مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس :وره بیست و سوم، شماره۲، سال۱۴۰۲



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

رامین مردی'،مهدی قاسمیه'

۱-دانشآموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران ۲-استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

m.ghassemieh.ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳

#### چکیدہ

مهاربندهای کمانش تاب (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 مهاربندیشده همگرا به کار می روند. در مهاربندهای BRB به دلیل اینکه از کمانش هسته فولادی جلوگیری می شود، سازه رفتار بسیار پایدارتری از خود نشان می دهد. 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 می باشند، قادر به حذف کرنش های پسماند خود نیستند. به عبارتدیگر، 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 ايجاد ميشود. براي برتري بر اين نواقص، راهحلهاي نوآورانه مختلفي در ساخت مهاربندهاي فولادي به كار گرفته شدهاست؛ كه از جمله اين راهحل.ها استفاده از آلیاژهای حافظهدارشکلی (SMA) که دارای دو ویژگی بارز حافظهدار بودن و رفتار ابرکشسان هستند و میتوانند پس از باربرداری در کرنش.های بزرگ به وضعیت اولیه خود بازگردند؛ است. در سال.های اخیر از آلیاژهای حافظهدارشکلی بر پایه آهن که مزیت.های زیادی نسبت به آلیاژهای پیش از خود دارند و همچنین هزینه تولید آنها کمتر است، در زمینه ساختوساز استفاده میشود. در این پژوهش به مقایسه رفتار لرزهای سازههای دارای مهاربندهای کمانش تاب و سازههای فولادی دارای مهاربندهای آلیاژ حافظهدارشکلی بر پایه آهن و بر پایه نیکل پرداخته شدهاست. برای مدل کردن این سیستمها از نرمافزار سایزمواستراکت 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 کمانش تاب جابهجاییهای بیشتری را تجربه میکنند؛ در صورتی که هیچگونه جابهجایی ماندگاری برجای نمی گذارند.

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

#### ۱- مقدمه

کشور ایران روی کمربند لرزهای قرار دارد؛ از طرفی تقریباً در صفحات زمینشناسی بیشتر استانهای کشور گسلهای فعالی وجود دارند. از طرف دیگر جابهجایی جانبی ناشی از نیروهای زلزله در ساختمانهای فولادی همواره موجب نگرانیهای شدیدی برای مهندسان و پژوهشگران بودهاست که به این منظور در سازههای فولادی از انواع سیستمهای مختلف مهار جانبی از جمله مهاربند استفاده ميكنند. انواع مختلف مهاربندها به منظور کاهش اثر نیروهای جانبی لرزهای و کاهش جابهجایی سازهها به طور موفقیت آمیزی عمل کردهاند. با این وجود وقتی مهاربندهای فولادی در معرض نیروهای فشاری بزرگ قرار میگیرند، تغییر شکل های کمانشی ارائه میکنند و رفتار یسماند نامتقارن در کشش و فشار را سبب می شوند. در نتیجه این رفتار، کاهش شدیدی در مقاومت مهاربندها مشاهده می شود و در پی آن ظرفیت سازه به طور قابل توجهی کاهش یافته و خسارتهای جبرانناپذیری را تجربه میکند. برای مرتفع نمودن این مشکلات راه حل های مختلفی پیشنهاد شده است. از جمله این راه حل ها استفاده از مهاربند فولادی کمانشتاب یا مهاربند کمانشناپذیر ('BRB) و آلیاژهای حافظهدارشکلی ('SMA) است. در مهاربندهای 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، مهاربند از یک کمربند معمولی روکششده با لوله فولادی و پر شده با ملات تشکیل شده بود[1]. کلارک و همکاران به منظور طراحی و ساخت نخستین سازههای دارای مهاربندهای BRB ، تعداد زیادی تحلیلهای غیرخطی و همزمان با آن، آزمایشها در مقیاس بزرگ در آزمایشگاه انجام دادند که نتایج این آزمایش ها برای طراحی سازه دارای مهاربندهای BRB مورد استفاده قرار گرفت[2]. همچنین سابلی و همکاران مطالعات تحلیلی وسیعی را روی پاسخ لرزهای سیستمهای مجهز به BRB ها و خاص الگوی شورون معکوس انجام دادند[3]. پس از آن، مطالعات فراوانی روی BRBها انجام شد که از آنجمله می توان

به آزمایشهای، کیم و سئو، کیگینز و اوآنگ و فهنستوک و همکاران اشاره نمود. اگرچه هنوز نیاز به انجام آزمایشهای با مقیاسهای بزرگتر در سازههای چند طبقه به منظور درک بهتر از رفتار و عملکرد این سیستمها است [4–6].

