **طبقات** |
| 2670 | 3150 | IPE500 | IPB550 | 1 |
| 2330 | **2780** | IPE350 | IPB500 | 2 |
| 1990 | 2460 | IPE350 | IPB500 | 3 |
| 1780 | **2290** | IPE270 | IPB450 | 4 |
| 1555 | 1995 | IPE270 | IPB400 | 5 |
| 1230 | **1680** | IPE220 | IPB350 | 6 |
| 1005 | 1240 | IPE400 | IPB270 | 7 |
| 770 | **997** | IPE350 | IPB220 | 8 |
| 450 | 670 | IPE350 | IPB180 | 9 |

**Table. 3.** Details of section sizes of braces, beams, and columns of the studied frames

در این مقاله، مهاربندهای قاب­ها به ترتیب شامل 2 بخش الاستیک صلب، هسته مهاربند کمانش تاب است. در نرم­افزار بخش الاستیک با دستور،ElasticBeamColumn و بخش هسته کمانش تاب با دستور Corot Truss مدل‌سازی شده است. ملاحظه می­شود که بخشی از المان قطری به‌عنوان المان صلب لحاظ شده است. بخش آلیاژ حافظه­دار در مهاربندهای مجهز به آلیاژ حافظه­دار با المان خرپائی Corot Truss و رفتار آن توسط دستور Self Centering شبیه‌سازی ‌شده است. این نوع از المان­ها تحت بارهای فشاری دچار کمانش نمی­شوند. به منظور اتصال بخش خرپائی که دو انتها مفصل محسوب می­شود، از یکسان­سازی درجات آزادی توسط دستور Equal DOF استفاده‌شده است**.** مصالح به کار رفته در تیرها، ستون­ها و مهاربندها همگی از نوع ST37 با مدول الاستیسیته برابر 200000 مگاپاسکال، تنش تسلیم 240 مگاپاسکال و تنش نهایی 370 مگاپاسکال، در نظر گرفته شده است. مصالح فولادی تک‌محوری دو خطی با سخت شوندگی سینماتیکی و سختی ایزوتروپیک بر اساس مدل Steel01 با میزان سخت­شدگی 3 درصد فرض شده­اند [26]. برای المان­های سازه­ای از مقطع رشته­ای (فایبر) به صورت مدل پلاستیسیته گسترده استفاده ‌شده است. از المان­های تیر-ستون غیرخطی نیز در مدل­سازی استفاده شده است. این المان­ها به صورت نیرویی و بر پایه پلاستیسیته گسترده هستند تا رفتار واقعی المان­ها را در تحلیل غیرخطی ارزیابی کنند. برای برآورد رفتار غیرخطی هندسی از تبدیل همگرد استفاده شده است که در این نوع تبدیل، تبدیلات هندسی غیرخطی را به صورتی دقیق از سیستم محلّی به سیستم کلّی محاسبه کرده است. همچنین اتصالات تیر به ستون و ستون به پی، صلب فرض شده است.

**4- تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی**

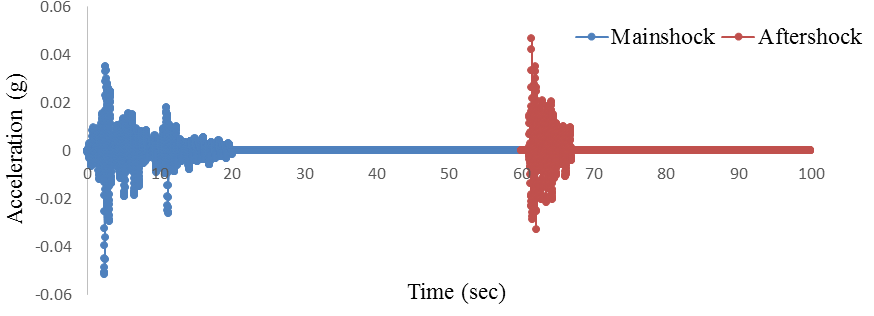
در روش تحلیل دینامیكی غیرخطی، پاسخ سازه با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و رفتار غیرخطی هندسی سازه محاسبه می‌شود. معمولاً مطابق بند 2-5-3 استاندارد 2800 ویرایش چهارم، برای تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی می­توان از 3 رکورد زلزله استفاده کرد [23]. به منظور انجام تحلیل­های غیرخطی، شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های مورد نیاز از مطالعه گارسیا و همکاران (2010) استخراج ‌شده است [25]. مطابق مقاله گارسیا و همکاران [27]، به منظور تمایز زلزله‌ی اصلی و پس­لرزه و برآورد پاسخ­های لرزه­ای، مقیاس سازی صورت نگرفته است. در این پژوهش، 3 رکورد لرزه­ای نزدیک گسل شامل لرزه اصلی و پس‌لرزه انتخاب‌شده است. شتاب‌نگاشت‌های موردنظر با مشخصات مندرج در جدول (4) از سایت PEER [28] استخراج‌شده­اند و با استفاده از نرم­افزار SeismoSignal [29]، شتاب­نگاشت توالی زلزله اصلی و پس‌لرزه با میرایی 5% مطابق شکل­های (10، 11 و 12) ارائه شده است.

**جدول 4.** معرفی زلزله­های موردنظر در تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه­ها **[23].**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **زلزله اصلی/پس­لرزه** | **PGA** | **بزرگی** | **سال** | | **ایستگاه** | | **زمین­لرزه** | | **رکورد** | |
| Mainshock | 1/208 | 3/5 | | 1994 | | Jensen Filter Plant | | JEFP 19940117 | | 1 |
| Aftershock | 4/47 | 1/5 | | 1994 | | Jensen Filter Plant | | JEFP 19940117 | | 2 |
| Mainshock | 1/154 | 3/5 | | 1994 | | Jense Filter Plant Generator | | JEFG 19940117 | | 3 |
| Aftershock | 3/70 | 1/5 | | 1994 | | Jense Filter Plant Generator | | JEFG 19940117 | | 4 |
| Mainshock | 1/149 | 3/5 | | 1994 | | Pacoima Kagel Canyon | | PACO 19940117 | | 5 |
| Aftershock | 7/34 | 2/5 | | 1994 | | Pacoima Kagel Canyon | | PACO 19940117 | | 6 |

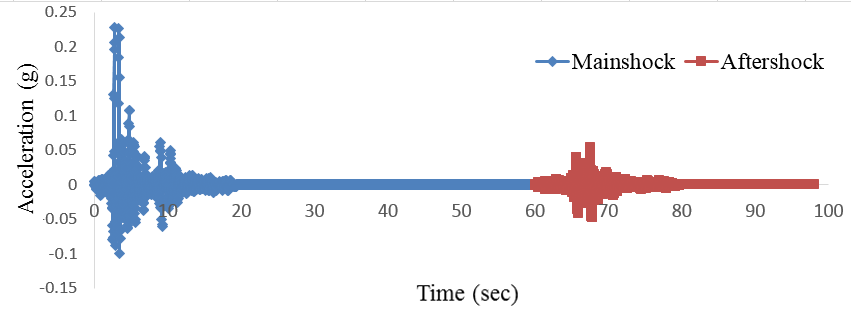
**Table.2.** Introduction of used earthquakes in structural nonlinear dynamic analysis [23].

