

رفتار لرزه‌ای مهاربندهای نوین مجهز به آلیاژ حافظه‌دارشکلی با پایه آهن

رامین مردی^۱، مهدی قاسمیه^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۱۱۵۵-۴۵۶۳۱۲، m.ghassemieh@ut.ac.ir

چکیده

مهاربندهای جدید ساخته‌شده از فولاد کمانش‌تاب، قادر به اتلاف انرژی زیادی در هنگام زلزله بوده و به همین دلیل در کنترل غیرفعال سازه‌ها به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما این مهاربندها همانند مهاربندهای متداول با مشکلاتی مواجه هستند که پس از باربرداری به شکل اولیه خود باز نمی‌گردند و سازه جابجایی‌های ماندگار زیادی را تجربه می‌کند که سبب می‌شود تعمیر سازه از لحاظ فنی غیرممکن و یا غیراقتصادی شود. در دهه‌های اخیر برای رفع این مشکل محققان از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی به عنوان موادی هوشمند که دارای ویژگی‌های بارزی از جمله حافظه‌دار بودن و رفتار ابرکشسان هستند، استفاده کرده‌اند. در سال‌های اخیر آلیاژهای حافظه‌دار با پایه آهن به دلیل قابلیت استهلاک انرژی زیاد، توانایی تحمل کرنش‌های بسیار زیاد، قابلیت برگرداندگی و عدم بر جای گذاشتن تغییر شکل‌های ماندگار در زمان باربرداری و هزینه بسیار کمتر آن نسبت به دیگر آلیاژهای حافظه‌دارشکلی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه مهاربندی شده با مهاربندهای کمانش‌تاب، آلیاژ حافظه‌دارشکلی پایه آهن و آلیاژ حافظه‌دارشکلی نیتینول که از معروف‌ترین آلیاژهای حافظه‌دارشکلی است، پرداخته شده‌است. مدلسازی و تحلیل دینامیکی غیرخطی برای این سازه‌ها در نرم‌افزار Seismostruct انجام گرفته‌است. جابجایی‌های حداکثر، جابجایی‌های ماندگار و نیروهای محوری مهاربندهای این سازه‌ها در اثر اعمال شتاب‌نگاشت‌های مختلف زلزله‌های بزرگ سال‌های اخیر با شدت‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سازه‌های مهاربندی شده با آلیاژهای حافظه‌دارشکلی پایه آهن در مقایسه با سازه مهاربندی شده کمانش‌تاب جابجایی‌های حداکثر بیشتری را تجربه می‌کنند؛ در صورتی که هیچگونه جابجایی ماندگاری برجای نمی‌گذارند. همچنین این سازه‌ها در مقایسه با سازه‌های مهاربندی شده با نیتینول جابجایی‌های حداکثر و جابجایی ماندگار کمتری را متحمل می‌شوند و عملکرد مطلوب‌تری را نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی

مهاربند کمانش‌تاب، آلیاژ حافظه‌دارشکلی پایه آهن، آلیاژ حافظه‌دارشکلی نیتینول، ابرکشسان، تغییر شکل ماندگار

The seismic behavior of conventional bracing system equipped with Iron based shape memory alloy

R. Mardi, M. Ghassemieh

Abstract

Buckling restrained braces have been shown to exhibit favorable energy dissipating characteristics in steel structures during an earthquake and are therefore widely used in passive control of structures. However, they face the problem that they do not return to their original shape upon unloading, and consequently, the structure experiences large permanent deformations after the earthquake which usually makes the structure impossible or uneconomical to repair. In recent years, to solve this problem, researchers have used Iron-based shape memory alloys which have two essential properties of superelasticity and shape memory behavior. These alloys have been considered due to their high energy dissipation capacity, their ability to withstand large strains, recentering and not leaving permanent deformations upon unloading, and their much lower cost than other shape memory alloys. In this research, the seismic behavior of three-story structures braced with buckling restrained braces, iron-based shape memory alloy, and nitinol shape memory alloy, which is one of the most famous shape memory alloys, is investigated. Modeling and Nonlinear dynamic analysis for these structures have been performed in Seismostruct software. Maximum displacements, residual strains, and force-displacement diagrams of these structures have been studied due to the application of different accelerometers of large earthquakes of recent years with different intensities. The results of this study show that braced structures with Iron-based shape memory alloys experience more maximum displacements than buckling restrained braces, although unlike BRBF they do not leave any permanent displacement. Also, these structures undergo fewer maximum displacements and permanent displacements compared to nitinol-braced structures, and in general, show better performance.

Keywords

Buckling restrained brace, Fe-Based shape memory alloy, Nitinol, Superelastic, Residual deformation

زلزله همواره خطر جدی برای سکونت و استقرار انسان بر روی زمین محسوب می‌شود. دانشمندان زیادی تاکنون تلاش کرده‌اند، چگونگی وقوع آن را مورد مطالعه قرار دهند تا بتوانند نحوه انتقال نیروی زلزله به سازه را درک کنند و چاره‌ای برای کاهش صدمات وارده بیندیشند. در چهار دهه گذشته، تحقیقات در مورد فن‌آوری‌های مدرن و از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه برای کاهش آسیب لرزه‌ای، به نحوی که برای مقابله با زلزله‌های شدید، سازه کشسان نماند، مانند جداسازی پایه و موارد دیگر سیستم‌های کنترل غیرفعال یک مسئله مهم در سراسر جهان به ویژه ژاپن بوده است. پس از زلزله‌های نورتریج آمریکا و کوبه ژاپن که منجر به فروپاشی‌های متعدد ساختمان‌ها، پل‌ها و ایجاد ساختاری پرهزینه به منظور تعمیرات گردید، محققین متوجه شدند که گسیختگی مهاربندها و اتصالات آن‌ها مهمترین دلایل عملکرد نامطلوب این سازه‌ها بوده است. به همین سبب سیستم‌های مدرن محافظت از زمین‌لرزه به سرعت جایگزین راه‌حل‌های ساختاری معمول گردید. در نتیجه تلاش پژوهشگران، زمینه برای دستیابی به راه‌حل‌های نوآورانه محافظت از سازه در برابر زمین‌لرزه ایجاد گردید. همچنین این راه‌حل‌ها در سایر کشورهای با لرزه‌خیزی بالا با پذیرش بالایی همراه شد. در این روش‌ها، برخی اعضای سازه‌ای خسارت‌هایی را در هنگام زلزله‌های متوسط تا شدید متقبل می‌شوند تا بدین وسیله تلاش‌های وارد بر اعضای اصلی سازه مانند ستون‌ها که باید رفتار الاستیک داشته‌باشند، کاهش یافته و از این طریق سازه از آسیب‌های عمده در امان بماند.

روش‌های غیرفعال بطور کلی به دو دسته سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی و جداگرهای پی تقسیم می‌شوند. تمام سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی که امروزه استفاده می‌شوند، مشکلاتی از قبیل عمر مفید کم، خستگی، سختی نصب، احتیاج به تعویض پس از زلزله و اعمال تغییر در هندسه سازه پس از وقوع زلزله را دارند.

قاب‌های مهاربندی‌شده کمانش‌تاب (BRB) نوعی سیستم مقاوم در برابر نیروی لرزه‌ای هستند [۱]. به دلیل کارایی آن‌ها و همچنین عملکرد لرزه‌ای بهتر از مهاربندهای مرسوم، استفاده از آن‌ها در حال گسترش است. مهاربندهای BRB معمولاً در قاب‌های مهاربندی‌شده همگرا به کار می‌روند. در مهاربندهای BRB به دلیل اینکه از کمانش هسته فولادی جلوگیری می‌شود، سازه رفتار بسیار پایدارتری نسبت به مهاربندهای فولادی متداول از خود نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که مهاربندهای

BRB نوعی مهاربند همگرا هستند که در آن‌ها از کمانش مهاربند در فشار جلوگیری شده است. در این نوع مهاربندها، عملکرد هیستریک مهاربند مشابه عملکرد هیستریک مصالح هسته است. اصلی که مهاربندهای BRB بر پایه آن عمل می‌کنند این است که در فشار، مقاومت در برابر تنش، از مقاومت در برابر کمانش خمشی، جدا می‌شود. از دیگر ویژگی‌های این مهاربندها این است که شکل‌پذیری مصالح فولادی در طول قابل توجهی از مهاربند اتفاق می‌افتد.

تعداد زیادی تحلیل‌های غیرخطی و آزمایشات با مقیاس بزرگ توسط Clark و همکارانش در سال ۲۰۰۰ انجام گرفت و منجر به ساخت نخستین ساختمان‌های دارای این سیستم در محوطه دانشگاه کالیفرنیا-دیویس شد [۲]. از سال ۲۰۰۰، علاقه و استفاده از BRB به سرعت در حال رشد است. در این زمان، Sabelli و همکارانش در سال ۲۰۰۱ جامع‌ترین مطالعه عددی را بر روی BRBها انجام دادند [۳]. پس از آن، مطالعات فراوانی بر روی BRBها انجام شد که از آن‌جمله می‌توان به آزمایشات، هوانگ و تسای، Merritt و همکارانش و لویز و همکاران در آمریکا اشاره نمود. اگرچه هنوز نیاز به انجام آزمایشات با مقیاس‌های بزرگتر در سازه‌های چند طبقه به منظور درک بهتر از رفتار و عملکرد این سیستم‌ها می‌باشد [۴].