مهاربندهای BRB با وجود آن که قادر به اتلاف مقداری زیادی از انرژی هستند، قادر به حذف کرنش های پسماند خود نیستند. به عبارتدیگر، 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 میشود. بنابراین تغییرشکل های ماندگار زیادی بعد از زلزله در سازه ایجاد می شود. در سال های اخیر برای رفع این مشکل استفاده از آلیاژهای حافظهدارشکلی، معروف به SMA، به عنوان موادی هوشمند که دارای دو ویژگی بارز حافظهدار بودن و رفتار ابرکشسان هستند و میتوانند پس از باربرداری در کرنشهای بزرگ به وضعیت اولیه خود بازگردند؛ در کنترل غیرفعال سازه ها مورد بررسی پژوهشگران قرار گرفته است آلیاژهای حافظهدارشکلی که به عنوان موادی هوشمند شناخته شدهاند، نسبت به سیستمهای متداول مستهلککننده انرژی دارای مزایا و ویژگیهای منحصر به فردی میباشند. قابلیت استهلاک مناسب انرژی، عدم باقی گذاشتن کرنش پسماند، مقاومت بالا در برابر خستگی و خوردگی، عمر مفید بالا، سختشدگی نهایی در تغییر شکل های بالا و امکان ساخت مواد با ویژگی های مورد تقاضا همگی از جمله مزایا و ویژگیهای این مواد هستند که آن را به یک ماده مطلوب برای کاربرد در میراگرها تبدیل کردهاست. معروفترين و پركاربردترين آلياژ حافظهدارشكلي، نايتينول (NiTi) است که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم است، اما به دلیل اینکه در این مواد از نیکل و تیتانیوم استفاده شدهاست، هزینه استفاده از آنها زیاد است و ممکن است برای استفاده در سازه صرفه اقتصادی نداشته باشند. به همین منظور در سالهای اخیر از آلیاژهای حافظهدارشکلی بر پایه آهن که مزیتهای زیادی نسبت به آلیاژهای قبلی دارند و همچنین هزینه تولید و

2. Shape Memory Alloys

مجله علمي -پژوهشي مهندسي عمران مدرس

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

از سال ۱۹۷۰ تلاش های بسیاری برای به دست آوردن خاصیت ابرکشسان آلیاژهای مبتنی بر آهن صورت گرفتهاست. ساتو و همکاران رفتار حافظه شکلی 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، هیسترزیس گرمایی بزرگتر و قیمت کمتر در مقایسه با نایتینول، باعث برتری این آلیاژها در زمينه ساختوساز شده است. اين كاهش هزينه هم به دليل 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 جوش یذیری مناسب می باشند. کاربر د SMA-Fe به ویژه برای اعمال پیش تنیدگی در سازهها بسیار مغید 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-5A1-8Ta-0.01B و Fe-29Ni-18Co-5A1-8Ta-0.01B و حافظهدارشکلی 36Mn-8AI-8.6Ni حافظهدارشکلی 36Mn-8AI-8.6Ni-18Co-5AI-8Ta-0.01B را تولید نمودند که کرنش برگشت پذیر بیش از ۱۳٪ را در دمای اتاق و مقاومت کششی بسیار بالای ۱۲۰۰ مگاپاسکال را نشان می دهد (۱۳۰ مقاومت کششی بسیار بالای ۱۲۰۰ مگاپاسکال را نشان می دهد مگاپاسکال است که بسیار زیاد است و قبل از آنکه مهاربندها از این جنس از ناحیه کشسان خارج شوند، تیرها و اتصالات آسیب مهاربند نیست ولی توان زیادی در مستهلک کردن انرژی دارند. Fe-36Mn با خاصیت ابرکشسان بسیار بالایی در دمای اتاق را همچنین اموری و همکاران آلیاژ حافظهدارشکلی -Fe-36Nn بررسی کردند و مشخصات آن را ارائه کردند [10]. وابستگی این آلیاژ به دما بسیار کم است و با تغییر دما از ۱۶۰۰ – درجه تا دمای

