

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

سیده وحیده هاشمی^۱، مجید پورامینیان^{۲*}، عباسعلی صادقی^۳، سمیه پوربخشیان^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان
۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر
۳. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی

*m.pouraminian@iauramsar.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۵/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۲۷

چکیده

در دنیای امروز، با پیشرفت سریع علم و تکنولوژی، هر روزه مواد و مصالح جدیدی پا به عرصه ظهور می‌گذارند، که آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA) از جمله این مواد است. از آنجایی که استفاده از سیستم قاب با مهارندهای مرسوم به دلیل محدودیت‌هایی نظیر شکل‌پذیری پایین، کمانش مهاربند در فشار و کاهش ظرفیت باربری جوابگوی نیاز سازه نیست، لذا استفاده از مهاربندکمانش‌تاب (BRB) و آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سیستم مهاربندی می‌تواند راه‌گشا باشد. بنابراین در جهت افزایش استهلاک انرژی ناشی از زلزله، استفاده از مهاربندکمانش‌تاب 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 کمانش‌تاب به‌عنوان میراگرهای هیسترتیک در کشورهای چون ژاپن، آمریکا و ایتالیا مورد توجه مهندسين 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 کمانش‌تاب بررسی می‌شود و تأثیر اضافه کردن SMA در سیستم مهاربندی کمانش‌تاب مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور، سه ساختمان سه بعدی با تعداد طبقات ۳، ۶ و ۹ بر اساس ضوابط آئین‌نامه‌ای طراحی و سپس قاب محور کناری با استفاده از نرم‌افزار OpenSees به صورت دو بعدی مدل‌سازی شده‌اند. در ادامه، رفتار غیر ارتجاعی قاب‌ها، که در دهانه‌های مختلف دارای مهاربند کمانش‌تاب می‌باشند، در دو حالت با و بدون SMA با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت ۳ رکورد نزدیک به گسل شامل زلزله‌ی اصلی و پس‌لرزه بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد که بیشترین پاسخ‌های سازه‌ای جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای، جابه‌جایی بام، برش پایه، شتاب بام و منحنی هیستریزس در مدل‌های مجهز به میله‌های SMA به‌طور میانگین کاهش یافته 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 لرزه اصلی با در نظر گرفتن SMA، به صورت 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، نرم‌افزار OpenSees، تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی، برگشت‌پذیری.

۱- مقدمه

با توجه به وقوع زلزله‌های قوی در کشورهای زلزله‌خیز، بحث کنترل لرزه‌ای ساختمان‌ها در مقابل زلزله همواره چالش مهمی برای مهندسين 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 به اختصار (BRB) نامیده می‌شود. اگر بتوان این سیستم مهاربندی را به وسیله مصالح دارای خاصیت ارتجاعی بالا و کرنش ماندگار اندک، مانند آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (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 (۲۰۱۱)، 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 مهاربندی شده می‌تواند موجب کاهش تغییرشکل‌های ماندگار پس از زلزله شود [2]. ماوریا و همکاران (۲۰۱۶)، 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 (۲۰۱۷)، 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 (۲۰۱۷)، عملکرد لرزه‌ای قاب‌های با مهاربندهای هم‌محور را با و بدون مهاربندهای کمانش-تاب 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 (۲۰۱۸)، سازه مهاربندی یک طبقه یک دهانه دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی پایه مسی نوین را در دماهای مختلف (۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰-) تحت ۷ 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 ۲۰۱۸، نوعی میراگر سربی-آلیاژ حافظه‌دار شکلی را به صورت آزمایشگاهی ابداع نموده‌اند. ابتدا این نوع میراگر تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و سپس منحنی‌های هیستریزس و پوش‌آور به دست آمده است. سپس این نوع میراگر را در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی نمودند [7]. قلحکی و همکاران (۲۰۱۸)، نمونه‌های دیوار برشی

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 (۲۰۲۰)، نقش شکل‌پذیری در ظرفیت فروریزش قاب‌های خمشی فولادی ۵ طبقه را به صورت احتمالاتی بررسی کردند [15]. هاشمی و همکاران (۲۰۲۰)، 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 (۲۰۲۰)، 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 فوق‌الاستیک 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 ۰/۰۴ رادیان (حد پذیرش قاب‌های خمشی) کاهش یافته و تمرکز تنش در گوشه‌های برش خورده بیشترین تأثیر را در گسیختگی صفحات کناری دارند [17]. هاشمی و همکاران (۲۰۲۱)، 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 ۷ شتاب‌نگاشت تکان قوی شامل زلزله اصلی و پس‌لرزه‌های متوالی استفاده شده است. نتایج نشان داد که قاب دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی بیشتر دارای محدوده عملکردی IO و LS است و احتمال رخداد سطح عملکردی آستانه فروریزش ۳۸ درصد و در حالت بدون آلیاژ

فولادی سه طبقه با ورق نازک با مقیاس یک سوم، دارای درصدهای مختلف از آلیاژ حافظه‌دار شکلی، تحت بار دوره‌ای در نرم‌افزار تحلیلی Opensees قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش درصد آلیاژ مصرفی شکل‌پذیری نیز افزایش یافته است [8]. میرزایی و همکاران (۲۰۱۸)، 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]. سانزینگ و همکاران (۲۰۱۸)، 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 (۲۰۱۹)، در دو سازه ۴ و ۸ 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 ۶ شتاب‌نگاشت زلزله ارزیابی کردند [11]. علیلو و پورامینیان در سال ۲۰۱۹، به بررسی منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای قاب خمشی بتن‌آرمه مجهز به میراگرهای ویسکوالاستیک با استفاده از روش‌های FNA_1 و $NLTHA_2$ پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که زمان اجرا در روش FNA کاهش یافته است [12]. صادقی و همکاران در سال ۲۰۲۰، عملکرد سازه‌های قاب خمشی فولادی سه‌بعدی با شکل‌پذیری ویژه ۴، ۸ و ۱۲ طبقه دارای مصالح زوال-پذیر را بررسی نموده‌اند. نتایج نشان داد که ظرفیت فروریزش سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه تحت زلزله‌های دور از گسل بیشترین و تحت زلزله‌های نزدیک گسل با پالس کمترین است و در بین آن‌ها سازه کوتاه مرتبه ۴ طبقه، ظرفیت فروریزش کمتری دارد [13]. صابری و همکاران در سال ۲۰۲۰، عملکرد قاب‌های خمشی فولادی ۳، ۶ 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

مورد استفاده قرار می گیرد. قاب های دارای مهاربندهای کمانش تاب، حالت خاصی از مهاربندهای هم محور یا همگرا هستند که شکل پذیری بیشتری داشته و از توانایی جذب انرژی بالایی برخوردارند. هسته مهاربندهای کمانش تاب مطابق شکل (۲) ارائه شده است [1].