BRBها به دلیل عدم کمانش، قادر به اتلاف انرژی به مقدار زیادی بوده و به همین دلیل در کنترل غیرفعال سازه‌ها به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما با این مشکل مواجه هستند که پس از باربرداری به شکل اولیه خود باز نمی‌گردند. این امر موجب می‌شود که پس از پایان زلزله، سازه به وضعیت اولیه خود بازنگردد و سازه جابجایی‌های مانده زیادی را تجربه کند. در سال‌های اخیر محققان برای رفع این مشکل از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی، معروف به SMA، استفاده کرده‌اند. 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 شکل‌های بالا و امکان ساخت مواد با خصوصیات مورد تقاضا همگی از جمله مزایا و ویژگی‌های این مواد است که آن را به یک ماده مطلوب برای کاربرد در میراگرها تبدیل کرده است. خصوصیت اصلی مواد SMA، رفتار ابرکشسان و حافظه‌شکلی آن‌ها می‌باشد. بدین معنی که در رفتار ابرکشسان قادر به تحمل کرنش‌های بزرگ تا حدود ۱۰ درصد و در مواردی حتی

کرنش‌های بیشتر، بدون ایجاد کرنش پسماند هستند و همچنین در رفتار حافظه‌شکلی قادر به حذف کرنش‌های پسماند به کمک اعمال دما می‌باشند. یعنی اگر SMAها با ترکیب شیمیایی مشخص تحت عملیات حرارتی مناسبی قرارگیرند، توانایی بازگشت به شکل یا اندازه از قبل تعیین‌شده را از خود نشان می‌دهند. اما این مواد، از طرف دیگر قادر به اتلاف انرژی زیادی نمی‌باشند. معروف‌ترین و پرکاربردترین آلیاژ حافظه‌دارشکلی، نیتینول (NiTi) است که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم می‌باشد که با توجه به وجود فلزات گرانبهای نیکل و تیتانیوم برای استفاده سازه‌ای گران خواهد بود و مقرون به صرفه نخواهد بود. به همین دلیل، در سال‌های اخیر محققان و مهندسان به آلیاژهای حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن، روی آورده‌اند. از سال ۱۹۷۰ تلاش‌های بسیاری برای به دست آوردن خاصیت ابرکشسان آلیاژهای مبتنی بر آهن صورت گرفته است. Sato و همکارانش در سال ۱۹۸۲، رفتار حافظه‌شکلی در آلیاژهای حافظه دار با پایه آهن (SMA-Fe) مشاهده کردند [۵]. 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 هزینه کمتر تولید آلیاژ با پایه آهن در مقایسه با نیتینول، باعث برتری این آلیاژها در زمینه ساخت‌وساز گردیده 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 می‌باشد. SMA-Feها همچنین دارای مقاومت خوردگی مناسب، قابلیت کارپذیری کافی و جوش‌پذیری مناسب می‌باشند. کاربرد SMA-Fe به ویژه برای اعمال پیش‌تندگی در سازه‌ها بسیار مفید است. همچنین با توجه به روند توسعه این آلیاژها، پیش‌بینی می‌شود که قیمت SMA-Feها در سال‌های آینده به مرور کمتر شده و بیش‌ازپیش برای استفاده در صنعت ساختمان مناسب گردند.

دو گروه مختلف از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن وجود دارد. دسته اول آلیاژهای حافظه‌دارشکلی، Fe-Mn-Si می‌باشد. این آلیاژها طی دو دهه گذشته به دلیل هزینه کم، کارایی مناسب، ویژگی‌های مکانیکی خوب و قابلیت جوشکاری بالا مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. این آلیاژها در دمای اتاق ابرکشسان نیستند، ولی هیستریزس گرمایی زیادی در تبدیل‌ها دارند. استفاده از این آلیاژ به منظور مقاوم‌سازی سازه‌های فولادی و بتنی در سال‌های اخیر گسترش یافته است. دسته دوم شامل آلیاژهایی می‌باشد که ویژگی‌های معمول ترموالاستیک

مارتنزیتی را همانند آلیاژ حافظه‌دارشکلی نیتینول از خود نشان می‌دهند و در دمای اتاق ابرکشسان عمل می‌کنند، که به همین سبب قابل استفاده در سازه‌ها می‌باشند. رفتار ابرکشسان در آلیاژهای Fe-Mn-Si مشاهده نمی‌شود زیرا با اعمال تنش به این آلیاژها در دمایی بالاتر از دمای پایان حالت آستنیت، به طور غیرقابل‌بازگشتی، پلاستیک می‌شوند، که به همین دلیل نمی‌توان به طور گسترده در سازه‌ها از این آلیاژها استفاده کرد. با این حال امروزه انواعی از SMA-Feهای نوع دوم با خاصیت ابرکشسان نظیر Fe-29Ni-18Co-5Al-8Ta-0.01B و Fe-36Mn-8Al-8.6Ni تولید شده‌اند [۶].

Tanaka و همکارانش در سال ۲۰۱۴، 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 [۷]. تنش آغاز تبدیل آستنیت به مارتنزیت برای این آلیاژ ۷۵۱ مگاپاسکال می‌باشد که بسیار زیاد است و قبل از آنکه مهاربندها از این جنس از ناحیه کشسان خارج شوند، تیرها و اتصالات آسیب خواهند دید. لذا این آلیاژها مناسب برای استفاده به عنوان مهاربند نمی‌باشند ولی توان زیادی در مستهلک کردن انرژی دارند. همچنین Omori و همکارانش در سال ۲۰۱۱، آلیاژ حافظه‌دارشکلی Fe-36Mn-8Al-8.6Ni با خاصیت سوپرالاستیک بسیار بالایی در دمای اتاق را بررسی کردند و مشخصات آن را ارائه کردند [۸]. وابستگی این آلیاژ به دما بسیار کم می‌باشد 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 حافظه‌شکلی نیتینول به عنوان مهاربندهای سازه فولادی، استفاده شده‌است. مشخصات این دو آلیاژ در جدول (۱) ارائه شده است. مقایسه مشخصات آلیاژهای جدول بالا در نمودار خطی و ساده شده تنش-کرنش در شکل (۱) ارائه شده‌است. محققین 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 می‌شود.

Dolce و همکارانش جامعترین مطالعه بر روی عملکرد SMAها در سازه‌هایی که تحت بارهای دینامیکی و زلزله قرار

جدول ۱- مشخصات مکانیکی دو آلیاژ حافظه‌دارشکلی پایه آهن

و نیتینول [۹]

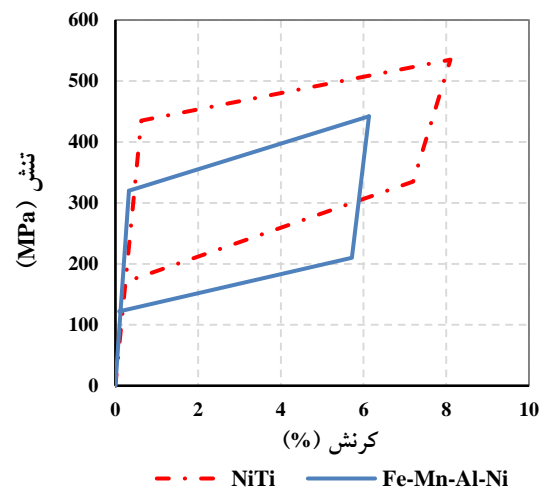
| تعریف | واحد | FeMnAlNi | NiTi |
|--|------|----------|------|
| مدول الاستیسیته | GPa | ۹۸ | ۶۸ |
| تنش آغاز تبدیل آستنیت به مارتنزیت | MPa | ۳۲۰ | ۴۳۵ |
| تنش پایان تبدیل آستنیت به مارتنزیت | MPa | ۴۴۲ | ۵۳۵ |
| تنش آغاز تبدیل معکوس مارتنزیت به آستنیت | MPa | ۲۱۰ | ۳۳۵ |
| تنش پایان تبدیل معکوس مارتنزیت به آستنیت | MPa | ۱۲۲ | ۱۷۰ |
| بیشترین کرنش برگشت پذیر | - | ۰/۰۶۱۳ | ۰/۰۸ |

شاخص‌های خرابی و با استفاده از مدل ساده شده مواد حافظه‌دارشکلی، امکان استفاده از این مواد را به صورت تحلیلی بررسی کردند. تعداد زیادی تحلیل غیرخطی با افزایش تدریجی شدت زلزله بر روی سازه‌هایی با مهاربند فولادی و حافظه‌دارشکلی و همچنین سازه‌های تقویت شده با جداگرهای لاستیکی و حافظه‌دارشکلی انجام پذیرفت. نتایج به دست آمده حاکی از برتری استفاده از جداگرهای پی حافظه‌دارشکلی در کاهش خطرات ناشی از زلزله بر روی سازه‌ها می‌باشد. همچنین در مقایسه بین میراگرهای لاستیکی حافظه‌دارشکلی نشان دادند که سیستم اخیر دارای رفتار مناسب‌تری می‌باشد [۱۳].

Motahari و همکارانش 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. نتایج تحلیل‌های انجام شده حاکی از امکان استفاده مناسب از مواد حافظه‌دارشکلی به عنوان میراگر به ویژه در از بین بردن تغییر مکان‌های باقی‌مانده بر روی سازه، پس از زلزله می‌باشد [۱۴]. Sharabash و Andrawes اثر میراگرهای حافظه‌دارشکلی را در یک پل کابلی مطالعه کردند [۱۵]. نتایج این تحقیق نشان داد که میراگرهای حافظه‌دارشکلی قادر به کاهش تغییر مکان‌های پل و برش و خمش پای برج به نسبت ۶۵ درصد بوده و افزایش تعداد این میراگرها به شرط توزیع مناسب آن‌ها بین اتصالات پایه و برج عملکرد لحظه‌ای پل را بهبود می‌بخشد. Farzaneh و Ghassemieh به ارزیابی رفتار اتصالات خمشی با ورق انتهایی دارای پیچ‌های SMA به جای پیچ‌های پرمقاومت فولادی پرداختند [۱۶]. آن‌ها نشان دادند که با این کار شکل‌پذیری و قابلیت میرا کردن انرژی در اتصال افزایش می‌یابد ولی مقاومت و سختی اتصال کاهش می‌یابد.

Kari و همکارانش در سال ۲۰۱۱ از آلیاژ حافظه‌دارشکلی نیتینول در مهاربندهای سازه استفاده کردند و 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 [۱۷]. Ghassemieh و همکارانش به بررسی اثر به کارگیری از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی هوشمند با خصوصیت‌های رفتار ابرکشسان و رفتار حافظه‌دارشکلی برای به کارگیری در بهسازی سازه‌های بتنی به ویژه دیوارهای برشی بتنی پرداختند [۱۸]. نتایج به دست آمده نشان دهنده بهبود رفتار دیوارها و بازگرداندگی و کاهش تغییر مکان‌ها یا کرنش‌های پسماند آن‌ها در برابر پاسخ‌های لرزه‌ای مخصوصاً پس از زلزله بوده است [۱۸]. Ghassemieh و

می‌گیرند، انجام دادند. اهداف اصلی پروژه ایشان مطالعه رفتار SMAها در سیستم‌هایی که قرار است از خاصیت ابرکشسان و میرایی زیاد این مواد استفاده شود، بود و نیز پیشنهاد راهکارهایی برای طراحی و کاربرد دستگاه‌هایی که از ماده SMA استفاده نموده‌اند [۱۲-۱۰]. ایشان کاربرد همزمان حالت‌های مختلف مواد حافظه‌دارشکلی را به عنوان میراگرهای ویژه در سازه بررسی کردند. آن‌ها میراگرهای متفاوت بازگرداننده و مستهلک‌کننده ساخته شده از حالت‌های مختلف مواد حافظه‌دارشکلی را پیشنهاد کردند و به کمک نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که با ترکیب آن‌ها می‌توان به رفتار مناسبی در برابر بارگذاری‌های لرزه‌ای دست [۱۱].



شکل ۱- تنش-کرنش دو آلیاژ حافظه‌دارشکلی پایه آهن و نیکل

Bruno و Valente با روش‌های تحلیلی و با استفاده از ایده



همکارانش تاثیر بکارگیری از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی را در بهبود رفتار دیوارهای برشی تحت تحریکات لرزه‌ای تحقیق کردند. آن‌ها دو سامانه دیوار برشی ۵ طبقه را الگوسازی و زیر تحلیل تاریخچه زمانی مورد بررسی قرار دادند [۱۹]. نتایج نشان داد که به کارگیری از مصالح حافظه‌دارشکلی به جای فولاد کاهش قابل ملاحظه‌ای در جابجایی مانده خواهد داشت.