**شکل10.** شتاب‌نگاشت زلزله­ی اصلی و پس­لرزه­ی JEFP 19940117 **(R1)**.



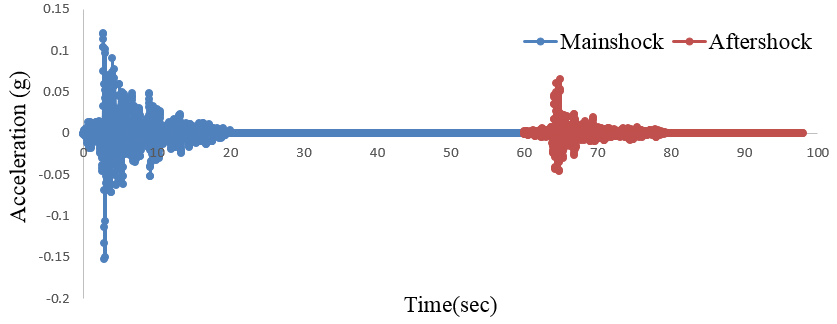
**Fig.10**. Accelogram of main shock-aftershock ground motion JEFP 19940117 (R1).

**شکل 11.** شتاب‌نگاشت زلزله­ی اصلی و پس­لرزه­ی JEFG 19940117 **(R2)**.



**Fig. 11.** Accelogram of main shock-aftershock ground motion JEFG 19940117(R2).

**شکل 12. شتاب‌نگاشت زلزله اصلی و پس‌لرزهPACO 19940117 (R3)**.

**Fig. 12.** Accelogram of main shock-aftershock ground motion PACO 19940117 )­R3).

**5-بررسی نتایج تحلیل­ها**

در این مقاله، به ارزیابی رفتار لرزه­ای قاب دارای مهاربند کمانش تاب با و بدون آلیاژ حافظه­دار شکلی پرداخته‌شده است. تعداد 6 مدل 3، 6 و 9 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه­دار شکلی تحت توالی سه زلزله اصلی و سه پس­لرزه مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی قرار گرفته است و پاسخ­های لرزه­ای جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای، جابه‌جایی بیشینه بام، بیشترین برش پایه و بیشترین شتاب بام استخراج شده و مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. با بررسی حدود جابه‌جایی نسبی مطابق نشریه‌ 361 (بهسازی) [30]، مقادیر 7/0، 5/2 و 5 درصد به ‌عنوان سطوح عملکرد "استفاده‌ی بی‌وقفه[[10]](#footnote-10) (IO)­، ایمنی جانی[[11]](#footnote-11) (LS) و آستانه‌ی فروریزش[[12]](#footnote-12) (CP) بیان‌ شده است. بر اساس جدول (5)، بیشترین جابه‌جایی نسبی در قاب 3طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله R1، R2 وR3 نشان داده‌شده است که تحت هر سه توالی زلزله اصلی و پس­لرزه، وجود آلیاژ حافظه­دار شکلی باعث افزایش جابه‌جایی نسبی سازه­ای شده است. آلیاژ حافظه­دار شکلی به دلیل ماهیت میرا کننده‌ای که دارد باعث کاهش پالس­های ضربه­ای رکورد می­شود ولی بیشینه جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای را کاهش نمی­دهد پس می­توان نتیجه گرفت که آلیاژ حافظه­دار شکلی در سازه­های کوتاه مرتبه باعث کاهش جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای نمی­شود. سطح عملکرد لرزه­ای در قاب 3 طبقه تحت توالی زلزله اصلی و پس‌لرزه رکوردهای R1 و R3 در محدوده استفاده بی‌وقفه (IO) و تحت رکورد R2 در ناحیه ایمنی جانی (LS) است.

**جدول 5.** مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای قاب 3 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله R1، R2و R3.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **R3** | **R2** | **R1** | **وضعیت**  **SMA** | **طبقات** |
| 0043/0 | 001/0 | 005/0 | با | 1 |
| 0055/0 | 0024/0 | 0065/0 | بدون |
| 0051/0 | 0019/0 | 0045/0 | با | 2 |
| 0067/0 | 0035/0 | 0065/0 | بدون |  |
| 0056/0 | 0072/0 | 006/0 | با | 3 |
| 007/0 | 01/0 | 007/0 | بدون |

**Table. 5.** Comparison of maximum interstory drift of 3-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

بر اساس جدول (6)، بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای در قاب 6 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله R1، R2وR3 نشان داده ‌شده است که تحت هر سه توالی زلزله اصلی و پس‌لرزه، وجود آلیاژ حافظه­دار شکلی باعث کاهش جابه‌جایی نسبی سازه­ای شده است پس می­توان نتیجه گرفت که آلیاژ حافظه­دار شکلی در سازه­های میان مرتبه باعث کاهش جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای می­شود. سطح عملکرد لرزه­ای در قاب 6 طبقه تحت توالی زلزله اصلی و پس­لرزه رکورد R1 در محدوده ایمنی جانی (LS) است.