شکل ۱. منحنی هیستریزس مهاربند مقید در برابر کمانش و مهاربند معمولی [۱۶].

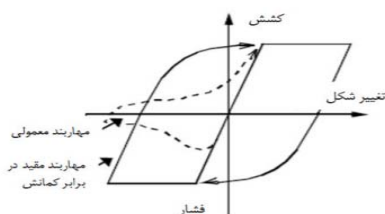


Fig. 1. Hysteresis curve of BRB and conventional brace [16].

شکل ۲. شمای کلی مهاربند کمانش تاب [۱۱].

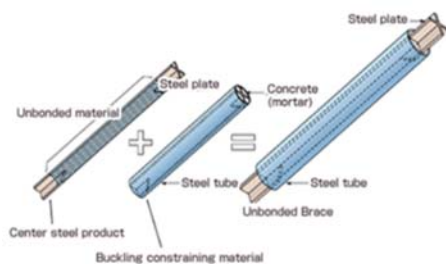


Fig. 2. General schematic view of buckling restrained brace [11].

سیستم های هوشمند در مهندسی سازه به سیستم هایی اطلاق می شود 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 تکنولوژی های جدیدی که امکان دستیابی به این اهداف را میسر می سازد، ساخت و توسعه مواد هوشمند مانند آلیاژهای حافظه دار شکلی است که به علت دارا بودن ویژگی های میکروسکوپی و مایکروسکوپی متمایز همچون ظرفیت میرایی بالا، دوام، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی، خاصیت فوق ارتجاعی یا شبه ارتجاعی، تغییر شکل ها و کرنش های بزرگ و برگشت پذیر که در مصالح سنتی موجود نیست، کاربردهای زیادی در زمینه های مختلف علوم و صنعت پیدا کرده اند [19]. کاربرد الیاف حافظه دار شکلی در سیستم های جداگر لرزه ای، میراگرهای انرژی، اتصالات سازه ای، بتن مسلح

حافظه دار شکلی دارای محدوده ی عملکرد CP^۱ و با احتمال ۶۵ درصد خواهد بود [18]. با توجه به اینکه فلسفه طراحی لرزه ای در آیین نامه ها بر مبنای رفتار غیرخطی سازه ها حین وقوع زلزله است. پس این امر سبب می شود تا سیستم های سازه ای پس از زلزله های با شدت متوسط و یا بالا دچار تغییر شکل های گسترده شده و به این ترتیب پس از وقوع زلزله قابل بازسازی نبوده و یا بازسازی آن بسیار پرهزینه و غیراقتصادی باشد. با توجه به اینکه آلیاژ حافظه دار مشکل تغییر شکل های ماندگار سازه را تا حدودی مرتفع می کند. بنابراین در این مقاله، به عنوان نوآوری، رفتار لرزه ای سازه های دارای مهاربند کمانش تاب در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی بررسی می شود و تأثیر اضافه کردن SMA در سیستم BRB تحت ۳ رکورد زلزله ی نزدیک به گسل شامل توالی زلزله اصلی و پس لرزه تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی می شوند.

۲- معرفی مهاربند کمانش تاب و آلیاژ حافظه دار شکلی

یکی از رایج ترین سیستم های مقاوم در برابر نیروهای جانبی، مهاربند است. شکل (۱) مقایسه ای بر رفتار مهاربندهای هم محور متداول و مهاربندهای کمانش تاب است [16]. هسته فولادی در مهاربندهای کمانش تاب به سه بخش تقسیم شده است: ناحیه تسلیم، ناحیه انتقال و منطقه اتصال. ناحیه تسلیم، قسمتی از طول هسته مهاربند است که در آن همه نیروهای لرزه ای از طریق جاری شدن هسته در کشش و فشار، مستهلک شده و از بین می روند. این منطقه دارای عرض مقطع کاهش یافته است تا مطمئن شویم که تسلیم در این ناحیه رخ می دهد. اطراف هسته توسط اجزای محدود کننده کاملاً پوشانده می شود تا از کمانش کلی یا موضعی مهاربند در ناحیه تسلیم جلوگیری شده و به طور 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 قسمت ها دارای عرض مقطع بیشتر از ناحیه تسلیم است و به همان شکل توسط اجزای محدود کننده، فرا گرفته شده اند. منطقه اتصال بخشی از مهاربند است که خارج از ناحیه محدود شده قرار گرفته است و برای اتصال مهاربند به سایر المان های قاب

آزمایشگاهی BRB-SMA در نرم افزار، طراحی و مدل سازی قاب های مورد مطالعه ارائه شده است.

۳-۱- درستی آزمایشی مدل تحلیلی BRB-SMA

به منظور درستی آزمایشی مدل سازی و شبیه سازی در نرم افزار OpenSees از مدل آزمایشگاهی شامل مهاربند کمانش تاب با میله های SMA، ارائه شده در مطالعه میلر و همکاران استفاده شده است [22]. سیستم در شکل (۴) توصیف شده است. در بطن این سیستم هسته BRB قرار گرفته است که توسط ملات درون غلاف پوشانده شده است. جوش هسته میانی با غلاف های بیرونی و میانی از طریق المان Gap مدل سازی شده است که منجر به عملکرد مناسب آلیاژهای حافظه دار شکلی با المان سازه ای شده است.

برای مدل سازی مهاربند کمانش تاب در OpenSees از المان خریابی Corot Truss بهره برده می شود که عملکرد هم زمان میله های آلیاژ حافظه دار شکلی و همچنین تیوپ های داخلی و میانی و بیرونی در آن گذاشته شده است. برای جلوگیری از کمانش مهاربند مورد نظر در مدل آزمایشگاهی از ملات استفاده شده است، همچنین ۴ میله SMA به کار برده شده نیز در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل ۴. مدل آزمایشگاهی مهاربند کمانش تاب مجهز به میله های SMA

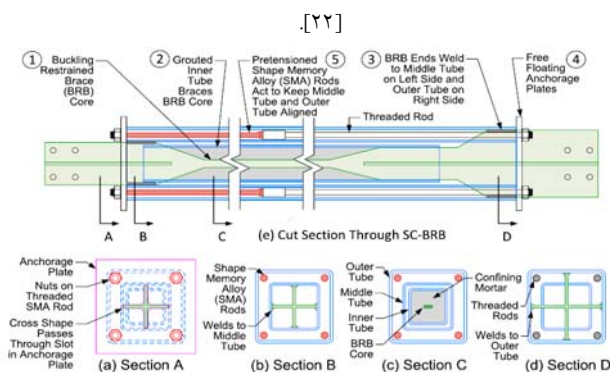


Fig. 4. Experimental model of buckling restrained brace with SMA bars [22].

رفتار آلیاژ حافظه دار شکلی مورد استفاده در این پژوهش مطابق شکل (۵) در اثر بارگذاری و باربرداری بدون کرنش پسماند است. مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه دار شکلی نیز بر اساس منحنی رفتاری مطابق جدول (۱) ارائه شده است.