Ghassemieh و **Kari** مقاوم‌سازی قاب‌های خمشی آسیب دیده در اثر زلزله را با استفاده از مهاربندهای BRB و مهاربندهای SMA مورد مطالعه قرار دادند [۲۰]. ملاحظه شد که قاب‌هایی که آسیب فراوانی دیده‌اند، در صورتی که با مهاربندهای SMA مقاوم‌سازی شوند، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به مقاوم‌سازی با مهاربندهای BRB خواهند داشت. **Mortazavi** و همکارانش به بررسی بهترین استفاده از هر دو فاز استینت و مارتزیت آلیاژهای حافظه‌دارشکلی در مهاربندهای سازه‌های فولادی پرداختند [۲۱]. **Alvandi** و **Ghassemieh** به بررسی عملکرد سازه مجهز به جداساز پایه در ترکیب با آلیاژ حافظه‌دارشکلی پرداختند [۲۲]. در این تحقیق که سیم‌های پیش کشیده آلیاژ حافظه‌دارشکلی برپایه آهن در یک آرایش خاص به کار گرفته شد، حساسیت سامانه به سختی المان، تاثیر پیش کشیدگی و درصد مشارکت المان SMA مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان از تاثیر مثبت به کارگیری آلیاژ در جداسازی‌های پایه در راستای کاهش تغییر مکان‌های نسبی سازه داشت. **Gholampour** و **Ghassemieh** یک روش گام به گام جدید انتگرال زمانی برای مشکلات غیرخطی سازه‌های دارای اعضای حافظه‌دارشکلی پیشنهاد دادند [۲۳].

Farmani و **Ghassemieh** به ارزیابی رفتار سوپرالاستیک پیچ‌های SMA از جنس آلیاژ نیتینول و خاصیت بازگرداندگی پیچ‌ها در اتصالات ورق انتهایی گسترش‌یافته در نرم‌افزار آباکوس پرداختند [۲۴]. در هر مورد رفتار اتصال با پیچ‌های بلند با رفتار پیچ‌های فولادی پرمقاومت مقایسه شد و با انتخاب آرایش استفاده همزمان از پیچ فولادی و پیچ بلند SMA سعی شد اتصال طراحی گردد تا با کمترین میزان حجمی آلیاژ SMA بیشترین مقدار بازگرداندگی و اتلاف انرژی را داشته باشد. **Aryan** و **Ghassemieh** یک سیستم نوین متشکل از آلیاژهای حافظه‌شکلی برای بهسازی و همچنین طراحی پل‌ها، برای کاهش اثرات قائم و افقی پل‌ها پیشنهاد دادند [۲۵]. **Farmani** و **Ghassemieh** مطالعه عددی به روی اتصال تیر به ستون جدید تشکیل شده از SMA و نوارهای برشی پرداختند [۲۶]. از این مطالعه نتیجه گرفتند که اگر طراحی به درستی انجام پذیرد و به

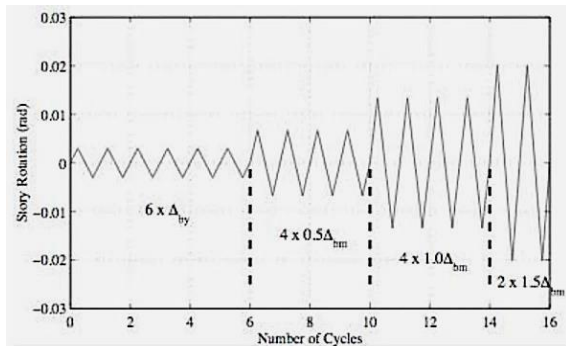
درستی اتصالات نصب شوند نه تنها ظرفیت استهلاک انرژی را افزایش می‌دهد؛ بلکه ظرفیت خمشی، سختی اولیه و مقاومت برشی را نیز بهبود می‌بخشد. **Ghassemieh** و همکارانش یک رویکرد جدید برای ایجاد تعادل در شکل‌پذیری در پل‌های نامنظم با استفاده از SMAها ارائه کردند [۲۷]. **Kari** و همکارانش، یک مهاربند جدید تشکیل شده از المان‌های BRB و آلیاژهای حافظه‌دارشکلی را پیشنهاد دادند [۲۸]. 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 و نتایج این قاب‌ها را با قاب مهاربندی شده BRB مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که این سیستم مهاربندی جدید جابجایی کمتری در طبقات و همچنین جابجایی مانده کمتری نسبت به سازه BRB تجربه می‌کند. **Abouali** و همکارانش 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 [۲۹]. در این پژوهش به کمک تحلیل سه بعدی با نرم‌افزار آباکوس دریافتند که شکل‌پذیری و جذب انرژی تیر مقاوم شده با آلیاژ حافظه‌شکلی بسیار بیشتر است. **Abbass** و همکارانش به بررسی تکنیک جدید استفاده از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی در بهسازی لرزه‌ای ستون‌های پل پرداختند [۳۰]. ایشان دو ستون دایره و مستطیل را در نظر گرفتند و با تقسیم ستون به سه بخش حیاتی، آن را به وسیله میله‌های SMA و ورق‌های تقویت شده با فیبر پلیمر مقاوم‌سازی کردند. با استفاده از یک آنالیز در نرم‌افزار اپنسیس به این نتیجه رسیدند که قابلیت بازگرداندگی ستون نسبت به قبل افزایش قابل ملاحظه‌ای داشت.

Dolatabadi و همکارانش به بررسی روش جدیدی برای مدلسازی و تحلیل رفتار اعضای بتنی پیش‌تنیده و مقاوم‌سازی شده به وسیله آلیاژهای حافظه‌دارشکلی پایه آهن در لایه‌ای از بتن پاششی پرداختند [۳۱]. به طور کلی در این پژوهش سعی شده‌است که رفتار لرزه‌ای آلیاژهای حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن را با آلیاژ حافظه‌دارشکلی نیتینول و مهاربندهای فولادی کماتش تاب به عنوان مهاربندهای متداول در سازه‌های فولادی مورد بررسی قرار دهیم و عملکرد آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کنیم. پیش‌بینی می‌شود که مهاربندهای SMA-Fe عملکرد مطلوب‌تری نسبت به نیتینول داشته‌باشند.

۲- صحت‌سنجی

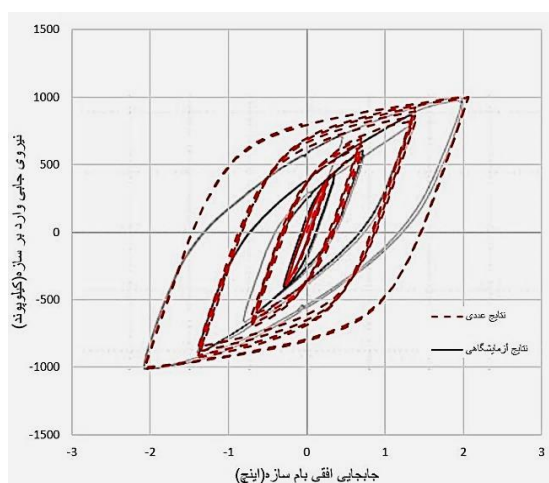
برای صحت‌سنجی قاب مهاربندی‌شده با استفاده از مهاربندهای

ستون‌ها نیز صلب در نظر گرفته شده‌است. در گره بالایی سازه یک الگوی بارگذاری تغییرمکانی به سازه وارد می‌شود و تحلیل استاتیکی تاریخچه زمانی انجام می‌دهیم. تاریخچه زمانی بارگذاری-تغییر مکانی در شکل (۳) نشان داده شده‌است.



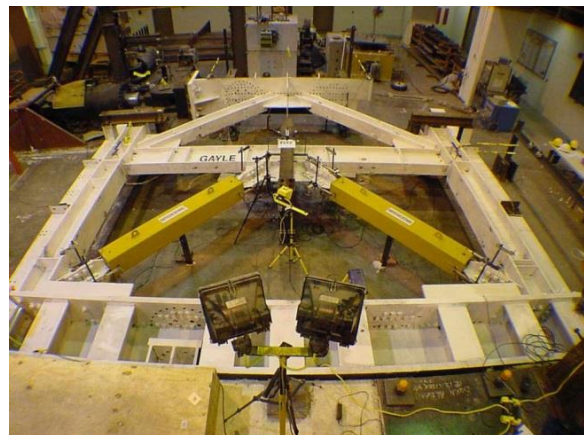
شکل ۳- پروتکل بارگذاری به صورت چرخه‌ای [۳۲]

مطابق با شکل (۴) نتایج که شامل نمودارهای هیستریزس سازه و مهاربند است با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌است. جابجایی بیشینه مهاربند و نیروی متناظر آن در نمونه آزمایشگاهی به ترتیب ۱/۷ اینچ و ۵۷۰ هزارپوند می‌باشد که این نتایج در مدلسازی انجام شده به ترتیب ۱/۵۹ اینچ و ۵۴۲ هزارپوند است که با دقت بیشتر از ۹۰ درصد نتایج با یکدیگر مشابه هستند و همچنین نیروی جانبی بیشینه سازه و جابجایی 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 هزارپوند و ۲/۰۶ اینچ به دست آمده‌است.



شکل ۴- مقایسه نیروی جانبی در مقابل جابجایی بام نمونه مدلسازی شده و نمونه آزمایشگاهی

BRB که توسط Mahin و همکارانش در دانشگاه برکلی در کالیفرنیا آزمایش شده‌است [۳۲] با استفاده از برنامه SeismoStruct مدل‌سازی شده‌است و نتایج بدست آمده از آن برنامه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌است [۳۲ و ۳۳]. تصویر سازه آزمایش شده در شکل (۲) نشان داده شده‌است. این سازه شامل یک قاب دو طبقه است که از مهاربندهای از نوع شورون یا هشتی برای مهارسازی آن در مقابل نیروی جانبی استفاده شده‌است. 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 مهارهای معمولی فولادی هستند. مشخصات مادی و هندسی مدل آزمایش شده مجهز شده با مهاربندهای BRB در جدول (۲) ارائه شده‌است.



