

# بررسی و مقایسه رفتار لرزه‌ای مهاربندهای نوین فلزی به روش تحلیل دینامیکی فزاینده

رامین مردی<sup>۱</sup>، مهدی قاسمیه<sup>۲</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

m.ghassemieh.ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

## چکیده

مهاربندهای کمانش‌تاب (BRB) نوعی سیستم جدید مقاوم لرزه‌ای هستند که به دلیل کارایی و همچنین عملکرد لرزه‌ای بهتر آن‌ها نسبت به مهاربندهای مرسوم، استفاده از آن‌ها در حال گسترش است. مهاربندهای BRB معمولاً در قاب‌های مهاربندی شده همگرا به کار می‌روند. در مهاربندهای BRB به دلیل اینکه از کمانش هسته فولادی جلوگیری می‌شود، سازه رفتار بسیار پایدارتری از خود نشان می‌دهد. در این نوع مهاربندها، عملکرد هیستریک مهاربند، مشابه عملکرد هیستریک مصالح هسته است. از دیگر ویژگی‌های این مهاربندها می‌توان به این مورد اشاره نمود که شکل پذیری مصالح فولادی در طول قابل توجهی از مهاربند اتفاق می‌افتد. مهاربندهای BRB با وجود آن‌که قادر به اتلاف مقدار زیادی از انرژی می‌باشند، قادر به حذف کرنش‌های پسماند خود نیستند. به عبارت دیگر، فاقد ویژگی خودبازگشتی می‌باشند که این امر منجر به عدم بازگشت سازه در صورت نبود سازوکار بازگرداننده، به موقعیت اولیه خود پس از پایان زلزله می‌شود. بنابراین تغییرشکل‌های ماندگار زیادی در هنگام زلزله در سازه ایجاد می‌شود. برای برتری بر این نواقص، راه‌حل‌های نوآورانه مختلفی در ساخت مهاربندهای فولادی به کار گرفته شده‌است؛ که از جمله این راه‌حل‌ها استفاده از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی (SMA) که دارای دو ویژگی بارز حافظه‌دار بودن و رفتار ابرکشسان هستند و می‌توانند پس از باربرداری در کرنش‌های بزرگ به وضعیت اولیه خود بازگردند؛ است. در سال‌های اخیر از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن که مزیت‌های زیادی نسبت به آلیاژهای پیش از خود دارند و همچنین هزینه تولید آن‌ها کمتر است، در زمینه ساخت و ساز استفاده می‌شود. در این پژوهش به مقایسه رفتار لرزه‌ای سازه‌های دارای مهاربندهای کمانش‌تاب و سازه‌های فولادی دارای مهاربندهای آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن و بر پایه نیکل پرداخته شده‌است. برای مدل کردن این سیستم‌ها از نرم‌افزار ساینزمواستراکت استفاده شده‌است و تحلیل دینامیکی فزاینده روی یک سازه هفت طبقه مجهز به مهاربندهای هفت و هشت با توالی انجام گرفته‌است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سازه‌های مهاربندی شده با آلیاژهای حافظه‌دار پایه آهن در مقایسه با سازه‌های مهاربندی شده با نایتینول جابه‌جایی‌های بیشتر و جابه‌جایی ماندگار کمتری را متحمل می‌شوند و عملکرد مطلوب‌تری را نشان می‌دهند. لیکن این سازه‌ها در مقایسه با سازه‌های مهاربندی شده کمانش‌تاب جابه‌جایی‌های بیشتری را تجربه می‌کنند؛ در صورتی که هیچگونه جابه‌جایی ماندگاری برجای نمی‌گذارند.

واژگان کلیدی: آلیاژ حافظه‌دارشکلی پایه آهن، مهاربند کمانش‌تاب، آلیاژ حافظه‌دارشکلی نایتینول، تحلیل دینامیکی فزاینده، تغییر شکل ماندگار، رفتار ابرکشسان

## ۱- مقدمه

کشور ایران روی کمر بند لرزه ای قرار دارد؛ از طرفی تقریباً در صفحات زمین شناسی بیشتر استان های کشور گسل های فعالی وجود دارند. از طرف دیگر جابه جایی جانبی ناشی از نیروهای زلزله در ساختمان های فولادی همواره موجب نگرانی های شدیدی برای مهندسان و پژوهشگران بوده است که به این منظور در سازه های فولادی از انواع سیستم های مختلف مهار جانبی از جمله مهار بند استفاده می کنند. انواع مختلف مهار بندها به منظور کاهش اثر نیروهای جانبی لرزه ای و کاهش جابه جایی سازه ها به طور موفقیت آمیزی عمل کرده اند. با این وجود وقتی مهار بندهای فولادی در معرض نیروهای فشاری بزرگ قرار می گیرند، تغییر شکل های کمانشی ارائه می کنند و رفتار پسماند نامتقارن در کشش و فشار را سبب می شوند. در نتیجه این رفتار، کاهش شدیدی در مقاومت مهار بندها مشاهده می شود و در پی آن ظرفیت سازه به طور قابل توجهی کاهش یافته و خسارت های جبران ناپذیری را تجربه می کند. برای مرتفع نمودن این مشکلات راه حل های مختلفی پیشنهاد شده است. از جمله این راه حل ها استفاده از مهار بند فولادی کمانش تاب یا مهار بند کمانش ناپذیر (BRB<sup>1</sup>) و آلیاژهای حافظه دارشکلی (SMA<sup>2</sup>) است. در مهار بندهای کمانش تاب، به دلیل اینکه از کمانش هسته فولادی جلوگیری می شود، قادر به اتلاف انرژی به مقدار زیادی هستند. اولین مطالعات روی BRB توسط کیمورا انجام شد. در طرح وی، مهار بند از یک کمر بند معمولی روکش شده با لوله فولادی و پر شده با ملات تشکیل شده بود [1]. کلارک و همکاران به منظور طراحی و ساخت نخستین سازه های دارای مهار بندهای BRB، تعداد زیادی تحلیل های غیرخطی و همزمان با آن، آزمایش ها در مقیاس بزرگ در آزمایشگاه انجام دادند که نتایج این آزمایش ها برای طراحی سازه دارای مهار بندهای BRB مورد استفاده قرار گرفت [2]. همچنین سابلی و همکاران مطالعات تحلیلی وسیعی را روی پاسخ لرزه ای سیستم های مجهز به BRB ها و خاص الگوی شورون معکوس انجام دادند [3]. پس از آن، مطالعات فراوانی روی BRB ها انجام شد که از آن جمله می توان

به آزمایش های، کیم و سئو، کیگینز و اوآنگ و فهنستوک و همکاران اشاره نمود. اگرچه هنوز نیاز به انجام آزمایش های با مقیاس های بزرگتر در سازه های چند طبقه به منظور درک بهتر از رفتار و عملکرد این سیستم ها است [4-6].

مهار بندهای BRB با وجود آن که قادر به اتلاف مقداری زیادی از انرژی هستند، قادر به حذف کرنش های پسماند خود نیستند. به عبارت دیگر، ویژگی خودبازگشتی را ندارند پس این امر منجر به عدم بازگشت سازه، در صورت نبود سازوکار بازگرداننده، به موقعیت اولیه خود پس از پایان زلزله می شود. بنابراین تغییر شکل های ماندگار زیادی بعد از زلزله در سازه ایجاد می شود. در سال های اخیر برای رفع این مشکل استفاده از آلیاژهای حافظه دارشکلی، معروف به SMA، به عنوان موادی هوشمند که دارای دو ویژگی بارز حافظه دار بودن و رفتار ابرکشسان هستند و می توانند پس از باربرداری در کرنش های بزرگ به وضعیت اولیه خود بازگردند؛ در کنترل غیرفعال سازه ها مورد بررسی پژوهشگران قرار گرفته است آلیاژهای حافظه دارشکلی که به عنوان موادی هوشمند شناخته شده اند، نسبت به سیستم های متداول مستهلک کننده انرژی دارای مزایا و ویژگی های منحصر به فردی می باشند. قابلیت استهلاک مناسب انرژی، عدم باقی گذاشتن کرنش پسماند، مقاومت بالا در برابر خستگی و خوردگی، عمر مفید بالا، سخت شدگی نهایی در تغییر شکل های بالا و امکان ساخت مواد با ویژگی های مورد تقاضا همگی از جمله مزایا و ویژگی های این مواد هستند که آن را به یک ماده مطلوب برای کاربرد در میراگرها تبدیل کرده است. معروف ترین و پرکاربردترین آلیاژ حافظه دارشکلی، نایتینول (NiTi) است که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم است، اما به دلیل اینکه در این مواد از نیکل و تیتانیوم استفاده شده است، هزینه استفاده از آن ها زیاد است و ممکن است برای استفاده در سازه صرفه اقتصادی نداشته باشند. به همین منظور در سال های اخیر از آلیاژهای حافظه دارشکلی بر پایه آهن که مزیت های زیادی نسبت به آلیاژهای قبلی دارند و همچنین هزینه تولید و

بهره‌برداری آن‌ها کمتر است، در زمینه ساخت و ساز استفاده می‌شود.

