

عملکرد سازه‌ی مجهز به جداساز لرزه‌ی طبقه و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با پایه‌ی آهنی

مآنده اسعدی (کارشناس ارشد)

مهدی قاسمیه* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۴۰۰)
دوره‌ی ۲ - ۳۷، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۶۸-۶۱ (پژوهشی)

در سال‌های اخیر، در ساختمان‌های خاص به طراحی جداسازهای لرزه‌ی در طبقات بالاتر از پایه که جداساز طبقه نامیده می‌شود، بسیار توجه شده است. با وجود این، جداسازهای لرزه‌ی با محدودیت‌هایی، از قبیل: ناپایداری در تغییرشکل‌های بزرگ، جابه‌جایی پسماند و غیره پس از زلزله‌های شدید هستند. استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با توجه به خواص منحصر به فردی که دارند، به عنوان راه حلی مناسب برای غلبه بر این نواقص در نظر گرفته شده‌اند. هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر ترکیب آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و جداسازها در سازه و تأثیر آن‌ها در کاهش پاسخ لرزه‌ی سازه بوده است. به همین منظور، سازه‌ی چندطبقه‌ی فولادی همراه با ترکیب جداساز لرزه‌ی طبقه و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با پایه‌ی آهنی و با استفاده از نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی و ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده نشان داده است که استفاده از آلیاژهای مذکور در جداسازهای لرزه‌ی طبقه باعث کاهش جابه‌جایی در تراز جداساز می‌شود و می‌توان آن را به عنوان سامانه‌ی مطابقت در مهار سازه‌ها در نظر گرفت.

واژگان کلیدی: جداساز طبقه، آلیاژ حافظه‌دار شکلی، جابه‌جایی ماندگار، استهلاک انرژی، مقاوم‌سازی لرزه‌ی.

maede.asadi@alumni.ut.ac.ir
m.hassemieh@ut.ac.ir

۱. مقدمه

سامانه‌های مهارکنترل غیرفعال و جداسازهای لرزه‌ی با وجود مزایای بسیار زیادی که دارند، محدودیت‌هایی، از قبیل: ناپایداری در تغییرشکل‌های بزرگ، جابه‌جایی پسماند، نگهداری، پیچیدگی نصب، نیاز به تعویض و اعمال تغییر در هندسه‌ی سازه پس از وقوع زلزله دارند. در سال‌های اخیر، با توجه به رفتار منحصر به فرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در کرنش‌های بالا، مطالعات زیادی به منظور به‌کارگیری آلیاژهای اخیر در راستای غلبه بر محدودیت‌های ذکر شده صورت گرفته است که استفاده از آن‌ها در سامانه‌های جداساز لرزه‌ی باعث کاهش صدمات و خسارت‌های ناشی از زلزله بر روی سازه‌ها و رفع محدودیت‌های آن‌ها شده است.^[۱] آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به دلیل تغییر بین فازهای آلیاژ، خصوصیات مکانیکی ویژه و ظرفیت کرنشی بالایی دارند و در برابر خوردگی و خستگی، مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. همچنین هیستریزس غیرخطی آن به علت اثر فوق‌کشسانی که برای محدوده‌ی خاصی از دما به شکل پرچم است، از تغییرشکل پسماند جلوگیری می‌کند، بخش عمده‌ی انرژی را مستهلک می‌کند، و نیروی انتقالی بیشینه را محدود می‌کند. سامانه‌ی جداساز لرزه‌ی بر پایه‌ی اثر فوق‌کشسانی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، برای محدود کردن نیروی زلزله‌ی وارد شده و فراهم کردن خاصیت میرایی بیشتر همراه با خاصیت بازگردانی ارائه شده است، تا خسارت‌های ناشی از زلزله را کاهش دهد یا از بین ببرد.^[۲]

کنترل پاسخ سازه‌ها در مقابل تحریکات لرزه‌ی، همواره یکی از چالش‌های مهندسی عمران بوده است؛ بنابراین یافتن شیوه‌های جدید برای حفظ ایمنی و قابلیت اعتماد سازه‌ها تحت اثر این قبیل نیروها، اهمیت فوق‌العاده‌ی دارد. بر همین مبنای طی سال‌های اخیر، کاهش پاسخ سازه‌ی ناشی از آثار نیروهای دینامیکی با استفاده از سامانه‌های کنترل سازه‌ها، توجه پژوهشگران بسیاری را به خود جلب کرده و مطالعات گسترده و رو به رشدی را به دنبال داشته است.

امروزه استفاده از جداسازهای لرزه‌ی، یکی از مؤثرترین رویکردهای کاهش پاسخ لرزه‌ی هستند که در طراحی ساختمان‌ها و پل‌ها در مناطق لرزه‌خیز استفاده می‌شوند. سیستم جداساز لرزه‌ی پایه، متداول‌ترین نوع جداسازهای لرزه‌ی است که در پی ساختمان قرار می‌گیرد و در هنگام وقوع زلزله با جدا شدن ساختمان از زمین، باعث کاهش پاسخ لرزه‌ی آن می‌شود. اما گاهی ممکن است استفاده از جداسازهای لرزه‌ی ذکر شده در برخی ساختمان‌ها با مشکلات بسیاری مواجه شود. برای رفع محدودیت‌های اخیر، سامانه‌ی نوین با عنوان جداساز لرزه‌ی طبقه که در آن جداساز بتواند در طبقات ساختمان نصب شود، ابداع شده است تا پاسخ‌های سازه‌ی ناشی از تحریکات لرزه‌ی را کاهش دهد.^[۱]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۱/۳/۱۳۹۹، اصلاحیه ۱۶/۷/۱۳۹۹، پذیرش ۱۶/۹/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J30.2020.55808.2780