شکل ۲- برپایش آزمایش در آزمایشگاه دانشگاه کالیفرنیا [۲۴]

جدول ۲- مشخصات مقاطع مورد استفاده در نرم‌افزار

| طبقه | ستون | تیر | سطح مقطع مهاربند (cm ²) |
|------|---------|--------|-------------------------------------|
| ۱ | W14×176 | W21×93 | ۴۰/۸۵ |
| ۲ | W14×176 | W21×93 | W1۰×۱۱۲ |

مطابق با مقاله از فولاد ASTM-A992 Gr50 برای تیرها و ستون‌ها و مهاربندهای بارگذاری (طبقه دوم) استفاده شده‌است و همچنین برای مدلسازی مقاطع BRB در نرم‌افزار، فولاد با مقاومت تسلیم ۲۸۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده‌است. در برنامه برای مدلسازی المان‌های BRB از المان محوری خرپایی استفاده شده‌است و به نحوی مدلسازی انجام شده‌است که مهاربندهای BRB کماتش نکنند و رفتار مهاربندها مطابق با نتایج آزمایش باشد. اتصالات پای ستون‌ها گیردار و اتصالات تیرها و

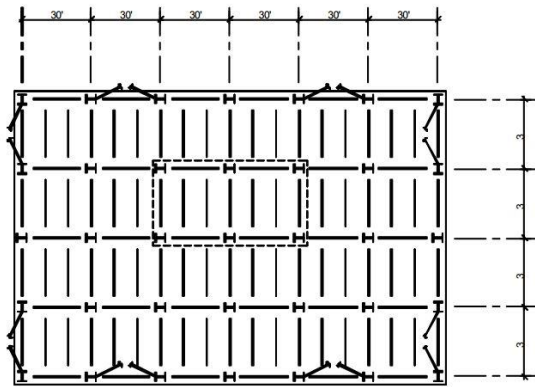
۳- مدل سازی

در این پژوهش به بررسی و مقایسه یک مدل سه طبقه با مهاربندهای شورون یا هشتی می پردازیم. این سازه را با سه مهاربندی با نوع های متنوع مجهز می کنیم و نتایج آن ها را با یکدیگر مقایسه می کنیم. این سازه به ترتیب به مهاربندهای BRB، مهاربندهای SMA-NiTi و SMA-Fe مجهز شده است. این سه سازه تحت سه شتابنگاشت با بیشترین بزرگای شتاب ۰/۳g، ۰/۶g، ۰/۹g و ۱/۲g قرار گرفته شد و نتایج این سه سیستم مهاربندی را بررسی نموده و برای مقایسه با یکدیگر، معیارهای حداکثر جابجایی های مطلق طبقه بام در طول زلزله و حداکثر تغییر مکان مانده طبقه بام پس از زلزله مورد استفاده قرار گرفته شد.

سازه سه طبقه پیشنهاد شده توسط آقای Sabelli به عنوان سازه مینا برای بررسی و مقایسه عملکرد سه سیستم انتخاب گردید [۳]. با این فرض که در پلان تقارن داریم می توان تنها یک قاب دو بعدی از سازه را مورد تحلیل و بررسی قرار داد (شکل (۵)). از فولاد A572-Gr50 برای تیرها و ستون ها و از فولاد با مقاومت تسلیم ۲۴۸ MP برای مهاربندهای BRB استفاده شده است. ارتفاع هر طبقه ۳/۹۶ متر بوده و ابعاد دهانه های سازه ۹/۱۴ متر می باشد. طبقات دارای سقف کامپوزیت با ارتفاع قسمت فولادی ۷۶ میلیمتر و ۵۰ میلی متر پوشش بتنی می باشند. مشخصات هندسی مدل با مهاربندهای BRB در جدول (۳) ارائه شده است. پلان طبقات در شکل (۶) نمایش داده شده است.

جدول ۳- مشخصات مقاطع استفاده در مدلسازی BRB

| طبقه | ستون | تیر | مهاربند |
|------|--------|--------|---------------|
| ۱ | W12x96 | W14x48 | HSS 8x8x0/5 |
| ۲ | W12x96 | W14x48 | HSS 6x6x0/5 |
| ۳ | W12x96 | W14x48 | HSS 5x5x0/375 |



شکل ۶- پلان طبقه سازه ۳ طبقه [۳]

هر طبقه به نحوی انتخاب شدند که سختی محوری EA/L و ظرفیت محوری σA یکسانی با مهاربندهای BRB داشته باشند. به طور مثال برای مهاربند طبقه ۲ که از مقطع HSS 6x6x0/5 است، محاسبات مربوط به سطح مقطع و طول مهاربند در سازه مجهز به SMA-Fe در زیر ارائه شده است.

$$A_{SMA} \cdot \sigma_{Ms} = A_{BRB} \cdot F_y; \quad (1)$$

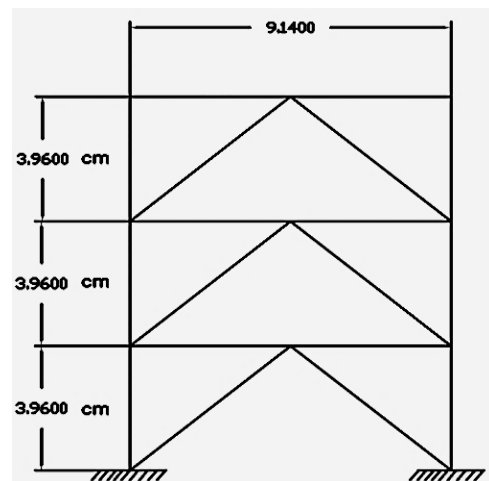
$$A_{SMA} = \frac{A_{BRB} \cdot F_y}{\sigma_{Ms}} = \frac{62.83 \times 248}{320} = 48.69 \text{ cm}^2$$

اگر این مساحت را به صورت سطح مقطع دایره ای در نظر بگیریم قطر این دایره را ۸ سانتیمتر در نظر می گیریم و در سازه اعمال می کنیم. همچنین طول این مهاربند را نیز به دست می آوریم.

$$\frac{E_{SMA} A_{SMA}}{L_{SMA}} = \frac{E_{BRB} A_{BRB}}{L_{BRB}} \rightarrow L_{SMA} = \frac{E_{SMA} A_{SMA}}{\frac{E_{BRB} A_{BRB}}{L_{BRB}}} \quad (2)$$

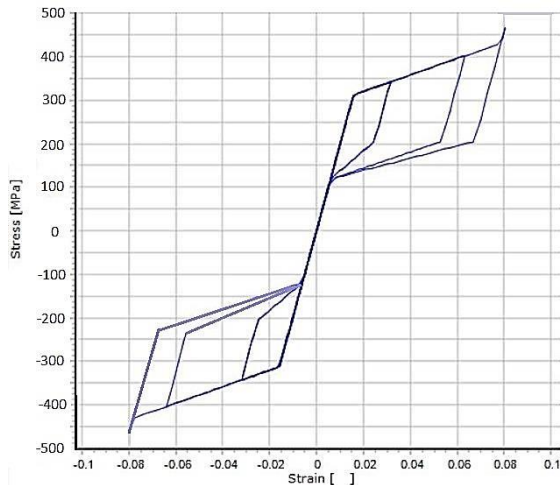
$$\rightarrow L_{SMA} = \frac{9.8 \times 10^6 \times 50.3}{20 \times 10^6 \times 63/605} = 236.2 \text{ cm}$$

با توجه به نتیجه، طول میله های SMA را در نرم افزار ۲۳۵ سانتی متر در نظر می گیریم. لازم به ذکر است که اگر هدف مقایسه نباشد می توان از طول کمتری از میله های آلیاژی حافظه دارشکلی استفاده کرد و می توان معیار برای انتخاب طول

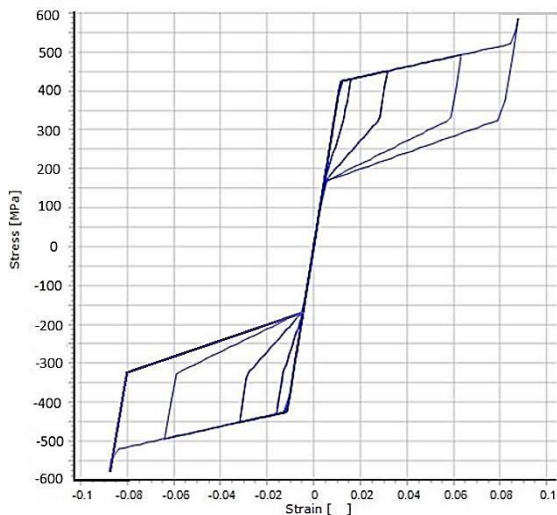


شکل ۵- تصویر و ابعاد سازه ۳ طبقه با مهاربند هشتی [۳]

مشخصات مادی و هندسی تیرها و ستون ها در هر سه مدل مهاربندی BRB و SMA ها یکسان است. مهاربندهای SMA در



شکل ۸- منحنی تنش-کرنش SMA-Fe در نرم‌افزار

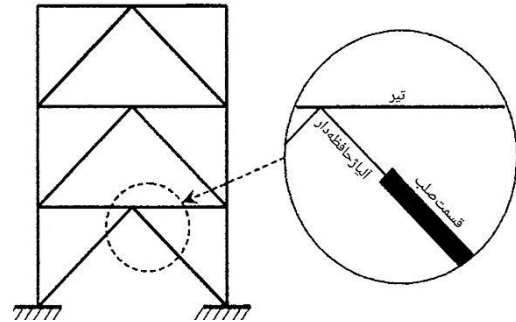


شکل ۹- منحنی تنش-کرنش SMA-NiTi در نرم‌افزار

سه تاریخچه زمانی زلزله ایمپریال ولی ضبط شده در الاسترو، زلزله نورتریج ضبط شده در بورلی هیلز و زلزله نورتریج ضبط شده در لاست‌کنی مقیاس شده به نحوی که حداکثر شتاب‌های آن‌ها ۰/۳g، ۰/۶g، ۰/۹g و ۱/۲g باشد، به منظور بدست آوردن تغییر مکان‌های باقی‌مانده طبقه سوم در پایان زلزله و همچنین حداکثر تغییر مکان‌های حداکثر طبقه سوم، بر روی سازه در نظر گرفته شده است. نمودار شتاب طیفی این سه شتابنگاشت در شکل (۱۰) ارائه شده است.

جرم لرزه‌ای معادل هر گره، برابر با یک چهارم جرم کل طبقه، محاسبه شده و بصورت متمرکز بر روی گره‌ها اعمال شد. علاوه بر جرم بتن طبقات، جرمی هم برای دیوارهای جداکننده و تاسیسات و کفسازی در نظر گرفته شد که در مجموع به هر

را فقط جابجایی مجاز طبقات در نظر بگیریم، که در این صورت جابجایی حداکثر و نسبی طبقات نیز کاهش چشمگیری خواهد داشت. محل قرارگیری مهاربندهای حافظه‌دارشکلی در شکل (۷) ارائه شده است و این مهاربندها به نحوی طراحی شده‌اند که همانند مهاربندهای کمانش‌تاب، کمانش ناپذیرند و در کشش و فشار نیز مانند مهاربندهای متداول عمل می‌کنند.