۲۴۰ درجه سانتیگراد تنش در این آلیاژ تغییر محسوسی نمی کند 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  |
| $F_{P1}(MPa)$             | 442      | 535  |
| F <sub>T1</sub> (MPa)     | 210      | 335  |
| F <sub>T2</sub> (MPa)     | 122      | 170  |
| $\varepsilon_{\rm s}(\%)$ | 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 آن ها امکان استفاده از ماده نایتینول را به عنوان یک ميراگر زلزله پيشنهاد دادند [12]. دلچه و همكاران جامع ترين مطالعه روی عملکرد SMAها در سازههایی که تحت بارهای ديناميكي و زلزله قرار مي گيرند، انجام دادند [13]. خان و لاگوداس اثر ابرکشسان SMA را روی سامانههای ارتعاشی مطالعه كردند [14]. آنها مدلي براي تعيين پاسخ ابركشسان المان های فنری SMA ارائه کردند. مطهری و قاسمیه به کمک روش های 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 قاسميه با تهيه برنامه اجزا محدود غير خطي، مدلي براي سازههاي 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

رامین مردی ، مهدی قاسمیه

بررسی استفاده از آلیاژ نایتینول در کاهش آسیب وارد شده در تیرها و گوشه بازشوها در دیوار برشی بتنی با استفاده از نرمافزار آباكوس پرداختند [29]. آرين و قاسميه يک سيستم نوين متشكل از آلیاژهای حافظهدارشکلی برای بهسازی و همچنین طراحی پل،ها، برای کاهش آثار قائم و افقی پل،ها پیشنهاد دادند [30]. فرمانی و قاسمیه به ارزیابی رفتار ابرکشسان پیچهای SMA از جنس آلیاژ نایتینول و خاصیت بازگردانندگی پیچها در اتصالات ورق انتهایی گسترشیافته در نرمافزار آباکوس 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 شتاب نگاشت 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]. أرين و قاسميه يک 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]. دولت آبادی و همکاران رویکردی برای مدلسازی و تحلیل رفتار اعضای بتنی تقویت شده و پیش تنیده شده با میلگردهای SMA-Fe تعبیه شده در یک لایه شاتکریت 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>T</sup>) بررسی شوند. عملکرد آنها با یکدیگر مقایسه شده و برتری این سیستمهای پیشنهادی با مهاربندهای فولادی

اثر استفاده همزمان مهاربندهای SMA و مهاربندهای کمانش تاب را با جایگزینی مناسب در کاهش جابهجایی مانده و هچنین كاهش جابهجايي بيشينه نسبي طبقات بررسي كردند [17]. قدرتیان و همکاران رویکرد جدیدی را برای بهبود رفتار لرزه ای پلها با استفاده از آلیاژهای حافظهدارشکلی نایتینول ارائه کردهاند [18]. قاسميه و همكاران تاثير بكارگيري آلياژهاي حافظهدارشکلی را در بهبود رفتار دیوارهای برشی تحت تحريكات لرزهاي تحقيق كردند [19]. قاسميه و همكاران هر دو خاصیت شبهارتجاعی و اثر حافظهشکلی آلیاژ نایتینول برای کنترل ساختار دیوار برشی بتنی در شرایط تحریک لرزهای را بررسي كردند [20]. قاسميه و همكاران به بررسي اثربخشي آرماتورهای SMA در افزایش رفتار دیوارهای برشی، به ویژه هنگامی که در معرض تحرکات لرزهای قرار می گیرند، 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 مارتنزیت 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]. الوندي و قاسميه به بررسي عملكرد سازه مجهز به جداساز پايه 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 [26,25]. أرين و قاسميه يک سيستم ابرکشسان براي طراحي و همچنین مقاومسازی پلهای پیوسته چند دهانه ارائه و ارزیابی كردند [27]. غلامپور و قاسمیه یک روش گامبه گام جدید انتگرال زمانی برای مشکلات غیرخطی سازههای دارای اعضای حافظهدارشکلی پیشنهاد دادند [28]. قاسمیه و همکاران به

۲. Incremental Dynamic Analysis

<sup>1.</sup> ABAQUS

مجله علمي -پژوهشي مهندسي عمران مدرس

نوین 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 شدت. های متفاوت افزایشی است.

