

کاهش پاسخ سازه‌های فولادی با استفاده از میراگرهای حافظه‌دار شکلی

مهدی قاسمیه^{۱*} و اردوان مطهری^۲

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۲ دانش آموخته دکتری سازه دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۹/۲۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۸/۶، تاریخ تصویب ۸۸/۲/۲۹)

چکیده

حالت‌های مختلف کریستالی مواد حافظه‌دار شکلی در یک میراگر پیشنهادی به منظور به دست آوردن یک رفتار بهینه استفاده شده‌اند. میراگر پیشنهادی قابلیت استهلاک انرژی نسبی بالا، در عین حال رفتار بازگرداندگی دارد. ایده های مختلف طراحی برای بدست آوردن اثر ایده آل میراگرهای پیشنهادی در سازه‌ها، استفاده و مقایسه شده است. با مقایسه رفتار سازه‌های تقویت شده با میراگر حافظه دار شکلی پیشنهادی و سیستم مهاربندهای فولادی مقید در برابر کماتش، نشان داده شده است که سیستم‌های پیشنهادی دارای قابلیت کاهش خرابی‌های سازه و کاهش چشمگیر تغییر شکل های باقیمانده روی زلزله حتی پس از زلزله های بسیار شدید را دارد.

واژه های کلیدی: آلیاژ حافظه دار شکلی، میراگر، رفتار فوق الاستیک، تحلیل غیر خطی، رفتار لرزه‌ای

مقدمه

(رفتار فوق الاستیک^۵ یا شبه الاستیک^۶). قابلیت استهلاک مناسب انرژی، مقاومت بالا در برابر خستگی و خوردگی، عمر مفید بالا، سخت شدگی نهائی در تغییر شکل‌های بالا، نبود نیاز به نگهداری و امکان حذف کرنش‌های پس ماند به کمک اعمال دما (رفتار حافظه شکلی^۷)، ایجاد تنش با اعمال دما (رفتار احیا مقید^۸) و امکان ساخت مواد با خصوصیات مورد تقاضا همگی از قابلیت‌هایی بوده که این مواد را به یک ماده مطلوب برای کاربرد در میراگرها و یا جداگرهای پی تبدیل کرده اند [۳ و ۲].

مواد حافظه‌دار شکلی در سال ۱۹۳۰ کشف شده و در دهه شصت میلادی و به میزان بیشتری در دهه ۸۰ میلادی و هنگامی که ایده مواد هوشمند معرفی شد، مورد توجه بسیاری قرار گرفتند. در ابتدا کاربردهای مواد حافظه‌دار شکلی به کاربردهای پزشکی [۴] محدود بود. ولی امروزه این مواد در زمینه های بسیار گسترده ای مانند هوا و فضا [۵]، صنعت [۶]، وسایل تجاری [۷] و عمران [۸-۱۱] مورد استفاده قرار می‌گیرند. در زمینه مهندسی عمران؛ این مواد در کاربردهای متنوعی مانند نگهدارنده‌های پل^۹ [۸]، مهاربندهای مستهلک کننده [۹]، اتصالات ویژه [۱۰] و جداگرهای پی [۱۱] کاربرد دارند.

امروزه از روش های غیر فعال کنترل سازه ها در برابر زلزله به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش‌های سنتی نام برده می شود [۱]. این سیستم ها چنان طراحی می شوند که تلاش های وارده بر اعضای سازه ها را به وسیله جذب و مستهلک کردن قسمتی از انرژی زلزله توسط مکانیزم‌های خاصی کاهش دهند. روش‌های غیر فعال به طور کلی به دو دسته جداگرهای پی و مستهلک کننده انرژی تقسیم می شوند.

سیستم‌های مستهلک کننده انرژی امروزه به صورت‌های مختلف مانند سیستم‌های اصطکاکی، ویسکوالاستیک^۱، الاستوپلاستیک هیستریتیک^۲ و ویسکوز^۳ استفاده می‌شوند. همه این سیستم‌ها مشکلاتی از قبیل عمر مفید کم، پایداری و خستگی، نگهداری، سختی نصب و احتیاج به تعویض پس از زلزله و اعمال تغییر در هندسه سازه پس از وقوع زلزله دارند [۱].

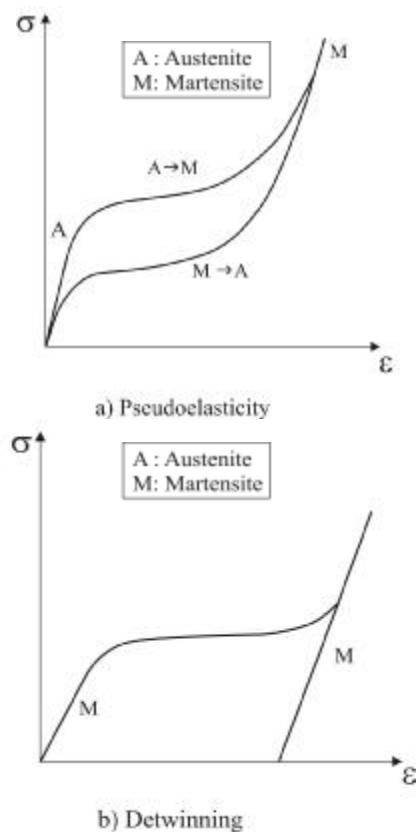
آلیاژهای حافظه دار شکلی^۴ به عنوان یک ماده هوشمند دارای خصوصیات یگانه و رفتارهای بسیار جالبی است که می تواند برای کاهش صدمات زلزله روی سازه ها به شکل‌های گوناگون استفاده شود و مشکلات و محدودیت‌های سیستم‌های ذکر شده را تا حد بسیار زیادی برطرف کند. آلیاژهای حافظه دار شکلی می توانند تا کرنش‌های حدود ۱۰٪ را بدون بر جا گذاشتن کرنش پس ماند و همزمان با رفتار هیستریتیک تحمل کنند