نخستین بار اولاندر (۱۹۳۲)،^[۲] دانشمند سوئدی، رفتار فوق‌کشسانی ماده‌ی

AuCd را کشف کرد. گرینبرگ و مورادیان^۱ (۱۹۳۸)،^[۵] تشکیل و ناپدید شدن فاز مارتزیت را با کاهش و افزایش دمای آلیاژ Cu-Zn مشاهده کردند. پدیده‌ی اصلی اثر حافظه پذیری که با رفتار ترموکشسان فاز مارتزیتی کنترل می‌شود، به طور گسترده‌یی در یک دهه بعد توسط کردجامو (۱۹۴۹) و نیز توسط چانگ و ریذ^۲ (۱۹۵۱)،^[۶] گزارش شد. در سال ۱۹۶۷، نیز اثر حافظه‌دار شکلی در آلیاژ نیکل - تیتانیوم با درصد اتمی مساوی توسط بوهرلر^۳ کشف و با نام نیتینول مشهور شد.^[۷] از اوایل سال ۱۹۸۰ در بین پژوهشگران و مهندسان، به استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار توجه شده و در زمینه‌های وسیعی استفاده شده‌اند و کشف مزایای اصلی و علمی آن‌ها در حال افزایش است. در ابتدا، کاربردهای مواد حافظه‌دار شکلی به کاربردهای پزشکی محدود بود، اما امروزه مواد مذکور در زمینه‌های بسیار گسترده‌یی، مانند: هوا و فضا، صنعت، وسایل تجاری و... استفاده می‌شوند. پژوهشگران در سال‌های اخیر به بررسی امکان استفاده از مواد حافظه‌دار شکلی در کاربردهای مهندسی سازه و زلزله نیز پرداخته‌اند. این مواد در زمینه‌ی مهندسی عمران در کاربردهای متنوعی، مانند: مهاربندهای مستهلک‌کننده، نگهدارنده‌های پل، اتصال‌های ویژه و جداگرهای پی کاربرد دارند.

اولین پژوهش در زمینه‌ی مهندسی عمران و زلزله به مطالعه‌ی گراسر و کوزارلی^۴ (۱۹۹۱)،^[۸] بر می‌گردد که امکان استفاده از ماده‌ی نیتینول^۵ را به‌عنوان یک میراگر زلزله پیشنهاد دادند. ایشان اثر بسامد و تاریخچه‌ی بارگذاری را در میزان استهلاک انرژی سیم‌های نیتینول بررسی کردند و یک مدل رفتاری یک‌بعدی نیز برای مدل‌سازی رفتار شبه‌کشسان آن‌ها پیش‌بینی کردند. دلچه^۶ و همکاران (۲۰۰۰)،^[۹] کاربرد هم‌زمان حالت‌های مختلف مواد حافظه‌دار شکلی را به‌عنوان میراگرهای ویژه در سازه مطالعه و میراگرهای متفاوت بازگرداننده و مستهلک‌کننده‌ی ساخته شده از حالت‌های مختلف مواد حافظه‌دار شکلی را پیشنهاد کردند که به کمک نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که با ترکیب آن‌ها می‌توان به رفتار مناسبی در برابر بارگذاری‌های زلزله دست یافت. همچنین ایشان امکان استفاده از سیم‌های نیتینول برای جداساز ارتعاشی را بررسی کردند و دریافتند که سیستم جداساز مجهز به سیم‌هایی با آلیاژهای حافظه‌دار بر روی کنترل سیستم‌های غیرفعال قابلیت اجرایی دارد.

واپلده^۷ و همکاران (۲۰۰۰)،^[۱۰] سیستم جداساز پایه با میله‌های فوق‌کشسان مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار را برای پل‌های بزرگراهی مرتفع بررسی کردند و دریافتند که سیستم اخیر در برابر پاسخ‌های متغیر و تحریکات وابسته، میرایی مناسبی از خود نشان می‌دهد. همچنین ایشان اثر انواع تحریکات ناشی از زلزله را در سیستم اخیر بررسی و رفتار آلیاژهای مذکور در حالت‌های مذکور و نتایج مرتبط را با یکدیگر مقایسه کردند. به‌طورکلی مقایسه‌ها نشان داد که در سیستم‌های جداساز حافظه‌دار، انرژی که باعث آسیب در پل‌ها می‌شود، از سیستم‌های رایج معمولی کوچک‌تر است.

خان و لاگوداس^۸ (۲۰۰۲)،^[۱۱] استفاده از فنر یا آلیاژهای حافظه‌دار را در جداسازی سیستم یک درجه آزادی تحت تحریکات میز لرزه به‌صورت تحلیلی آزمایش کردند و دریافتند که رفتار سیستم جداساز ارتعاشی به تغییرمکان نسبی فنرهای حافظه‌دار وابسته است. به عبارتی، تغییرمکان‌های کوچک باعث تغییر شکل مارتزیتی تحت تنش نمی‌شوند و زمانی فنرهای حافظه‌دار بهترین تأثیر را در سیستم جداساز دارند که بسامد سیستم نزدیک بسامد تشدید و ارتعاش سیستم باشد. همچنین دروجه و دلمونت^۹ (۲۰۰۲)^[۱۲] امکان استفاده از نگهدارنده‌های حافظه‌دار شکلی را برای کاهش پاسخ پدیده‌ی یک پل چنددهانه با پایه‌های ساده بررسی کردند. ابوالمعالی و همکاران (۲۰۰۶)،^[۱۳] نیز مشخصات استهلاک انرژی اتصال‌های T شکل با بیج‌های فولادی و حافظه‌دار شکلی را بررسی کردند. چوی^{۱۰} و همکاران

(۲۰۰۶)،^[۱۴] هم با مجهز ساختن تکیه‌گاه‌های الاستومری با سیم‌های SMA کاربرد جدیدی از آلیاژ مذکور را برای رفع کمبودهای جداسازهای هسته‌ی سربی متداول در تکیه‌گاه‌های پل ارائه کردند و نشان دادند که جداساز لاستیکی حافظه‌دار شکلی، تغییرمکان نسبی عرشه و پایه را به‌خصوص در تحریک‌های شدید به طور مؤثری محدود می‌کند. اوزبولت و هرولباس^{۱۱} (۲۰۱۰)،^[۱۵] کارایی سیستم جداساز پایه‌ی لاستیکی با SMA را برای محافظت از پل‌ها در مقابل زلزله‌های میدان نزدیک ارائه کردند و دریافتند که جداساز لغزشی SMA نسبت به جداساز لاستیکی SMA خواص مطلوب‌تری دارد. دزفولی و الم (۲۰۱۳)،^[۱۶] نیز دو آرایش متفاوت از تکیه‌گاه الاستومری هوشمند با استفاده از سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی ارائه کردند. در مطالعه‌ی حاضر، ۶ نوع متفاوت از سیم‌های SMA به‌کار برده شد و نتایج نشان داد که نمونه‌ی آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه‌ی آهن معروف به Fe SMA با کرنش فوق‌کشسان ۱۳/۵٪، بهترین گزینه برای استفاده در تکیه‌گاه لاستیکی مجهز به SMA تحت تحریکات بالاست.