**جدول 6.** مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای قاب6 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله R1، R2 وR3.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **R3** | | **R2** | **R1** | **وضعیت**  **SMA** | **طبقات** |
| 004/0 | 002/0 | | 0014/0 | با | 1 |
| 0055/0 | 0033/0 | | 0025/0 | بدون |
| 0061/0 | 0041/0 | | 0035/0 | با | 2 |
| 0072/0 | 0051/0 | | 0043/0 | بدون |
| 0066/0 | 0068/0 | | 0051/0 | با | 3 |
| 007/0 | 01/0 | | 0067/0 | بدون |
| 009/0 | 0025/0 | | 0078/0 | با | 4 |
| 01/0 | 0042/0 | | 0099/0 | بدون |
| 0095/0 | 005/0 | | 01/0 | با | 5 |
| 011/0 | 0087/0 | | 015/0 | بدون |
| 009/0 | 0072/0 | | 017/0 | با | 6 |
| 018/0 | 015/0 | | 021/0 | بدون |

**Table. 6.** Comparison of maximum interstory drift of 6-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

جدول (7) بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای در قاب 9 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله R1، R2 وR3 را نشان می­دهد، که تحت هر سه توالی زلزله اصلی و پس­لرزه، وجود آلیاژ حافظه­دار شکلی باعث کاهش شدید جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای شده است پس می­توان نتیجه گرفت که آلیاژ حافظه­دار شکلی در طبقات میانی سازه بلند مرتبه باعث کاهش بیش از 50 درصدی جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای می­شود. سطح عملکرد لرزه‌ای در قاب 9 طبقه تحت توالی زلزله اصلی و پس‌لرزه در محدوده ایمنی جانی (LS) است. بر اساس شکل (13)، بیشترین جابه‌جایی بام در قاب 9 طبقه بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت زلزله R2 رخ‌داده است که با افزودن آلیاژ حافظه­دار شکلی باعث کاهش بیش از 50 درصد بیشترین جابه‌جایی بام سازه 9 طبقه شده است. در ضمن در تمامی مدل‌های مورد بررسی، افزودن SMA باعث کاهش جابه‌جایی بیشینه بام می‌شود که این کاهش در مدل 9 طبقه بیشتر و در مدل 3 طبقه کمتر بوده است.

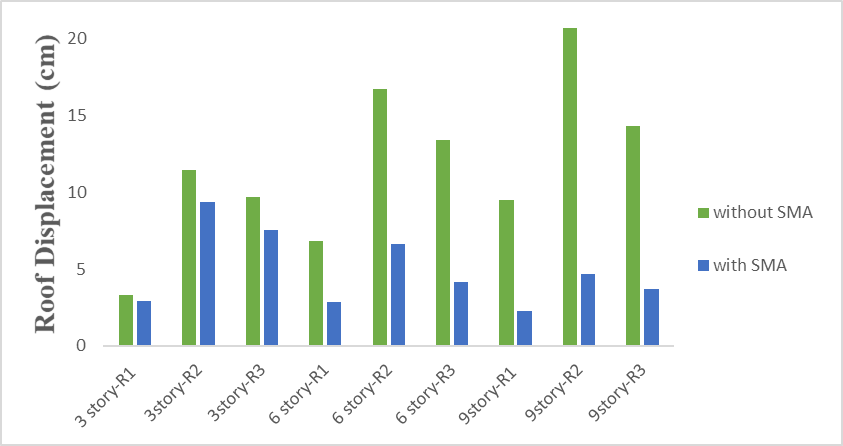
مطابق شکل (14)، بیشترین برش پایه در قاب6 طبقه بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت زلزله R3 رخ‌داده است که با افزودن آلیاژ حافظه‌دار شکلی باعث کاهش بیش از 50 درصد بیشترین برش پایه قاب 6 طبقه شده است. همچنین در تمامی مدل‌های مورد بررسی، افزودن SMA باعث کاهش برش پایه می‌شود که این کاهش با افزایش تعداد طبقات، افزایش‌یافته است. بر اساس شکل (15)، بیشترین شتاب بام در قاب 9 طبقه بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت زلزله R3 رخ‌داده است که با افزودن آلیاژ حافظه­دار شکلی باعث کاهش بیش از 50 درصد بیشترین شتاب بام قاب 9 طبقه شده است و در تمامی مدل­های موردبررسی، افزودن SMA باعث کاهش شتاب بام می­شود که این کاهش با افزایش ارتفاع بیشتر می­شود.

**جدول 7.** مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای قاب 9 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله R1، R2وR3**.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **R3** | | **R2** | | **R1** | **وضعیت**  **SMA** | | | **طبقات** |
| 0043/0 | 001/0 | | 005/0 | | | با | 1 | |
| 0055/0 | 0033/0 | | 0067/0 | | | بدون |
| 0061/0 | 0041/0 | | 0035/0 | | | با | 2 | |
| 0072/0 | 0051/0 | | 0043/0 | | | بدون |
| 0066/0 | 0068/0 | | 0051/0 | | | با | 3 | |
| 007/0 | 01/0 | | 007/0 | | | بدون |
| 0043/0 | 001/0 | | 005/0 | | | با | 4 | |
| 0055/0 | 0033/0 | | 0025/0 | | | بدون |
| 0061/0 | 0041/0 | | 0035/0 | | | با | 5 | |
| 0072/0 | 0051/0 | | 0043/0 | | | بدون |
| 0066/0 | 0068/0 | | 0051/0 | | | با | 6 | |
| 007/0 | 01/0 | | 0067/0 | | | بدون |
| 009/0 | 0025/0 | | 0078/0 | | | با | 7 | |
| 0055/0 | 0033/0 | | 0025/0 | | | بدون |
| 0061/0 | 0041/0 | | 0035/0 | | | با | 8 | |
| 0067/0 | 0035/0 | | 0065/0 | | | بدون |
| 0056/0 | 0072/0 | | 006/0 | | | با | 9 | |
| 011/0 | 01/0 | | 021/0 | | | بدون |

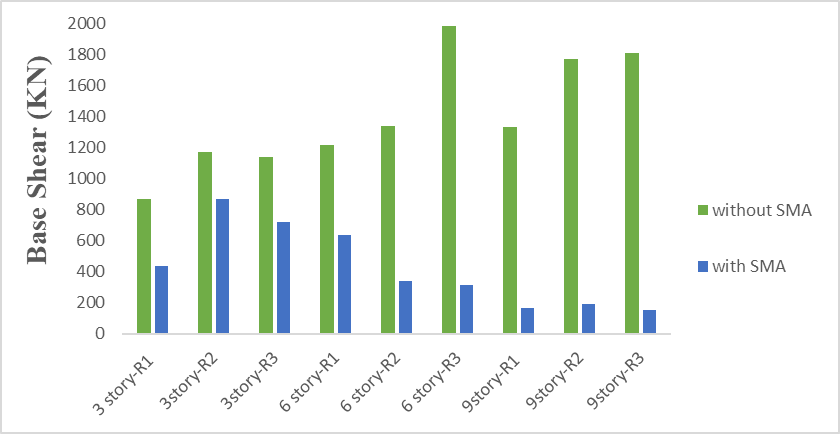
**Table. 7.** Comparison of maximum interstory drift of 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 13.** مقایسه بیشترین جابه‌جایی بام قاب 3، 6 و 9 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله اصلی و پس­لرزه R1، R2وR3.