تحقیق کردند. آنها میراگرهای متفاوت بازگرداننده و مستهلک کننده ساخته شده از حالت‌های مختلف مواد حافظه‌دار شکلی پیشنهاد کردند که به کمک نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که با ترکیب آنها می‌توان به رفتار مناسبی در برابر بار گذاری‌های زلزله دست یافت. برونو و والنته [۱۹] با روش‌های تحلیلی و با استفاده از ایده شاخص‌های خرابی و با استفاده از مدل ساده شده مواد حافظه‌دار شکلی، امکان استفاده از این مواد را به صورت تحلیلی بررسی کردند. تعداد زیادی تحلیل غیرخطی با افزایش تدریجی شدت زلزله روی سازه‌های با مهاربند فولادی و حافظه‌دار شکلی و همچنین سازه‌های تقویت شده با جداگرهای لاستیکی و حافظه دار شکلی انجام گرفت و شاخص‌های خرابی سازه‌ای، غیرسازه‌ای و اعضاء تحت این زلزله‌ها به دست آمد. نتایج به دست آمده حاکی از برتری استفاده از جداگرهای پی حافظه دار شکلی در کاهش خطرات ناشی از زلزله بر روی سازه‌ها است. همچنین در مقایسه بین میراگرهای لاستیکی و حافظه دار شکلی نشان داده شد که سیستم اخیر دارای رفتار مناسب تری است. طبق نتایج به دست آمده چنین نتیجه‌ای را نمی‌توان برای مقایسه بین مهاربندهای فولادی و حافظه دار شکلی بیان کرد.

کاردونه و همکاران در سال ۲۰۰۴ نیز به بررسی آزمایشگاهی قاب‌های بتن مسلح مقاوم سازی شده با میراگرهای مستهلک کننده و بازگرداننده پرداختند [۲۰]. دسروش و همکاران [۳] در یک تحقیق جامع آزمایشگاهی رفتار مواد نایتینول فوق الاستیک تحت بارهای چرخه‌ای را برای بررسی قابلیت آنها در استفاده برای طراحی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها انجام دادند. دسروش و دلمونت [۸] امکان استفاده از نگهدارنده‌های حافظه دار شکلی را برای کاهش پاسخ بدنه یک پل چند دهانه با پایه‌های ساده بررسی کردند. ابوالمعالی و همکاران [۱۰] مشخصات استهلاک انرژی اتصالات تی شکل با پیچ‌های فولادی و حافظه دار شکلی را بررسی کردند. چادرسکی و همکاران [۲۱] به بررسی رفتار ویژه یک تیر بتن آرمه با سیم‌های حافظه‌دار شکلی پرداختند. نتایج بررسی بیانگر امکان استفاده از سیم‌های حافظه دار شکلی در تیرهای بتن آرمه برای به دست آوردن سختی و مقاومت متغیر است. ویلده و همکاران [۱۱]، به بررسی امکان استفاده از سیستم‌های جداگر پی متغیر همراه با

از زمان ارائه اولین مدل رفتاری برای مواد حافظه‌دار شکلی در سال ۱۹۸۲ توسط تاناکا و ناگی [۱۲]، ارائه مدل‌های رفتاری مختلف برای رفتارهای متفاوت این مواد از اهمیت بالایی برای محققان مختلفی در نقاط مختلف جهان داشته است. این محققان از تئوری و روش‌های متفاوتی که از روش‌های کاملاً تئوری تا روش‌های بر پایه تجربه گسترده است، برای این منظور استفاده می‌کنند. پیشنهادهای مختلفی برای نحوه طبقه بندی این مدل‌های رفتاری در ادبیات فنی موجود است. به طور کلی می‌توان این مدل‌ها را به سه دسته مدل‌های ترمودینامیک میکروسکوپی [۱۳]، مدل‌های ماکروسکوپیک بر اساس میکرومکانیک [۱۴] و مدل‌های پدیده شناختی^{۱۰} ماکروسکوپیک تقسیم بندی کرد. مدل‌های پدیده شناختی ماکروسکوپیک بر پایه ترمودینامیک پدیده شناختی و/یا با منحنی یابی^{۱۱} مستقیم نتایج آزمایشگاهی استوار هستند. این مدل‌ها به علت سادگی به طور کلی برای کاربردهای مهندسی مناسب تر هستند. برخی از تحقیقات انجام شده در این دسته، مدل‌های پیشنهاد شده توسط لیانگ و روجرز [۱۵]، برینسون [۱۶] و بوید و لاگوداس [۱۷] است.