هوشمند و کامپوزیت ها از جمله کاربردهای آلیاژهای حافظه دار است. فاز غالب در این آلیاژها، وابسته به دما و تنش های اعمالی است و با توجه به ترکیب شیمیایی و فرآیندهای ترمومکانیکی زمان ساخت، تنظیم می شوند. فاز پایدار در دمای بالا آستنیت ۱ و فاز پایدار در دمای پایین مارتنزیت ۲ نامیده می شود. 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 می شوند و تمامی ویژگی های مکانیکی، الکتریکی و حرارتی آلیاژهای حافظه دار شکلی را تحت تأثیر قرار می دهد. (شکل ۳) [20].

شکل ۳. فازهای اصلی در آلیاژهای حافظه دار شکلی [20].

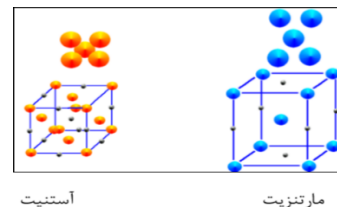


Fig. 3. Original phases in shape memory alloys [20].

۳-۲- درستی آزمایشی و مدل سازی قابها

در این مقاله، به منظور انجام تحلیل های غیرخطی از نرم افزار کدباز OpenSees استفاده شده است. این نرم افزار اجزای محدود است که به وسیله مازونی و همکاران تهیه شده است و همچنان در حال توسعه می باشد [21]. این نرم افزار مجموعه کاملی از انواع المان ها، مصالح و روش های مختلف تحلیل است. نرم افزار OpenSees به شکل تخصصی در حوزه سیستم های عملکردی خاک و سازه تحت زلزله ارائه شده است و با این هدف از سال ۱۹۹۰ تاکنون در حال توسعه است. این نرم افزار به صورت رایگان قابل دسترسی است. نرم افزار مذکور در زمینه های مختلف مدل سازی و تحلیل سازه ها در سرتاسر دنیا مورد استفاده قرار می گیرد. مفاهیم اساسی برنامه با استفاده از مفسر این برنامه قابل توجیه است. مفسر یک فرم گسترش یافته ای از زبان متنی Tcl است. مفسر برای انجام عملیات تحلیل اجزای محدود دستورات لازم را به Tcl اضافه می کند [21]. در ادامه، درستی آزمایشی نمونه

شکل ۶. نمودار شماتیک مدل سازی عددی در نرم افزار OpenSees.

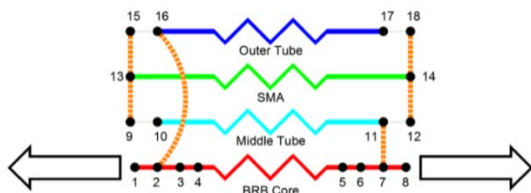


Fig. 6. Schematic diagram of OpenSees numerical model.

شکل ۷. مقایسه نتیجه تحلیل رایانه ای و آزمایشگاهی.

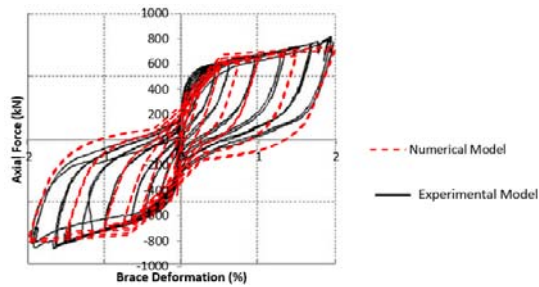


Fig. 7. Results comparison of computer Analysis and experiment analysis.

جدول ۲. درصد خطای پارامترهای مورد مطالعه در نمونه تحلیلی و آزمایشگاهی

پارامترهای مورد مطالعه	نیروی تسلیم (kN)	نیروی نهایی (kN)	سختی اولیه (kN/m)
نمونه ی آزمایشگاهی	۳۲۶	۵۳۸	۱۱۲۰۰۰
نمونه ی تحلیلی	۳۱۹	۵۲۹	۱۰۷۰۰۰
درصد خطا	٪ ۲/۱	٪ ۱/۶	٪ ۴/۵

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

۲-۳- طراحی و مدل سازی قابها

در این مقاله، عملکرد سازه های دارای سیستم مهاربندی کمانش تاب با و بدون SMA تحت زلزله و پس لرزه متوالی نزدیک به گسل بررسی می شود. به منظور نیل به این هدف، ابتدا پلان و پیکربندی مدل های مورد نظر در این مقاله بر اساس سازه های معرفی شده در مطالعه میلر و همکاران ارائه شد [22]. سپس مقاطع سه سازه ۳، ۶ و ۹ طبقه به صورت سه بعدی بر اساس آئین نامه های داخلی (مبحث ششم و دهم مقررات ملی [23 و 24]) و استاندارد ۲۸۰۰۰ ویرایش چهارم [25] طراحی شد. بارگذاری ثقلی مرده و زنده طبقات به ترتیب ۶۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع اعمال شده اند و نسبت میرایی رایلی به صورت $(\xi = 0/05)$ برای تمام مدهای ارتعاشی سازه لحاظ شده و اثر المان های غیرسازه ای در نظر گرفته نشده است. کلیه ضوابط لرزه ای برای سازه مذکور لحاظ شده است. تعداد دهانه ها در یک راستا ۴ و در راستای دیگر ۶ هستند. فاصله

جدول ۱. مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه دار بر اساس منحنی رفتار ارائه شده در مرجع [۱۹].

مصالح	سختی اولیه (K_1) (N/m^2)	سختی نهایی (K_2) (N/m^2)	تنش فعال سازی (N/m^2)	β
SMA	63431792000	2080412987	268895640	0.5

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

شکل ۵. رفتار آلیاژ حافظه دار بر اساس شبیه سازی با دستور Self-Centering در نرم افزار OpenSee [۲۱].

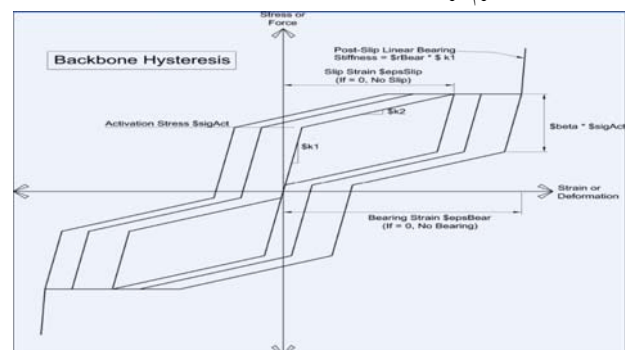


Fig. 5. The behavior of the memory alloy is based on simulation with the Self Centering command in the OpenSees software [21].