شکل ۷- جانمایی مهاربندهای حافظه‌دارشکلی در سازه

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

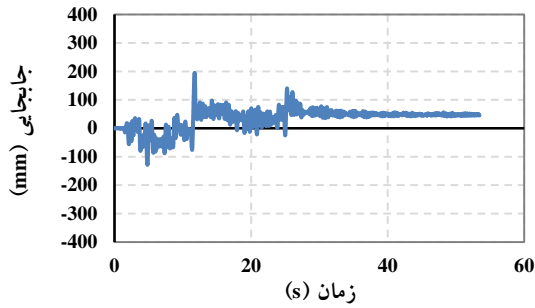
جدول ۴- مشخصات هندسی سازه مهاربندی شده با آلیاژ حافظه‌دارشکلی با پایه آهن

| طبقه | ستون | تیر | قطر میله (cm) | طول میله (cm) |
|------|--------|--------|---------------|---------------|
| ۱ | W12×96 | W14×48 | 9/4 | 235 |
| ۲ | W12×96 | W14×48 | 8/0 | 235 |
| ۳ | W12×96 | W14×48 | 6/4 | 235 |

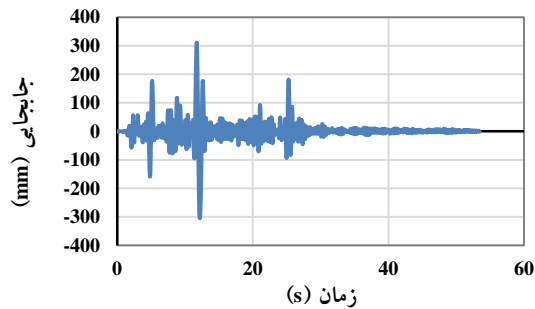
جدول ۵- مشخصات هندسی سازه مهاربندی شده با آلیاژ حافظه‌دارشکلی با پایه نیتینول

| طبقه | ستون | تیر | قطر میله (cm) | طول میله (cm) |
|------|--------|--------|---------------|---------------|
| ۱ | W12×96 | W14×48 | 8/2 | 120 |
| ۲ | W12×96 | W14×48 | 7/1 | 120 |
| ۳ | W12×96 | W14×48 | 5/6 | 120 |

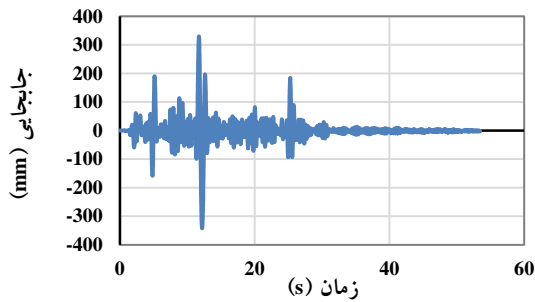
مشخصات مادی مهاربندهای SMA-Fe و SMA-NiTi طبق جدول (۲) استفاده شده است. نمودار تنش-کرنش مواد آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن و نیتینول در شکل‌های (۸) و (۹) ارائه شده است.



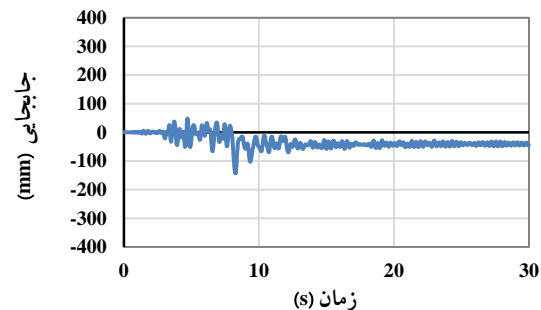
شکل ۱۱- جایجایی حداکثر بام سازه با مهاربندهای BRB برای زلزله شماره ۱ با PGA برابر با $1/2g$



شکل ۱۲- جایجایی حداکثر بام سازه با مهاربندهای SMA-Fe برای زلزله شماره ۱ با PGA برابر با $1/2g$

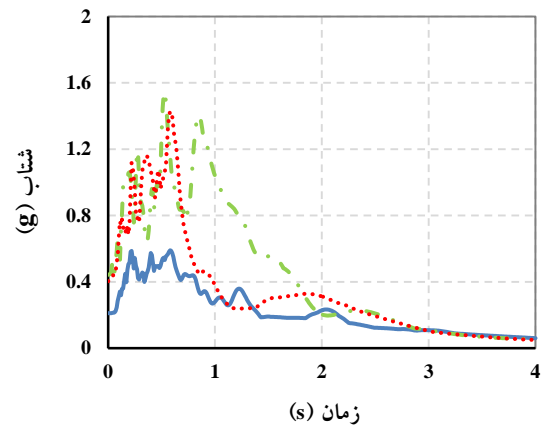


شکل ۱۳- جایجایی حداکثر بام سازه با مهاربندهای SMA-NiTi برای زلزله شماره ۱ با PGA برابر با $1/2g$



شکل ۱۴- جایجایی حداکثر بام سازه با مهاربندهای BRB برای زلزله شماره ۲ با PGA برابر با $1/2g$

ستون در هر طبقه بار لرزه‌ای متمرکز ۶۰ کیلو نیوتنی وارد شد. از المان نیرومحور برای مدل کردن تیرها و ستون‌ها؛ و از المان خرابیایی که فقط نیروی محوری را در نظر می‌گیرد برای مهاربندها استفاده شده‌است. اتصال ستون‌ها به پی و اتصال تیرها به ستون‌ها بصورت صلب در نظر گرفته شده‌است. از تغییر شکل محوری تیرها صرف نظر شده و سقف طبقات در راستای عمود بر صفحه، صلب در نظر گرفته شده‌است.



شکل ۱۰- شتاب طیفی سه شتاب‌نگاشت مورد استفاده

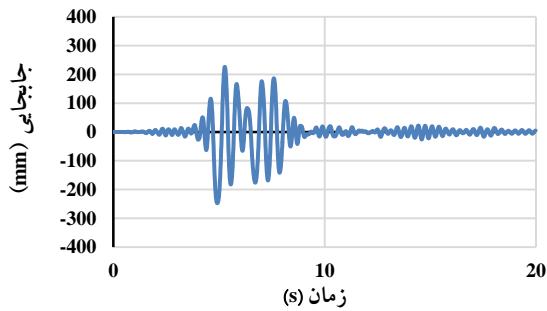
شکل ۱۰- شتاب طیفی سه شتاب‌نگاشت مورد استفاده

۴- تحلیل مدل

با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی بر روی مدل‌های ساخته شده از مهاربندهای SMA و BRB، نمودارهای تاریخچه زمانی تغییر مکان‌های طبقه سوم (شکل‌های (۱۱) الی (۱۹))، برای زلزله شماره یک تا سه برای بزرگترین شتاب و $1/2g$ نشان داده شده‌است. حداکثر تغییر مکانی که سازه تجربه کرده‌است و بیشینه جایجایی مانده بام سازه برای هر ۳ زلزله در جداول (۶) تا (۱۴) نشان داده شده‌است. در ادامه نیز نمودارهای مقایسه عملکرد ۳ مهاربند برای هر ۳ شتاب‌نگاشت برای ۴ بزرگای مختلف در شکل‌های (۲۰) تا (۲۵) به نمایش درآمده‌است.

در این تحقیق سازه مهاربندی شده به وسیله المان‌های کمانش‌تاب، سازه با مهاربندی آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن و مهاربندی به وسیله آلیاژ حافظه‌دارشکلی نیتینول به ترتیب سازه شماره ۱، ۲ و ۳ نام‌گذاری شده‌اند.

مطابق با شکل‌های (۱۱) الی (۱۹) مشاهده می‌شود که برای شتاب‌نگاشت ۱ و ۳ جایجایی حداکثر سازه‌ی کمانش‌تاب کمتر از سازه‌های حافظه‌دار شکلی می‌باشد؛ اما این سازه جایجایی‌های مانده زیادی را بعد از اتمام زلزله تجربه می‌کند.



شکل ۱۹- جابجایی حداکثر بام سازه با مهاربندهای SMA-NiTi برای زلزله شماره ۳ با PGA برابر با ۱/۲g

سازه حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن تحت شتابنگاشت ۲ بسیار خوب عمل می‌کند و این آلیاژ برخلاف نیتینول وارد ناحیه سخت‌شوندگی نهایی نمی‌شود و به همین دلیل جابجایی‌های کمتری را در مقایسه با سازه‌های ۱ و ۳ تجربه می‌کند.

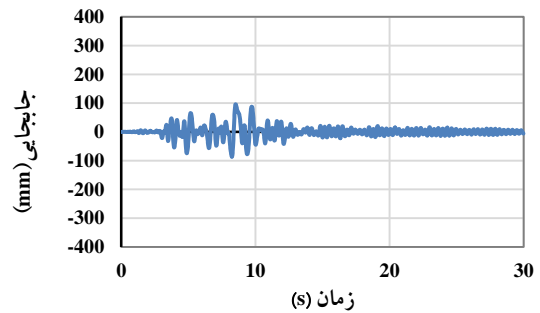
۴-۱- تفسیر نتایج شتاب‌نگاشت یک

مطابق شکل (۲۰) و جداول (۶) تا (۸) مشاهده می‌شود که در شتاب‌های پایین‌تر از ۰/۸g هر ۳ سازه تقریباً مشابه یکدیگر عمل می‌کنند و جابجایی حداکثر زیادی را متحمل نمی‌شوند؛ ولی با افزایش شتاب مشاهده می‌شود که مسیر سازه ۱ از سازه ۲ و ۳ جدا می‌شود و سازه‌های مجهز به آلیاژ حافظه‌دارشکلی جابجایی‌های بیشتری را تجربه می‌کنند. لازم به ذکر است که از بین دو سازه حافظه‌دارشکلی، سازه شماره ۲ عملکرد بهتری دارد و مقادیر کمتری از جابجایی را تجربه می‌کند. همان‌طور که در شکل (۲۱) قابل مشاهده است جابجایی مانده سازه ۲ و ۳ بسیار کمتر از سازه ۱ است که همان‌گونه که در جداول (۶) تا (۸) نیز ذکر شده است میزان جابجایی مانده سازه ۲ و ۳ حدود صفر است، در صورتی که سازه ۱ در شتاب ۱/۲g حدود ۵ سانتی‌متر جابجایی بعد از اتمام زلزله را تجربه می‌کند.