محققان در سال‌های اخیر به بررسی امکان استفاده از مواد حافظه دار شکلی در کاربردهای مهندسی سازه و زلزله نیز پرداخته‌اند. اولین کار در این زمینه به تحقیق گراسر و کوتزالی در سال ۱۹۹۱ بر می‌گردد که آنها امکان استفاده از ماده نایتینول را به عنوان یک میراگر زلزله پیشنهاد دادند. آنها اثر فرکانس و تاریخچه بارگذاری را بر روی میزان استهلاک انرژی سیم‌های نایتینول بررسی کردند [۱۸]. دلچه و کاردونه [۲] رفتار مکانیکی مواد حافظه دار شکلی را برای کاربردهای لرزه‌های مورد بررسی قرار دادند. رشته‌های متعدد نیکل-تیتانیوم در فاز استنیت با بارگذاری کششی قرار گرفته و رفتار فوق الاستیک آنها مورد بررسی کامل قرار گرفت. وابستگی پاسخ رفتاری به دما، سرعت بارگذاری و تعداد چرخه‌ها بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده، تغییرات معمول در دمای محیط، تاثیر اندکی بر روی پاسخ تنش-کرنش مواد خواهد داشت که نسبت به مواد دیگر استفاده شده در وسایل لرزه‌ای قابل صرف‌نظر کردن است. دلچه و همکاران [۱] کاربرد همزمان حالت‌های مختلف مواد حافظه دار شکلی را به عنوان میراگرهای ویژه در سازه



شکل ۱: رفتارهای مختلف مواد حافظه دار شکلی.

به دلیل طبیعت ترمومکانیکی تبدیل فاز، رفتار مواد حافظه دار شکلی وابسته به سرعت بارگذاری است. در بارگذاری های با سرعت پایین هنگام تبدیل فاز، گرما آزاد شده و دمای ماده ثابت خواهد ماند. این فرآیند به عنوان فرآیند هم دما شناخته می شود، ولی در بارگذاری های با سرعت بالا مانند بارگذاری های زلزله، ماده گرمای نهان ماده موجب می شود که دمای نمونه تغییر کند. این فرآیند نیز به عنوان فرآیند بی دررو در ادبیات فنی شناخته شده است.

یک مدل رفتاری مناسب برای مواد حافظه دار شکلی باید قابلیت پیشگویی رفتارهای مختلف این مواد از قبیل رفتار فوق ارتجاعی، اثر حافظه شکلی و جهت گیری مجدد را داشته باشد. این مدل همچنین باید امکان انجام بارگذاری های مختلف ترمومکانیکی را با شرایط محیطی و حالت های مختلف بارگذاری داشته باشد. به خصوص برای بارگذاری های زلزله، این مدل باید قابلیت مدل کردن رفتار بی دررو برای بارگذاری های با سرعت بالا را داشته باشد.

مواد حافظه دار شکلی برای پل های بلند پرداختند.

تحقیقات ذکر شده در زمینه کاربرد مواد حافظه دار شکلی در مهندسی سازه و زلزله اغلب آزمایشگاهی بوده و تحقیقات اندکی نیز که به صورت تحلیلی و عددی انجام شده از مدل های رفتاری بسیار ساده استفاده کرده اند و از همه مزایای مواد حافظه دار شکلی به صورت کامل استفاده نکرده اند.

در بررسی های موجود در ادبیات فنی، اثر سرعت بارگذاری و همچنین جهت گیری دوباره مواد حافظه دار شکلی در نظر گرفته نشده است.

در این مقاله سعی شده است به کمک روش های تحلیلی و عددی و با استفاده از مدل رفتاری ارائه شده توسط نویسندگان مقاله [۲۴] که مناسب برای کاربردهای مهندسی سازه و زلزله بوده، کاستی های ذکر شده را برطرف کرده و رفتار این مواد به عنوان یک میراگر بهینه شده پیشنهادی در سازه ها بررسی شود.

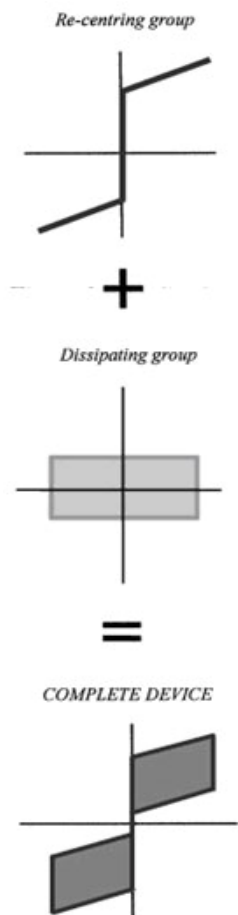
رفتار مواد حافظه دار شکلی

آلیاژهای حافظه دار شکلی در دو فاز کریستالی به نام های استنیت و مارتنزیت موجود است. حالت استنیت حالت اصلی با تقارن بالا بوده و حالت مارتنزیت حالت محصول و با تقارن کمتر است. استنیت در دماهای بالا و تنش های پایین و مارتنزیت در دماهای پایین و تنش های بالا پایدار هستند. لذا با اعمال بارگذاری های حرارتی و یا مکانیکی این دو فاز می توانند به یکدیگر تبدیل شوند. اشکال مختلف مارتنزیت نیز می توانند در دماهای پایین به یکدیگر تبدیل شوند و پروسه جهت گیری دوباره و یا Twinning و Detwinning شکل خواهد گرفت [۴].