مدل آزمایشگاهی مهاربند صلیبی شکل است و هسته آن مستطیل شکل است. آزمایش بار محوری برای این مدل آزمایشگاهی انجام گرفته و نمودارهای هیستریزس آن نشان داده شده است. شکل (۵) و همان گونه که مشاهده می شود رفتار پرجمی شکل از خود نشان می دهد. به منظور شبیه سازی اتصال بین غلاف های داخلی، میانی، بیرونی و میله آلیاژ حافظه دار در نرم افزار از المان های گپ استفاده شده است. نمودار شماتیک مدل سازی عددی در نرم افزار مطابق شکل (۶) 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. هم پوشانی نمودارهای هیستریزس نیروی محوری-تغییر شکل مهاربند مدل آزمایشگاهی و مدل شبیه سازی شده در این مقاله در شکل (۷) ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود با مدل سازی این مهاربند در نرم افزار OpenSees نتایج قابل قبولی در ارزیابی درستی مدل سازی به دست آمده است. ضمناً درصد خطای پارامترهای مورد مطالعه در نمونه تحلیلی و آزمایشگاهی مطابق جدول (۲) ارائه شده است.

۳	IPB500	IPE350	۲۴۶۰	۱۹۹۰
۴	IPB450	IPE270	۲۲۹۰	۱۷۸۰
۵	IPB400	IPE270	۱۹۹۵	۱۵۵۵
۶	IPB350	IPE220	۱۶۸۰	۱۳۳۰
۷	IPB270	IPE400	۱۲۴۰	۱۰۰۵
۸	IPB220	IPE350	۹۹۷	۷۷۰
۹	IPB180	IPE350	۶۷۰	۴۵۰

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

در این مقاله، مهاربندهای قاب‌ها به ترتیب شامل ۲ 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 خرنائی 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 خرنائی که دو انتها مفصل محسوب می‌شود، از یکسان‌سازی درجات آزادی توسط دستور Equal DOF استفاده شده است. مصالح به کار رفته در تیرها، ستون‌ها و مهاربندها همگی از نوع ST37 با مدول الاستیسیته برابر ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال، تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۳۷۰ 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 ۳ 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 محلی به سیستم کلی محاسبه کرده است. همچنین اتصالات تیر به ستون و ستون به پی، صلب فرض شده است.

دهانه‌ها ۹/۱ متر و ارتفاع طبقات ۴ متر است. در ادامه، به منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی مدل‌های موردنظر، قاب‌های دو بعدی محور کناری سازه‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه‌ی ۴ دهانه، استخراج شده‌اند. مطابق شکل‌های (۸ و ۹) به ترتیب پلان و نمای سازه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. ضمناً جزئیات مقاطع طراحی شده قاب‌های مذکور نیز مطابق جدول (۳) نشان داده می‌شود.

شکل ۸. پلان سازه‌های سه بعدی مورد استفاده در این مقاله.

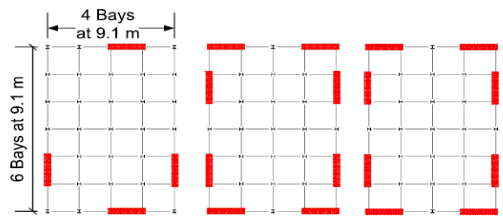


Fig. 8. The plan of three dimensional structures in this study.

شکل ۹. قاب کناری استخراج شده از سازه‌های سه بعدی موردنظر.

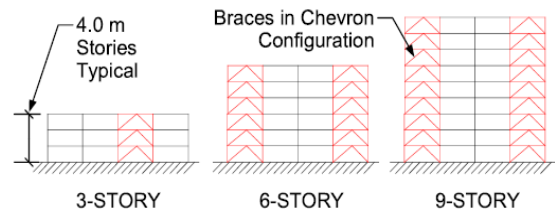


Fig. 9. The extracted side axis frame from the desired three dimensional of studied structures.

جدول ۳. جزئیات اندازه مقاطع اعضا در قاب‌های مورد مطالعه

طبقات	ستون	تیر	مساحت هسته BRB (mm ²)	مساحت SMA (mm ²)
۱	IPB200	IPE200	۱۹۵۰	۱۸۰۰
۲	IPB200	IPE180	۱۸۳۵	۱۷۱۰
۳	IPB200	IPE180	۱۶۸۰	۱۵۵۰
طبقات	ستون	تیر	مساحت هسته BRB (mm ²)	مساحت SMA (mm ²)
۱	IPB400	IPE400	۲۱۸۰	۱۹۱۰
۲	IPB400	IPE350	۱۹۵۰	۱۷۷۰
۳	IPB320	IPE350	۱۸۹۰	۱۶۵۰
۴	IPB300	IPE270	۱۸۱۰	۱۵۷۰
۵	IPB250	IPE270	۱۷۵۰	۱۴۴۰
۶	IPB200	IPE220	۱۶۲۰	۱۳۲۰
طبقات	ستون	تیر	مساحت هسته BRB (mm ²)	مساحت SMA (mm ²)
۱	IPB550	IPE500	۳۱۵۰	۲۶۷۰
۲	IPB500	IPE350	۲۷۸۰	۲۳۳۰

۴- تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی

در روش تحلیل دینامیکی غیرخطی، پاسخ سازه با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و رفتار غیرخطی هندسی سازه محاسبه می شود. معمولاً مطابق بند ۲-۵-۳ استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، برای تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی می توان از ۳ رکورد زلزله استفاده کرد [23]. به منظور انجام تحلیل های غیرخطی، شتابنگاشت های زلزله های مورد نیاز از مطالعه گارسیا و همکاران (۲۰۱۰) استخراج شده است [25]. مطابق مقاله گارسیا و همکاران [27]، به منظور تمایز زلزله اصلی و پس لرزه و برآورد پاسخ های لرزه ای، مقیاس سازی صورت نگرفته است. در این پژوهش، ۳ رکورد لرزه ای نزدیک گسل شامل لرزه اصلی و پس لرزه انتخاب شده است. شتابنگاشت های موردنظر با مشخصات مندرج در جدول (۴) از سایت PEER [28] استخراج شده اند و با استفاده از نرم افزار SeismoSignal [29]، شتابنگاشت توالی زلزله اصلی و پس لرزه با میرایی ۰.۵٪ مطابق شکل های (۱۰، ۱۱ و ۱۲) ارائه شده است.

جدول ۴. معرفی زلزله های موردنظر در تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه ها [۲۳].