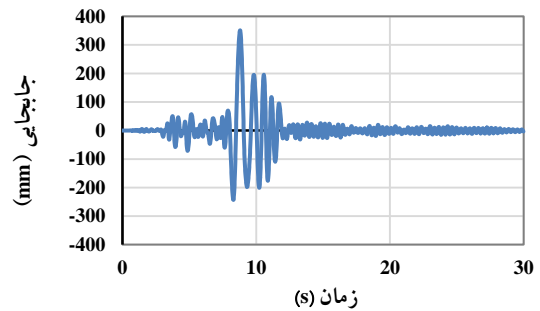
جدول ۶- جابجایی حداکثر و جابجایی مانده سازه مجهز به

مهاربندهای BRB در زلزله شماره ۱

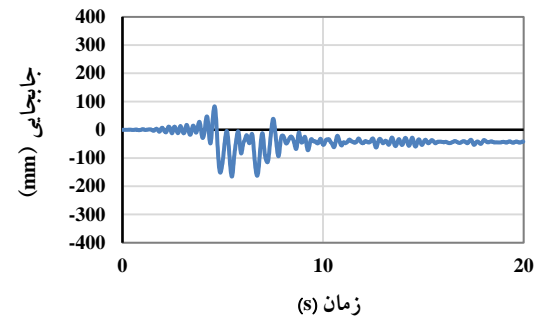
| BRB | | مهاربند |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| جابجایی مانده بام در پایان زلزله (mm) | حداکثر جابجایی بام (mm) | شتاب بر حسب (g) |
| ۱/۸ | ۳۴/۴ | ۰/۳ |
| ۱۰/۰ | ۵۲/۳ | ۰/۶ |
| ۵/۰ | ۷۸/۰ | ۰/۹ |
| ۴۹/۰ | ۱۹۴/۸ | ۱/۲ |



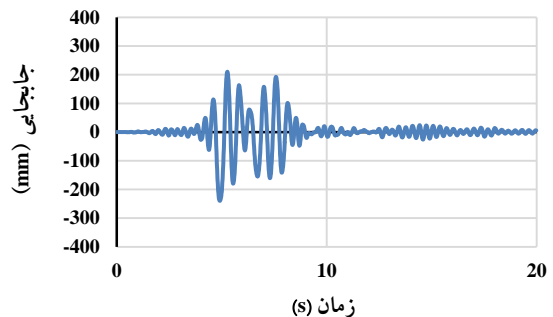
شکل ۱۵- جابجایی حداکثر بام سازه با مهاربندهای SMA-Fe برای زلزله شماره ۲ با PGA برابر با ۱/۲g



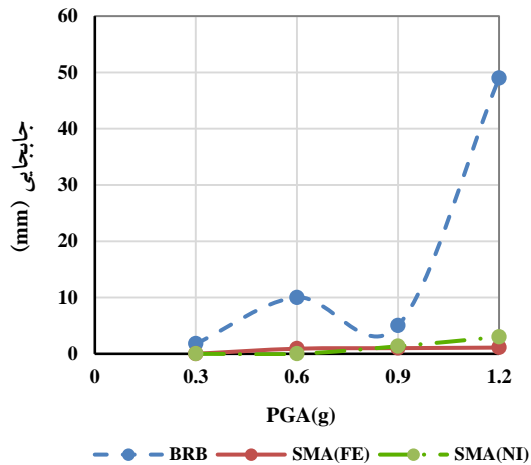
شکل ۱۶- جابجایی حداکثر بام سازه با مهاربندهای SMA-NiTi برای زلزله شماره ۲ با PGA برابر با ۱/۲g



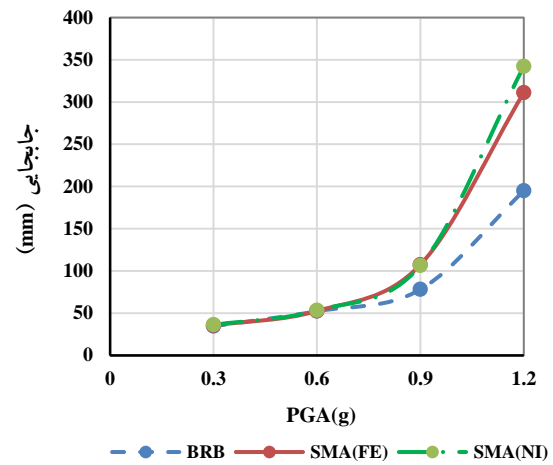
شکل ۱۷- جابجایی حداکثر بام سازه با مهاربندهای BRB برای زلزله شماره ۳ با PGA برابر با ۱/۲g



شکل ۱۸- جابجایی حداکثر بام سازه با مهاربندهای SMA-Fe برای زلزله شماره ۳ با PGA برابر با ۱/۲g

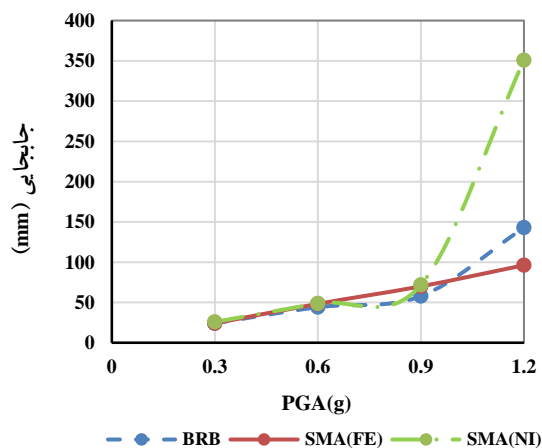


شکل ۲۰- مقایسه جابجایی حداکثر سیستم‌های مانده سازه‌ای مختلف در برابر زلزله ۱



شکل ۲۱- مقایسه جابجایی حداکثر سیستم‌های مانده سازه‌ای مختلف در برابر زلزله ۲

بیشتر از g جابجایی‌های کمتری را حتی نسبت به سازه کمانش‌تاب تجربه می‌کند. تفاوت سازه شماره ۲ و ۳ در این مورد است که در شتاب‌های بیشتر از $0.9g$ سازه شماره ۳ از ناحیه برگشت‌پذیر آلیاژ نیتینول خارج می‌شود و به همین دلیل باعث جابجایی بیشتر این سازه می‌شود. همان‌طور که در جدول (۱۱) ذکر شده است این سازه برای شتاب‌های بیشتر از g جابجایی نسبی زیادی در حدود $2/95\%$ را تجربه کرده است و عملاً غیرقابل سکونت است. همچنین طبق شکل (۲۳) مشاهده می‌شود تحت شتاب‌نگاشت ۲ جابجایی مانده سازه BRB بیشتر از دو سازه حافظه‌شکلی است. لازم به ذکر است که جابجایی مانده سازه حافظه‌دار شکلی پایه آهن و نیتینول تقریباً برابر با هم و حدود ۵ میلی‌متر است.



شکل ۲۲- مقایسه جابجایی حداکثر سیستم‌های مانده سازه‌ای مختلف در برابر زلزله ۲

جدول ۷- جابجایی حداکثر و جابجایی مانده سازه مجهز به مهاربندهای SMA-Fe در زلزله شماره ۱

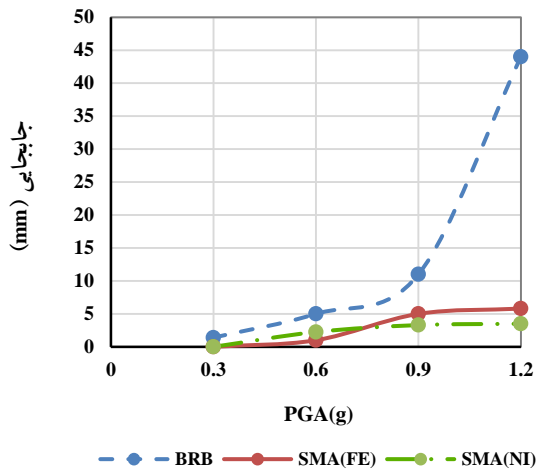
| SMA Fe | | مهاربند |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| جابجایی مانده بام در پایان زلزله (mm) | حداکثر جابجایی بام (mm) | شتاب بر حسب (g) |
| ۰/۰ | ۳۵/۵ | ۰/۳ |
| ۰/۹ | ۵۲/۶ | ۰/۶ |
| ۱/۰ | ۱۰۷/۴ | ۰/۹ |
| ۱/۱ | ۳۱۱/۰ | ۱/۲ |

جدول ۸- جابجایی حداکثر و جابجایی مانده سازه مجهز به مهاربندهای SMA Ni-Ti در زلزله شماره ۱

| SMA Ni-Ti | | مهاربند |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| جابجایی مانده بام در پایان زلزله (mm) | حداکثر جابجایی بام (mm) | شتاب بر حسب (g) |
| ۰/۰ | ۳۶/۱ | ۰/۳ |
| ۰/۰ | ۵۳/۳ | ۰/۶ |
| ۱/۳ | ۱۰۶/۴ | ۰/۹ |
| ۳/۰ | ۳۴۲/۱ | ۱/۲ |

۴-۲- تفسیر نتایج شتاب‌نگاشت دو

مطابق شکل (۲۲) و جداول (۹) تا (۱۱) در اثر اعمال شتاب‌نگاشت شماره ۲ مشاهده می‌شود که سازه شماره ۲ بسیار عالی عمل کرده است و در شتاب‌های کمتر از g پاسخ‌هایی مشابه به سازه دیگر تجربه می‌کند و در ادامه در شتاب‌های



شکل ۲۳- مقایسه جابجایی مانده سیستم‌های سازه‌های مختلف در برابر زلزله ۲

جابجایی‌شان در شتاب کمتر از ۰/۹g تقریباً نزدیک صفر است، و در شتاب ۱/۲g در حدود ۵ میلی‌متر است، در صورتی که سازه شماره ۱ حدود ۴/۵ سانتیمتر در شتاب ۱/۲g جابجایی مانده را تجربه کرده است.

جدول ۱۲- جابجایی حداکثر و جابجایی مانده سازه مجهز به مهاربندهای BRB در زلزله شماره ۳

| BRB | | مهاربند |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| جابجایی مانده بام در پایان زلزله (mm) | حداکثر جابجایی بام (mm) | شتاب بر حسب (g) |
| ۱/۹ | ۳۶/۴ | ۰/۳ |
| ۲/۰ | ۵۱/۲ | ۰/۶ |
| ۲۱/۴ | ۹۹/۸ | ۰/۹ |
| ۴۴/۰ | ۱۶۵/۷ | ۱/۲ |

جدول ۱۳- جابجایی حداکثر و جابجایی مانده سازه مجهز به مهاربندهای SMA-Fe در زلزله شماره ۳

| SMA-Fe | | مهاربند |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| جابجایی مانده بام در پایان زلزله (mm) | حداکثر جابجایی بام (mm) | شتاب بر حسب (g) |
| ۰/۰ | ۳۹/۰ | ۰/۳ |
| ۱/۷ | ۸۷/۱ | ۰/۶ |
| ۳/۹ | ۱۸۳/۳ | ۰/۹ |
| ۵/۵ | ۲۳۹/۶ | ۱/۲ |

جدول ۹- جابجایی حداکثر و جابجایی مانده سازه مجهز به مهاربندهای BRB در زلزله شماره ۲

| BRB | | مهاربند |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| جابجایی مانده بام در پایان زلزله (mm) | حداکثر جابجایی بام (mm) | شتاب بر حسب (g) |
| ۱/۴ | ۲۴/۲ | ۰/۳ |
| ۵/۰ | ۴۴/۲ | ۰/۶ |
| ۱۱/۰ | ۵۷/۹ | ۰/۹ |
| ۴۴/۰ | ۱۴۲/۹ | ۱/۲ |