انجام IDA نیاز به انتخاب مناسب شاخص شدت حرکت زمین و شاخص خرابی دارد. بعد از انتخاب شتاب نگاشت ها برای تحلیل مدلسازی مهمترین مطلب انتخاب مناسب شاخص شدت ('IM) و شاخص خسارت ('DM) می باشد. سازه مورد مطاله 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 گام های ثابت انتخابی منطقی است.

در این تحقیق برای DM از شاخص خسارت بیبعد نسبت بیشینه تغییرمکان نسبی بین طبقهای به ارتفاع طبقه (θmax) در طول زمان تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شدهاست.

## ۳- درستیآزمایی نمونه آزمایشگاهی

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

دوره بیست وسوم شماره ۲ / سال۱۴۰۲





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 شدهاست. ارتفاع طبقه اول ۲/۳ 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 شدهاست 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 المان های BRB از المان خرپایی استفاده شده است. اتصالات ستون ها به پی گیردار و اتصالات تیرها به ستون ها صلب در نظر گرفته شده است. در گره بالایی سازه یک الگوی بارگذاری تغییر مکانی 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.

r. SeismoStruct

<sup>1.</sup> Intensity measures

<sup>2.</sup> Damage measures



شکل (۳) مقایسه نتایج نمودارهای هیسترزیس 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 شدهاست که این نتایج در نمونه مدلسازی شده به ترتیب ۱۰۰۳ شدهاست که این نتایج در نمونه مدلسازی شده به ترتیب ۱۰۰۳ شد، با استفاده از نرمافزار بهکارگرفته شده و مدلسازی دقیق، شد، با استفاده از نرمافزار بهکارگرفته شده و مدلسازی دقیق، نتایج قابل قبولی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است. درنتیجه با انجام این درستی آزمایی، سایر مطالعات و همچنین بررسی رفتار سایر سیستمهای مهاربندی با این نرمافزار انجام گرفته است.



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

### ۴- مدلسازی

در ادامه، یک سازه ۷ طبقه با مهاربندهای هفتی و هشتی به صورت توالى، پيشنهاد شده توسط قوسى و ساهو، به عنوان سازه مبنا برای مقایسه سه سیستم مهاربندی استفاده شدهاست[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 می باشد. مطابق با شکل (۵) همان طور 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 شدهاست. 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 مگایاسکال 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 شدهاست 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 ( $\sigma.A$ ) 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 کمانش تاب، کمانش ناپذیرند و در کشش و فشار نیز مانند مهاربندهای BRB عمل

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      |
| - T 1 |         |             | 1 1.      |

Table 4. Sections used in SMA-Fe modeling

| SMA-NiTi | مهاربندهاي | مشخصات | ۵. | جدول |
|----------|------------|--------|----|------|
|----------|------------|--------|----|------|

| 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-NiTi و SMA-Fe

طبق جدول (۱) استفاده شدهاست.



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

شکل ۶. سازه قاب مهاربندی ۷ طبقه



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     |

ولمین مردی، مهدی قاسمیه 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].





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

#### ۵- تحلیلهای IDA

با انجام تحلیل های IDA منحنی های 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 کمانش تاب و آلیاژ حافظهدار شکلی بر پایه آهن در اثر اعمال زلزله نور تریج با آلیاژ حافظهدار شکلی بر پایه آهن در اثر اعمال زلزله نور تریج با PGA=0.6g برای نمونه در شکلهای (۸ و ۹) ارائه شدهاست. در شکل (۱۰) نمودارهای تحلیل دینامیکی فزاینده برای سازه با مهاربندی کمانش تاب در مقایسه با یکدیگر به صورت ساده شده نشان داده شدهاست. در هر یک از منحنی ها IDA مقادیر عددی خسارت در هر تراز شدت محاسبه می شود. با کنار هم قرار دادن مقادیر خسارت تمام زلزلهها، در هر سطح شدت به تعداد منحنی های IDA خسارت وجود دارد. برای بررسی رفتار لرزهای سه سیستم مهاربندی جانبی ذکر شده از تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده شده است. در این تحلیل ۱۴ شتابنگاشت نزدیک گسل زلزلههای مختلف با بزرگای بین ۵٫۹ تا ۲٫۶ با توجه به خاک محل سازه، سرعت موج برشی و عمق وقوع زلزله انتخاب شده اند. مشخصات این شتاب نگاشت ها در جدول (۶) ارائه شده است و تمام این شتاب نگاشت ها با توجه به طیف طرح سازه برای زلزله MCE همپایه شده اند. در انتها نیز نمو دار شتاب طیفی میانگین برای شتاب نگاشت های همپایه شده ندر شکل (۷) ارائه شده است. سازه در ناحیه ای فرضی در ایالت کالیفرنیا و شهر لس آنجلس واقع شده است و خاک منطقه از نوع خاک نوع C است. زمان تناوب مود اول این سازه ۶٫۹۰ ثانیه به سازه از سازه با محل محل مان می از آن نشته در شکار (۷) ارائه شده است مو اول این سازه ۶٫۹۰ ثانیه به محاک نوع C است. زمان تناوب مود اول این سازه ۶٫۹۰ ثانیه به دست آمده است مشخصات طیف طرح سازه با توجه به محل سازه از سایت سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) استخراج شده است.