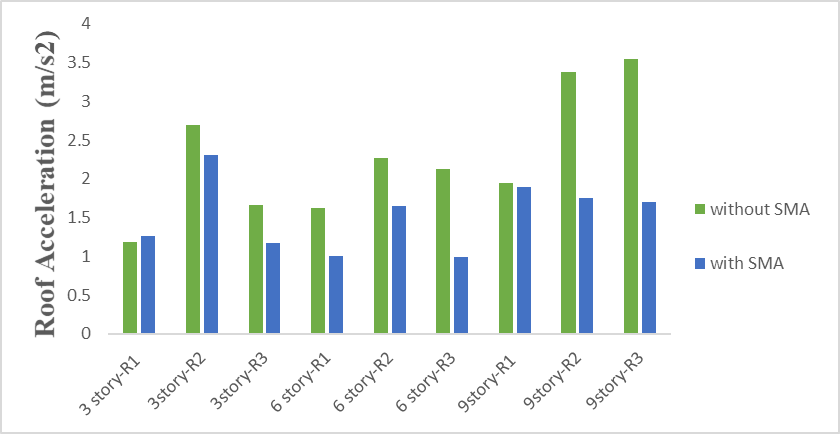
**Fig. 13.** Comparison of maximum roof displacement of 3, 6 and 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3**.**

**شکل 14**. مقایسه بیشترین برش پایه طبقات قاب 3، 6 و 9 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله R1، R2وR3.



**Fig. 14.** Comparison of maximum base shear of 3, 6 and 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 15.** مقایسه بیشترین شتاب بام قاب 3، 6 و 9 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله R1، R2وR3.

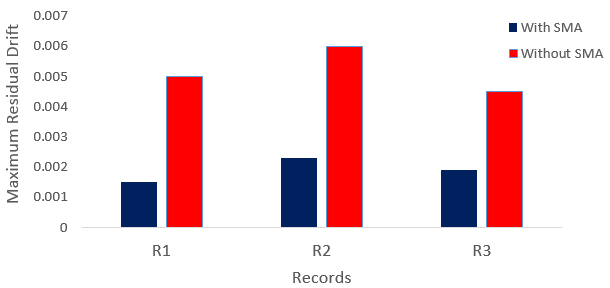


**Fig. 15.** Comparison of maximum roof acceleration of 3, 6 and 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3

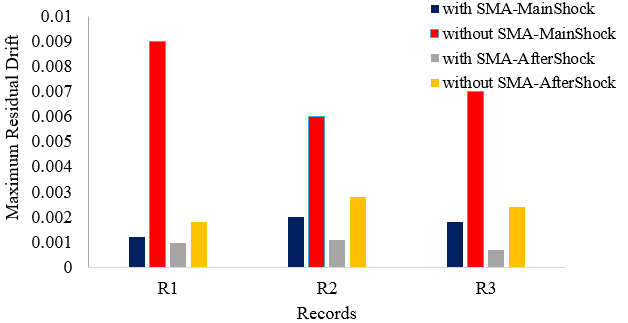
.

بر اساس شکل­های (16 تا 21)، بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای پسماند در قاب­های مورد مطالعه ارائه شده است. بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای پسماند در قاب­های 3، 6 و 9 طبقه دارای مهاربند کمانش تاب به ترتیب معادل 0055/0، 009/0 و 0085/0 است. مقدار جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای پسماند در پس‌لرزه بیش‌تر از زلزله اصلی است با افزایش ارتفاع قاب­ها، میانگین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای پسماند هنگام زلزله اصلی و پس‌لرزه افزایش یافته است. به عنوان نمونه، در قاب 3 طبقه، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی باعث کاهش بیشترین پاسخ‌ جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند به میزان 6/86 % و 50 % به ترتیب تحت زلزله اصلی و پس‌لرزه شده است.

**شکل 16.** مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای پسماند قاب 3 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله R1، R2وR3**.**

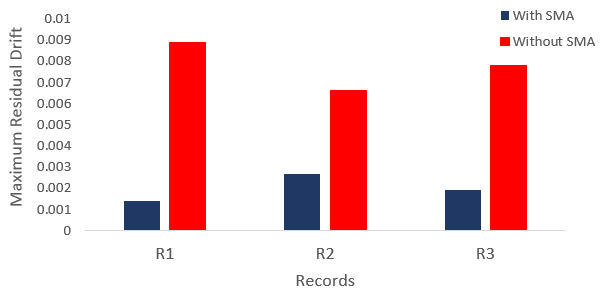
**Fig. 16.** Comparison of maximum rsidual interstory drift of 3-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 17**. مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای پسماند قاب 3 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله­ی اصلی و پس­لرزه R1،R2 وR3.



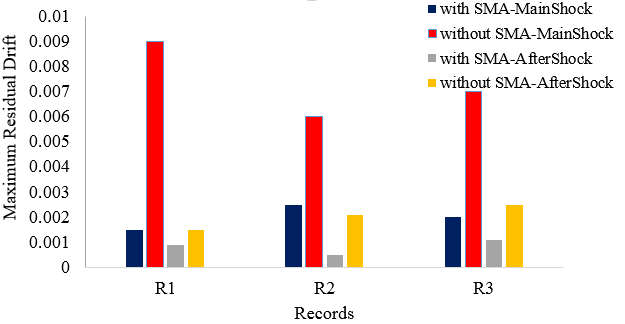
**Fig. 17**. Comparison of maximum rsidual interstory drift of 3-story frame with and without shape memory alloy under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 18.** مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای پسماند قاب 6 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله R1، R2 و R3.



**Fig. 18.** Comparison of maximum rsidual interstory drift of 6-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 19**. مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای پسماند قاب 6 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله­ی اصلی و پس­لرزه R1، R2وR3.