رکورد	زمین لرزه	ایستگاه	سال	بزرگی	PGA $\frac{cm}{s^2}$	زلزله اصلی/پس لرزه
۱	JEFP 19940117	Jensen Filter Plant	۱۹۹۴	۵/۳	۲۰۸/۱	Mainshock
۲	JEFP 19940117	Jensen Filter Plant	۱۹۹۴	۵/۱	۴۷/۴	Aftershock
۳	JEFG 19940117	Jense Filter Plant Generator	۱۹۹۴	۵/۳	۱۵۴/۱	Mainshock
۴	JEFG 19940117	Jense Filter Plant Generator	۱۹۹۴	۵/۱	۷۰/۳	Aftershock
۵	PACO 19940117	Pacoima Kagel Canyon	۱۹۹۴	۵/۳	۱۴۹/۱	Mainshock
۶	PACO 19940117	Pacoima Kagel Canyon	۱۹۹۴	۵/۲	۳۴/۷	Aftershock

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

شکل ۱۰. شتابنگاشت زلزله اصلی و پس لرزه ای JEFP 19940117 (R1).

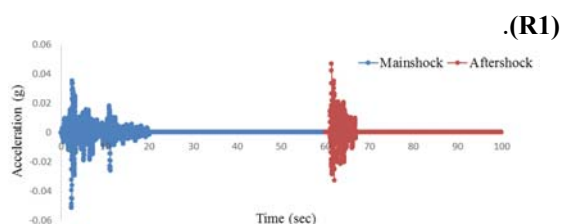


Fig.10. Accelogram of main shock-aftershock ground motion JEFP 19940117 (R1).

شکل ۱۱. شتابنگاشت زلزله اصلی و پس لرزه ای JEFG 19940117 (R2).

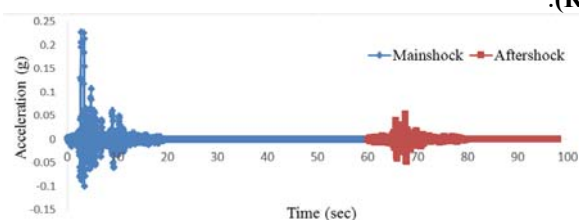


Fig. 11. Accelogram of main shock-aftershock ground motion JEFG 19940117 (R2).

شکل ۱۲. شتابنگاشت زلزله اصلی و پس لرزه ای PACO 19940117 (R3).

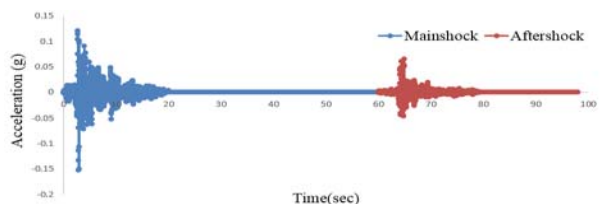


Fig. 12. Accelogram of main shock-aftershock ground motion PACO 19940117 (R3).

۵- بررسی نتایج تحلیل ها

در این مقاله، به ارزیابی رفتار لرزه ای قاب دارای مهاربند کمانش تاب با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی پرداخته شده است. تعداد ۶ مدل ۳، ۶ و ۹ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی تحت توالی سه زلزله اصلی و سه پس لرزه مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی قرار گرفته است و پاسخ های لرزه ای جابه جایی نسبی بین طبقه ای، جابه جایی بیشینه بام، بیشترین برش پایه و بیشترین شتاب بام استخراج شده و مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است. با بررسی حدود جابه جایی نسبی مطابق نشریه ۳۶۱ (بهسازی) [30]، مقادیر ۰/۷، ۲/۵ و ۵ درصد به عنوان سطوح عملکرد "استفاده ای بی وقفه" (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه ای فروریزش (CP) بیان شده است. بر اساس جدول (۵)، بیشترین جابه جایی نسبی در قاب ۳ طبقه با و بدون آلیاژ

جدول ۶. مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌های قاب ۶ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

طبقات	وضعیت SMA	R1	R2	R3
۱	با	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴
	بدون	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۵۵
۲	با	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۶۱
	بدون	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۷۲
۳	با	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۶۶
	بدون	۰/۰۰۶۷	۰/۰۱	۰/۰۰۷
۴	با	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۹
	بدون	۰/۰۰۹۹	۰/۰۰۴۲	۰/۰۱
۵	با	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹۵
	بدون	۰/۰۱۵	۰/۰۰۸۷	۰/۰۱۱
۶	با	۰/۰۱۷	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۹
	بدون	۰/۰۲۱	۰/۰۱۵	۰/۰۱۸

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 (۷) بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌های در قاب ۹

طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3 را نشان می‌دهد، که تحت هر سه توالی زلزله اصلی و پس‌لرزه، وجود آلیاژ حافظه‌دار شکلی باعث کاهش شدید جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌های شده است پس می‌توان نتیجه گرفت که آلیاژ حافظه‌دار شکلی در طبقات میانی سازه بلند مرتبه باعث کاهش بیش از ۵۰ درصدی جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌های می‌شود. سطح عملکرد لرزه‌ای در قاب ۹ طبقه تحت توالی زلزله اصلی و پس‌لرزه در محدوده ایمنی جانی (LS) است. بر اساس شکل (۱۳)، بیشترین جابه‌جایی بام در قاب ۹ طبقه بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت زلزله R2 رخ داده است که با افزودن آلیاژ حافظه‌دار شکلی باعث کاهش بیش از ۵۰ درصد بیشترین جابه‌جایی بام سازه ۹ طبقه شده است. در ضمن در تمامی مدل‌های مورد بررسی، افزودن SMA باعث کاهش جابه‌جایی بیشینه بام می‌شود که این کاهش در مدل ۹ طبقه بیشتر و در مدل ۳ طبقه کمتر بوده است.

مطابق شکل (۱۴)، بیشترین برش پایه در قاب ۶ طبقه بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت زلزله R3 رخ داده است که با افزودن آلیاژ حافظه‌دار شکلی باعث کاهش بیش از ۵۰ درصد بیشترین برش پایه قاب ۶ طبقه شده است. همچنین در تمامی مدل‌های مورد بررسی، افزودن SMA باعث کاهش برش پایه می‌شود که

حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3 نشان داده شده 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 میراکننده‌ای که دارد باعث کاهش پالس‌های ضربه‌ای رکورد می‌شود ولی بیشینه جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌های را کاهش نمی‌دهد پس می‌توان نتیجه گرفت که آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سازه‌های کوتاه مرتبه باعث کاهش جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌های نمی‌شود. سطح عملکرد لرزه‌ای در قاب ۳ 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 ۵. مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌های قاب ۳ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

طبقات	وضعیت SMA	R1	R2	R3
۱	با	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴۳
	بدون	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۲۴	۰/۰۰۵۵
۲	با	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۱۹	۰/۰۰۵۱
	بدون	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۶۷
۳	با	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۵۶
	بدون	۰/۰۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰۷

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 (۶)، بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌های در قاب ۶ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3 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 طبقه‌های می‌شود. سطح عملکرد لرزه‌ای در قاب ۶ طبقه تحت توالی زلزله اصلی و پس‌لرزه رکورد R1 در محدوده ایمنی جانی (LS) است.