| استفاده در تحلیل | مورد | شتابنگاشتهای | - مشخصات | ل ۶ | جدو |
|------------------|------|--------------|----------|-----|-----|
| <u> </u>         | ~~   | -            |          |     |     |

| Earthquake<br>name     | Station           | М   | PGA(g) |
|------------------------|-------------------|-----|--------|
| Northridge1994         | Beverly Hills     | 6.7 | 0.443  |
| Northridge1994         | Beverly Hills     | 6.7 | 0.488  |
| Northridge1994         | Canyon<br>Country | 6.7 | 0.404  |
| Northridge1994         | Canyon<br>Country | 6.7 | 0.472  |
| Duzce,<br>Turkey1999   | Bolu              | 7.1 | 0.739  |
| Duzce,<br>Turkey1999   | Bolu              | 7.1 | 0.806  |
| Imperial<br>Valley1979 | Delta             | 6.5 | 0.236  |
| Imperial<br>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,<br>Taiwan1999 | CHY101            | 7.6 | 0.34   |
| Chi-Chi,<br>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

مجله علمي -پژوهشي مهندسي عمران مدرس



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

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



Fig. 9. Axial force- displacement diagram of SMA-Fe structure منحنی IDA برای ۱۴ شتابنگاشت مختلف اعمال شده به سازه

مهاربند كمانش تاب



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

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 سیس 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 می رسد مناسب و کاربردی است، اگر یک منحنی در تراز پایین تر از سطح شدت حرکت زمین در سایر منحنی ها به سمت بینهایت میل کند از آن تراز به بعد منحنی میانگین نیز بینهایت خواهد شد برای برطرف کردن این نقص استفاده از میانه اعداد موثر تر و کاربر دی تر خواهد بود. مطابق شکل(۱۱) با در نظر گرفتن مقادیر خسارتهای تعیین شده در هر تراز شدت به جای محاسبه میانگین حسابی، از میانه ساده ۵۰ درصد، ۱۶درصد و ۸۴ درصد بازه اعداد استفاده می شود. این میانه ها با توجه به تحقیقات کرنل و همکاران که از بنيان گذاران اين روش هستند انتخاب شدهاند[42]. كه همچنين توصيه شده است نمودار تا جايي ادامه يابد كه سازهها به ناپایداری برسند که در این تحقیق تا کرنش ۱۲ درصد به عنوان نقطه انتهای تحلیل انتخاب شده است. در شکل (۱۲) نمودارهای تحليل ديناميكي فزاينده براي سازه با مهاربندي آلياژ حافظهدارشکلی بر یایه آهن در مقایسه با یکدیگر به صورت سادهسازی شده در یک نمو دار نشان داده شدهاست.

**شکل ۱۱.** منحنی های IDA خلاصه شده ۱۴ شتابنگاشت برای ۵۰٪ و صدک های ۱۶٪ و ۸۴٪ مهاریند کمانش تاب



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

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

رامین مردی، مهدی قاسمیه



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

شکل ۱۵. منحنی های IDA خلاصه شده ۱۴ شتابنگاشت برای ۵۰٪ و صدک های 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

۶- تفسیر نتایج
۱۱ رسم منحنیهای دینامیکی فزاینده برای قابهای مطالعه شده
۱۱ رسم منحنیهای دینامیکی فزاینده برای قابهای مطالعه شده
۱۱ رسم منحنیهای دینامیکی فزاینده برای قابهای مطالعه شده
۱۱ رسم منحنیهای دینامیکی فزاینده برای قابهای مطالعه شده



شکل ۱۲. منحنی IDA برای ۱۴ شتابنگاشت مختلف اعمال شده به سازه

مهاربند آلیاژ حافظهدارشکلی برپایه 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 ۱۴شتابنگاشت 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 سادهسازیشده در یک نمودار نشان داده شدهاست.