اعمال تنش به یک ماده در حالت استنیت، موجب می شود که آن ماده به حالت مارتنزیت تبدیل شود.

با انجام بار برداری، ماده با ایجاد هیستریزس دوباره به حالت اولیه استنیت باز می گردد. این رفتار، رفتار فوق الاستیک و یا شبه الاستیک نامیده می شود (شکل ۱- a). اگر این پروسه اعمال بار و بار برداری در حالت مارتنزیت انجام گیرد، واریانت های مختلف مارتنزیت به یکدیگر تبدیل شده و رفتار هیستریزس Detwinning شکل خواهد گرفت (شکل ۱- b).

بازگرداندگی خواهد بود. خاصیت بازگرداندگی با استفاده از مواد حافظه دار شکلی در حالت استنیت قابل دستیابی خواهد بود، ولی طبق تحقیقات انجام شده، میزان استهلاک انرژی این مواد در این حالت و به خصوص در بارگذاری‌های با سرعت بالا و یا در نمونه‌های با سطح مقطع بالا چندان قابل توجه نیست [۲ و ۳]. برای رفع این نقیصه می‌توان از رفتار Detwinning این مواد در حالت مارتنزیت برای افزایش میزان استهلاک انرژی مجموعه میراگر استفاده کرد. ایده اصلی طراحی میراگر حافظه دار شکلی در ترکیب این دو حالت از مواد به صورت دو گروه جداگانه بازگرداننده و مستهلک کننده برای به دست آوردن رفتار ایده آل است. ترکیب رفتار دو گروه و به دست آوردن رفتار ایده آل به صورت شماتیک در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲: رفتار شماتیک ترکیب دو رفتار مختلف مواد حافظه دار شکلی در یک میراگر ترکیبی [۱].

در این بخش از مقاله سعی شده است که از حالت‌های مختلف مواد حافظه‌دار شکلی برای به دست آوردن یک

مدل‌های رفتاری موجود که تمام و یا اکثر شرایط ذکر شده را تأمین کنند، بسیار پیچیده بوده و قابلیت کاربرد در فرمولاسیون اجزاء محدود را نداشته و یا از نظر عددی بسیار سنگین هستند. تعداد اندکی نیز مدل‌های رفتاری ساده شده برای استفاده در برنامه‌های اجزای محدود و کاربردهای مهندسی توسط محققان مختلف پیشنهاد شده [۲۲، ۲۳] که همگی آنها تنها برای مدل کردن رفتار فوق الاستیک کاربرد داشته و برای بارگذاری‌های با سرعت بالا نیز طراحی نشده‌اند.

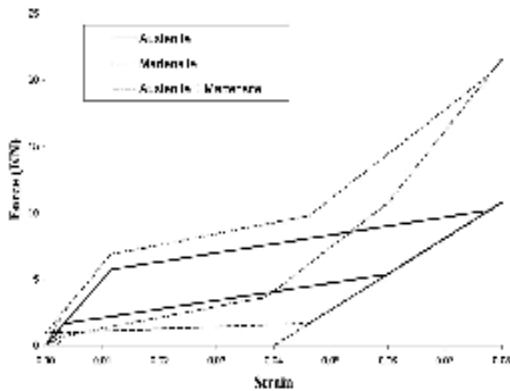
در این مقاله از مدل رفتاری ارائه شده توسط مطهری و قاسمیه [۲۴] برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی مواد حافظه دار شکلی استفاده شده است. این مدل رفتاری برای غلبه بر کاستی‌های ذکر شده مدل‌های رفتاری موجود پیشنهاد شده است.