جدول ۱۰- جابجایی حداکثر و جابجایی مانده سازه مجهز به مهاربندهای SMA-Fe در زلزله شماره ۲

| SMA-Fe | | مهاربند |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| جابجایی مانده بام در پایان زلزله (mm) | حداکثر جابجایی بام (mm) | شتاب بر حسب (g) |
| ۰/۰ | ۲۴/۲ | ۰/۳ |
| ۱/۰ | ۴۸/۴ | ۰/۶ |
| ۵/۰ | ۷۰/۱ | ۰/۹ |
| ۵/۸ | ۹۶/۳ | ۱/۲ |

جدول ۱۱- جابجایی حداکثر و جابجایی مانده سازه مجهز به مهاربندهای SMA-NiTi در زلزله شماره ۲

| SMA-NiTi | | مهاربند |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| جابجایی مانده بام در پایان زلزله (mm) | حداکثر جابجایی بام (mm) | شتاب بر حسب (g) |
| ۰/۰ | ۲۵/۹ | ۰/۳ |
| ۲/۳ | ۴۸/۹ | ۰/۶ |
| ۳/۳ | ۷۱/۸ | ۰/۹ |
| ۳/۵ | ۳۵۰/۸ | ۱/۲ |

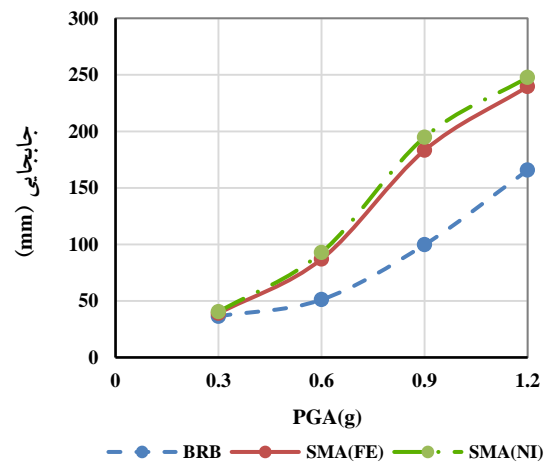
۴-۳- تفسیر نتایج شتاب‌نگاشت سه

مطابق شکل (۲۴) و جداول (۱۲) تا (۱۴) در اثر اعمال شتاب‌نگاشت شماره ۳ نیز سازه شماره ۱ جابجایی‌های حداکثر کمتری را متحمل شده‌است و پاسخ‌های مطلوب‌تری دارد. سازه شماره ۲ نیز در مقایسه با سازه شماره ۳ عملکرد بهتری را تجربه کرده‌است اگرچه پاسخ‌ها به یکدیگر کاملاً نزدیک است. مطابق با شکل (۲۵)، همانند پاسخ‌های سازه‌های قبلی، سازه‌های شماره ۲ و ۳ در زمینه جابجایی مانده بسیار بهتر عمل کرده‌اند و مقدار

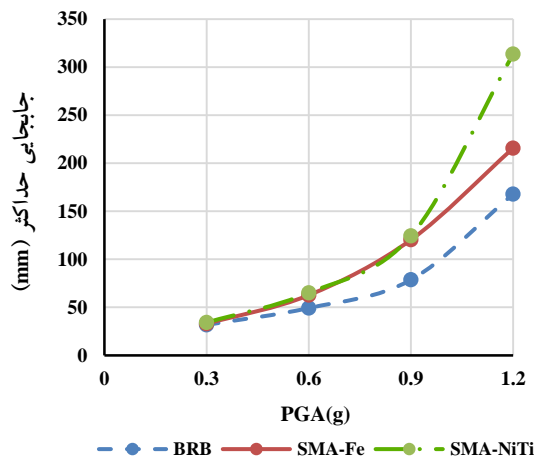
جدول ۱۴- جابجایی حداکثر و جابجایی مانده سازه مجهز به مهاربندهای SMA-NiTi در زلزله شماره ۳

| SMA-NiTi | | مهاربند |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|
| جابجایی مانده بام در پایان زلزله (mm) | حداکثر جابجایی بام (mm) | شتاب بر حسب (g) |
| ۱/۹ | ۴۰/۴ | ۰/۳ |
| ۳/۵ | ۹۲/۹ | ۰/۶ |
| ۴/۰ | ۱۹۴/۸ | ۰/۹ |
| ۵/۱ | ۲۴۷/۷ | ۱/۲ |

مهاربندی‌های مختلف در اثر اعمال هر سه شتاب‌نگاشت با حداکثر شتاب $0.3g$ پاسخ‌های مشابه می‌دهند و جابجایی حداکثر و جابجایی مانده تقریباً برابری را در تراز بام سازه ۳ طبقه متحمل می‌شوند. به دلیل اینکه حداکثر شتاب وارد شده به سازه در این مرحله کم است، و مهاربندهای مجهز به آلیاژ حافظه‌دارشکلی مطابق با سختی مهاربندهای کمانش‌تاب طراحی شده‌اند، سازه‌ها وارد مرحله غیرخطی نمی‌شوند و تمام اعضا خطی عمل می‌کنند. به همین سبب، هر ۳ سازه با مهاربندی کمانش‌تاب و آلیاژ حافظه‌دارشکلی پایه آهن و نیتینول مشابه هم عمل می‌کنند. هنگامی که به سازه‌ها شتاب $0.6g$ وارد می‌شود نیز برای ۲ شتاب‌نگاشت یک و دو نتایج تقریباً مشابه است و اعضای سازه‌های همچنان در محدوده خطی قرار می‌گیرند، اگرچه سازه‌های مهاربندی شده مجهز به آلیاژ حافظه‌دارشکلی کمی وارد مرحله غیرخطی نیز می‌شوند. برای شتاب‌های بیشتر کاملاً مشخص است که رفتار ۳ سازه از هم فاصله می‌گیرند و سازه مجهز به مهاربندهای کمانش‌تاب جابجایی‌های حداکثر کمتری نسبت به ۲ سازه دیگر نشان می‌دهد ولی مطابق با شکل (۲۷) جابجایی مانده ۲ سازه مجهز به مهاربندهای آلیاژ حافظه‌دارشکلی بسیار کمتر از سازه کمانش‌تاب است و در حدود صفر است. در صورتی که سازه کمانش‌تاب حدود ۵ سانتی‌متر جابجایی مانده بعد از زلزله را تجربه می‌کند.

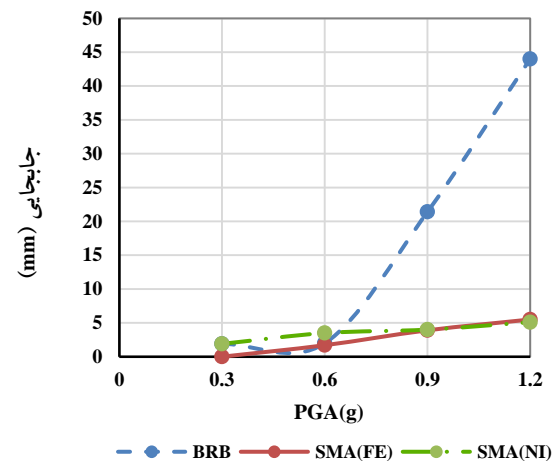


شکل ۲۴- مقایسه جابجایی حداکثر سیستم‌های سازه‌ای مختلف در برابر زلزله ۳



شکل ۲۶- میانگین جابجایی حداکثر سیستم‌های سازه‌ای مختلف

در این بین نکته حائز اهمیت تفاوت دو سازه با مهاربندهای آلیاژ حافظه‌دارشکلی با یکدیگر است که جابجایی حداکثر مهاربند آلیاژ حافظه‌دارشکلی بر پایه آهن کمتر از مهاربند مجهز به آلیاژ حافظه‌دارشکلی نیتینول است و همچنین مقدار جابجایی مانده بام هر ۲ سازه تحت میانگین هر ۳ شتاب‌نگاشت برای



شکل ۲۵- مقایسه جابجایی مانده سیستم‌های سازه‌ای مختلف در برابر زلزله ۳

۴-۴- تفسیر نتایج شتاب‌نگاشت میانگین همان‌طور که در شکل (۲۶) مشخص است، هر ۳ سازه با

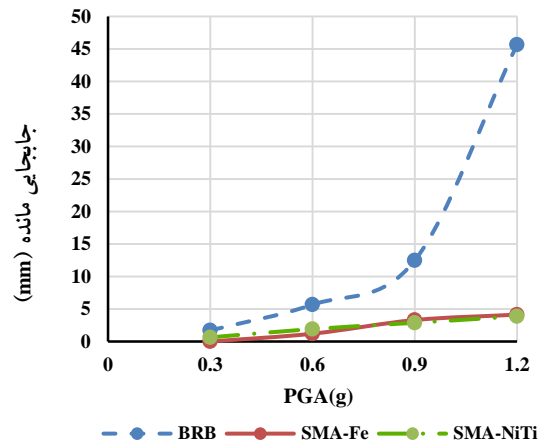
از آنجایی که مهاربند فشاری پس از کماتش به شدت سختی خود را از دست می‌دهد، اتلاف انرژی با مشکل مواجه شده و انرژی محدودی تلف می‌شود. علاوه بر آن، اختلاف نیروی عمودی بسیار بزرگی که در مهاربندهای ویژه هفتی ناشی از کماتش مهاربند فشاری در این سازه‌ها مشاهده می‌شود، با استفاده از سیستم کماتش‌تاب، این نیرو به حداقل رسیده و در نتیجه تیر دهانه مهاربندی دارای ابعاد بسیار کوچک‌تری خواهد بود.

هدف از انجام این پژوهش بررسی رفتار لرزه‌ای سازه مهاربندی فلزی متداول مجهز به آلیاژهای حافظه‌شکلی پایه آهن می‌باشد. در این پژوهش این کار از طریق مدل‌سازی سازه مهاربندی شده سه طبقه به وسیله مهاربندهای SMA-Fe, BRB و SMA-NiTi انجام گرفته‌شد؛ که در مرحله بعد سه شتابنگاشت با ۴ شدت PGA به هرکدام از سازه‌ها اعمال شد و بیشینه جابجایی و جابجایی ماندگار این سازه‌ها به دست آمد.

هر سه سازه با مهاربندی‌های مختلف در اثر اعمال شتاب‌نگاشت‌ها با حداکثر شتاب $0.3g$ برای هر ۳ شتابنگاشت پاسخ‌های مشابه می‌دهند و جابجایی حداکثر و جابجایی مانده تقریباً برابری در تراز بام سازه ۳ طبقه دارند. به دلیل اینکه حداکثر شتاب وارده به سازه در این مرحله کم است، و مهاربندهای مجهز به آلیاژ حافظه‌دارشکلی مطابق با سختی مهاربندهای کماتش‌تاب طراحی شده‌است، سازه‌ها وارد مرحله غیرخطی نمی‌شوند و به صورت کامل، تمام اعضا خطی عمل می‌کنند که در نتیجه همان‌طور که ذکر شده هر ۳ سازه با مهاربندی کماتش‌تاب و آلیاژ شکلی پایه آهن و نیتینول مشابه هم عمل می‌کنند. هنگامی که به سازه‌ها شتاب $0.6g$ وارد می‌شود نیز برای ۲ شتابنگاشت یک و دو نتایج تقریباً مشابه است و اعضای سازه‌ای همچنان در محدوده خطی قرار می‌گیرند اگرچه سازه‌های مهاربندی شده مجهز به آلیاژ حافظه‌دارشکلی کمی وارد مرحله غیرخطی نیز می‌شوند؛ که از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت استفاده از آلیاژهای حافظه‌دارشکلی به عنوان مهاربند در محل‌هایی که شدت زلزله پایین تخمین زده می‌شود، بدلیل گران بودن این مواد و اینکه رفتار آن‌ها در زلزله‌های ضعیف با رفتار سازه‌های دارای مهاربندهای BRB تقریباً یکسان است، توصیه نمی‌شود و استفاده از مهاربندهای BRB ارجحیت دارد.