از سال ۱۹۷۰ تلاش‌های بسیاری برای به دست آوردن خاصیت ابرکشسان آلیاژهای مبتنی بر آهن صورت گرفته است. ساتو و همکاران رفتار حافظه‌شکلی در آلیاژهای حافظه‌دار با پایه آهن (SMA-Fe) را بررسی نمودند [7]. امروزه آلیاژهای حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن به دلیل دارا بودن پتانسیل زیاد برای کاربرد در سازه‌ها، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. داشتن سختی بیشتر، هیستریزس گرمایی بزرگ‌تر و قیمت کمتر در مقایسه با نایتینول، باعث برتری این آلیاژها در زمینه ساخت‌وساز شده است. این کاهش هزینه هم به دلیل استفاده بیشتر از آهن در ترکیب آلیاژ و هم به دلیل امکان تولید این مواد در شرایط کارخانه‌های معمولی است. SMA-Feها همچنین دارای مقاومت خوردگی مناسب، قابلیت کارپذیری کافی و جوش‌پذیری مناسب می‌باشند. کاربرد SMA-Fe به ویژه برای اعمال پیش‌تنیدگی در سازه‌ها بسیار مفید است. همچنین با توجه به روند توسعه این آلیاژها، پیش‌بینی می‌شود که قیمت SMA-Feها در سال‌های آینده به مرور کاهش یافته و بیش‌ازپیش برای استفاده در صنعت ساختمان استفاده شوند.

امروزه انواعی از SMA-Feهای نوع دوم با خاصیت ابرکشسان مانند Fe-29Ni-18Co-5Al-8Ta-0.01B و Fe-36Mn-8Al-8.6Ni تولید شده‌اند [8]. تاناکا و همکاران آلیاژ حافظه‌دارشکلی Fe-29Ni-18Co-5Al-8Ta-0.01B را تولید نمودند که کرنش برگشت‌پذیر بیش از ۱۳٪ را در دمای اتاق و مقاومت کششی بسیار بالای ۱۲۰۰ مگاپاسکال را نشان می‌دهد [9]. تنش آغاز تبدیل آستنیت به مارتنزیت برای این آلیاژ ۷۵۱ مگاپاسکال است که بسیار زیاد است و قبل از آنکه مهاربندها از این جنس از ناحیه کشسان خارج شوند، تیرها و اتصالات آسیب خواهند دید. پس این آلیاژها مناسب برای استفاده به عنوان مهاربند نیست ولی توان زیادی در مستهلک کردن انرژی دارند. همچنین اموری و همکاران آلیاژ حافظه‌دارشکلی Fe-36Mn-8Al-8.6Ni با خاصیت ابرکشسان بسیار بالایی در دمای اتاق را بررسی کردند و مشخصات آن را ارائه کردند [10]. وابستگی این آلیاژ به دما بسیار کم است و با تغییر دما از ۱۶۰- درجه تا دمای

۲۴۰ درجه سانتیگراد تنش در این آلیاژ تغییر محسوسی نمی‌کند که این امر موجب کاربرد وسیع این آلیاژ در صنایع مختلف شده‌است. آلیاژ Fe-36Mn-8Al-8.6Ni با توجه به تنش آغاز تبدیل آستنیت به مارتنزیت، مدول الاستیسیته، کرنش برگشت‌پذیر خوب و وابستگی کم به دما، برای استفاده در سازه‌های فولادی مناسب است و به همین دلیل در این پژوهش از این آلیاژ در کنار آلیاژ حافظه‌دارشکلی نایتینول به عنوان مهاربندهای سازه فولادی، استفاده شده‌است. مشخصات این دو آلیاژ در جدول (۱) ارائه شده‌است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی دو آلیاژ حافظه‌دار پایه آهن و نایتینول [11]

Definition	FeMnAlNi	NiTi
E(GPa)	98	68
F <sub>y</sub> (MPa)	320	435
F <sub>p1</sub> (MPa)	442	535
F <sub>T1</sub> (MPa)	210	335
F <sub>T2</sub> (MPa)	122	170
ε <sub>s</sub> (%)	6.13	8

Table 1. Mechanical properties of SMA-Fe and NiTi

پژوهشگران در سال‌های اخیر به بررسی امکان استفاده از مواد حافظه‌دارشکلی در کاربردهای مهندسی سازه و زلزله پرداخته‌اند. در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره شده‌است. اولین پژوهش در این زمینه به تحقیق گراسر و کوتزارلی در سال ۱۹۹۱ بود که آن‌ها امکان استفاده از ماده نایتینول را به عنوان یک میراگر زلزله پیشنهاد دادند [12]. دلچه و همکاران جامع‌ترین مطالعه روی عملکرد SMAها در سازه‌هایی که تحت بارهای دینامیکی و زلزله قرار می‌گیرند، انجام دادند [13]. خان و لاگوداس اثر ابرکشسان SMA را روی سامانه‌های ارتعاشی مطالعه کردند [14]. آن‌ها مدلی برای تعیین پاسخ ابرکشسان المان‌های فنری SMA ارائه کردند. مطهری و قاسمیه به کمک روش‌های تحلیلی و استفاده از مدل رفتاری پیشنهادی، امکان استفاده از حالت‌های مختلف مواد حافظه‌دارشکلی را در میراگر پیشنهادی با رفتار بهینه بررسی کردند [15]. همچنین مطهری و قاسمیه با تهیه برنامه اجزا محدود غیرخطی، مدلی برای سازه‌های یک بعدی مجهز به آلیاژهای حافظه‌دارشکلی ارائه نمودند و رفتار آن را بررسی کردند [16]. قاسمیه و کاری در سال ۲۰۱۱ از آلیاژ حافظه‌دارشکلی نایتینول در مهاربندهای سازه استفاده کردند و

بررسی استفاده از آلیاژ نایتینول در کاهش آسیب وارد شده در تیرها و گوشه بازشوها در دیوار برشی بتنی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداختند [29]. آراین و قاسمیه یک سیستم نوین متشکل از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی برای بهسازی و همچنین طراحی پل‌ها، برای کاهش آثار قائم و افقی پل‌ها پیشنهاد دادند [30]. فرمانی و قاسمیه به ارزیابی رفتار ابرکشسان پیچ‌های SMA از جنس آلیاژ نایتینول و خاصیت بازگرداندگی پیچ‌ها در اتصالات ورق انتهایی گسترش یافته در نرم‌افزار آباکوس<sup>۱</sup> پرداختند [31]. ایشان همچنین به انجام یک مطالعه عددی به روی اتصال تیر به ستون جدید تشکیل شده از SMA و نوارهای برشی پرداختند [32]. کاری و همکاران، یک مهاربند جدید تشکیل شده از المان‌های BRB و آلیاژهای حافظه‌دارشکلی را پیشنهاد دادند [33]. ایشان در این مقاله به بررسی استفاده از این مهاربند جدید در ۴ قاب متفاوت فولادی پرداختند و آن‌ها را تحت ۲۰ شتاب‌نگاشت زلزله مختلف تحلیل کردند. ابوعلی و همکاران به مقایسه تیر بتنی مقاوم‌سازی شده به وسیله میله‌های SMA-Fe با تیر بتنی مقاوم‌سازی شده به کمک نوارهای کربنی تقویت شده با پلیمر پرداختند [34]. آراین و قاسمیه یک مطالعه عددی ارائه کردند که حضور نیروی قائم زلزله را نشان می‌داد [35]. عباس و همکاران یک رویکرد جدید برای مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای ستون‌های پل طراحی شده از قبل ارائه کردند [36]. دولت‌آبادی و همکاران رویکردی برای مدل‌سازی و تحلیل رفتار اعضای بتنی تقویت شده و پیش‌تنیده شده با میلگردهای SMA-Fe تعبیه شده در یک لایه شاکریت ارائه کردند [37]. رضاپور و همکاران راه جدیدی را برای بهبود رفتار دیوار بنایی با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی با پایه آهن ارائه کردند [38].