شکل ۱۴. مقایسه بیشترین برش پایه طبقات قاب ۳، ۶ و ۹ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

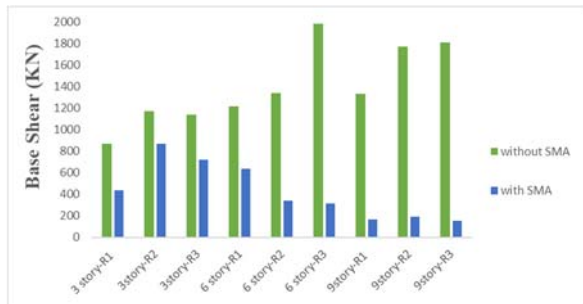


Fig. 14. Comparison of maximum base shear of 3, 6 and 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

شکل ۱۵. مقایسه بیشترین شتاب بام قاب ۳، ۶ و ۹ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

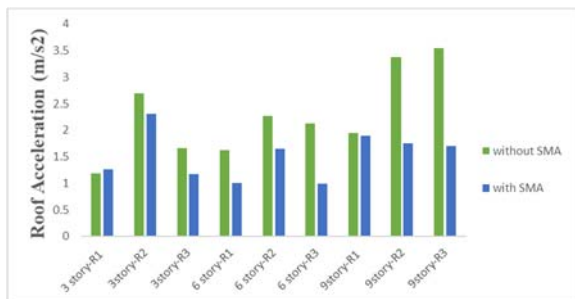


Fig. 15. Comparison of maximum roof acceleration of 3, 6 and 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3

بر اساس شکل های (۱۶ تا ۲۱)، بیشترین جابه جایی نسبی بین طبقه ای پسماند در قاب های مورد مطالعه ارائه شده است. بیشترین جابه جایی نسبی بین طبقه ای پسماند در قاب های ۳، ۶ و ۹ طبقه دارای مهاربند کمانش تاب به ترتیب معادل ۰/۰۰۹، ۰/۰۰۵۵ و ۰/۰۰۸۵ است. مقدار جابه جایی نسبی بین طبقه ای پسماند در پس لرزه بیش تر از زلزله اصلی است با افزایش ارتفاع قاب ها، میانگین جابه جایی نسبی بین طبقه ای پسماند هنگام زلزله اصلی و پس لرزه افزایش یافته است. به عنوان نمونه، در قاب ۳ طبقه، استفاده از آلیاژ حافظه دار شکلی باعث کاهش بیشترین پاسخ جابه جایی نسبی بین طبقه ای پسماند به میزان ۸۶/۶٪ و ۵۰٪ به ترتیب تحت زلزله اصلی و پس لرزه شده است.

این کاهش با افزایش تعداد طبقات، افزایش یافته است. بر اساس شکل (۱۵)، بیشترین شتاب بام در قاب ۹ طبقه بدون آلیاژ حافظه دار شکلی تحت زلزله R3 رخ داده است که با افزودن آلیاژ حافظه دار شکلی باعث کاهش بیش از ۵۰ درصد بیشترین شتاب بام قاب ۹ طبقه شده است و در تمامی مدل های مورد بررسی، افزودن SMA باعث کاهش شتاب بام می شود که این کاهش با افزایش ارتفاع بیشتر می شود.

جدول ۷. مقایسه بیشترین جابه جایی نسبی بین طبقه ای قاب ۹ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

طبقات	وضعیت SMA	R1	R2	R3
۱	با	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴۳
	بدون	۰/۰۰۶۷	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۵۵
۲	با	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۶۱
	بدون	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۷۲
۳	با	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۶۶
	بدون	۰/۰۰۰۷	۰/۰۱	۰/۰۰۰۷
۴	با	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۴۳
	بدون	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۵۵
۵	با	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۶۱
	بدون	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۷۲
۶	با	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۶۶
	بدون	۰/۰۰۶۷	۰/۰۱	۰/۰۰۰۷
۷	با	۰/۰۰۷۸	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۰۹
	بدون	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۵۵
۸	با	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۶۱
	بدون	۰/۰۰۶۵	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۶۷
۹	با	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۵۶
	بدون	۰/۰۰۲۱	۰/۰۱	۰/۰۱۱

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 ۱۳. مقایسه بیشترین جابه جایی بام قاب ۳، ۶ و ۹ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه دار شکلی تحت ۳ زلزله اصلی و پس لرزه R1، R2 و R3.

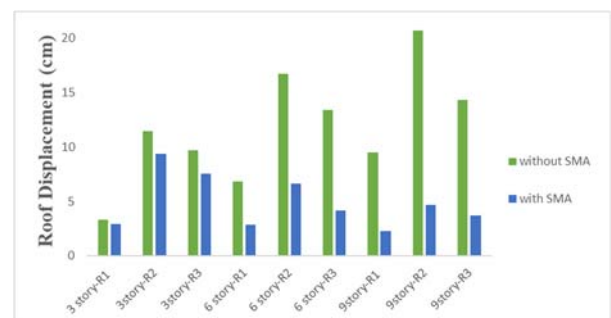


Fig. 13. Comparison of maximum roof displacement of 3, 6 and 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

شکل ۲۰. مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند قاب ۹ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

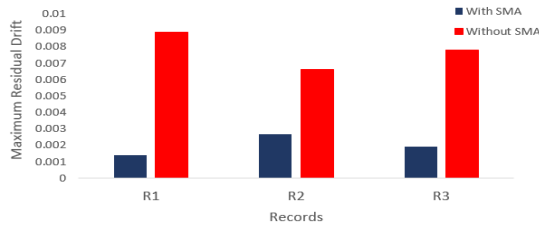


Fig. 20. Comparison of maximum residual interstory drift of 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

شکل ۲۱. مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند قاب ۹ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله اصلی و پس‌لرزه R1، R2 و R3.

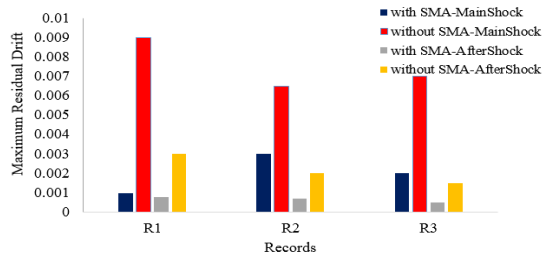


Fig. 21. Comparison of maximum residual interstory drift of 9-story frame with and without shape memory alloy under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

همچنین مطابق با شکل‌های (۲۲ تا ۲۴) میزان جابه‌جایی پسماند بام قاب‌های ۳، ۶ و ۹ طبقه با آلیاژ حافظه‌دار شکلی و بدون آن تحت شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر (زلزله اصلی و پس‌لرزه) قابل مشاهده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص است، مقدار جابه‌جایی پسماند بام برای هر کدام از شتاب‌نگاشت‌ها در دو حالت زلزله اصلی و پس‌لرزه در سازه دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر از سازه بدون این آلیاژ است. این مورد با افزایش تعداد طبقات سازه نمود بیشتری پیدا کرده است.