شکل ۱۳. منحنی های IDA خلاصه شده ۱۴ شتابنگاشت برای ۵۰٪ و صدک



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



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

همچنین مشاهده شدهاست 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 حافظهدار شکلی به شکلی طراحی شده اند که سختی و زمان تناوب یکسانی با سازه کمانش تاب داشته باشند. در نهایت همان طور که در شکلها به صورت واضح مشخص است نمودار سازه BRB بالاتر از دو سازه آلیاژ حافظهدار شکلی است و در شتاب مساوی مشخص است که جابه جایی سازه های آلیاژ حافظهدار شکلی بیشتر از سازه است که جابه جایی سازه های آلیاژ حافظهدار شکلی بیشتر از سازه کمانش تاب است و همچنین مشاهده شده است مهاربند آلیاژ حافظهدار شکلی بر پایه آهن عملکرد مطلوبی داشته و نمودار آن کمی بالای آلیاژ حافظهدار شکلی بر پایه نیکل است و در شتاب های حافظهدار شکلی می بایه زمان می کند. همچنین دو سازه آلیاژ خافظهدار شکلی تقریبا باهم حرکت می کنند و در یک نقطه به ناپایداری می رسند.

با توجه به نمودارها به نظر میرسد که سازههای مهاربندی شده با آلیاژهای حافظهدار شکلی عملکرد مطلوبی داشتهاند و تا زمانی که این سازه ها به ناپایداری برسند یعنی کمی قبل از جابه جایی نسبی ۷ درصد تفاوت زیادی با سازه کمانش تاب نداشتهاند، در صورتی که همان طور که در بخش های قبل ذکر شد اگر فقط معیار جابه جایی مجاز طبقات برای طراحی AMSها در نظر گرفته شود. مسلما به دلیل طول کمتر AMSها در نقطهای بیشتر از ۷ درصد به ناپایداری دینامیکی میرسند و عملکرد حتی مطلوب تری از خود نشان هرچه سازهها بیشتر وارد مرحله غیرخطی می شوند(در مقادیر حداکثر تقاضای تغییرمکان نسبی بین طبقهای بالا)، مقدار پراکندگی نتایج بیشتر شده و سازه بیشتر تحت تأثیر شتابنگاشتهای ورودی قرار می گیرد.

سازه با مهاربندی کمانش تاب از دو سازه با مهاربندی آلیاژ حافظهدار شکلی دیرتر به ناپایداری می رسد و در حداکثر تقاضای تغییر مکان نسبی بین طبقهای ۱۰٪ به ناپایداری دینامیکی می رسد. این در صورتی است که شیب سازه های مهاربندی شده با آلیاژهای حافظهدار شکلی در نقطه حدود ۷٪ به ۲۰٪ شیب ناحیه ار تجاعی می رسد و در این نقطه سازه ناپایدار می شود که این نقاط در شکل (۱۶) با علامت مثلث نشان داده شده اند.

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 کمانش تاب است و این سازهها دیرتر وارد ناحیه غیرار تجاعی می شوند که همان طور که در شکل زیر مشاهده می شود سازههای مهاربندی شده با آلیاژ حافظهدار شکلی تا مشاهده می شود سازههای مهاربندی شده با آلیاژ حافظهدار شکلی تا حدود ۳٪ در ناحیه خطی باقی ماندهاند؛ در صورتی که سازه می توان نتیجه گرفت مقدار پیشنهادی 20.2m برای سطح می توان نتیجه گرفت مقدار پیشنهادی 20.0m برای سطح مالکردی سکونت فوری در سازههای مهاربندی شده با آلیاژ می توان در نظر گرفت. می توان در نظر گرفت.