در این پژوهش تلاش شده که رفتار لرزه‌ای آلیاژهای حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن و رفتار لرزه‌ای آلیاژ حافظه‌دارشکلی نایتینول با خاصیت ابرکشسان با استفاده از روش تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA<sup>۲</sup>) بررسی شوند. عملکرد آنها با یکدیگر مقایسه شده و برتری این سیستم‌های پیشنهادی با مهاربندهای فولادی

اثر استفاده همزمان مهاربندهای SMA و مهاربندهای کمانش‌تاب را با جایگزینی مناسب در کاهش جابه‌جایی مانده و همچنین کاهش جابه‌جایی بیشینه نسبی طبقات بررسی کردند [17]. قدرتیان و همکاران رویکرد جدیدی را برای بهبود رفتار لرزه‌ای پل‌ها با استفاده از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی نایتینول ارائه کرده‌اند [18]. قاسمیه و همکاران تاثیر بکارگیری آلیاژهای حافظه‌دارشکلی را در بهبود رفتار دیوارهای برشی تحت تحریکات لرزه‌ای تحقیق کردند [19]. قاسمیه و همکاران هر دو خاصیت شبه‌ارتجاعی و اثر حافظه‌شکلی آلیاژ نایتینول برای کنترل ساختار دیوار برشی بتنی در شرایط تحریک لرزه‌ای را بررسی کردند [20]. قاسمیه و همکاران به بررسی اثربخشی آرماتورهای SMA در افزایش رفتار دیوارهای برشی، به ویژه هنگامی که در معرض تحریکات لرزه‌ای قرار می‌گیرند، پرداختند [19]. قاسمیه و کاری مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی آسیب دیده در اثر زلزله را با استفاده از مهاربندهای BRB و مهاربندهای SMA مورد مطالعه قرار دادند [21]. مرتضوی و همکاران به بررسی بهترین استفاده از هر دو فاز آستینت و مارتزیت آلیاژهای حافظه‌دارشکلی در مهاربندهای سازه‌های فولادی پرداختند [22]. قاسمیه و کارگر پاسخ لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده فولادی با استفاده از مهاربندهای آلیاژی حافظه‌دارشکلی را ارزیابی و ضریب رفتار سیستم‌های مختلف را مقایسه کردند [23]. قاسمیه و همکاران به بررسی اثربخشی آلیاژهای حافظه‌دارشکلی در بهبود رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی جفت شده پرداختند [24]. الوندی و قاسمیه به بررسی عملکرد سازه مجهز به جداساز پایه در ترکیب با آلیاژ حافظه‌دارشکلی پرداختند و همچنین ایشان کارایی و امکان‌سنجی دو سازوکار سیستم جداسازی و مواد حافظه‌دارشکلی را با چند نمونه موردی مقایسه و بررسی کردند [25, 26]. آراین و قاسمیه یک سیستم ابرکشسان برای طراحی و همچنین مقاوم‌سازی پل‌های پیوسته چند دهانه ارائه و ارزیابی کردند [27]. غلام‌پور و قاسمیه یک روش گام‌به‌گام جدید انتگرال زمانی برای مشکلات غیرخطی سازه‌های دارای اعضای حافظه‌دارشکلی پیشنهاد دادند [28]. قاسمیه و همکاران به

شکل ۱. سازه مدل سازی شده در برنامه ساینموستراکت

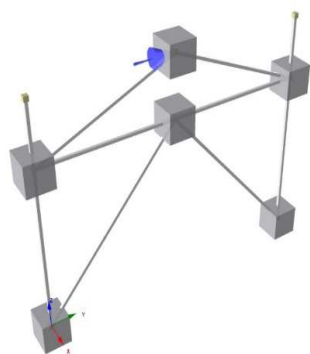


Fig. 1. The model built into the Seismostruct program

این سازه شامل یک قاب دو طبقه است که از مهاربندهایی از نوع شورون یا هشتی برای مهارسازی آن در مقابل نیروهای جانبی استفاده شده است. ارتفاع طبقه اول ۳/۳ متر، ارتفاع طبقه دوم ۲/۹ متر و عرض دهانه قاب ۶/۱ متر است. مهاربندهای طبقه اول از نوع المان‌های BRB و مهاربندهای طبقه دوم مهاربندهای معمولی فولادی هستند. مشخصات مادی و هندسی مدل آزمایش شده مجهز شده با مهاربندهای BRB در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات مقاطع مورد استفاده [39]

Story	Column	Beam	Brace
1	W14×176	W21×93	40.85 Cm <sup>2</sup>
2	W14×176	W21×93	W10×112

Table 2. Specifications of sections used

مطابق با نمونه آزمایشگاهی، مصالح فولادی از نوع ASTM-A992Gr50 استفاده شده است و همچنین برای مدل سازی مقاطع BRB در نرم‌افزار، فولاد با مقاومت تسلیم ۲۸۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. در برنامه برای مدل سازی المان‌های BRB از المان خرابایی استفاده شده است. اتصالات ستون‌ها به پی گیردار و اتصالات تیرها به ستون‌ها صلب در نظر گرفته شده است. در گره بالایی سازه یک الگوی بارگذاری تغییرمکانی به سازه وارد شده است و تحلیل استاتیکی تاریخچه زمانی انجام گرفته است. تاریخچه زمانی بارگذاری - تغییر مکانی در شکل (۲) نشان داده شده است.

نویسنده کمانش‌تاب به عنوان مهاربندهای متداول در سازه‌های فولادی مورد بررسی قرار گرفته شده است.

## ۲- مبانی تحلیل دینامیکی فزاینده

روش تحلیل دینامیکی فزاینده یا IDA شامل مجموعه‌ای از چندین تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی سازه تحت تأثیر زلزله با شدت‌های متفاوت افزایشی است. انجام IDA نیاز به انتخاب مناسب شاخص شدت حرکت زمین و شاخص خرابی دارد. بعد از انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها برای تحلیل مدلسازی مهمترین مطلب انتخاب مناسب شاخص شدت ( $IM^1$ ) و شاخص خسارت ( $DM^2$ ) می‌باشد. سازه مورد مطالعه یک سازه ۷ طبقه است و از آنجایی که ساختمان دارای ارتفاع متوسط است (بنابراین مود اول حاکم است)، شتاب طیفی مود اول با ۵ درصد میرایی به عنوان  $IM$  با افزایش به صورت گام‌های ثابت انتخابی منطقی است. در این تحقیق برای  $DM$  از شاخص خسارت بی‌بعد نسبت بیشینه تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای به ارتفاع طبقه ( $\theta_{max}$ ) در طول زمان تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده است.

## ۳- درستی آزمایشی نمونه آزمایشگاهی

برای درستی آزمایشی قاب مهاربندی شده با مهاربندهای BRB که توسط ماهین و یوریز آزمایش شده است، با استفاده از برنامه ساینموستراکت<sup>۳</sup> مدل سازی نموده و نتایج بدست آمده از آن برنامه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است [39, 40]. تصویر سازه مدل سازی شده در شکل (۱) نشان داده شده است.

شکل ۳. مقایسه نیروی جانبی در مقابل جابه‌جایی بام نمونه مدل‌سازی شده

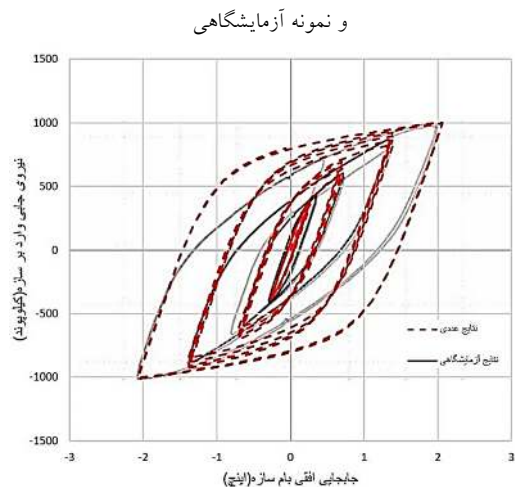


Fig. 3. Comparison of lateral force versus roof displacement of modeled sample and laboratory sample

شکل ۲. پروتکل بارگذاری به صورت چرخه‌ای

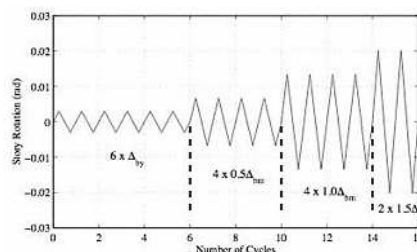


Fig. 2. Cyclic loading protocol [39]

شکل (۳) مقایسه نتایج نمودارهای هیستریزس عددی مهاربند را با نتایج آزمایشگاهی ارائه نموده است. جابه‌جایی بیشینه مهاربند و نیروی متناظر آن در مدل‌سازی انجام شده به ترتیب ۱/۵۹ اینچ و ۵۴۲ هزارپوند است که در نمونه آزمایشگاهی به ترتیب ۱/۷ اینچ و ۵۷۰ هزارپوند می‌باشد که با دقت بیشتر از ۹۰ درصد نتایج با یکدیگر مشابه هستند و همچنین نیروی جانبی بیشینه سازه و جابه‌جایی متناظر آن در نمونه آزمایشگاهی به ترتیب ۹۹۲ هزارپوند و ۱/۹۸ اینچ گزارش شده است که این نتایج در نمونه مدل‌سازی شده به ترتیب ۱۰۰۳ هزارپوند و ۲/۰۶ اینچ به دست آمده است. همانطور که ملاحظه شد، با استفاده از نرم‌افزار به‌کارگرفته شده و مدل‌سازی دقیق، نتایج قابل قبولی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است. در نتیجه با انجام این درستی‌آزمایی، سایر مطالعات و همچنین بررسی رفتار سایر سیستم‌های مهاربندی با این نرم‌افزار انجام گرفته است.