شکل ۲۲. مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی پسماند بام قاب ۳ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله اصلی و پس‌لرزه R1، R2 و R3.

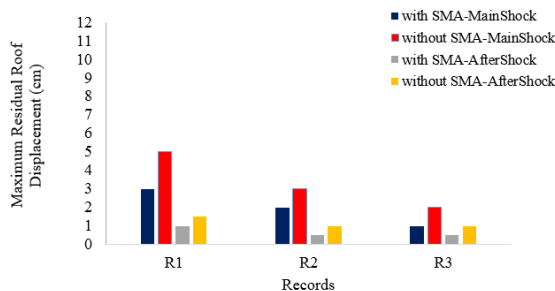


Fig. 22. Comparison of maximum residual roof displacement of 3-story frame with and without shape memory alloy under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

شکل ۱۶. مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند قاب ۳ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

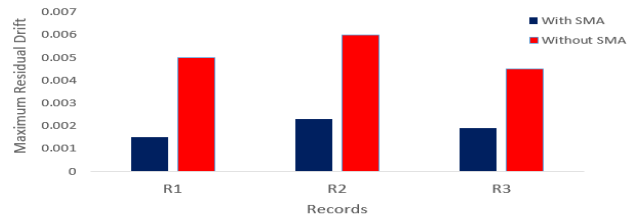


Fig. 16. Comparison of maximum residual interstory drift of 3-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

شکل ۱۷. مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند قاب ۳ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله اصلی و پس‌لرزه R1، R2 و R3.

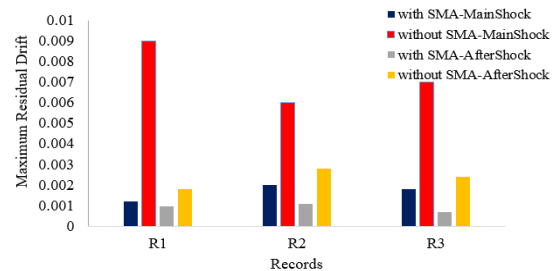


Fig. 17. Comparison of maximum residual interstory drift of 3-story frame with and without shape memory alloy under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

شکل ۱۸. مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند قاب ۶ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

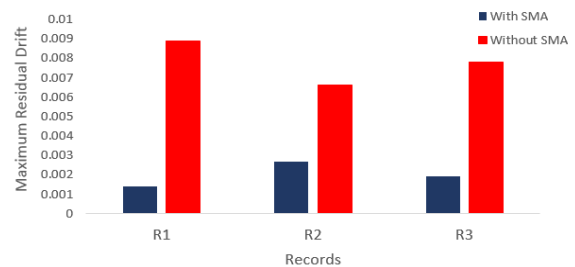


Fig. 18. Comparison of maximum residual interstory drift of 6-story frame with and without shape memory alloy under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

شکل ۱۹. مقایسه بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند قاب ۶ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله اصلی و پس‌لرزه R1، R2 و R3.

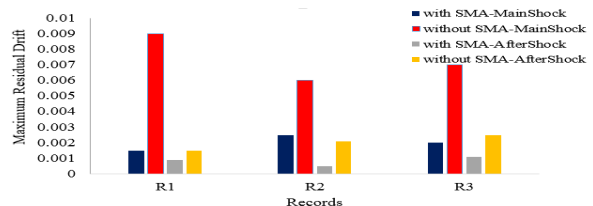
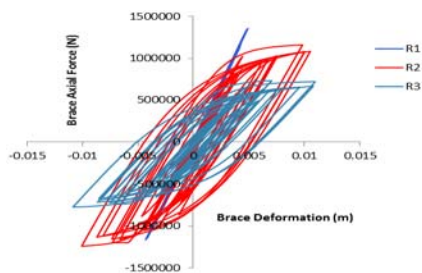
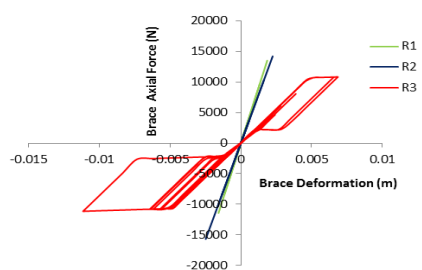


Fig. 19. Comparison of maximum residual interstory drift of 6-story frame with and without shape memory alloy under 3 mainshock-aftershock earthquakes R1, R2 and R3.

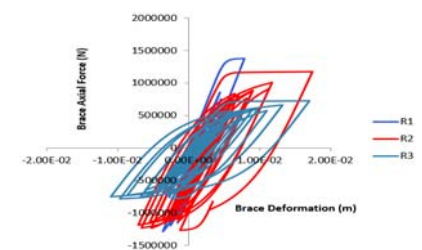
شکل ۲۵. مقایسه منحنی هیستریزیس BRB قاب ۳ طبقه تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.



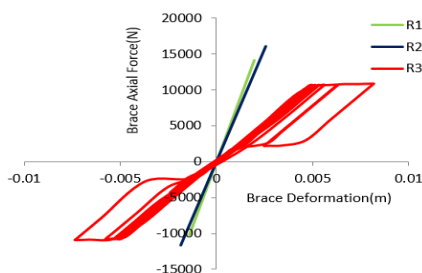
شکل ۲۶. مقایسه منحنی هیستریزیس BRB-SMA قاب ۳ طبقه تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.



شکل ۲۷. مقایسه منحنی هیستریزیس BRB قاب ۶ طبقه تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

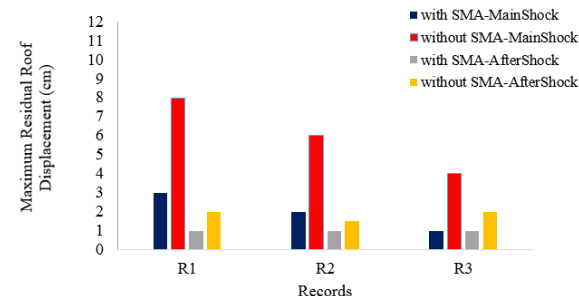


شکل ۲۸. مقایسه منحنی هیستریزیس BRB-SMA قاب ۶ طبقه تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

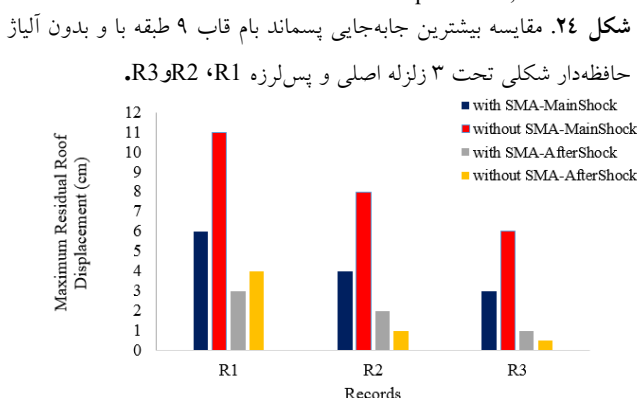


شکل ۲۳. مقایسه بیشترین جابه‌جایی پسماند بام قاب ۶ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله اصلی و پس‌لرزه R1، R2 و R3.