۲. هدف و روش پژوهش

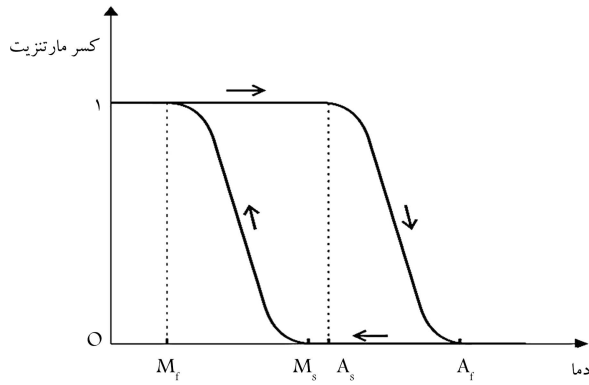
هدف از انجام پژوهش حاضر، ترکیب جداسازهای لرزه‌یی طبقه با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به منظور بررسی اثر آلیاژهای مذکور در عملکرد جداسازهای طبقه و مقایسه‌ی رفتار لرزه‌یی سازه‌ی مجهز به این سامانه با سازه‌ی مجهز به جداساز طبقه بدون وجود آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بوده است. به همین منظور، یک سازه‌ی مجهز به جداساز طبقه و یک سازه‌ی مجهز به جداساز طبقه و آلیاژ حافظه‌دار شکلی در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی و عملکرد آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

با توجه به اینکه آلیاژهای حافظه‌دار شکلی از نوع فلزات بسیار گران هستند و این مسئله می‌تواند عامل بازدارنده‌یی در استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی شود، در مطالعه‌ی حاضر سعی شده است که از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با پایه‌ی آهنی که در مقایسه با سایر آلیاژهای حافظه‌دار ارزان‌تر و بیشتر در دسترس هستند، در سیستم جداسازهای طبقه‌یی استفاده شود.

۳. جداساز لرزه‌یی طبقه

ساختمان‌های با جداساز پایه، یک تکنولوژی شناخته شده، مؤثر، اقتصادی و در دسترس برای مقاومت در برابر زلزله است که در طراحی ساختمان‌ها و پل‌ها در مناطق لرزه‌خیز در سراسر جهان استفاده می‌شود و اثر آن در چند زلزله‌ی گذشته شناخته و مشخص شده است.

براساس ایده‌ی جداسازی پایه، پاسخ سازه در حین زمین‌لرزه به وسیله‌ی ایجاد یک تراز انعطاف‌پذیر در پایه‌ی آن از ارتعاش‌های زمین جدا و در نتیجه از نیازهای لرزه‌یی آن به مقدار زیادی کاسته می‌شود و سازه‌ی جداسازی شده، رفتار لرزه‌یی بهتری نسبت به سازه با پایه‌ی ثابت خواهد داشت. اما به‌دلیل برخی محدودیت‌ها در عملکرد و موقعیت جداسازهای لرزه‌یی پایه، بسیاری از ساختمان‌ها برای استفاده از جداساز پایه مناسب نیستند، به ویژه در مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود که نصب جداسازها در محل پی بسیار مشکل و گاهی غیرممکن است و علاوه بر هزینه‌ی زیاد، نیاز به حفاری و انتقال موقت بار است. از این رو برای ساختمان‌های موجود، لازم است تراز جداساز در طبقات میانی ساختمان نصب شود که علاوه بر هزینه‌ی کمتر، ساختمان در حین مقاوم‌سازی می‌تواند به سرویس‌دهی خود ادامه دهد.^[۱۷]



شکل ۱. نسبت مارتنزیت در برابر دما در حالت بدون تنش.

اعمال دما هستند (رفتار حافظه‌ی شکلی).^[۲۲] علاوه بر این، قابلیت بازگرداندنگی در آلیاژهای حافظه‌دار شکلی موجب می‌شود که سازه در طول زلزله به دفعات به وضعیت اولیه‌ی خود بازگردد که این امر مانع از تجمع کرنش‌ها در سازه می‌شود و در نتیجه سازه پس از زلزله بدون به جای گذاشتن تغییرشکل‌های ماندگار، به وضعیت اولیه‌ی خود باز می‌گردد. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در دو فاز کریستالی به نام‌های آستنیت و مارتنزیت موجود هستند. حالت آستنیت، حالتی است اصلی با تقارن بالا، که در دماهای بالا و تنش‌های پایین، پایدار است؛ حال آنکه حالت مارتنزیت، حالت محصول و با تقارن کمتر است که در دماهای پایین و تنش‌های بالا پایدار هستند. لذا با اعمال بارگذاری‌های حرارتی و یا مکانیکی، دو فاز مذکور می‌توانند به یکدیگر تبدیل شوند.^[۲۳] دمای در حالت بدون تنش مواد حافظه‌دار شکلی، چهار دمای شاخص دارد، که A_f و A_s دمای آغاز و پایان فاز آستنیت و M_f و M_s دمای آغاز و پایان فاز مارتنزیت است. اگر دمای محیط بالاتر از A_f باشد، ماده در فاز آستنیت قرار دارد و رفتار فوق کشسان از خود نشان می‌دهد و اگر دمای محیط کمتر از M_f باشد، ماده در حالت مارتنزیت قرار دارد و رفتار حافظه‌ی شکلی از خود بروز خواهد داد. زمانی که ماده تحت حالت بدون تنش قرار داشته باشد و تحت بار گرمایی قرار گیرد، تا زمانی که دمای ماده به A_s نرسیده است، به صورت مارتنزیت است؛ زمانی که به A_s می‌رسد، از حالت مارتنزیت به آستنیت تبدیل می‌شود، تا به دمای بالاتر از A_s و به سمت A_f برود. سرانجام زمانی که به دمای A_f می‌رسد، تبدیل فاز پایان می‌یابد و ماده به حالت کاملاً آستنیت در می‌آید. در تبدیل معکوس، زمانی که دمای ماده تا دمای زیر M_s کاهش یابد، در حالت کاملاً آستنیت قرار دارد. وقتی به دمای M_s می‌رسد، کریستال‌های آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شوند و زمانی که دمای ماده به M_f می‌رسد، تبدیل از آستنیت به مارتنزیت کامل می‌شود. در تبدیل معکوس، در دمای بین M_s و M_f ، ماده به صورت ترکیبی از آستنیت و مارتنزیت است.^[۲۴] در شکل ۱، نحوه‌ی تغییر رفتار ذکر شده مشاهده می‌شود.