#### ۴- مدل‌سازی

در ادامه، یک سازه ۷ طبقه با مهاربندهای هفتی و هشتی به صورت توالی، پیشنهاد شده توسط قوسی و ساهو، به عنوان سازه مبنا برای مقایسه سه سیستم مهاربندی استفاده شده است [41]. پلان کلی سازه مستطیلی به ابعاد ۳۶/۶ متر در راستای افقی، که تشکیل شده از دو دهانه ۹/۱۵ متری و سه دهانه ۶/۱ متری و همچنین ۲۲/۸۷ در راستای عمود که تشکیل شده از یک دهانه ۹/۱۵ متری و دو دهانه ۶/۸۶ می‌باشد. مطابق با شکل (۵) همان‌طور که در پلان سازه مشخص است، ۲ مهاربند در جهت عرضی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و به دلیل تقارن در این راستا تنها یک قاب مهاربندی در نظر گرفته شده است. ارتفاع طبقه اول ۴/۲۷ متر و ارتفاع بقیه طبقات ۳/۵۱ متر است و همچنین عرض دهانه ۹/۱۵ متر است که در شکل (۴) مشخص شده است. در مدل‌سازی این سازه از فولاد با مقاومت تسلیم ۳۴۵ مگاپاسکال و مدل منگوتو-پینتو برای مدل‌سازی تیرها، ستون‌ها و مقاطع BRB استفاده شده است که در شکل (۶) نشان داده شده است. مدل‌سازی در راستای ضلع کوچک‌تر پلان انجام شده است و مهاربندها در وسط این ضلع سازه واقع شده‌اند. کل جرم لرزه‌ای سازه ۲۶۳۸ تن است. مشخصات هندسی مدل با مهاربندهای

**Table 3.** Sections used in BRB modeling [41]

مشخصات مادی و هندسی تیرها و ستون‌ها در هر سه مدل مهاربندی BRB و SMAها یکسان است. مهاربندهای SMA در هر طبقه به شکلی انتخاب شده‌اند که سختی محوری  $(\frac{EA}{L})$  و ظرفیت محوری  $(\sigma_c A)$  یکسانی با مهاربندهای BRB داشته باشند که در جداول (۴ و ۵) ذکر شده است. لازم به ذکر است که اگر هدف مقایسه نباشد می‌توان از طول کمتری از میله‌های آلیاژهای حافظه‌دارشکلی استفاده کرد و می‌توان معیار برای انتخاب طول را فقط جابه‌جایی مجاز طبقات در نظر بگیریم، که در این صورت جابه‌جایی حداکثر و نسبی طبقات نیز کاهش چشمگیری خواهند داشت. مهاربندهای حافظه‌دارشکلی به نحوی طراحی شده‌اند که مانند مهاربندهای کمانش‌تاب، کمانش ناپذیرند و در کشش و فشار نیز مانند مهاربندهای BRB عمل می‌کنند.

مشخصات هندسی آلیاژهای حافظه‌دار مورد استفاده در نرم‌افزار در جداول (۴ و ۵) ارائه شده‌است.

جدول ۴. مشخصات مهاربندهای SMA-Fe

Story	Column	Diameter(m)	Length(m)
1	W14x211	0.110	3.30
2	W14x211	0.100	3.00
3	W14x145	0.098	3.00
4	W14x145	0.090	3.00
5	W14x81	0.083	3.00
6	W14x81	0.075	3.00
7	W14x81	0.055	3.00

**Table 4.** Sections used in SMA-Fe modeling

جدول ۵. مشخصات مهاربندهای SMA-NiTi

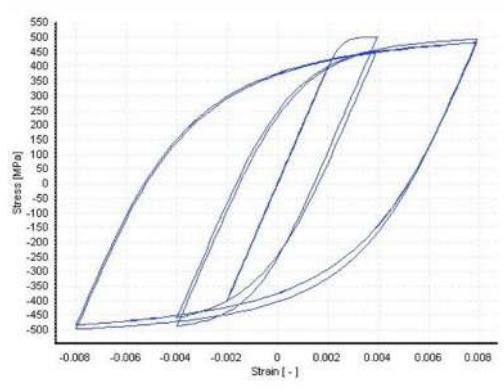
Story	Column	Diameter(m)	Length(m)
1	W14x211	0.096	1.80
2	W14x211	0.087	1.65
3	W14x145	0.085	1.65
4	W14x145	0.078	1.65
5	W14x81	0.073	1.65
6	W14x81	0.063	1.65
7	W14x81	0.050	1.65

**Table 5.** Sections used in SMA-NiTi modeling

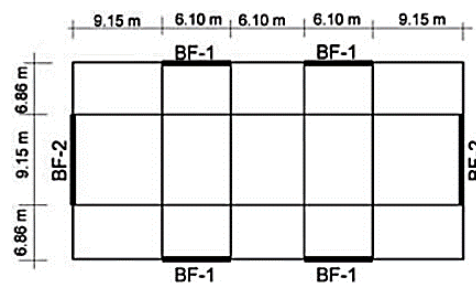
مشخصات مادی مهاربندهای SMA-Fe و SMA-NiTi طبق جدول (۱) استفاده شده‌است.

BRB در جدول (۳) ارائه شده‌است و همچنین مقطع تیرها یکسان و مقطع w16x50 است.

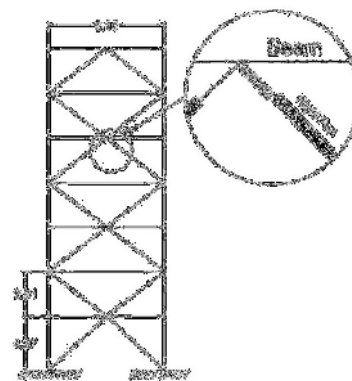
شکل ۴. مدل منگوتو-پیتو

**Fig. 4.** Manegotto-Pinto steel model

شکل ۵. پلان کلی سازه ۷ طبقه

**Fig. 5.** General plan of 7-story structure [41]

شکل ۶. سازه قاب مهاربندی ۷ طبقه

**Fig. 6.** Structural braced frame [41]

جدول ۳. مقاطع مورد استفاده در مدل‌سازی BRB

Story	Column	Brace(mm)
1	W14x211	Hss 8x8x0.5
2	W14x211	Hss 10x10x0.31
3	W14x145	Hss 8x8x0.37
4	W14x145	Hss 8x8x0.31
5	W14x81	Hss 6x6x0.37
6	W14x81	Hss 5.5x5.5x0.31
7	W14x81	Hss 5x5x0.18

نتیجه به هر ستون به صورت متمرکز در هر طبقه ۹۴ تن اختصاص داده شده‌است. از المان جابه‌جایی محور برای مدل کردن تیرها و ستون‌ها و از المان محوری برای مهاربندها استفاده شده‌است. مطابق تحقیق انجام شده توسط ساهو و قوسی اتصال ستون‌ها به پی به صورت گیردار و همچنین اتصال تیرها به ستون‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شده‌اند. از تغییر شکل محوری تیرها صرف نظر شده و سقف طبقات در جهت عمود بر صفحه صلب در نظر گرفته شده‌است [41].

شکل ۷. شتاب طیفی میانگین همپایه شده نسبت به شتاب طرح

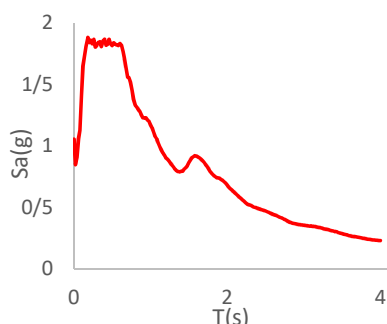


Fig. 7. Average spectral acceleration relative to the design Spectral acceleration

## ۵- تحلیل‌های IDA

با انجام تحلیل‌های IDA منحنی‌های دینامیکی فزاینده برای ۱۴ شتابنگاشت برای هر ۳ سازه مهاربندی BRB, SMA-NiTi و SMA-Fe ترسیم شدند. همچنین نمودار نیروی محوری-جابه‌جایی برای مهاربندهای طبقه اول سازه‌های کمانش‌تاب و آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن در اثر اعمال زلزله نورتریج با  $PGA=0.6g$  برای نمونه در شکل‌های (۸ و ۹) ارائه شده‌است. در شکل (۱۰) نمودارهای تحلیل دینامیکی فزاینده برای سازه با مهاربندی کمانش‌تاب در مقایسه با یکدیگر به صورت ساده شده نشان داده شده‌است. در هر یک از منحنی‌ها IDA مقادیر عددی خسارت در هر تراز شدت محاسبه می‌شود. با کنار هم قرار دادن مقادیر خسارت تمام زلزله‌ها، در هر سطح شدت به تعداد منحنی‌های IDA خسارت وجود دارد.

برای بررسی رفتار لرزه‌ای سه سیستم مهاربندی جانبی ذکر شده از تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده شده‌است. در این تحلیل ۱۴ شتابنگاشت نزدیک گسل زلزله‌های مختلف با بزرگای بین ۶,۵ تا ۷,۶ با توجه به خاک محل سازه، سرعت موج برشی و عمق وقوع زلزله انتخاب شده‌اند. مشخصات این شتاب‌نگاشت‌ها در جدول (۶) ارائه شده‌است و تمام این شتاب‌نگاشت‌ها با توجه به طیف طرح سازه برای زلزله MCE همپایه شده‌اند. در انتها نیز نمودار شتاب طیفی میانگین برای شتاب‌نگاشت‌های همپایه شده در شکل (۷) ارائه شده‌است. سازه در ناحیه‌ای فرضی در ایالت کالیفرنیا و شهر لس‌آنجلس واقع شده‌است و خاک منطقه از نوع خاک نوع D است. زمان تناوب مود اول این سازه ۰,۹۶ ثانیه به دست آمده‌است که در مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها از آن استفاده شده‌است. مشخصات طیف طرح سازه با توجه به محل سازه از سایت سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) استخراج شده‌است.