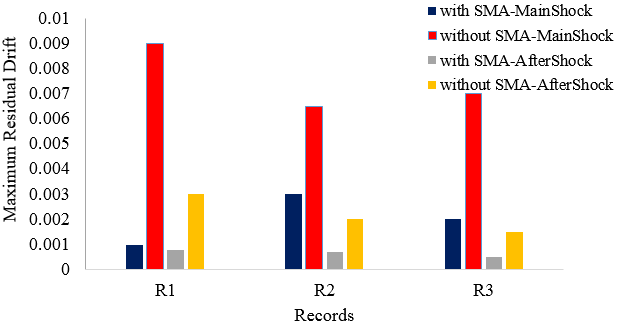
**Fig. 19.** Comparison of maximum rsidual interstory drift of 6-story frame with and without shape memory alloy under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 20.** مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای پسماند قاب 9 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله R1، R2وR3**.**



**Fig. 20.** Comparison of maximum rsidual interstory drift of 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 21.** مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای پسماند قاب 9 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله اصلی و پس‌لرزه R1، R2وR3.



**Fig. 21.** Comparison of maximum rsidual interstory drift of 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

همچنين مطابق با شكل­های (22 تا 24) ميزان جابه‌جایی پسماند بام قاب‌های 3، 6 و 9 طبقه با آلياژ حافظه­دار شكلي و بدون آن تحت شتاب نگاشت­هاي مورد نظر (زلزله اصلی و پس‌لرزه) قابل مشاهده است. همان‌گونه كه در اين شکل‌ها مشخص است، مقدار جابه‌جایی پسماند بام براي هر كدام از شتاب نگاشت‌ها در دو حالت زلزله اصلی و پس‌لرزه در سازه داراي آلياژ حافظه­دار شكلي بطور قابل ملاحظه‌اي كمتر از سازه بدون اين آلياژ است. اين مورد با افزايش تعداد طبقات سازه نمود بيشتري پيدا کرده است.

**شکل 22.** مقایسه بیشترین جابه‌جایی پسماند بام قاب 3 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله اصلی و پس­لرزه R1، R2وR3.

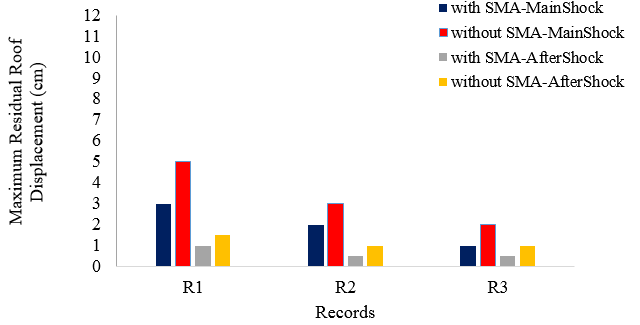
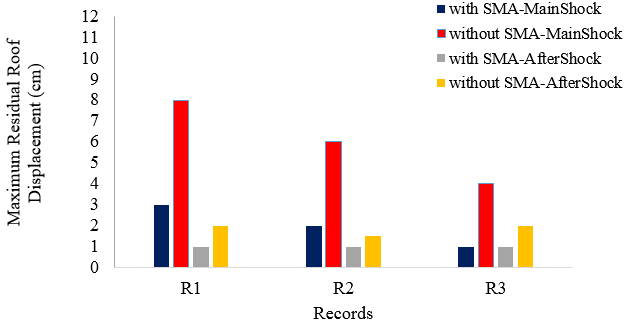
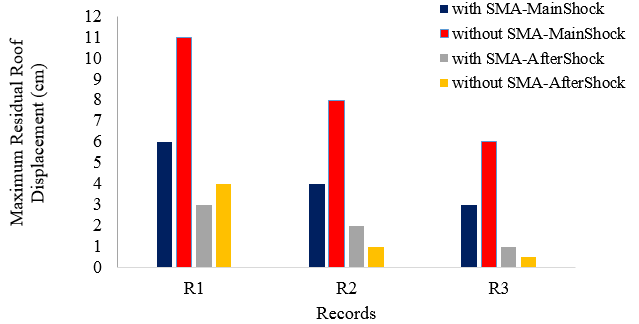


Fig. 22. Comparison of maximum rsidual roof displacement of 3-story frame with and without shape memory alloy under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 23.** مقایسه بیشترین جابه‌جایی پسماند بام قاب 6 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله اصلی و پس‌لرزه R1، R2وR3.

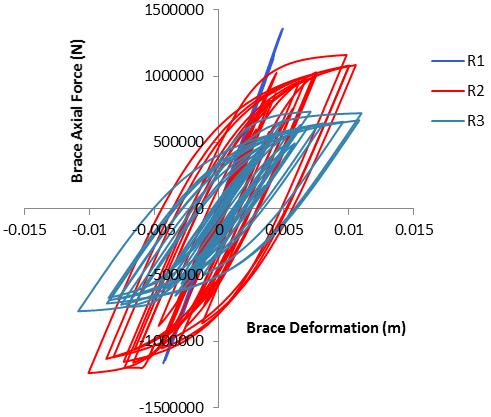
**Fig. 23.** Comparison of maximum rsidual roof displacement of 6-story frame with and without shape memory alloy under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 24.** مقایسه بیشترین جابه‌جایی پسماند بام قاب 9 طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت 3 زلزله اصلی و پس­لرزه R1، R2وR3**.**

**Fig. 24.** Comparison of maximum rsidual roof displacement of 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

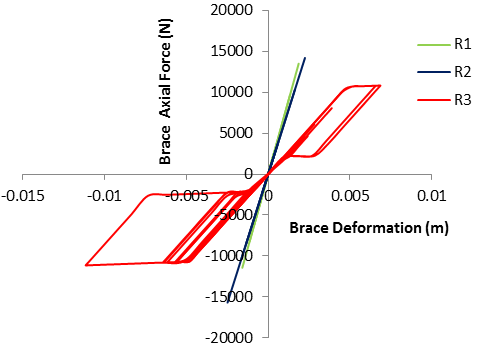
به‌منظور بررسی منحنی­های هیسترزیس نمونه­های موردمطالعه، با توجه به حجم بالای منحنی­های هیسترزیس دهانه­های مختلف مهاربندی با و بدون آلیاژ حافظه‌دار در طبقات مختلف، تنها نمونه­ا­­ی از این منحنی­ها به‌منظور مقایسه ارائه‌شده است. مطابق شکل­های (25 الی 30)، در حالت قاب‌های 3، 6 و 9 طبقه با مهاربندهای کمانش تاب و آلیاژ حافظه‌دار میزان اتلاف انرژی در مقایسه با مهاربندهای کمانش ناپذیر کمتر است. این مسئله با توجه به کاهش برش پایه قاب با آلیاژ حافظه‌دار منطقی به نظر می‌رسد. همچنین با توجه به بررسی منحنی­های هیسترزیس در قاب‌های 3، 6 و 9 طبقه دارای مهاربند کمانش تاب بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی اتلاف انرژی در طبقات ابتدایی و در قاب‌های با آلیاژ حافظه­دار تمرکز انرژی در طبقات انتهایی بوده است. ضمناً مطابق منحنی هیسترزیس قاب‌های موردمطالعه اکثراً در دو حالت مهاربند کمانش تاب با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت زلزله و پس­لرزه­ی متوالی R3 مقدار اتلاف انرژی بیشینه و تحت زلزله R1 کمینه بوده است.