میراگر حافظه دار شکلی

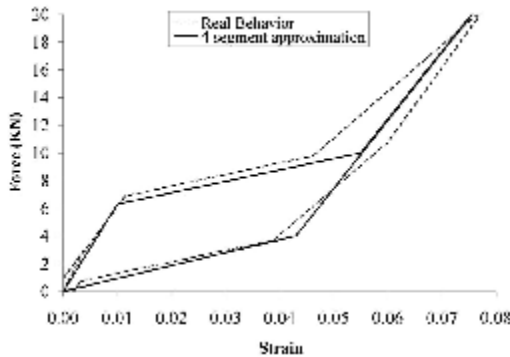
خصوصیات مورد نظر مواد حافظه دار شکلی برای استفاده در کنترل غیر فعال سازه در برابر زلزله، خاصیت استهلاک انرژی بالا و خاصیت بازگرداندگی آنها است. به دلیل قیمت نسبی بالای این مواد امکان استفاده کامل آنها در سازه وجود ندارد و باید به وسیله یک طرح بهینه، حداکثر استفاده از مصالح موجود انجام گیرد. لذا استفاده از این مواد به طور متمرکز در یک میراگر تنها راه منطقی و عملی است. با استهلاک انرژی در میراگر می‌توان تلاش‌های وارده روی اعضای اصلی سازه را کاهش داد؛ و از آنجا که مواد حافظه دار شکلی دارای مقاومت بسیار بالایی در برابر خستگی دارند و رفتار ثابت داشته و دچار افت مقاومت و سختی نمی‌شوند، می‌توانند در زلزله‌های بعدی نیز مورد استفاده قرار گیرند و نیازی به تعویض آنها پس از زلزله نیست. رفتار دیگر مورد نظر، خاصیت بازگرداندگی این مواد است. این خاصیت موجب می‌شود که در طول زلزله، اعضای سازه در دفعات بسیاری به وضعیت اولیه خود بازگردند و این موضوع به نوبه خود از تجمع کرنش‌ها و تغییر شکل‌های دائم بر روی سازه جلوگیری کرده و تغییر شکل‌ها و خرابی‌های سازه را کاهش داده و در ضمن امکان استفاده دوباره پس از زلزله بدون صرف هزینه بالا را فراهم می‌کند.

با این مقدمه، هدف طراحی میراگر بهینه، حداکثر

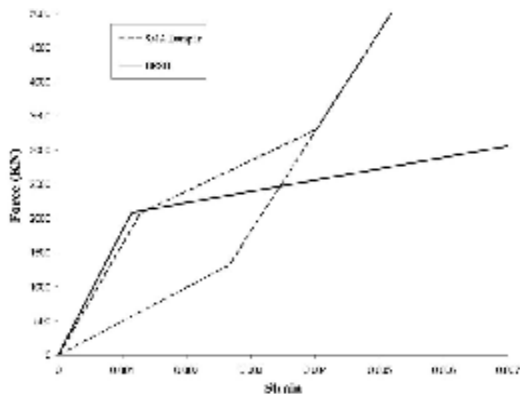
کردن میزان استهلاک انرژی، ضمن حفظ کردن خاصیت



شکل ۳: مقایسه رفتار حالت های فوق الاستیک، Detwinning و ترکیب آنها.



شکل ۴: تقریب ۴ خطی از رفتار میراگر پیشنهادی برای اعمال ساده تر در برنامه اجزا محدود.



شکل ۵: مقایسه رفتار سیستم میراگر پیشنهادی با مهاربند فولادی مقید در برابر کمانش (BRSB).

تحلیل های عددی

برای ارزیابی اثر استفاده از میراگر پیشنهادی در سازه ها، یک سازه فولادی معمولی ۳ طبقه پیشنهاد شده توسط سابلی [۲۵] به عنوان یک نمونه شاخص، انتخاب شده است. با استفاده از تقارن می توان تنها یک دهانه ۲

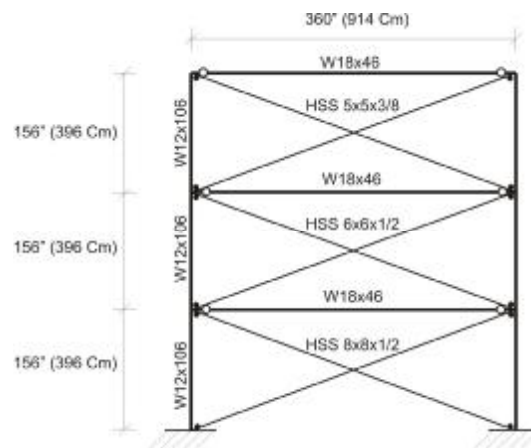
میراگر با رفتار بهینه استفاده شود که هم مزیت بازگرداندگی و هم حداکثر قابلیت استهلاک انرژی را دارد. همچنین نشان داده خواهد شد که رفتار بهینه میراگر به کمک تحلیل های عددی و پارامتری روی ترکیب حالت ها و ابعاد مختلف مواد حافظه دار شکلی قابل دسترسی است

با استفاده از مدل رفتاری پیشنهاد شده توسط نویسندگان [۲۴]، رفتار یک چرخه بارگذاری برای مواد حافظه دار شکلی در حالت های استنیت و مارتنزیت برای حالت بارگذاری با سرعت بالا برای بررسی حالت بارگذاری زلزله و با خصوصیات مصالح گرفته شده از روی آزمایش های دلچه و کاردونه [۲]، به دست آمده است.