جدول ۶- مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل

Earthquake name	Station	M	PGA(g)
Northridge1994	Beverly Hills	6.7	0.443
Northridge1994	Beverly Hills	6.7	0.488
Northridge1994	Canyon Country	6.7	0.404
Northridge1994	Canyon Country	6.7	0.472
Duzce, Turkey1999	Bolu	7.1	0.739
Duzce, Turkey1999	Bolu	7.1	0.806
Imperial Valley1979	Delta	6.5	0.236
Imperial Valley1979	Delta	6.5	0.35
Kobe, Japan1995	Shin-Osaka	6.9	0.225
Kobe, Japan1995	Shin-Osaka	6.9	0.233
Landers1992	Coolwater	7.3	0.284
Landers1992	Coolwater	7.3	0.417
Chi-Chi, Taiwan1999	CHY101	7.6	0.34
Chi-Chi, Taiwan1999	CHY101	7.6	0.398

Table 6. Accelerometers used in analysis

جرم لرزه‌ای معادل هر قاب مهاربندی، برابر با نصف جرم کل طبقه است، زیرا هر جهت مجهز به دو مهاربند می‌باشد و در



برای خلاصه کردن اطلاعات روش‌های مختلفی وجود دارد، که ساده‌ترین در عین حال پرکاربردترین آن‌ها محاسبه میانگین اعداد می‌باشد. در این روش در هر سطح از شدت، میزان خسارت تعیین شده و سپس با محاسبه میانگین حسابی اعداد، منحنی میانگین به دست می‌آید. استفاده از این روش تا رسیدن به نقطه‌ای که اولین منحنی به مقدار ظرفیت خود می‌رسد مناسب و کاربردی است، اگر یک منحنی در تراز پایین‌تر از سطح شدت حرکت زمین در سایر منحنی‌ها به سمت بینهایت میل کند از آن تراز به بعد منحنی میانگین نیز بی‌نهایت خواهد شد برای برطرف کردن این نقص استفاده از میان اعداد موثرتر و کاربردی‌تر خواهد بود. مطابق شکل (۱۱) با در نظر گرفتن مقادیر خسارت‌های تعیین شده در هر تراز شدت به جای محاسبه میانگین حسابی، از میان ساده ۵۰ درصد، ۱۶ درصد و ۸۴ درصد بازه اعداد استفاده می‌شود. این میان‌ها با توجه به تحقیقات کرنل و همکاران که از بنیان‌گذاران این روش هستند انتخاب شده‌اند [42]. که همچنین توصیه شده است نمودار تا جایی ادامه یابد که سازه‌ها به ناپایداری برسند که در این تحقیق تا کرنش ۱۲ درصد به عنوان نقطه انتهای تحلیل انتخاب شده است. در شکل (۱۲) نمودارهای تحلیل دینامیکی فزاینده برای سازه با مهاربندی آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن در مقایسه با یکدیگر به صورت ساده‌سازی شده در یک نمودار نشان داده شده است.

شکل ۱۱. منحنی‌های IDA خلاصه شده ۱۴ شتابنگاشت برای ۵۰٪ و صدک‌های ۱۶٪ و ۸۴٪ مهاربند کمانش‌تاب

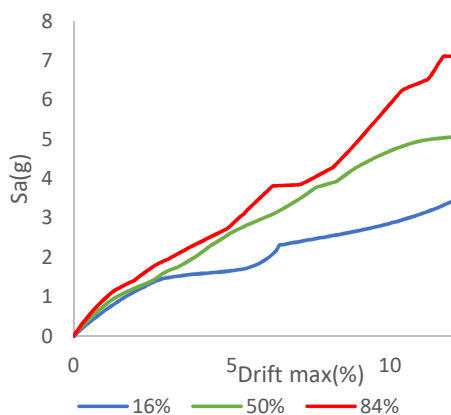


Fig. 11. Summarized IDA curves for 14 accelerometers for 50% and 16% and 84% percentages of BRB

شکل ۸. نمودار نیروی محوری-جابه‌جایی مهاربند سازه کمانش‌تاب

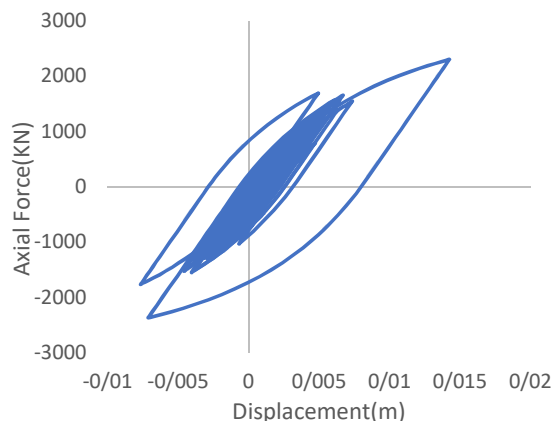


Fig. 8. Axial force- displacement diagram of BRB structure

شکل ۹. نمودار نیروی محوری-جابه‌جایی مهاربند سازه آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن

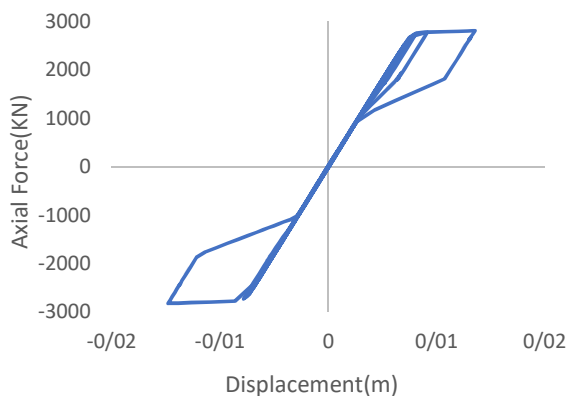


Fig. 9. Axial force- displacement diagram of SMA-Fe structure

شکل ۱۰. منحنی IDA برای ۱۴ شتابنگاشت مختلف اعمال شده به سازه مهاربند کمانش‌تاب

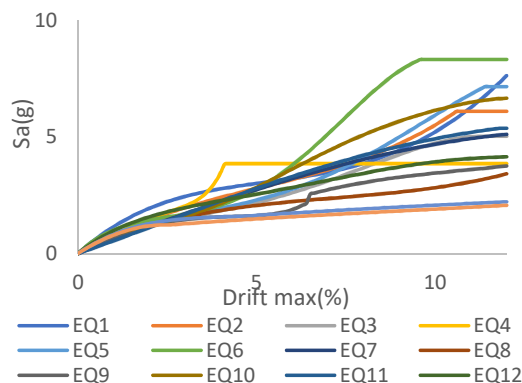


Fig. 10. IDA curve for 14 different accelerometers applied to the BRB structure

شکل ۱۴. منحنی IDA برای ۱۴ شتابنگاشت اعمال شده به سازه نایتینول

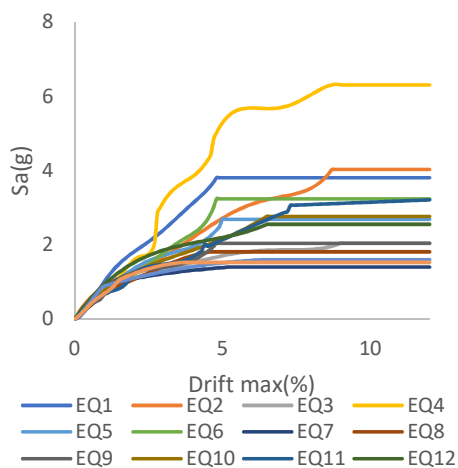


Fig. 14. IDA curve for 14 different accelerometers applied to the SMA-NiTi structure

در انتها نمودارهای IDA میانگین و ۲ صدک ۱۶٪ و ۸۴٪ از ۱۴ شتابنگاشت مختلف استخراج شده است که در شکل (۱۵) به نمایش درآمده است.