**شکل 25.** مقایسه منحنی هیسترزیس BRB قاب­ 3 طبقه تحت 3 زلزله R1، R2وR3.



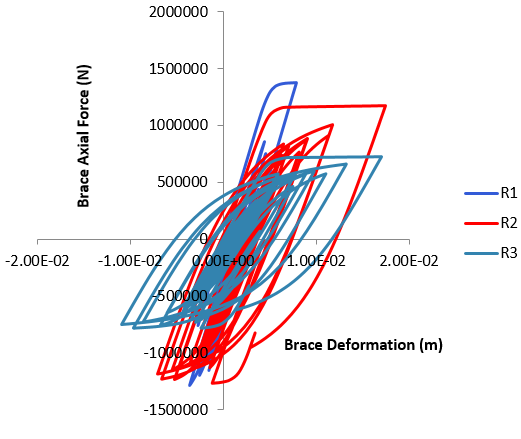
**Fig. 25.** Comparison of BRB hysteresis curve of 3-story frame under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 26.** مقایسه منحنی هیسترزیس BRB-SMA قاب­ 3 طبقه تحت 3 زلزله R1، R2وR3.



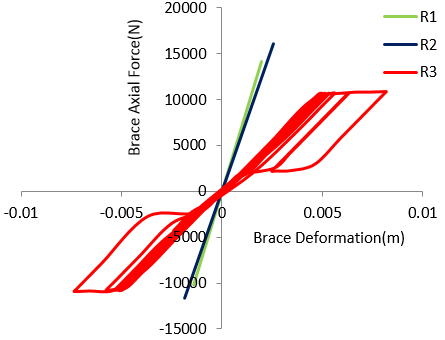
**Fig. 26.** Comparison of BRB-SMA hysteresis curve of 3-story frame under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 27.** مقایسه منحنی هیسترزیس BRB قاب­ 6 طبقه تحت 3 زلزله R1، R2وR3**.**



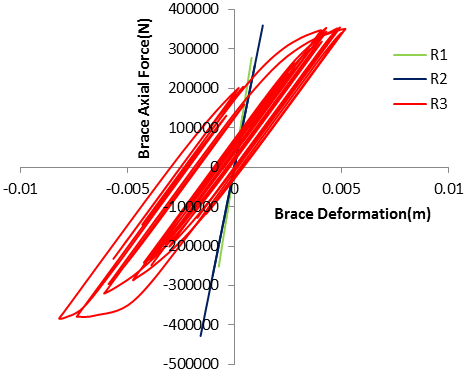
**Fig. 27.** Comparison of BRB hysteresis curve of 6-story frame under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 28.** مقایسه منحنی هیسترزیس BRB-SMA قاب 6 طبقه تحت 3 زلزله R1، R2وR3.



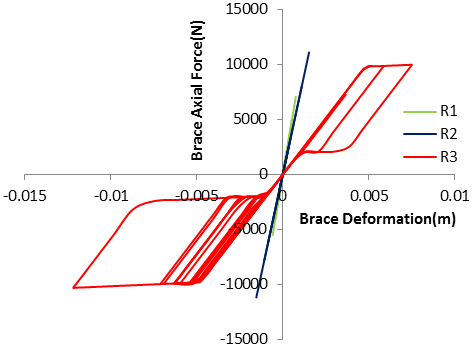
**Fig. 28.** Comparison of BRB-SMA hysteresis curve of 6-story frame under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 29.** مقایسه منحنی هیسترزیس BRB قاب­ 9 طبقه تحت 3 زلزله R1، R2وR3.



**Fig. 29.** Comparison of BRB hysteresis curve of 9-story frame under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

**شکل 30.** مقایسه منحنی هیسترزیس BRB-SMA قاب­ 9 طبقه تحت 3 زلزله R1، R2وR3.



**Fig. 30.** Comparison of BRB-SMA hysteresis curve of 9-story frame under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

با توجه به قيمت نسبي بالاي آلياژهاي حافظه‌دار امكان استفاده كامل آن‌ها در سازه­ها موجود نیست و بايد به وسيله يك طرح بهينه بیشترین استفاده از مصالح موجود صورت بگیرد. بنابراین استفاده از اين مواد به ‌صورت متمركز در يك ميراگر تنها راه منطقي و عملي بود كه پژوهشگران مي­توانستند انتخاب كنند. پس مهاربندهاي آلياژ حافظه‌دار شكلي با افزودن اين مواد به قسمتي از مهاربند با جزئيات خاص ساخته شده‌اند. در این پژوهش، با اضافه کردن میله­های آلیاژ حافظه‌دار شکلی با طول بهینه به مهاربند کمانش­تاب، ضمن ایجاد طرحی اقتصادی، کارایی آن نیز افزایش یافته است. در آینده نزدیک امید است که با پیشرفت تکنولوژی در صنعت ساختمان‌سازی، دسترسی به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در کشور با قیمت به صرفه‌تری افزایش یابد.

**6- نتیجه‌گیری**

با بررسی نتایج و نمودارهای ارائه‌شده در بخش قبلی می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد و با توجه به درستی‌آزمایی که نتایج مورد قبولی ارائه دادند، می­توان به مدل­های ایجادشده و پاسخ­های به‌ دست ‌آمده، اطمینان داشت.

* بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه­ای در قاب‌های 3 طبقه در هر دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه­دار شکلی در طبقه انتهایی رخ می­دهد. در قاب‌های 6 طبقه بدون آلیاژ حافظه‌دار بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای در طبقه چهارم و در قاب 6 طبقه با آلیاژ حافظه‌دار بیشترین جابه‌جایی نسبی در طبقه پنجم رخ می­دهد و مقدار آن در اثر استفاده از آلیاژ حافظه‌دار کاهش می‌یابد و در قاب‌های 9 طبقه بدون آلیاژ حافظه‌دار بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای در طبقه هفتم و در قاب‌های با آلیاژ حافظه‌دار شکلی در طبقه هشتم به وقوع پیوسته و مقادیر بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای تحت استفاده از آلیاژ حافظه‌دار کاهش می‌یابد.
* همچنین استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در ترکیب با مهاربندهای کمانش تاب به دلیل خاصیت میرایی آن و استهلاک انرژی زلزله، سبب می‌شود بیشترین برش پایه، در تمامی مدل‌ها کاهش یابد و با افزایش ارتفاع سازه نیز میزان استهلاک برش پایه در اثر استفاده از آلیاژ حافظه‌دار افزایش می‌یابد.
* بیشترین شتاب بام با افزایش ارتفاع سازه، به‌طور میانگین در اثر استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی، کاهش ‌یافته است و همچنین بیشترین جابه‌جایی بام در اثر استفاده از آلیاژ حافظه‌دار در تمامی مدل‌ها کاهش ‌یافته است.
* نتایج نشان می­دهد که استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی باعث بهبود مقاومت و سختی در سازه شده است و با توجه به رفتار SMA در حالت غیرخطی و وجود نیروهای فشاری، عملکرد SMA در سازه­های دارای مهاربند کمانش تاب به منظور بهسازی لرزه‌ای مفید بوده است.
* پاسخ­های لرزه­ای بیشترین جابه‌جایی بام، بیشترین برش پایه و بیشترین شتاب بام در لرزه اصلی در تمامی مدل‌ها بیشتر از پس‌لرزه است. با توجه به ماهیت پس‌لرزه، میزان کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای در لرزه اصلی با در نظر گرفتن SMA، به­صورت میانگین بیشتر از پس‌لرزه است.
* با افزایش ارتفاع سازه، پاسخ‌های لرزه‌ای در اثر استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی بیشتر بهبود یافته‌اند.
* از نظر كاهش پاسخ‌های لرزه‌ای، وجود آلياژ حافظه‌دار شكلي در قاب‌های بلند مرتبه مؤثرتر از قاب‌های کوتاه مرتبه هست كه با توجه به پرهزينه بودن، استفاده از آن جز براي ساختمان‌هاي با اهميت خيلي زياد توجيه ندارد ولي از منظر خاصيت برگشت‌پذيري، كاهش ميزان جابه‌جایی پسماند بام و جابه‌جایی نسبی پسماند براي قاب‌های بلندمرتبه داراي SMA بيشتر از ساير قاب‌ها بوده است و بیشترین اين كاهش بیش‌تر از 50 درصد جابه‌جایی پسماند قاب بدون آلياژ را شامل مي‌شود. بنابراين استفاده از اين مصالح می‌تواند نكته مثبتي در كاهش خسارات ناشي از جابه‌جایی‌های پسماند در زمان بهره‌برداري براي ساختمان‌هاي بلندمرتبه باشد.
* با تجهیز کردن قاب‌ها به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی الگوی تمرکز اتلاف انرژی تغییر یافته است. در قاب‌های بدون آلیاژهای حافظه‌دار با توجه به جذب بیشتر نیروی جانبی (برش پایه بزرگ‌تر) میزان اتلاف انرژی مهاربندهای کمانش تاب بیشتر بوده است. در این قاب‌ها اتلاف انرژی در طبقات ابتدایی و در قاب‌های با آلیاژ حافظه‌دار تمرکز انرژی در طبقات انتهایی بوده است.
* به‌کارگیری آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سيستم ساختماني قاب فولادی دارای مهاربند کمانش تاب باعث بهبود رفتار لرزه‌ای سيستم شده و موجبِ کاهشِ هزینه‌های بازسازی و تعمیرِ سیستم ساختمانی آسیب‌دیده شده و به ‌نوعی موجب ارتقاي برگشت‌پذیری سیستم مي­شود.

7- مراجع

[1] Uang C.M., Tsai K.C. Research and application of buckling-restrained braced frames, Journal of Steel Structures 2004; 4(4): 301-13.

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

[3] [Maurya A](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16302048#!), [Eatherton M.R.](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16302048#!), [Ryota Matsui](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16302048#!) R., [Florig](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16302048#!), S.H. Experimental investigation of miniature buckling restrained braces for use as structural fuses, [Journal of Constructional Steel Research](http://www.sciencedirect.com/science/journal/0143974X) 2016; [127](http://www.sciencedirect.com/science/journal/0143974X/127/supp/C): 54-65.

[4] Ozcelik R., Dikiciasik E., Erdil F. The development of the buckling restrained braces with new end restrains, [Journal of Constructional Steel Research](http://www.sciencedirect.com/science/journal/0143974X) 2017; [138](http://www.sciencedirect.com/science/journal/0143974X/138/supp/C): 208-220.

[5] Shen J., Seker O., Akbas B., Seker P., Momenzadeh S.B., Faytarouni M. Seismic performance of concentrically braced frames with and without brace buckling, Structures 2017; 141: 461-481.

[6] Mirzahosseini, M., Gerami M. the Effect of Temperature on Seismic Response of Cu–Al–Mn SMA Braced Frame, International Journal of Civil Engineering 2018.

[7] Li H.N., Liu M.M., Fu X. An innovative re-centering SMA-lead damper and its application to steel frame structures, Smart Materials and Structures 2018.

[8] Gholhaki M., khosravikhor A., Rezayfar O. Study Effect of Ni-Ti Shape Memory Alloy on Ductility of Steel Plate Shear Walls. Journal of Structural and Construction Engineering 2018.

[9] [Mirzai](http://scientiairanica.sharif.edu/?_action=article&au=104748&_au=Nadia++Mirzai) N., [Attarnejad](http://scientiairanica.sharif.edu/?_action=article&au=14106&_au=Reza++Attarnejad) R. Performance of EBFs equipped with an innovative shape memory alloy damper, International Journal of Science & Technology 2018.

[10] Canxing Q., Yichen Z., Han L., Bing Q., Hetao H., Li T. Seismic performance of Concentrically Braced Frames with non-buckling braces, [Engineering Structures](http://www.sciencedirect.com/science/journal/01410296) 2018; [154](http://www.sciencedirect.com/science/journal/01410296/154/supp/C): 93-102.

[11] Nazarimofrad E., Shokrgozar A. Seismic performance of steel braced frames with self‐centering buckling‐restrained brace utilizing superelastic shape memory alloys, Struct Design Tall Spec Build 2019.

[12] Rostam Alilou A. A. Pouraminian M. Seismic Fragility Assessment of RC Frame Equipped by Visco-Elastic Dampers Using NLTHA and FNA. American Journal of Engineering and Applied Sciences 2019; 12(3): 359-367.