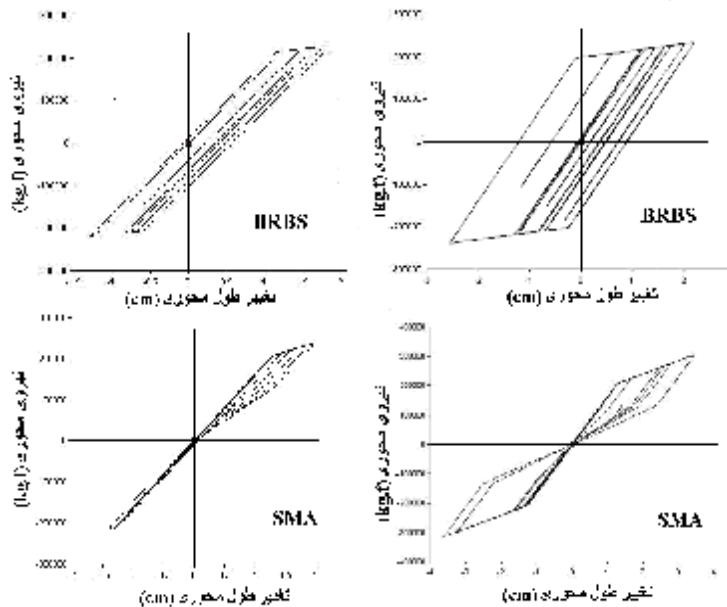
حال با ترکیب دو حالت و با تغییر درصد سطح مقطع هر یک از دو حالت نسبت به سطح مقطع کل مواد حافظه دار شکلی موجود در میراگر از صفر تا ۱۰۰ درصد، رفتارهای مختلفی را می توان به دست آورد. با کاهش درصد سطح مقطع استنیت از ۱۰۰ تا صفر درصد، رفتار مارتنزیت تغییر می کند. در محدوده بین دو حالت حدی، رفتاری بین این دو حالت به دست خواهد آمد. با حرکت از سمت رفتار استنیت به سمت رفتار مارتنزیت، ظرفیت استهلاک انرژی افزایش خواهد یافت، ولی با افزایش درصد مارتنزیت از یک حد مشخص، قابلیت بازگرداندگی مجموعه کاهش از بین خواهد رفت. بنابراین می توان با افزایش تدریجی درصد مارتنزیت، حالت حدی که خاصیت بازگرداندگی مجموعه حفظ شود را پیدا کرد. این حالت برای خصوصیات مصالح در نظر گرفته شده در نسبت سطح مقطع های مساوی استنیت و مارتنزیت به دست می آید (شکل ۳). در این شکل سطح مقطع کل مجموعه برای راحتی برابر با واحد در نظر گرفته شده است. برای اعمال آسان تر مدل رفتاری مجموعه میراگر در برنامه اجزاء محدود، یک تقریب ۴ خطی از رفتار مجموعه به دست آمده مطابق شکل (۴) ساخته شده است. برای امکان مقایسه سیستم میراگر پیشنهادی با سیستم مهاربندی فولادی، مساحت کل و طول سیم های حافظه دار شکلی در مهاربند، به گونه ای انتخاب شده اند که سختی کل و نیروی تسلیم مجموعه مهاربند برابر با مهاربند فولادی باشد (شکل ۵).

در شکل (۷) رفتار مهاربندهای طبقه اول برای دو سیستم مختلف تحت بررسی، مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می شود، سیستم BRSB قابلیت استهلاک انرژی بیشتر در مقایسه با سیستم حافظه دار شکلی داشته، ولی سیستم حافظه دار شکلی به علت داشتن رفتار بازگرداندگی در حین استهلاک انرژی، رفتار بهتری از نظر کنترل تغییر شکل های پلاستیک باقیمانده بر روی اعضا دارد. بررسی رفتار ستون ها نیز نشان دهنده رفتار مناسب سیستم های مقاوم در برابر زلزله در کاهش تلاش های وارده بر ستون های سازه است. در شکل (۸)، تاریخچه زمانی تغییر مکان سیستم های BRSB و میراگر حافظه دار شکلی برای تحلیل در نظر گرفته شده، نمایش داده شده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، تغییر شکل حداکثر در دو سیستم میراگر حافظه دار شکلی و BRSB تقریباً برابرند ولی تغییر شکل باقیمانده بر روی سقف در حالت استفاده از میراگر حافظه دار شکلی برابر با صفر است. این نتیجه به این معنی است که میراگرهای حافظه دار شکلی توانسته اند با استفاده از خصوصیت بازگرداندگی و همچنین استهلاک انرژی مناسب سازه را به حالت اولیه خود بازگردانند و از تجمع تغییر شکل های پلاستیک در اعضای سازه جلوگیری کنند.

بعدی از سازه را بررسی کرد (شکل ۶). تاریخچه زمانی زلزله ایمپریال، ولی ضبط شده در السنتر و مقیاس شده به میزان های 0.6g و 0.9g برای تحلیل در نظر گرفته شده است. تحلیل های دینامیکی غیر خطی به روش انتگرال گیری گام به گام نیومارک و با استفاده از برنامه اجزا محدود غیر خطی نوشته شده توسط نویسندگان مقاله [۲۶] انجام گرفته است. به علت در دست داشتن ملاک مقایسه مناسب از سیستم مهاربندی فولادی مقید در برابر کماتش^{۱۱} (BRSB) استفاده شده است. این مهاربندها به علت داشتن رفتار یکسان در حالت کشش و فشار رفتار بسیار مناسب و پایداری دارند [۲۷].



شکل ۶: هندسه و مقاطع قاب در نظر گرفته شده [۲۵].