شکل ۲۴. مقایسه بیشترین جابه‌جایی پسماند بام قاب ۹ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله اصلی و پس‌لرزه R1، R2 و R3.



شکل ۲۴. مقایسه بیشترین جابه‌جایی پسماند بام قاب ۹ طبقه با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت ۳ زلزله اصلی و پس‌لرزه R1، R2 و R3.



به‌منظور بررسی منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌های مورد مطالعه، با توجه به حجم بالای منحنی‌های هیستریزیس دهانه‌های مختلف مهاربندی با و بدون آلیاژ حافظه‌دار در طبقات مختلف، تنها نمونه‌ای از این منحنی‌ها به‌منظور مقایسه ارائه شده است. مطابق شکل‌های (۲۵ الی ۳۰)، در حالت قاب‌های ۳، ۶ و ۹ 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 هیستریزیس در قاب‌های ۳، ۶ و ۹ 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 هیستریزیس قاب‌های مورد مطالعه 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.

قبولی ارائه دادند، می‌توان به مدل‌های ایجادشده و پاسخ‌های به دست آمده، اطمینان داشت.

- بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای در قاب‌های ۳ طبقه در هر دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی در طبقه انتهایی رخ می‌دهد. در قاب‌های ۶ طبقه بدون آلیاژ حافظه‌دار بیشترین جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای در طبقه چهارم و در قاب ۶ 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 ۹ 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.

شکل ۲۹. مقایسه منحنی هیستریزس BRB قاب ۹ طبقه تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

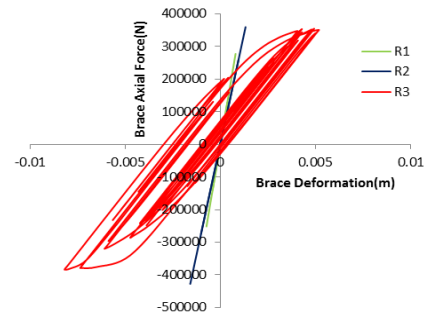


Fig. 29. Comparison of BRB hysteresis curve of 9-story frame under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

شکل ۳۰. مقایسه منحنی هیستریزس BRB-SMA قاب ۹ طبقه تحت ۳ زلزله R1، R2 و R3.

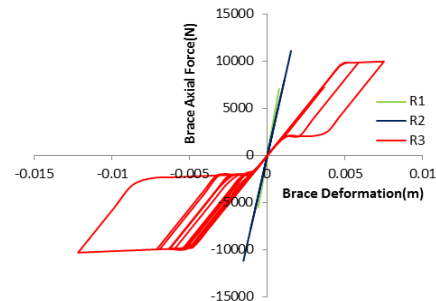


Fig. 30. Comparison of BRB-SMA hysteresis curve of 9-story frame under 3 earthquakes R1, R2 and R3.

با توجه به قیمت نسبی بالای آلیاژهای حافظه‌دار امکان استفاده کامل آن‌ها در سازه‌ها موجود نیست و باید به وسیله یک طرح بهینه‌ترین استفاده از مصالح موجود صورت بگیرد. بنابراین استفاده از این مواد به صورت متمرکز در یک میراگر تنها راه منطقی و عملی بود که پژوهشگران می‌توانستند انتخاب کنند. پس مهاربندهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی با افزودن این مواد به قسمتی از مهاربند با جزئیات خاص ساخته شده‌اند. در این پژوهش، با اضافه کردن میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی با طول بهینه به مهاربند کمانش تاب، 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.

۶- نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج و نمودارهای ارائه‌شده در بخش قبلی می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد و با توجه به درستی آزمایشی که نتایج مورد

- structural fuses, *Journal of Constructional Steel Research* 2016; 127: 54-65.
- [4] Ozelik R., Dikiciasik E., Erdil F. The development of the buckling restrained braces with new end restrains, *Journal of Constructional Steel Research* 2017; 138: 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 N., 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* 2018; 154: 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
- با افزایش ارتفاع سازه، پاسخ های لرزه ای در اثر استفاده از آلیاژ حافظه دار شکلی بیشتر بهبود یافته اند.
 - از نظر کاهش پاسخ های لرزه ای، وجود آلیاژ حافظه دار شکلی در قاب های بلند مرتبه مؤثرتر از قاب های کوتاه مرتبه هست که با توجه به پرهزینه بودن، استفاده از آن جز برای ساختمان های با اهمیت خیلی زیاد توجیه ندارد ولی از منظر خاصیت برگشت پذیری، کاهش میزان جابه جایی پسماند بام و جابه جایی نسبی پسماند برای قاب های بلندمرتبه دارای SMA بیشتر از سایر قاب ها بوده است و بیشترین این کاهش بیش تر از ۵۰ درصد جابه جایی پسماند قاب بدون آلیاژ را شامل می شود. بنابراین استفاده از این مصالح می تواند نکته مثبتی در کاهش خسارات ناشی از جابه جایی های پسماند در زمان بهره برداری برای ساختمان های بلندمرتبه باشد.
 - با تجهیز کردن قاب ها به آلیاژهای حافظه دار شکلی الگوی تمرکز اتلاف انرژی تغییر یافته است. در قاب های بدون آلیاژهای حافظه دار با توجه به جذب بیشتر نیروی جانبی (برش پایه بزرگتر) میزان اتلاف انرژی مهاربند های کمانش تاب بیشتر بوده است. در این قاب ها اتلاف انرژی در طبقات ابتدایی و در قاب های با آلیاژ حافظه دار تمرکز انرژی در طبقات انتهایی بوده است.
 - به کارگیری آلیاژ حافظه دار شکلی در سیستم ساختمانی قاب فولادی دارای مهاربند کمانش تاب باعث بهبود رفتار لرزه ای سیستم شده و موجب کاهش هزینه های بازسازی و تعمیر سیستم ساختمانی آسیب دیده شده و به نوعی موجب ارتقای برگشت پذیری سیستم می شود.

۷- 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, Eatherton M.R., Ryota Matsui R., Florig, S.H. Experimental investigation of miniature buckling restrained braces for use as

- 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.
- 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_manual/OpenSees_Command_Language_Manual_June_2006.pdf.
- [22] Miller D. J., Fahnestock L. A., Eatherton M. R. Development and experimental validation of a

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

Seyede Vahide Hashemi¹, Majid Pouraminian^{2*}, Abbasali Sadeghi³, 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

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 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.