۵. مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSees

برای مدل‌سازی سازه‌ی مینا از قاب ۳ طبقه‌ی SAC استفاده شده است که به عنوان سازه‌ی بشمارک و مینا توسط پژوهشگران بسیاری بررسی و مطالعه شده است. مدل مینای اخیر، توسط اهتری و همکارانش (۲۰۰۴)، برای مسائل مهار سازه‌های غیرخطی زیر بارهای لرزه‌ی ارزیابی شده است که مینای پژوهش حاضر نیز قرار گرفته است.^[۲۵] سازه‌ی ۳ طبقه‌ی SAC به ارتفاع ۱۲ متر، ۴ دهانه‌ی ۹ متری در راستای شمال - جنوب و ۶ دهانه به همین اندازه در راستای شرق - غرب دارد که

به قرار دادن جداساز در طبقات بالاتر از پایه که جداساز طبقه نامیده می‌شود، برای دستیابی به مزایای جداسازی لرزه‌ی در ساخت ساختمان‌های خاص بسیار توجه شده است. در ساختمان‌های با جداساز پایه، ساختمان روسازه باید منظم باشد و تراز جداساز باید بر روی پی ساختمان قرار گیرد؛ در نتیجه به دلیل نیازهای معماری، برخی از محدودیت‌های اخیر در پروژه‌های کاربردی باید از بین بروند.^[۱۸]

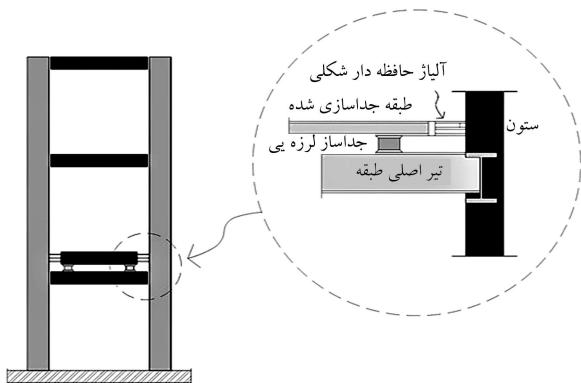
علاوه بر قابلیت رفع نگرانی‌های معماری مربوط به زیباشناسی و عملکردی، طراحی جداساز طبقه، به عنوان جایگزینی برای طراحی جداساز پایه، می‌تواند امکان ساخت و ساز به‌ویژه در مناطق پرجمعیت شهری که نصب سیستم جداساز در پایه‌ی ساختمان بسیار مشکل است، را افزایش دهد. علاوه بر این، زهکشی، تهویه و نگهداری منظم جداساز در تراز زیرزمین بسیار پیچیده‌تر از موارد اشاره شده در تراز جداساز طبقه است و باید توجه ویژه‌ی به آن شود.^[۱۹]

همچنین می‌توان از مزایای خاص جداسازهای طبقه در ساختمان‌هایی که در ارتفاع، نامنظم و یا منقطع هستند و ساختمان‌هایی که برای آن‌ها، اضافه شدن طبقه‌های بیشتر پیش‌بینی و برنامه‌ریزی شده است، استفاده کرد.^[۲۰] علاوه بر این، هنگامی که جداساز پایه با مشکلاتی از قبیل ساخت در کنار دریا روبه‌رو است، می‌توان از مزایای جداسازهای طبقه برای بهبود عملکرد ساختمان‌ها استفاده کرد. از آنجایی که محل قرارگیری تراز جداساز از سطح زمین بالاتر رفته است، سیستم جداساز طبقه می‌تواند از خوردگی جداسازهای لاستیکی ساختمان‌های جداشده‌ی کنار دریا توسط آب دریا جلوگیری کند.^[۲۱]

در جداسازهای لرزه‌ی طبقه با قرارگیری تراز جداساز در طبقات میانی ساختمان، کل ساختمان به دو قسمت روسازه و زیرسازه تقسیم می‌شود و خصوصیات دینامیکی ساختمان تغییر می‌کند. جداساز طبقه نه فقط پاسخ لرزه‌ی روسازه را کاهش می‌دهد، بلکه پاسخ لرزه‌ی کل ساختمان را نیز کاهش می‌دهد؛ همان‌طور که پاسخ لرزه‌ی زیرسازه را کاهش می‌دهد و یا افزایش نمی‌دهد.

۴. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، مواد نوبینی هستند که رفتارهای شگفت‌انگیزی از خود نشان می‌دهند و به دلیل رفتار منحصر به فردی که دارند، در چند دهه‌ی اخیر در صنایع مختلف، مانند: هوافضا، پزشکی و تجاری کاربرد داشته‌اند. در دهه‌ی اخیر، پژوهشگران در رشته‌ی مهندسی سازه نیز به فکر استفاده از قابلیت‌های ویژه‌ی مواد مذکور در سازه‌های عمرانی افتاده‌اند. در مطالعات انجام شده، امکان استفاده از مواد حافظه‌دار شکلی به عنوان مهاربند، میراگر، جداساز لرزه‌ی و یا عضو اتصالی برای کنترل غیرفعال سازه‌ها در برابر زلزله بررسی شده است. از جمله خواص و ویژگی‌های آلیاژهای حافظه‌دار شکلی می‌توان به مقاومت بالا در برابر خوردگی، قابلیت استهلاک انرژی مناسب، پایداری منحنی هیستریزس طی چرخه‌های بارگذاری (مقاومت بالا در برابر خستگی)، افزایش سختی در کرنش‌های بزرگ و عدم نیاز به تعویض پس از زلزله را نام برد که باعث برتری و کاربرد گسترده‌ی آلیاژهای حافظه‌دار در طراحی لرزه‌ی سازه‌ها و مقاوم‌سازی شده است. با وجود اینکه خواص ذکر شده جایگاه مهمی در رفتار مکانیکی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دارند، اما علت نام‌گذاری آن‌ها به حافظه‌دار شکلی به سبب رفتار بسیار ویژه‌ی آن‌ها بوده است که قابلیت بازگرداندنگی است. خصوصیت اصلی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، رفتار فوق کشسان و حافظه‌ی شکلی آن‌هاست. بدین معنی که قادر به تحمل کرنش‌های بزرگ تا حدود ۱۰٪ بدون ایجاد کرنش پسماند (رفتار فوق کشسان) و نیز حذف کرنش‌های پسماند به کمک



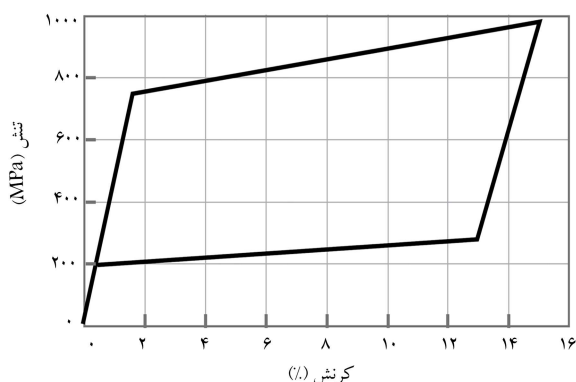
شکل ۴. محل قرارگیری جداسازها در طبقات ساختمان.