[13] Sadeghi A., Hashemi S., Mehdizadeh K. Probabilistic Assessment of Seismic Collapse Capacity of 3D Steel Moment-Resisting Frame Structures. Journal of Structural and Construction Engineering 2020. (In Persian).

[14] Saberi V., Saberi H., Sadeghi A. Collapse Assessment of Steel Moment Frames Based on Development of Plastic Hinges, Journal of Science and Technology 2020. (In Persian).

[15] Mehdizadeh K., Karamodin A., Sadeghi A. Progressive Sidesway Collapse Analysis of Steel Moment-Resisting Frames under Earthquake Excitations. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng 2020; 44: 1209–1221.

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

[17] Saberi V., Saberi H., Mazaheri O., Sadeghi A. Numerical Investigation of Shape Memory Alloys and Side Plates Perforation Effect on Hysteresis Performance of Connections. Amirkabir Journal of Civil Engineering 2020. (In Persian).

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

[19] Taftali B. Probabilistic seismic demand assessment of steel frames with shape memory alloy connections, PhD. Dissertation, Georgia Institute of Technology, َAtlanta. 2007.

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

[21] Mazzoni S., Mckenna F., Scott M.H., Fenves G.L. OpenSees Command Language Manual.  
http://OpenSees.[Berkeley.edu/OpenSees/manuals/user](http://berkeley.edu/OPENSEES/manuals/user) manual/OpenSees Command Language Manual June 2006.pdf.

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

[23] INBC. Design Loads for Buildings. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 6. 2013. (In Persian).

[24] INBC. Design and Construction of Steel Structures. Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 10. 2013. (In Persian).

[25] BHRC. Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings. Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800. 2014. (In Persian).

[26] Kim J., Park J., Lee T. Sensitivity analysis of steel buildings subjected to column loss, Engineering Structures 2011; 33(2): 421-432.

[27] Ruiz-Garcia J., Negrete-Manriquez J.C. Evaluation of drift demands in existing steel frames under as-recorded far-field and near-fault mainshock–aftershock seismic sequences, Engineering Structures 2010; 33(2): 621-634.

[28] PEER Ground Motion Database, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, Web Site: <http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database>.

[29] SeismoSignal. Constitutes a simple, yet efficient, package for the processing of strong-motion data. 2018.

[30] Commentary of Instruction for seismic Rehabilitation of Existing Buildings NO: 361. 2007.

**Seismic Performance of Buckling Restrained Braced Frames with Shape Memory Alloy Subjected to Mainshock-Aftershock Near-Fault Ground Motion**

**Seyede Vahide Hashemi 1, Majid Pouraminian 2\*, Abbasali Sadeghi 3, Somayyeh Pourbakhshian2**

1. PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Ramsar Branch, Islamic Azad University, Ramsar, Iran
3. PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

\*[**m.pouraminian@iauramsar.ac.ir**](mailto:m.pouraminian@iauramsar.ac.ir)

**Abstract**

Buckling-restrained braced (BRB) frames are steadily replacing concentrically braced frames because they can yield without buckling when subjected to both tension and compression loads. Though BRB frames are being widely used in construction industry especially for building structures in high seismicity areas such as Iran, it is shown that at large strains, a considerable amount of permanent deformation is generated at the support connector between the brace and the frame. This drawback can be overcome by providing recentering capabilities to the braced frame system. By applying the concept of a recentering system to the design of BRB frames, we used braced frames that incorporate BRBs with superelastic shape memory alloy (SMA). Also, the use of SMA in the bracing system causes damping and reduction of residual deformation. BRBs are considered as lateral load-bearing systems due to their non-buckling in compression. But these braces also have disadvantages. Among these disadvantages is the creation of permanent deformation in the structure after the end of loading and also the costly replacement of these members after the failure and current of the steel core of these braces. Therefore, the application of SMA in BRB systems, given the specific characteristics of these alloys, can be an effective step in improving seismic responses. However, recent studies have shown that BRB frames are susceptible to residual deformations during earthquakes which makes them vulnerable to [aftershock](https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/aftershock) events. The effectiveness of SMA-BRBs in controlling the seismic response of a structure largely depends on the relative strength and stiffness of SMA bars and BRB core plates.  The aim of the current study is to investigate the aftershock collapse capacity of BRB frames with and without SMAs. In this paper, seismic behavior of frames with BRB’s and the effect of utilizing SMAs were studied. The selected models are three frames with 3, 6 and 9 story, which in different openings have BRBs in two states with and without applying shape memory alloys. These prototypes were modeled in OpenSees under nonlinear dynamic time history analyses. The results comparison was performed under three records including Main Shock-Aftershock Ground Motions. The results include comparing the seismic responses of structures with and without applying SMAs including maximum roof displacement, maximum interstory drift, maximum base shear, and maximum acceleration of roof and hysteresis curves in structures with BRBs and SMAs rods. The results showed that by employing SMAs rods, seismic responses including roof displacement, interstory drift and base shear have been significantly reduced. By reviewing the results, it is clear that improvements in the 6 and 9-story frames compared to the 3- story frame is more tangible. Also, the analysis results showed by equipping the frames with SMAs, the energy dissipation concentration pattern has been changed. In the case of frames without SMAs, due to the greater absorption of lateral force (larger base shear), the amount of energy dissipation of BRBs was higher. In these frames, energy loss was in the first stories and in frames with SMAs, the energy dissipation concentration was in the final stories. Using a SMA in these frames can reduce the cost of restoring and recovering of damaged systems and make more resilience building system.

**Keywords:** Buckling Restrained Brace (BRB), Shape Memory alloy (SMA), Mainshock-Aftershock Ground Motion, OpenSees Software, Nonlinear Dynamic Time History Analysis, Resilience.

1. .Buckling Restrained Brace [↑](#footnote-ref-1)
2. . Shape Memory Alloy [↑](#footnote-ref-2)
3. . the Fast Nonlinear Analysis [↑](#footnote-ref-3)
4. . the Nonlinear Time History Analysis [↑](#footnote-ref-4)
5. . Immediate Occupancy [↑](#footnote-ref-5)
6. . Life Safety [↑](#footnote-ref-6)
7. . Collapse Prevention [↑](#footnote-ref-7)
8. Austenite [↑](#footnote-ref-8)
9. Martensite [↑](#footnote-ref-9)
10. . Immediate Occupancy [↑](#footnote-ref-10)
11. . Life Safety [↑](#footnote-ref-11)
12. .Collapse Pervention [↑](#footnote-ref-12)