شکل ۱۵. منحنی‌های IDA خلاصه شده ۱۴ شتابنگاشت برای ۵۰٪ و ۱۶٪ و ۸۴٪ سازه با مهاربند آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه نیکل

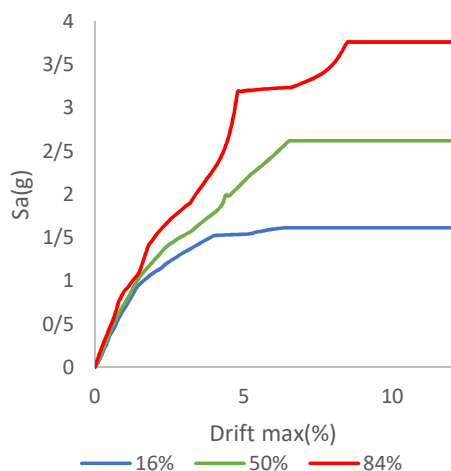


Fig. 15. Summarized IDA curves for 14 accelerometers for 50% and 16% and 84% percentages of SMA-NiTi bracing

شکل ۱۲. منحنی IDA برای ۱۴ شتابنگاشت مختلف اعمال شده به سازه مهاربند آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن

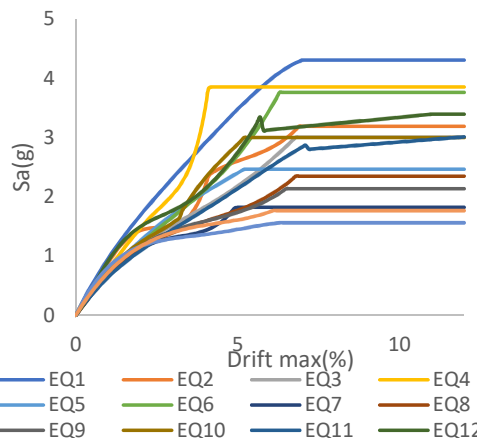


Fig. 12. IDA curve for 14 different accelerometers applied to the SMA-Fe structure

سپس نمودارهای IDA میانگین و ۲ صدک ۱۶٪ و ۸۴٪ از ۱۴ شتابنگاشت مختلف استخراج شد که در شکل (۱۳) به نمایش درآمده است. همچنین در شکل (۱۴) نمودارهای تحلیل دینامیکی فزاینده برای سازه با مهاربندی آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه نیکل در مقایسه با یکدیگر به صورت ساده‌سازی شده در یک نمودار نشان داده شده است.

شکل ۱۳. منحنی‌های IDA خلاصه شده ۱۴ شتابنگاشت برای ۵۰٪ و ۱۶٪ و ۸۴٪ سازه با مهاربندی آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن

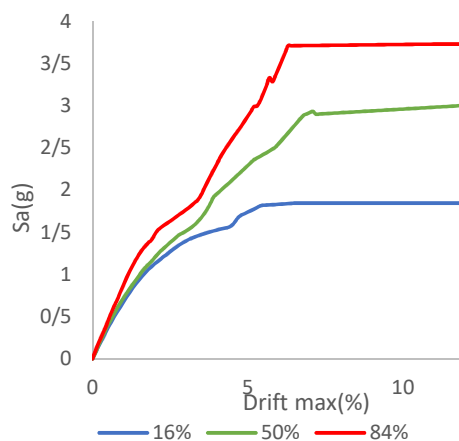


Fig. 13. Summarized IDA curves for 14 accelerometers for 50% and 16% and 84% percentages of SMA-Fe bracing

## ۶- تفسیر نتایج

با رسم منحنی‌های دینامیکی فزاینده برای قاب‌های مطالعه شده در این پژوهش در مختصات  $\theta_{max}$  و  $Sa(T1,5\%)$  نتایج زیر حاصل شده‌اند:

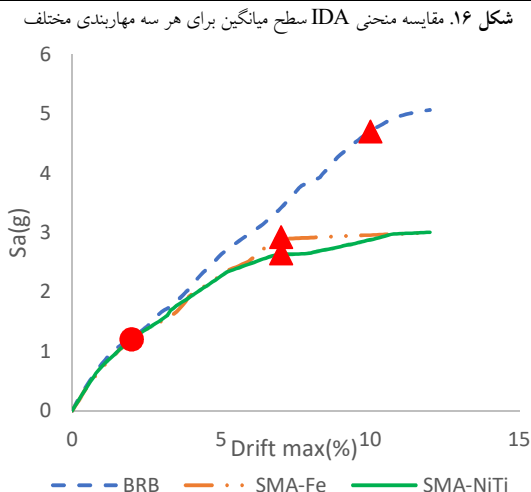


Fig. 16. Comparison of average level IDA curves for all three different braces

همچنین مشاهده شده است که سختی الاستیک (شیب ناحیه رفتار خطی) در هر ۳ قاب مهاربندی شده با یکدیگر برابر است که مطابق انتظار بوده است، زیرا مهاربندهای سازه‌های آلیاژ حافظه‌دارشکلی به شکلی طراحی شده‌اند که سختی و زمان تناوب یکسانی با سازه کمانش‌تاب داشته باشند. در نهایت همان‌طور که در شکل‌ها به صورت واضح مشخص است نمودار سازه BRB بالاتر از دو سازه آلیاژ حافظه‌دارشکلی است و در شتاب مساوی مشخص است که جابه‌جایی سازه‌های آلیاژ حافظه‌دارشکلی بیشتر از سازه کمانش‌تاب است و همچنین مشاهده شده است مهاربند آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن عملکرد مطلوبی داشته و نمودار آن کمی بالای آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه نیکل است و در شتاب‌های برابر، جابه‌جایی کمتری را تجربه می‌کند. همچنین دو سازه آلیاژ حافظه‌دارشکلی تقریباً باهم حرکت می‌کنند و در یک نقطه به ناپایداری می‌رسند.

با توجه به نمودارها به نظر می‌رسد که سازه‌های مهاربندی شده با آلیاژهای حافظه‌دارشکلی عملکرد مطلوبی داشته‌اند و تا زمانی که این سازه‌ها به ناپایداری برسند یعنی کمی قبل از جابه‌جایی نسبی ۷ درصد تفاوت زیادی با سازه کمانش‌تاب نداشته‌اند، در صورتی که همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد اگر فقط معیار جابه‌جایی مجاز طبقات برای طراحی SMAها در نظر گرفته شود. مسلماً به دلیل طول کمتر SMAها در نقطه‌ای بیشتر از ۷ درصد به ناپایداری دینامیکی می‌رسند و عملکرد حتی مطلوب‌تری از خود نشان

هرچه سازه‌ها بیشتر وارد مرحله غیرخطی می‌شوند (در مقادیر حداکثر تقاضای تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای بالا)، مقدار پراکندگی نتایج بیشتر شده و سازه بیشتر تحت تأثیر شتاب‌نگاشت‌های ورودی قرار می‌گیرد.

سازه با مهاربندی کمانش‌تاب از دو سازه با مهاربندی آلیاژ حافظه‌دارشکلی دیرتر به ناپایداری می‌رسد و در حداکثر تقاضای تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای ۱۰٪ به ناپایداری دینامیکی می‌رسد. این در صورتی است که شیب سازه‌های مهاربندی شده با آلیاژهای حافظه‌دارشکلی در نقطه حدود ۷٪ به ۲۰٪ شیب ناحیه ارتجاعی می‌رسد و در این نقطه سازه ناپایدار می‌شود که این نقاط در شکل (۱۶) با علامت مثلث نشان داده شده‌اند.

با بررسی منحنی‌های دینامیکی فزاینده برای ۳ نوع قاب مهاربندی شده مطالعه شده تحت اثر ۱۴ شتاب‌نگاشت مشاهده شده است، که طول ناحیه رفتار خطی در سازه‌های آلیاژ حافظه‌دارشکلی بیشتر از سازه کمانش‌تاب است و این سازه‌ها دیرتر وارد ناحیه غیرارتجاعی می‌شوند که همان‌طور که در شکل زیر مشاهده می‌شود سازه‌های مهاربندی شده با آلیاژ حافظه‌دارشکلی تا حدود ۳٪ در ناحیه خطی باقی مانده‌اند؛ در صورتی که سازه کمانش‌تاب زودتر وارد ناحیه غیرخطی شده است که از این مورد می‌توان نتیجه گرفت مقدار پیشنهادی  $\theta_{max}=0.02$  برای سطح عملکردی سکونت فوری در سازه‌های مهاربندی شده با آلیاژ حافظه‌دارشکلی مقدار دست‌پایینی است. از این جهت مقدار  $\theta_{max}=0.03$  را برای سطح عملکردی سکونت فوری در این سازه‌ها می‌توان در نظر گرفت.