جدول ۱. مشخصات هندسی جداساز NRB.

ضخامت لاستیک (mm)	ارتفاع (mm)	قطر خارجی (mm)	
۱۸۰	۲۶۰	۸۵۰	ستون‌های جانبی
۱۸۰	۲۹۰	۱۰۰۰	ستون‌های میانی

جدول ۲. مشخصات مکانیکی جداساز NRB.

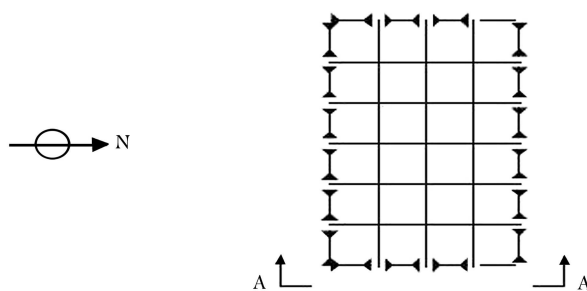
نسبت میرایی	سختی جانبی معادل (kN/mm)	
٪۵	۱/۹۴	ستون‌های جانبی
٪۵	۳/۸۹	ستون‌های میانی



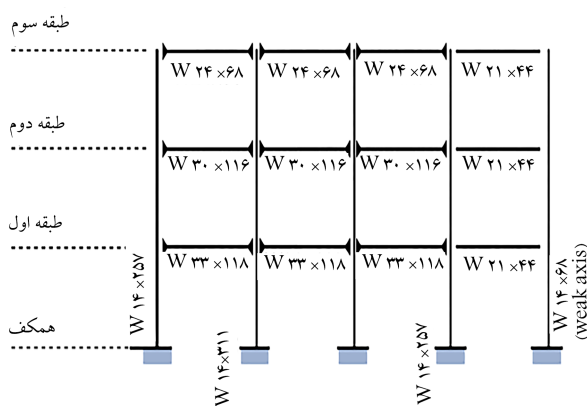
شکل ۵. منحنی تنش - کرنش آلیاژ Fe-SMA در دمای اتاق. [۲۷]

جدول ۳. مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر پایه‌ی آهن.

مقدار (MPa)	خصوصیات مکانیکی
۴۷۱۰۰	مدول کشسانی
۷۵۰	تنش شروع آستنیت به مارتنزیت
۹۹۰	تنش پایانی آستنیت به مارتنزیت
۲۸۵	تنش شروع مارتنزیت به آستنیت
۱۹۵	تنش پایانی مارتنزیت به آستنیت
٪۱۵	دامنه کرنش برای فوق پلاستیکی پایدار



شکل ۲. پلان ساختمان. [۲۵]



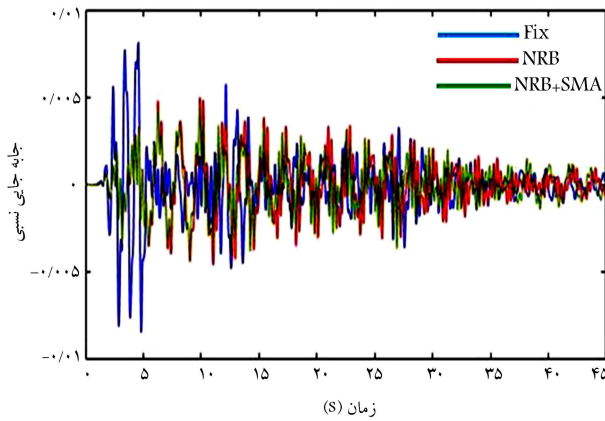
شکل ۳. مقطع نمای ساختمان. [۲۵]

پلان و نمای آن در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود. سیستم باربر جانبی، شامل: قاب خمشی فولادی پیرامونی و قاب ساده در دو انتهای جنوبی قاب غربی - شرقی است و در دهانه‌های میانی، قاب‌های ساده با اتصال‌های مفصلی و سقف‌های کامپوزیت به باربری ثقلی کمک خواهند کرد. مطابق آنچه در شکل ۲ مشخص است، علامت مثبت پُر شده، بیانگر اتصال‌های خمشی و اتصال‌های بدون علامت، از نوع مفصلی هستند.

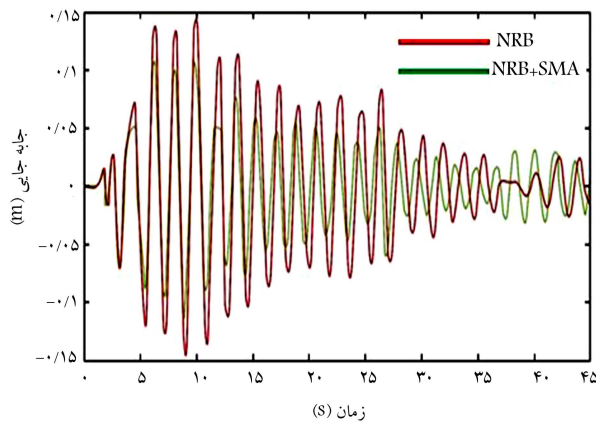
در پژوهش حاضر، برای جداساز لرزه‌یی طبقه از جداساز لاستیکی طبیعی با ورقه‌ی فولادی و میرایی کم (NRB) استفاده شده است که در طبقه‌ی اول سازه قرار گرفته است. محل قرارگیری و همچنین جزئیات جداسازهای لرزه‌یی طبقه در شکل ۴ مشاهده می‌شود، که مطابق آن سیستم جداساز طبقه‌یی، کاملاً سیستم قابی و تیر طبقه را از جداگر با به کارگیری جداگر و سیم‌های حافظه‌دار مجزا کرده است. مشخصات هندسی و مکانیکی جداساز NRB در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

در پژوهش حاضر، از آلیاژ حافظه‌دار شکلی با پایه‌ی آهن معروف به Fe-SMA استفاده شده است، که از آلیاژهای آهن، نیکل، مس، آلومینیوم، تانتالوم و بور تشکیل شده است. آلیاژ Fe-SMA محدوده‌ی کرنش فوق کشسان حدود ٪۱۵ در دمای اتاق و مقاومت کششی بالاتر از ۱ گیگاپاسکال دارد. به همین دلیل ظرفیت اتلاف انرژی بسیار بالایی دارد و قابلیت بازگشت‌پذیری زیادی در بارگذاری و باربرداری از خود نشان می‌دهد. در نتیجه، آلیاژ Fe-SMA پتانسیل بالایی در فراهم کردن میرایی بالا دارد. [۲۶] مدل‌سازی آلیاژ Fe-SMA در نرم‌افزار، مطابق مشخصات رفتاری استفاده‌شده توسط دزفولی و الم (۲۰۱۳)، [۲۷] مطابق شکل ۵ صورت گرفته و مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است.