برای شتاب‌های بیشتر کاملاً مشخص است که رفتار ۳ سازه از هم فاصله می‌گیرند و سازه مجهز به مهاربندهای کماتش‌تاب جابجایی‌های حداکثر کمتری نسبت به ۲ سازه دیگر دارد ولی جابجایی مانده ۲ سازه مجهز به مهاربندهای آلیاژ حافظه‌دارشکلی بسیار کمتر از سازه کماتش‌تاب است و در

شتاب‌های مختلف تقریباً برابر است که در شکل (۲۷) قابل مشاهده است و این موضوع نشان از عملکرد مطلوب آلیاژ حافظه‌دارشکلی پایه آهن به عنوان مهاربند نسبت به نیتینول می‌باشد.



شکل ۲۷- میانگین جابجایی مانده سیستم‌های سازه‌های مختلف

۵- نتیجه گیری

آلیاژهای حافظه‌دارشکلی به عنوان موادی هوشمند از قابلیت‌های منحصر بفردی مانند عمر مفید زیاد، مقاومت زیاد در برابر خستگی و خوردگی، عدم احتیاج به فرایندهای نگهداری، راحتی نصب و اجرا، عدم احتیاج به تعویض پس از زلزله، قابلیت تحمل کرنش‌های تا حد ۱۰ درصد بدون بر جای گذاشتن کرنش پسماند و قابلیت اتلاف انرژی زیاد برخوردارند. آلیاژهای حافظه‌دارشکلی دارای دو ویژگی منحصر به فرد سوپر الاستیسیته و حافظه‌شکلی می‌باشند. ویژگی سوپر الاستیسیته موجب بازگشت سازه به حالت اولیه و حذف کرنش‌های پسماند؛ و خاصیت حافظه‌شکلی باعث اتلاف انرژی زیاد در هنگام زلزله می‌شود. از میان انواع آلیاژهای حافظه‌دارشکلی، آلیاژ حافظه‌شکلی بر پایه آهن و نیتینول که ترکیبی از نیکل و تیتانیوم می‌باشد، در این پژوهش به عنوان مهاربند در نظر گرفته شدند.

مهاربندهای کماتش‌تاب به دلیل عدم کماتش، رفتار پایداری را در کشش و فشار داشته که این امر مانع از بروز کماتش‌های ترد و شکننده شده، و سازه رفتار پایداری خود نشان می‌دهد. استفاده دیگر این سیستم‌ها در قاب‌های همگرای ویژه‌ای است که در آن‌ها مهاربندهای هفتی یا هشتی وظیفه اتلاف انرژی زلزله را بر عهده دارند. در این سیستم‌ها، اتلاف انرژی از طریق جاری شدن مهاربند کششی و کماتش پایدار مهاربند فشاری صورت می‌پذیرد. در مهاربندهای متداول فلزی

- analysis of conventional and innovative seismic protection strategies", *Earthquake engineering & structural dynamics*, Vol. 31, pp. 1067-1092.
- [14] Motahari, S.A., Ghassemieh, M. and Abolmaali, S.A. (2007), "Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, pp. 1570-1579.
- [15] Sharabash, A.M. and Andrawes, B.O. (2009), "Application of shape memory alloy dampers in the seismic control of cable-stayed bridges", *Engineering Structures*, Vol. 31, pp. 607-616.
- [۱۶] فرزانه، م. (۱۳۸۹)، "ارزیابی اتصالات خمشی با ورق انتهایی دارای پیچهای حاوی آلیاژ حافظه دار"، کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- [17] Kari, A., Ghassemieh, M. and Abolmaali, S.A. (2011), "A new dual bracing system for improving the seismic behavior of steel structures", *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, pp. 125020.
- [18] Ghassemieh, M., Mostafazadeh, M. and Sadeh, M.S. (2012), "Seismic control of concrete shear wall using shape memory alloys", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, pp. 535-543.
- [19] Ghassemieh, M., Bahaari, M.R., Ghodrati, S.M. and Nojumi, S.A. (2012), "Improvement of concrete shear wall structures by smart materials", *Open Journal of Civil Engineering*, Vol. 2, pp. 87.
- [20] Ghassemieh, M. and Kari, A. (2013), "Application of shape memory alloys in seismic control of steel structures", *Advances in Materials Science and Applications*, Vol. 2, pp. 66-72.
- [21] Mortazavi, S.M.R., Ghassemieh, M. and Motahari, S.A. (2013), "Seismic control of steel structures with shape memory alloys", *International Journal of Automation and Control Engineering*, Vol. 2, pp. 28-34.
- [22] Alvandi, S. and Ghassemieh, M. (2014), "Seismic evaluation of base isolated system equipped with Shape memory alloys", In *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications Ltd., Vol. 831, pp. 110-114.
- [23] Gholampour, A.A., Ghassemieh, M. and Kiani, J. (2014), "State of the art in nonlinear dynamic analysis of smart structures with SMA members", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 75, pp. 108-117.
- [24] Farmani, M.A. and Ghassemieh, M. (2016), "Shape memory alloy-based moment connections with superior self-centering properties", *Smart Materials and Structures*, Vol. 25, pp. 075028.
- [25] Aryan, H. and Ghassemieh, M. (2017), "A superelastic protective technique for mitigating the effects of vertical and horizontal seismic excitations on highway bridges", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 28, pp. 1533-1552.
- [26] Farmani, M.A. and Ghassemieh, M. (2017), "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*, Vol. 135, pp. 30-48.
- [27] Ghassemieh, D., Ghodrati, S.M., Khanmohammadi, M. and Baei, M. (2018), "A superelastic retrofitting method for mitigating the effects of seismic excitations on irregular bridges", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, Vol. 51, pp. 147-168.
- [28] Kari, A., Ghassemieh, M. and Badarloo, B. (2019), "Development and design of a new self-centering energy-dissipative brace for steel structures", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 30, pp. 924-938.
- حدود صفر است. در صورتی که سازه کماتش تاب حدود ۵ سانتیمتر جابجایی مانده بعد از زلزله را تجربه می‌کند؛ که به همین دلیل می‌توان برداشت کرد که در محل‌هایی که شدت زلزله زیاد تخمین زده می‌شود، استفاده از مهاربندهای از جنس SMA نسبت به مهاربندهای BRB در اولویت است. همچنین کاملاً مشخص است که سازه با مهاربندی SMA-Fe عملکرد بهتری نسبت به نیتینول در هر دو زمینه جابجایی حداکثر و جابجایی ماندگار نشان می‌دهد.

۶- مراجع

- [1] Wakabayashi, M., Nakamura, T., Kashibara, A., Morizono, T. and H. Yokoyama (1973), "Experimental study of elasto-plastic properties of precast concrete wall panels with built-in insulating braces", In *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan*, Vol. 104121044, pp. 12-20.
- [2] Clark, P., Kasai, K., Aiken, I., Kimura, I., Kasai, K. and Aiken, I. (2000), "Evaluation of design methodologies for structures incorporating steel unbonded braces for energy dissipation", In *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 2240.
- [3] Sabelli, R. (2001), "Research on improving the design and analysis of earthquake-resistant steel-braced frames", Oakland, CA, USA: EERI.
- [4] Merritt, S., Uang, C.-M. and Benzoni, G. (2003), "Subassembly testing of corebrace buckling-restrained braces", Final report to CoreBrace, LLC, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego.
- [5] Sato, A., Chishima, E., Soma, K. and Mori, T. (1982), "Shape memory effect in $\gamma \rightleftharpoons \epsilon$ transformation in Fe-30Mn-1Si alloy single crystals", *Acta Metallurgica*, Vol. 30, pp. 1177-1183.
- [6] Cladera, A., Weber, B., Leinenbach, C., Czaderski, C., Shahverdi, M. and Motavalli, M. (2014), "Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview", *Construction and building materials*, Vol. 63, pp. 281-293.
- [7] Tanaka, Y., Kainuma, R., Omori, T. and Ishida, K. (2015), "Alloy design for Fe-Ni-Co-Al-based superelastic alloys", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 2, pp. S485-S492.
- [8] Omori, T., Ando, K., Okano, M., Xu, X., Tanaka, Y., Ohnuma, I., Kainuma, R. and Ishida, K. (2011), "Superelastic effect in polycrystalline ferrous alloys", *Science*, Vol. 333, pp. 68-71.
- [9] Chowdhury, M.A., Rahmzadeh, A., Moradi, S. and Alam, M.S. (2019), "Feasibility of using reduced length superelastic shape memory alloy strands in post-tensioned steel beam-column connections", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 30, pp. 283-307.
- [10] Dolce, M. and Cardone, D. (2001), "Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension", *International journal of mechanical sciences*, Vol. 43, pp. 2657-2677.
- [11] Dolce, M. and Marnetto, R. (2000), "Passive seismic devices based on shape memory alloys", In *12th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 1-8.
- [12] Valente, C., Cardone, D., Dolce, M. and Pozzo, F.C. (2000), "MANSIDE: Shaking table tests of R/C frames with various passive control systems", In *Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [13] Bruno, S. and Valente, C. (2002), "Comparative response

- [29] Abouali, S., Shahverdi, M., Ghassemieh, M. and Motavalli, M. (2019), "Nonlinear simulation of reinforced concrete beams retrofitted by near-surface mounted iron-based shape memory alloys", *Engineering Structures*, Vol. 187, pp. 133-148.
- [30] Abbass, A., Attarnejad, R. and Ghassemieh, M. (2020), "Seismic assessment of RC bridge columns retrofitted with near-surface mounted shape memory alloy technique", *Materials*, Vol. 13, pp. 1701.
- [31] Dolatabadi, N., Shahverdi, M., Ghassemieh, M. and Motavalli, M. (2020), "RC Structures strengthened by an iron-based shape memory alloy embedded in a shotcrete layer-Nonlinear finite element modeling", *Materials*, Vol. 13, pp. 5504.
- [32] Mahin, S., Uriz, P., Aiken, I., Field, C. and Ko, E. (2004), "Seismic performance of buckling restrained braced frame systems", In 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- [33] SeismoSoft, (2018), "SeismoStruct-a computer program for static and dynamic non-linear analysis of framed structures".