الف) 0.6g

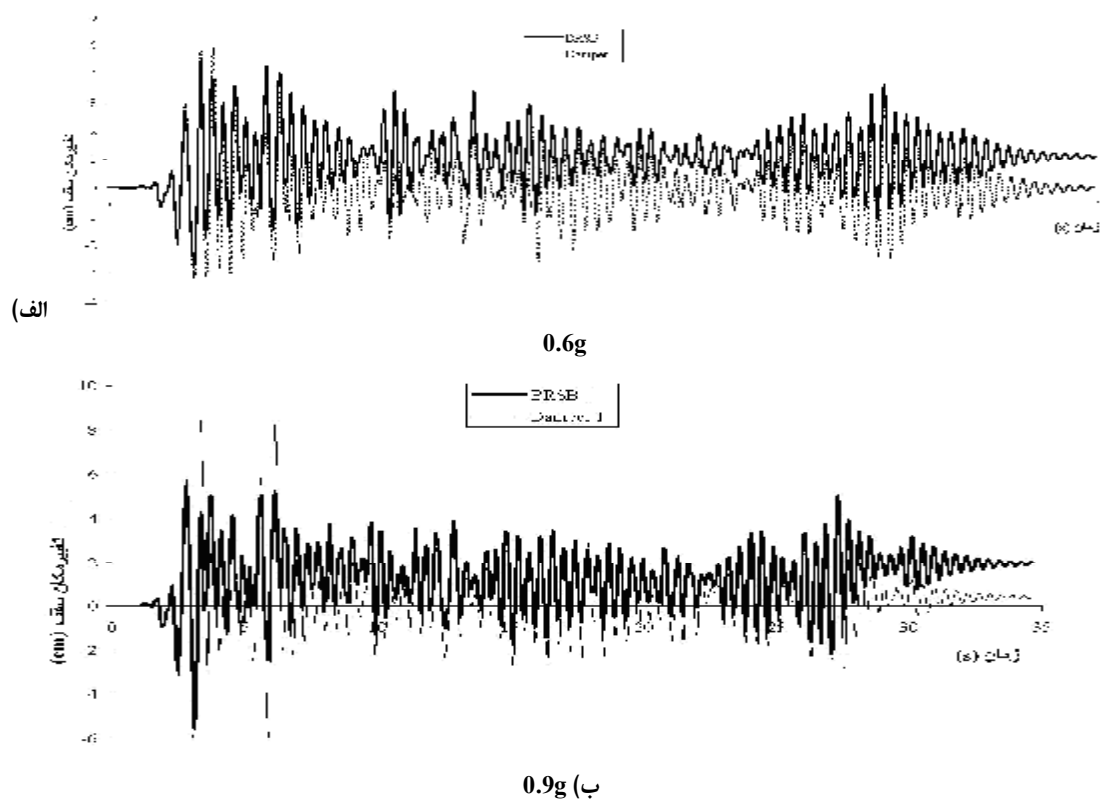
ب) 0.9g

شکل ۷: مقایسه رفتار مهاربندهای طبقه اول در سیستم های مختلف.

است که با به کارگیری یک سیستم میراگر حافظه دار شکلی به جای سیستم مهاربند جلوگیری شده در برابر کمانش، تغییر شکل باقیمانده روی سازه به میزان ۹۹ درصد برای زلزله مقیاس شده به میزان 0.6g و به میزان ۸۶ درصد برای زلزله مقیاس شده به میزان 0.9g کاهش داده شده است و به طور کلی نتایج به دست آمده حاکی از اثر مناسب استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی به عنوان میراگر، بخصوص در کاهش تغییر شکل‌های باقیمانده روی سازه و در نتیجه کاهش هزینه‌های پس از زلزله است.

جمع بندی

در این مقاله، امکان استفاده از آلیاژهای حافظه دار شکلی به عنوان یک ماده با رفتار ویژه و مطلوب برای کنترل غیر فعال سازه‌ها در برابر زلزله بررسی شده است. در این مقاله از ایده ترکیب حالت‌های مختلف این مواد برای ایجاد رفتار بازگرداندگی در حین حداکثر کردن میزان استهلاک انرژی استفاده شده است. با انجام تحلیل‌های غیر خطی دینامیکی، اثر استفاده از میراگرهای حافظه دار شکلی پیشنهادی و مقایسه سیستم پیشنهادی با سیستم نوین مهاربندی فولادی مقید در برابر کمانش (BRSB) بررسی شده است. در این مقاله نشان داده شده



شکل ۸: تاریخچه زمانی تغییر مکان سقف برای سیستم‌های BRSB و میراگر حافظه دار شکلی.

مراجع

- 1 - Dolce, M., Cardone, D. and Marnetto, R. (2000). "Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys." *Earthquake Engng. Struc. Dyn.*; Vol.29: PP. 945-68.
- 2 - Dolce, M. and Cardone, D. (2001) "Mechanical behavior of shape memory alloys for seismic applications – 2. Austenite NiTi wires subjected to tension." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, PP. 2657-77.
- 3 - DesRoches, R., McCormick, J. and Delemont, M. A. (2004). "Cyclical properties of superelastic shape memory alloys." *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No.1, PP. 38–46.