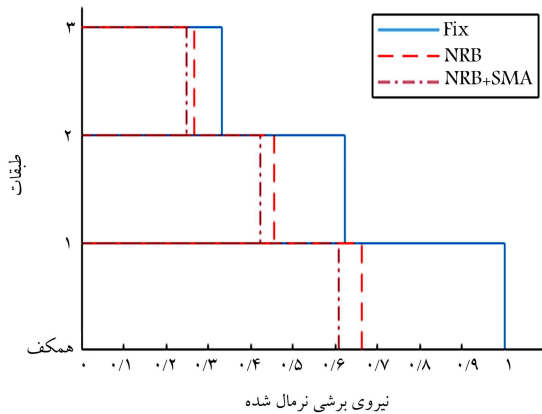
ویژگی‌های مدل‌سازی در شکل ۶ مشاهده می‌شود. قسمت اصلی جداکننده



شکل ۸. نمودار تاریخیچه‌ی زمانی جابه‌جایی نسبی بام سازی ۳ طبقه تحت زلزله‌ی السنترو.

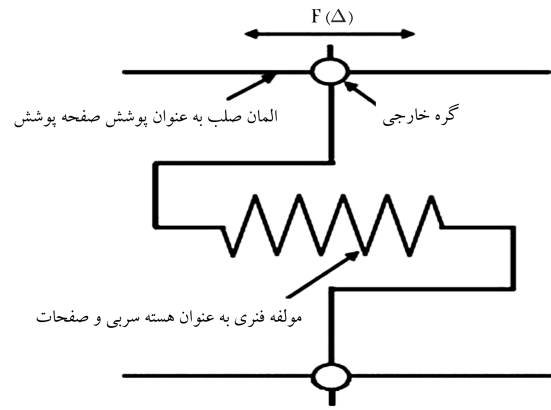


شکل ۹. نمودار تاریخیچه‌ی زمانی تغییرمکان بام سازی ۳ طبقه تحت زلزله‌ی السنترو.

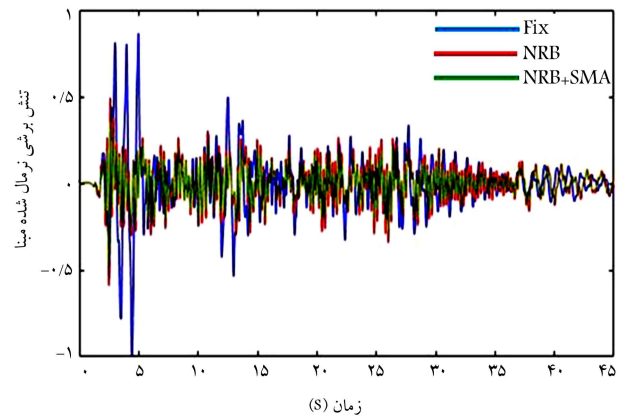


شکل ۱۰. مقایسه‌ی بیشینه‌ی برش در طبقات.

برای درک بهتر رفتار سازی ۳ طبقه تحت سامانه‌ی جداساز لرزه‌ی طبقه در ترکیب با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و تأثیر آن‌ها، پارامترهای نیروی برشی، جابه‌جایی، شتاب، و جابه‌جایی نسبی در طبقات بررسی شده‌اند (شکل‌های ۱۰ الی ۱۳). همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، سیستم موردنظر در کاهش برش طبقات و به‌خصوص برش پایه‌ی عملکرد بسیار خوبی داشته است. مطابق نمودار اخیر، جداساز لرزه‌ی طبقه به تنهایی باعث کاهش ۳۳ درصدی نیروی زلزله نسبت به



شکل ۶. مدل سازی جداساز در نرم افزار.



شکل ۷. نمودار تاریخیچه‌ی زمانی برش پایه‌ی سازی ۳ طبقه تحت زلزله‌ی السنترو.

به عنوان مثال، لاستیک الاستومری و هسته‌ی سرب به عنوان فنر به صورت مدل غیرخطی با طول صفر و صفحه‌ی پوشش به عنوان عنصر سخت و سخت مدل شده‌اند. رفتار جداکننده می‌تواند به صورت مدل با سختی دوخطی و استفاده از سه پارامتر اصلی، مانند: سختی اولیه، نیروی تسلیم و سختی پس از جاری شدن، شبیه‌سازی شود.

به منظور بررسی و ارزیابی اثر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در جداسازهای لرزه‌ی طبقه، سازی موردنظر یک بار در حالت عادی بدون هیچ‌گونه سیستم جداساز (FIX) و بار دیگر تحت اثر جداساز (NRB) بدون به‌کارگیری آلیاژ و نهایتاً با به‌کارگیری جداساز و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (NRB+SMA) مدل‌سازی شده است. سپس تحت تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی ارزیابی شده است. برای تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی نیز از شتاب‌نگاشت مربوط به زلزله‌ی السنترو استفاده شده است.

۶. تحلیل و ارزیابی نتایج

برای بررسی اثر جداساز لرزه‌ی و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سازی، نمودارهای تاریخیچه‌ی زمانی برش پایه‌ی سازی، جابه‌جایی نسبی و تغییرمکان بام برای آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله‌ی السنترو در شکل‌های ۷ الی ۹ مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، وجود جداساز لرزه‌ی طبقه، خود به تنهایی باعث کاهش قابل توجه مقادیر برش پایه و جابه‌جایی نسبی طبقات می‌شود، اما آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نیز در کاهش بیشتر مقادیر برش پایه و جابه‌جایی نسبی طبقات نقش به‌سزایی دارند.

لرزه‌یی طبقه باعث می‌شوند که جابه‌جایی اخیر نسبت به جداسازهای معمولی کاهش یابد و در واقع جابه‌جایی‌ها نسبت به سازه‌ی بدون جداساز کمتر افزایش یابند. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که آلیاژ حافظه‌دار در جداساز NRB تغییرمکان سازه در بام را ۲۷٪ کاهش داده است، به طوری که جابه‌جایی بام را از ۴۵ سانتی‌متر در حالت جداساز معمولی به ۳۳ سانتی‌متر رسانده است.