شکل ۱۸. مقایسه منحنی IDA سطح صدک ۸۴٪ برای هر سه مهاربندی مختلف

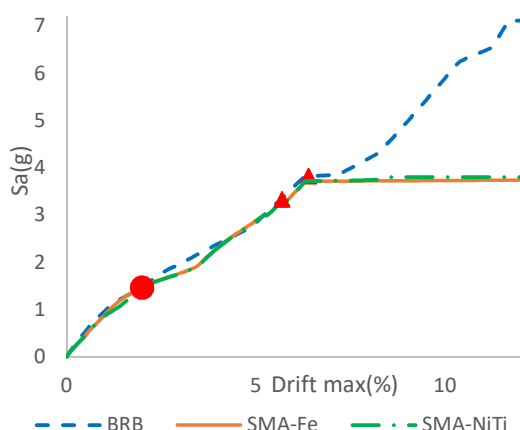


Fig. 18. Comparison of 84% percentile IDA curves for all three different braces

### ۷ - نتیجه

آلیاژهای حافظه‌دارشکلی به عنوان موادی هوشمند دارای دو ویژگی منحصر بفرد ابرکشسان و حافظه‌شکلی هستند. خاصیت حافظه‌شکلی باعث اتلاف انرژی زیاد در هنگام زلزله؛ و ویژگی ابرکشسان موجب بازگشت سازه به حالت اولیه و حذف کرنش‌های پسماند می‌شود. از میان انواع آلیاژهای حافظه‌دارشکلی، آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن و نایتینول که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم می‌باشد، در این پژوهش به عنوان مهاربند در نظر گرفته شده‌اند. مهاربندهای کمانش‌تاب به دلیل عدم کمانش، رفتار پایداری را در کشش و فشار دارند که این امر مانع از بروز کمانش‌های ترد و شکننده شده، و سازه رفتار پایدارتری از خود نشان می‌دهد. هدف از انجام این پژوهش بررسی رفتار لرزه‌ای سازه مهاربندی فلزی متداول مجهز به آلیاژهای حافظه‌دارشکلی می‌باشد. در این مقاله یک سازه هفت طبقه مجهز به مهاربندهای هفتی و هشتی، در نرم‌افزار ساینزموستراکت مدل‌سازی شد و با اعمال ۱۴ شتابنگاشت تحلیل دینامیکی فزاینده روی این سازه انجام گرفته‌شد و نتایج تحلیل IDA برای زلزله‌ها مشخص شد که نتایج حاصل شده برای قاب مورد مطالعه در این مقاله ارائه شده‌است. بعد از انجام تحلیل مشخص شد سازه با مهاربندی کمانش‌تاب از دو سازه با مهاربندی آلیاژ حافظه‌دارشکلی دیرتر به ناپایداری می‌رسد و درحداکثر تقاضای تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای ۱۰٪ به ناپایداری دینامیکی می‌رسد در صورتی

می‌دهند و این سازه‌ها جابه‌جایی مانده بسیار کمی را برخلاف سازه کمانش‌تاب به جای می‌گذارند و برای همین برتری مهمی دارند.

مطابق شکل (۱۷) مشاهده می‌شود که دو سازه آلیاژ حافظه‌شکلی شبیه به هم عمل می‌کنند و تقریباً هر دو در نمودار برای صدک ۱۶٪ در جابه‌جایی نسبی ۴٪ به ناپایداری می‌رسند در حالی که در سازه BRB زودتر و در نقطه ۳٪/۲ شیب نمودار به ۲۰ درصد ناحیه ارتجاعی رسیده‌است که همین نقطه برای آستانه فروریزش انتخاب شده‌است. همچنین در شکل (۱۸) مشاهده می‌شود که آستانه فروریزش برای دو سازه حافظه‌دارشکلی در ۵٪/۸ و برای سازه BRB در نقطه ۶٪/۴ رخ داده‌است. همچنین لازم به ذکر است که در صدک‌های ۱۶ و ۸۴ درصد هر سه سازه تقریباً مشابه به هم عمل کرده‌اند و نمودار IDA هر ۳ سازه نزدیک به یکدیگر است که نشان می‌دهد در شتاب‌های یکسان هر ۳ سازه تقریباً به یک میزان جابه‌جایی نسبی تجربه کرده‌اند.

شکل ۱۷. مقایسه منحنی IDA سطح صدک ۱۶٪ برای هر سه مهاربندی مختلف

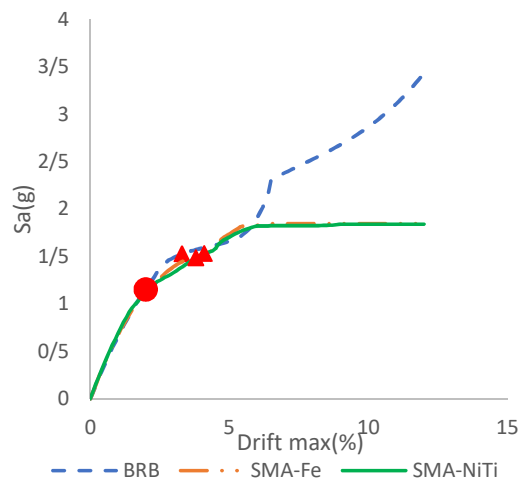


Fig. 17. Comparison of 16% percentile IDA curves for all three different braces

- dual system*. Engineering Structures, 2006. **28**(11): p. 1525-1532.
- [5] Merritt, S., C.-M. Uang, and G. Benzoni, *Subassembly testing of corebrace buckling-restrained braces*. La Jolla, California: University of California, San Diego, 2003.
- [6] Kim, J. and Y. Seo, *Seismic design of low-rise steel frames with buckling-restrained braces*. Engineering structures, 2004. **26**(5): p. 543-551.
- [7] Sato, A. Chishima, E. Soma, K. Mori, T., *Shape memory effect in  $\gamma$   $\epsilon$  transformation in Fe-30Mn-1Si alloy single crystals*. Acta Metallurgica, 1982. **30**(6): p. 1177-1183.
- [8] Cladera, A. Weber, B. Leinbach, C. Czaderski, C. Shahverdi, M. Motavalli, M., *Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview*. Construction and building materials, 2014. **63**: p. 281-293.
- [9] 9. Tanaka, Y. Kainuma, R. Omori, T. Ishida, K. „, *Alloy design for Fe-Ni-Co-Al-based superelastic alloys*. Materials Today: Proceedings, 2015. **2**: p. S485-S492.
- [10] 10. Omori, T. Ando, K. Okano, M. Xu, X. Tanaka, Y. Ohnuma, I. Kainuma, R. Ishida, K., *Superelastic effect in polycrystalline ferrous alloys*. Science, 2011. **333**(6038): p. 68-71.
- [11] 11. Chowdhury, M.A. Rahmzadeh, A. Moradi, S. Shahria, M., *Feasibility of using reduced length superelastic shape memory alloy strands in post-tensioned steel beam-column connections*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019. **30**(2): p. 283-307.
- [12] 12. Graesser, E. and F. Cozzarelli, *Shape-memory alloys as new materials for aseismic isolation*. Journal of engineering mechanics, 1991. **117**(11): p. 2590-2608.
- [13] 13. Dolce, M. and D. Cardone, *Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 1. Martensite and austenite NiTi bars subjected to torsion*. International Journal of Mechanical Sciences, 2001. **43**(11): p. 2631-2656.
- [14] 14. Khan, M.M. and D.C. Lagoudas, *Modeling of shape memory alloy pseudoelastic spring elements using Preisach model for passive vibration isolation*. in *Smart Structures and Materials 2002: Modeling, Signal Processing, and Control*. 2002. SPIE.
- [15] 15. Motahari, S., M. Ghassemieh, and S. Abolmaali, *Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations*. Journal of
- که شیب سازه‌های مهاربندی شده با آلیاژ حافظه‌دار در نقطه حدود ۷٪ به ناپایداری می‌رسد. همچنین با بررسی منحنی‌های دینامیکی فزاینده برای ۳ قاب مورد مطالعه مشاهده شد که طول ناحیه رفتار خطی در سازه‌های آلیاژ حافظه‌دارشکلی بیشتر از سازه کمانش‌تاب است و این سازه‌ها دیرتر وارد ناحیه غیرارتجاعی می‌شوند. سازه‌های مهاربندی شده با آلیاژ حافظه‌دارشکلی تا حدود ۳٪ در ناحیه خطی باقی مانده‌اند در صورتی که سازه کمانش‌تاب زودتر وارد ناحیه غیرخطی شد. همچنین مشاهده شد که سختی الاستیک (شیب ناحیه رفتار خطی) در هر ۳ قاب مهاربندی شده با یکدیگر برابر است که مطابق انتظار بوده‌است زیرا مهاربند‌های سازه‌های آلیاژ حافظه‌دارشکلی به نحوی طراحی شده بودند که سختی و زمان تناوب یکسانی با سازه کمانش‌تاب داشته باشند. با توجه به منحنی‌ها به نظر می‌رسد که سازه‌های مهاربندی شده با آلیاژهای حافظه‌دارشکلی عملکرد مطلوبی داشته‌اند و تا زمانی که این سازه‌ها به ناپایداری برسند یعنی کمی قبل از جابه‌جایی نسبی ۷٪، تفاوت زیادی با سازه کمانش‌تاب نداشته‌اند در صورتی که همان‌گونه که در نمودار نیروی محوری-جابه‌جایی سازه‌ها مشخص شد این سازه‌ها جابه‌جایی مانده بسیار کمی را برخلاف سازه کمانش‌تاب به جای می‌گذارند و به این منظور برتری مهمی دارند. در کل با توجه به قیمت کمتر SMA-Fe نسبت به نایتینول و همچنین نتایج خوب این آلیاژها، می‌توان از آن‌ها در مهندسی عمران استفاده مطلوبی نمود.