- 4 - Duerig, T. W., Melton, K. N. and Proft, J. L. (1990). *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*. Butterworth-Heinemann, Guildford, UK, PP. 130.
- 5 - Chandra, R. (2001). "Active shape control of composite blades using shape memory actuation." *Smart Material and Structures*, Vol. 10, PP. 1018-24.
- 6 - Bank, R. and Weres, O. (1976). *Shape Memory Effects in Alloys*, Perkins, ed., NY: Plenum Press.
- 7 - Asai, M. and Suzuki, Y. (2000). "Applications of shape memory alloys in Japan." *Materials Science Forum* PP. 327-28, 17-22.
- 8 - DesRoches, R. and Delemont, M. (2002). "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys." *Engineering Structures*, Vol. 24, PP. 325- 32.
- 9 - Bartera, F. and Giacchetti, R. (2004). "Steel dissipating braces for upgrading existing building frames." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, PP. 751-769.
- 10 - Abolmaali, A., Treadway, J., Aswath, P. and Lu FK, McCarthy, E. (2006). "Hysteresis behavior of t-stub connections with superelastic shape memory fasteners." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, No. 8, PP. 831-838.
- 11 - Wilde, K., Gardoni, P. and Fujino, Y. (2000). "Base Isolation System with Shape memory alloy devices for elevated highway bridges." *Engineering Structures*, Vol 22. No. 3, PP. 222-9.
- 12 - Tanaka, K. and Nagki, S. (1982). "A Thermomechanical description of materials with internal variables in the process of phase transformation." *Ing. Arch.*, Vol. 51, PP. 287-99.
- 13 - Abeyaratne, R., Kim, S. J. and Knowles, J. K. (1994). "Continuum modeling of shape memory alloys." AMD-Vol. 189/PVP-Vol.292, Mechanics of Phase Transformations and Shape Memory alloys 1994, ASME: PP. 59-69.
- 14 - Sun, Q. P. and Hwang, K. C. (1993). "Micromechanics modeling for the constitutive behavior of polycrystalline shape memory alloys - I. Derivation of general relations." *J. Mech. Phys. Solids*; Vol. 41, No. 1, PP. 1-17.
- 15 - Liang, C. and Rogers, C. A. (1992). "A Multidimensional constitutive model for shape memory alloys." *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 26, PP. 429-43.
- 16 - Brinson, L. C. (1993). "One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable." *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 4, PP. 229-242.
- 17 - Boyd, J. G. and Lagoudas, D. C. (1996). "Thermodynamical constitutive model for shape memory materials. Part I. The monolithic shape memory alloy." *International Journal of Plasticity*, Vol. 12, No. 6, PP. 805-42.
- 18 - Graesser, E. J. and Cozzarelli, F. A. (1991). "Shape memory alloys as new materials for aseismic isolation." *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 117, PP. 2590-2608.
- 19 - Bruno, S. and Valente, C. (2002). "Comparative response analysis of conventional and innovative seismic protection strategies." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, PP. 1067-1092.
- 20 - Cardone, D., Dolce, M. and Ponzio, F. C. (2004). "Experimental behavior of R/C Frames retrofitted with dissipating and re-centering braces." *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 3, PP. 361-396.
- 21 - Czaderski, C., Hahnebach, B. and Motavalli, M. (2005). "RC beam with variable stiffness and strength." *Construction and Building Materials*.

- 22 - Lagoudas, D. C., Mayes, J. J. and Khan, M. M. (2001). "Simplified shape memory alloys (SMA) material model for vibration isolation." *Proc. SPIE*, Vol. 4326, PP. 452-461, Smart Structures and Materials: Modeling, Signal Processing, and Control in Smart Structures, Vittal S. Rao; Ed.
- 23 - Fugazza, D. (2003). "Shape memory alloy devices in earthquake engineering: mechanical properties, constitutive modelling and numerical simulations." *Rose Shool MSc Dissertaion*. Under the supervision of Prof. F. Auricchio, A. Pavase and L. Petrini –Pavia.
- 24 - Motahari, S. A. and Ghassemieh, M. (2007). "Multilinear one-dimensional shape memory material model for use in structural engineering applications." *Engineering Structures*, Vol. 29, PP. 904-913.
- 25 - Sabelli, R. (2001) "Research on improving the design and analysis of earthquake-resistant steel-braced frames." *Professional Fellowship Report. No. PF2000-9*, NEHRP, USA.
- 27 - Motahari, S. A. (2006). *AIMS (Analysis of Intelligent Materials and Structures)*, Visual Nonlinear Dynamic Multi Degree of Freedom Nonlinear Finite Element Program.
- 26 - Ravi Kumar, G., Satish Kumar, S. R. and Kalyanaraman, V. (2007). "Behavior of frames with Non-buckling bracings under earthquake loading." *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 36, PP 254-262.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Viscoelastic
- 2 - Elastoplastic hysteretic
- 3 - Viscous
- 4 - Shape Memory Alloys
- 5 - Superelastic
- 6 - Pseudoelastic
- 7 - Shape memory effect
- 8 - Constrained recovery effect
- 9 - Bridge restrainers
- 10 - Phenomenological
- 11 - Curve fitting
- 12 - Buckling Restrained Steel Braces (BRSB)