مطابق شکل ۱۲، نیز شتاب در تراز جداساز به‌طور ناگهانی تغییر کرده است. پاسخ شتاب سازه در زیر تراز جداساز بسیار بیشتر از آن در طبقات بالای تراز جداساز بوده است. جداساز طبقه باعث کاهش شتاب در طبقات بالایی آن نسبت به سازه‌ی بدون جداساز شده است. همچنین مطابق شکل ۱۱، بیشترین مقدار شتاب در تراز جداساز اتفاق افتاده است، که وجود آلیاژهای حافظه‌دار شکلی باعث کاهش شتاب مذکور شده است. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در جداساز NRB شتاب تراز جداساز را ۸٪ نسبت به جداساز معمولی کاهش داده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، جداساز طبقه باعث تمرکز جابه‌جایی در تراز جداساز و در نتیجه افزایش جابه‌جایی نسبی در تراز جداساز نسبت به سازه‌ی بدون جداساز شده است؛ اما در سایر طبقات به دلیل حرکت صلب‌گونه‌ی سازه، جابه‌جایی نسبی بسیار کاهش یافته است. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی موجب کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات به‌خصوص در تراز جداساز شده و عملکرد مطلوبی داشته‌اند. مطابق شکل ۱۳، نیز آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در جداساز NRB جابه‌جایی نسبی در تراز جداساز را ۲۸٪ نسبت به جداساز معمولی کاهش داده‌اند.

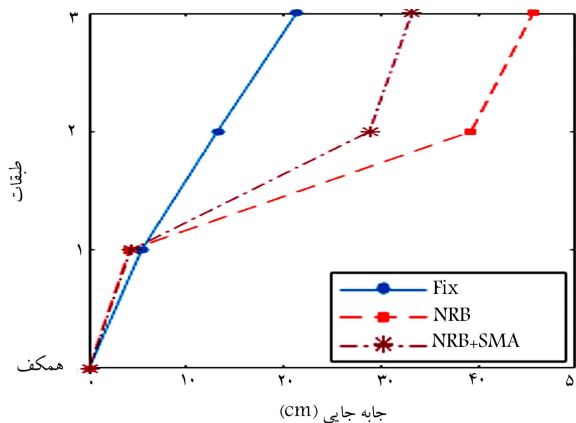
۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با پایه‌ی آهنی در جداسازهای لرزه‌یی طبقه بررسی شده است. برای ارزیابی و بررسی نتایج، سازه‌ی ۳ طبقه‌ی فولادی مبنا یک بار تحت اثر جداسازهای لرزه‌یی طبقه بدون به‌کارگیری آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و بار دیگر با به‌کارگیری آلیاژهای حافظه‌دار مدل‌سازی شده و تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی قرار گرفته است. سپس نتایج هر دو حالت مقایسه شده و این نتایج به‌دست آمده است:

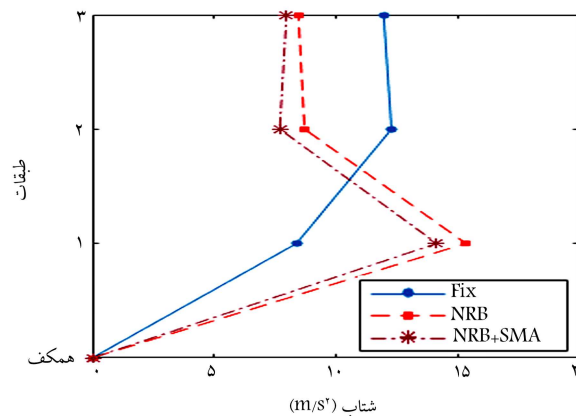
۱. به‌طور کلی جداساز لرزه‌یی در طبقه باعث کاهش نیروی برشی در طبقات و به‌خصوص برش پایه می‌شود؛ اما وجود آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در کاهش بیشتر نتایج اخیر، نقش به‌سزایی دارند. به طوری که آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در جداساز NRB، برش پایه را ۸٪ نسبت به جداساز بدون آلیاژ کاهش داده‌اند.

۲. مقادیر بیشینه تغییرمکان در طبقات بالایی تراز جداساز نسبت به سازه‌ی بدون جداساز افزایش و در طبقات پایینی آن کاهش می‌یابد، اما طبقات بالایی به‌صورت یک جسم صلب حرکت می‌کنند. وجود آلیاژهای حافظه‌دار شکلی باعث می‌شود که جابه‌جایی اخیر نسبت به سازه‌ی با جداساز معمولی کاهش قابل توجه و عملکرد بسیار خوبی داشته باشد. در پژوهش حاضر، وجود آلیاژ حافظه‌دار شکلی باعث شده است جابه‌جایی بام از ۴۵ سانتی‌متر در حالت جداساز معمولی به ۳۳ سانتی‌متر کاهش پیدا کند.

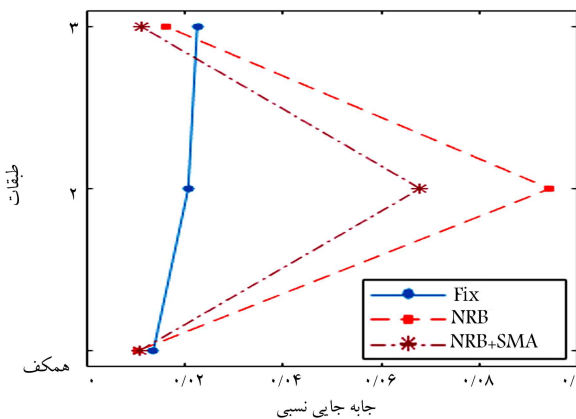
۳. جداساز لرزه‌یی طبقه، شتاب را در طبقه‌ی جداساز بسیار افزایش می‌دهد؛ لیکن باعث کاهش شتاب در طبقات بالایی آن می‌شود. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در کاهش شتاب طبقه‌ی جداساز نسبت به سازه‌ی با جداساز معمولی عملکرد خوبی دارند و در واقع باعث می‌شوند شتاب در طبقه‌ی جداساز



شکل ۱۱. مقایسه‌ی بیشینه‌ی جابه‌جایی طبقات.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی بیشینه‌ی شتاب طبقات.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی در طبقات.

سازه‌ی بدون جداساز شده است. وجود آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نیز خود باعث کاهش بیشتر برش طبقات نسبت به سازه‌ی بدون جداساز شده‌اند، به طوری که آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در جداساز NRB، برش پایه را ۸٪ نسبت به جداساز بدون آلیاژ کاهش داده‌اند.