## منابع

- [1] Kimura, K. Yoshioka, K. Takeda, T. Fukuya, Z. Takemoto, K., *Tests on braces encased by mortar in-filled steel tubes*. in *Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan*. 1976.
- [2] Clark, P.W. Aiken, I. Kasai, K. Kimura, I., *Large-scale testing of steel unbonded braces for energy dissipation*, in *Advanced technology in structural engineering*. 2000. p. 1-5.
- [3] Sabelli, R., *Research on improving the design and analysis of earthquake-resistant steel-braced frames*. 2001: EERI Oakland, CA, USA.
- [4] Kiggins, S. and C.-M. Uang, *Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a*

- Infrastructures Journal, 2014. **47**(2): p. 153-171.
- [27] 27.Aryan, H. and M. Ghassemieh, *Seismic enhancement of multi-span continuous bridges subjected to three-directional excitations*. Smart Materials and Structures, 2015:(4)24 .p. 045030.
- [28] 28.Gholampour, A., M. Ghassemieh, and J. Kiani, *State of the art in nonlinear dynamic analysis of smart structures with SMA members*. International Journal of Engineering Science, 2014. **75**: p. 108-117.
- [29] 29.Ghassemieh, M., M. Rezapour, and V. Sadeghi, *Effectiveness of the shape memory alloy reinforcement in concrete coupled shear walls*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017. **28**(5): p. 640-652.
- [30] 30.Aryan, H. and M. Ghassemieh, *A superelastic protective technique for mitigating the effects of vertical and horizontal seismic excitations on highway bridges*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017. **28**(12): p. 1533-1552.
- [31] 31.Farmani, M.A. and M. Ghassemieh, *Shape memory alloy-based moment connections with superior self-centering properties*. Smart Materials and Structures, 2016. **25**(7): p. 075028.
- [32] 32.Farmani, M.A. and M. Ghassemieh, *Steel beam-to-column connections equipped with SMA tendons and energy dissipating devices including shear tabs or web hourglass pins*. Journal of Constructional Steel Research, 2017. **135**: p. 30-48.
- [33] 33.Kari, A., M. Ghassemieh, and B. Badarloo, *Development and design of a new self-centering energy-dissipative brace for steel structures*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019. **30**(6): p. 924-938.
- [34] 34.Abouali, S. Shahverdi, M. Ghassemieh, M. Motavalli, M., *Nonlinear simulation of reinforced concrete beams retrofitted by near-surface mounted iron-based shape memory alloys*. Engineering Structures, 2019. **187**: p. 133-148.
- [35] 35.Aryan, H. and M. Ghassemieh, *Numerical assessment of vertical ground motion effects on highway bridges*. Canadian Journal of Civil Engineering, 2020. **47**(7): p. 790-800.
- [36] 36.Abbass, A., R. Attarnejad, and M. Ghassemieh, *Seismic assessment of rc bridge columns retrofitted with near-surface mounted Constructional Steel Research*, 2007. **63**(12): p. 1570-1579.
- [16] 16.Motahari, S.A. and M. Ghassemieh, *Multilinear one-dimensional shape memory material model for use in structural engineering applications*. Engineering Structures, 2007. **29**(6): p. 904-913.
- [17] 17.Kari, A., M. Ghassemieh, and S. Abolmaali, *A new dual bracing system for improving the seismic behavior of steel structures*. Smart Materials and Structures, 2011. **20**(12): p. 125020.
- [18] 18.Ghodratian, S.M., M. Ghassemieh, and M. Khanmohammadi, *Uniform distribution of ductility demand in irregular bridges using shape memory alloy*. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 2011. **5**(11): p. 606-612.
- [19] 19.Ghassemieh, M. Bahaari, M. Ghodrati, S. Nojoomi, A., *Improvement of concrete shear wall structures by smart materials*. Open Journal of Civil Engineering, 2012. **2**(3): p. 87.
- [20] 20.Ghassemieh, M., M. Mostafazadeh, and M.S. Sadeh, *Seismic control of concrete shear wall using shape memory alloys*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012. **23**(5): p. 535-543.
- [21] 21.Ghassemieh, M. and A. Kari, *Application of shape memory alloys in seismic control of steel structures*. Advances in Materials Science and Applications, 2013. **2**(2): p. 66-72.
- [22] 22.Mortazavi, S., M. Ghassemieh, and S. Motahari, *Seismic control of steel structures with shape memory alloys*. International Journal of Automation and Control Engineering, 2013. **2**(1): p. 28-34.
- [23] 23.Ghassemieh, M. and R. Kargarmoakhar, *Response modification factor of steel frames utilizing shape memory alloys*. Journal of intelligent material systems and structures, 2013. **24**(10): p. 1213-1225.
- [24] 24.Ghassemieh, M. Ghodrati, SM. Bahari, MR. Nojoomi, SA., *Seismic enhancement of coupled shear walls using shape memory alloys*. Journal of Civil Engineering and Science, 2013. **2**(2): p. 93-101.
- [25] 25.Alvandi, S. and M. Ghassemieh. *Seismic evaluation of base isolated system equipped with Shape memory alloys*. in *Advanced Materials Research*. 2014. Trans Tech Publ.
- [26] 26.Alvandi, S. and M. Ghassemieh, *Application of shape memory alloys in seismic isolation: A review*. Civil Engineering

- shape memory alloy technique*. *Materials*, 2020. **13**(7): p. 1701.
- [37] 37. Dolatabadi, N. Shahverdi, M., Ghassemieh, M. Motavalli, M., *RC structures strengthened by an iron-based shape memory alloy embedded in a shotcrete layer—Nonlinear finite element modeling*. *Materials*, 2021 : (23)13 .20p.5504
- [38] 38. Rezapour, M. Ghassemieh, M. Motavalli. Shahverdi, M., *Numerical Modeling of Unreinforced Masonry Walls Strengthened with Fe-Based Shape Memory Alloy Strips*. *Materials*, 2021. **14**(11): p. 2961.
- [39] 39. Mahin, S. Uriz, P. Aiken, I. Field, C. Ko, E., *Seismic performance of buckling restrained braced frame systems*. in *13th World Conference on Earthquake Engineering*. 2004.
- [40] 40. Seismosoft, *SeismoStruct*. Seismosoft. p. SeismoStruct: A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures.
- [41] 41. Ghowsi, A.F. and D.R. Sahoo, *Seismic performance of buckling-restrained braced frames with varying beam-column connections*. *International journal of steel structures*, 2013. **13**(4): p. 607-621.
- [42] 42. Vamvatsikos, D. and C.A. Cornell, *Incremental dynamic analysis*. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2002. **31**(3): p. 491-514.

# Seismic Behavior of Innovative Braces Using Incremental Dynamic Analysis

Ramin Mardi, Mehdi Ghassemieh

School of Civil Engineering, University of Tehran

## Abstract

BRBs are a new type of seismic resistance system that is being used extensively nowadays due to their enhanced seismic performance than conventional braces. In BRB braces, because the buckling of the steel core is prevented, the structure shows more stable behavior. In this type of bracing, the hysteresis performance of the bracing is similar to the hysteresis performance of the core material. Another feature of these braces is that the ductility of the steel material occurs over a considerable length of the brace. Although BRB braces are capable of dissipating large amounts of energy, they are unable to eliminate their residual strains. In other words, they do not have the property of self-centering. This leads to the non-return of the structure and to its original configuration after the seismic excitations; in the absence of a return mechanism. There may arise many permanent deformations in the structure during an earthquake. To overcome these permanent deformations, various innovative solutions have been developed in the construction of steel frames, including the use of shape memory alloys (SMA) that have two prominent features of shape memory and superelastic behavior and can return to their original position after subjected to the various loadings condition. In recent years, beside the Nitinol shape memory alloy (NiTi), Iron-based shape memory alloys (SMA-Fe), which have many advantages over previous SMAs and particularly due to their lower cost, have been introduced and being used in many construction projects.

In this research, the seismic behavior of structures braced with BRB, and iron-based shape memory alloy and Nitinol shape memory alloys has been investigated. Seismostruct finite element software has been used to model these systems. Incremental dynamic analysis (IDA) has been performed on seven story structures equipped with X braces with different materials.

The results of this study show that braced structures with iron-base shape memory alloys undergo less maximum displacement and permanent displacement compared to nitinol-braced structures. However, these structures experience more maximum displacement than BRB braced structure. The more the structures enter the nonlinear stage (in the maximum values of the relative inter-floor displacement demand) the more the dispersion of the results increases and the structure is more affected by the input accelerometers. The structure with buckling bracing will reach instability later than the two structures with shape memory alloy bracing.

It is also observed that the elastic stiffness (slope of the linear behavior region) in all 3 braced frames is equal to each other. And finally, the IDA curve of the BRB structure is higher than the two shape memory alloy structures, and at equal acceleration, it is clear that the displacement of the shape memory alloy structures is more than the buckling structure, and it can also be seen that the iron-based shape memory alloy brace has a favorable performance and its curve is slightly higher than the NiTi shape memory alloy. Also, two shape memory alloy structures move almost together and reach instability at one point. According to the curves, it seems that the braced structures with shape memory alloys have performed well and until these structures reach instability.

**Keywords:** Iron-Based shape memory alloy, buckling restrained brace, Nitinol, Seismostruct, Incremental dynamic analysis, Superelasticity, Residual deformation