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

### ۷ - نتيجه

آلیاژهای حافظهدارشکلی به عنوان موادی هوشمند دارای دو ویژگی منحصر بفرد ابرکشسان و حافظه شکلی هستند. خاصیت حافظه شکلی باعث اتلاف انرژی زیاد در هنگام زلزله؛ و ویژگی ابرکشسان موجب بازگشت سازه به حالت اولیه و حذف کرنش های پسماند میشود. از میان انواع آلیاژهای حافظهدارشکلی، آلیاژ حافظهدارشکلی بر یایه آهن و نایتینول که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم میباشد، در این پژوهش به عنوان مهاربند در نظر گرفتهشدهاند. مهاربندهای کمانش تاب 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 نشانمیدهد. هدف از انجام این پژوهش بررسی رفتار لرزهای سازه مهاربندی فلزی متداول مجهز به آلیاژهای حافظهدارشکلی می باشد. در این مقاله یک سازه هفت طبقه مجهز به مهاربندهای هفتی و هشتی، در نرمافزار سایزمواستراکت مدلسازی شد و با اعمال ۱۴ شتابنگاشت تحلیل دینامیکی فزاینده روی این سازه انجام گرفته شد و نتایج تحلیل IDA برای زلزله ها مشخص شد که نتایج حاصل شده برای قاب مورد مطالعه در این مقاله ارائه شدهاست. بعد از انجام تحلیل مشخص شد سازه با مهاربندی کمانش تاب 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 سازه ها جابه جایی مانده بسیار کمی را برخلاف سازه کمانش تاب به جای می گذارند و برای همین برتری مهمی دارند. مطابق شکل (۱۷) مشاهده می شود که دو سازه آلیاژ حافظه

شکلی شبیه به هم عمل میکنند و تقریبا هر دو در نمودار برای صدک ۱۶٪ در جابه جایی نسبی ۴٪ به ناپایداری میرسند در حالی که در سازه BRB زودتر و در نقطه ۲/۲٪ شیب نمودار به ۲۰درصد ناحیه ارتجاعی رسیده است که همین نقطه برای آستانه فروریزش انتخاب شده است. همچنین در شکل (۱۸) مشاهده می شود که آستانه فروریزش برای دو سازه حافظه دارشکلی در ۸/۰٪۵ و برای سازه BRB در نقطه ۶/۶٪ رخ داده است. همچنین لازم به ذکر است که در صدکهای ۱۶ و ۸۴ درصد هر سه سازه تقریبا مشابه به هم عمل کرده اند و نمودار DAI هر ۳ سازه نزدیک به یکدیگر است که نشان می دهد در شتاب های یکسان هر ۳ سازه تقریبا به یک میزان جابه جایی نسبی تجربه کرده اند.

#### **شکل ۱**۷. 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, Subassemblage testing of corebrace bucklingrestrained 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 γ ε 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. Motavallli, 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, Shapememory 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 شبب سازههای مهاریندی شده با آلباژ 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 خطبی در سازههای آلیاژ حافظهدارشکلی بیشتر از سازه كمانش تاب است و اين سازهها ديرتر وارد ناحيه غيرارتجاعي مي شوند. سازەھاي مھاربندي شدہ با آلياژ 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 زيرا مهاريندهاي سازههاي آلباژ حافظهدارشکلی به نحوی طراحی شده بودند که سختی و زمان تناوب يكساني با سازه كمانش تاب داشتهباشند. با توجه به منحني ها به نظر می رسد که سازههای مهاربندی شده با آلیاژهای حافظهدارشکلی عملکرد مطلوبی داشتهاند و تا زمانی که این سازهها به نایایداری برسند یعنی کمی قبل از جابهجایی نسبی ۷٪، تفاوت زیادی با سازه کمانش تاب نداشتهاند در صورتی که همان گونه که در نمودار نیروی محوری-جابه جایی سازهها مشخص شد این سازهها جابهجایی مانده بسیار کمی را برخلاف سازه کمانش تاب به جای می گذارند و به این منظور برتری مهمی دارند. در کل با توجه به قیمت کمتر SMA-Feها نسبت به نایتینول و همچنین نتایج خوب این آلیاژها، می توان از آنها در مهندسی عمران استفاده مطلوبي 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 steelbraced 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.

رامین مردی، مهدی قاسمیه

- [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 selfcentering 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 nearsurface 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. Ghodratian, S. Nojoumi, 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. Ghodratian, 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 Earthqauke 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