مطابق شکل ۱۱، افزایش انعطاف‌پذیری در سازه با جداساز باعث افزایش جابه‌جایی در طبقات بالای تراز جداساز نسبت به سازه‌ی بدون جداساز شده است؛ اما این جابه‌جایی فقط در تراز جداساز متمرکز است و طبقات بالای تراز جداساز مانند یک جسم صلب جابه‌جا می‌شوند. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در جداسازهای

در تراز جداساز و افزایش ناگهانی تغییرمکان در این طبقه، جابه‌جایی نسبی در آن افزایش می‌یابد. آلیاژهای حافظه‌دار در کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات به‌خصوص تراز جداساز نقش به‌سزایی دارند و عملکرد بسیار مطلوبی دارند. در پژوهش حاضر، وجود آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در جداساز NRB باعث شده است تا جابه‌جایی نسبی در تراز جداساز، ۲۸٪ نسبت به جداساز معمولی کاهش پیدا کند.

نسبت به سازه‌ی بدون جداساز کمتر افزایش یابد. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در جداساز NRB شتاب تراز جداساز را ۸٪ نسبت به جداساز معمولی کاهش داده‌اند.

۴. حرکت صلب‌گونه‌ی طبقات در سازه‌ی مجهز به جداساز لرزه‌ی باعث کاهش قابل توجه جابه‌جایی نسبی بین طبقات می‌شود؛ اما به دلیل تمرکز جابه‌جایی

پانویس‌ها

1. Greninger & Mooradian
2. Chang & Read
3. Buehler
4. Graesser & Cozzarelli
5. Nitinol
6. Dolce
7. Wilde
8. Khan & Lagoudas
9. DesRoches & Delemont
10. Choi
11. Ozbulut & Hurlbausa

منابع (References)

1. Zhou, J., Hu, M., Li, K. and et al. "Mid-story seismic isolation for strengthening of a multi-story building", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, paper 1443, Vancouver, B.C., Canada (2004).
2. Alvandi, S. and Ghassemieh, M. "Application of shape memory alloys in seismic isolation: A Review", *Civil Engineering Infrastructures Journal*, **47**(2), pp. 153-171 (2014).
3. Attanasi, G. "Feasibility assessment of innovative isolation bearing system with shape memory alloys", Master Thesis, School of Advanced Studies, University of Pavia, Italy (2008).
4. Otsuka, K. and Wayman, C.M. "Shape memory materials", Cambridge University Press (1998).
5. Greninger, A.B. and Mooradian, V.G. "Strain transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper-tin alloys", *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, **128**, pp. 337-368 (1938).
6. Chang, L.C. and Read, T.A. "Plastic deformation and diffusionless The gold-cadmium beta phase", *AIME, phase changes in metals - 3*(1), pp. 47-52 (1951).
7. Buehler, W.J. and Wang, F.E. "A summary of recent research on the nitinol alloys and their potential application in ocean engineering", *Journal of Ocean Eng*, **1**(1), pp. 105-120 (1967).
8. Graesser, E.J. and Cozzarelli, F.A. "Shape Memory Alloys as new materials for a seismic isolation", *Journal of Engineering Mechanics*, **117**(11), pp. 2590-2608 (1991).
9. Dolce, M., Cardone, D. and Marnetto, R. "Implementation and Testing of Passive control devices based on shape memory alloys", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**(7), pp. 68-945 (2000).
10. Wilde, K., Gardoni, P. and Fujino, Y. "Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges", *Engineering Structures*, **22**(3), pp. 222-229 (2000).
11. Khan, M.M. and Lagoudas, D. "Modeling of shape memory alloy pseudoelastic spring elements using Preisach model for passive vibration isolation", *Proceedings of SPIE 4693, Smart Structures and Materials: Modeling, Signal Processing, and Control*, 336-347, San Diego, CA (Mar. 17, 2002).
12. DesRoches, R. and Delemont, M. "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys", *Engineering Structures*, **24**(3), PP. 325-332 (2002).
13. Abolmaali, A., Treadway, J., Aswath, P. and et al. "Hysteresis behavior of t-stub connections with superelastic shape memory fasteners", *Journal of Constructional Steel Research*, **62**(8), pp. 831-838 (2006).
14. Choi, E., Nam, T.H., Oh, J.T. and et al. "An isolation bearing for highway bridges using shape memory alloys", *Materials Science And Engineering: A*, **438-440**, pp. 1081-1084 (2006).
15. Ozbulut, O.E. and Hurlbausa, S. "Evaluation of the performance of a sliding-type base isolation system with a Ni-Ti shape memory alloy device considering temperature effects", *Engineering Structures*, **32**(1), pp. 238-349 (2010).
16. Dezfuli, F.H. and Alam, M.Sh. "Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing", *Smart Material and Structures*, **22**(4), pp. 1-17 (2013).
17. Hu, M. and et al., "Earthquake response analysis of a mid-story seismic isolated building", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, paper 1456, Vancouver, B.C., Canada (2004).
18. Huang, X. and et al., "Theoretical and experimental investigation on mid-story seismic isolation structures", *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China (2008).
19. Wang, Sh. and et al., "Dynamic behavior of a building structure tested with base and mid-story isolation systems", *Engineering Structures*, **42**, pp. 420-433 (2012).

20. Zhou, Q., Singh, M.P. and Huang. X.Y. "Model reduction and optimal parameters of mid-story isolation systems", *Engineering Structures*, **124**, pp. 36-48 (2016).
21. Ping, T., Ying, Z. and Fulin, Z. "Optimal design and control mechanism study on story isolation system", *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China (2008).
22. Boyd, J.G. and Lagoudas, D.C. "A constitutive model for simultaneous transformation and reorientation in memory materials", *Mechanics of Phase Transformations and Shape Memory alloys*, AMD- 189/PVP- 292, p. 159-172, ASME (1994).
23. DesRoches, R., McCormick, J. and Delemont, M.A. "Cyclical properties of superelastic shape memory alloys", *ASCE Journal of Structural Engineering*, **130**(1), pp. 38-46 (2004).
24. Dolce, M., Cardone, D. and Marnetto, R. "Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**(7), pp. 945-968 (2000).
25. Ohtori, Y. and et al. "Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings", *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(4), pp. 366-385 (2004).
26. Afsari, A. and Ghassemieh, M. "Seismic evaluation of floor based isolation structures utilized by SMA", 6th National Iranian Congress on Steel and Structures, Tehran, Iran (2015).
27. Dezfuli, F.H. and Alam, S. "Shape memory alloy wire-based smart natural rubber bearing", *Smart Materials and Structures*, **22**(4), pp. 1-17 (2013).