

تأثیر میراگر آلیاژ حافظه‌ای هوشمند در استهلاک انرژی و کاهش دامنه ارتعاش قابهای فولادی چند طبقه

علی سید کاظمی*

هیأت علمی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آیت الله آملی، آمل، ایران

میلاذ اسمعیلی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آیت الله آملی

سامان افتخار اردبیلی

کارشناسی ارشد عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، اهر، ایران

مرتضی حسینعلی بیگی

استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

*a.seydkazemi@iauamol.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۱۷ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

چکیده

در سال‌های اخیر ایده‌ی استفاده از مصالح با دوام، دارای قابلیت جذب انرژی و شکل پذیری بالا در مهندسی سازه پر رنگ‌تر شده است. از جمله‌ی این نوع مصالح آلیاژهای حافظه‌دار شکلی هستند که در شرایط مختلف از خود خواص فیزیکی از پیش تعریف شده‌ای نشان می‌دهند. این مواد تحت سیکل‌های بارگذاری و باربرداری حتی پس از گذشتن از ناحیه‌ی تسلیم از خود کرنش پسماند ناچیزی نشان می‌دهند و در واقع در سازه نیروهای بازسازی کننده‌ای ایجاد می‌کنند. در مطالعه‌ی حاضر به بررسی تأثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در استهلاک انرژی و کاهش دامنه ارتعاش قاب فولادی چند طبقه پرداخته می‌شود و برای انجام این کار از مدل‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی در وسط المان قطری مهاربند استفاده شده است. نرم‌افزار مورد استفاده در این پژوهش نرم افزار ABAQUS می‌باشد. جهت اعتبارسنجی مدل‌ها، در ابتدا قاب دو طبقه مهاربندی مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی که در مطالعات آزمایشگاهی هان و همکاران در سال ۲۰۰۳ استفاده شده بود، در نرم افزار، مدل سازی و تحلیل شد. نتایج تطابق قابل قبول پاسخ‌های بدست آمده از دو روش آزمایشگاهی و تحلیلی را نشان می‌دهد. جهت بررسی تأثیر ارتفاع بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مجهز به این نوع آلیاژها، ساختمان‌های مورد مطالعه به ۳ و ۱۲ طبقه افزایش یافت و روی مدل‌ها، تحلیل‌های رفت و برگشتی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت شتاب نگاشت زلزله طبرستان انجام گرفت. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد استفاده از این نوع میراگرها باعث تسریع در استهلاک انرژی و کاهش چشمگیر در دامنه ارتعاش و برش پایه می‌شود بطوریکه در حضور آلیاژ حافظه‌دار شکلی در ساختمان ۳ طبقه، قابلیت جذب و استهلاک انرژی سیستم سازه‌ای ۲/۵ برابر و سختی اولیه سیستم سازه‌ای ۲ برابر حالت اولیه می‌باشد. همچنین با افزایش ارتفاع، اثر بخشی آن در کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه بین ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش می‌یابد.

کلید واژگان: آلیاژ حافظه‌دار شکلی، تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی، جذب انرژی، شکل پذیری

۱. مقدمه

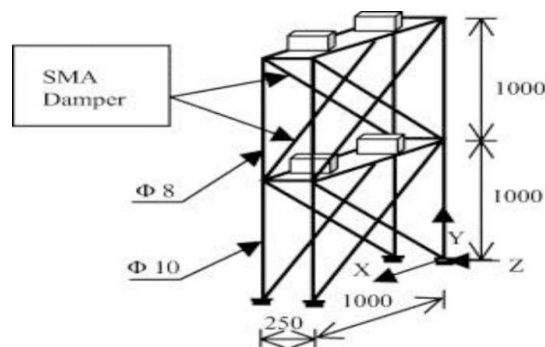
بهبود استفاده کردند. میراگر پیشنهادی قابلیت استهلاک انرژی نسبی بالا، در حین حال رفتار بازگرداندگی داشت. نتایج آنها نشان داد که سیستم‌های پیشنهادی دارای قابلیت کاهش خرابی‌های سازه و کاهش چشمگیر تغییرشکل‌های باقی مانده از زلزله حتی پس از زلزله‌های بسیار شدید را دارند [۴]. مهدی قاسمیه و امیر کاری در سال ۱۳۹۰ رفتار لرزه‌ای سازه‌های مهاربندی از نوع آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و مهاربندهای مقید شده در برابر کماتش را بررسی نمودند. طبق نتایج بدست آمده در تحقیقات آنها، در سازه‌های نسبتاً کوتاه، ارجحیت استفاده از هریک از این دو سیستم نسبت به دیگری، بستگی به شدت تحریکات زمین دارد. همچنین برخلاف سازه‌های کوتاه، در سازه‌های متوسط استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی مزیتی ندارد و استفاده از بادبندهای مقیدشده در برابر کماتش ارجحیت دارد [۵]. عسگریان و مرادی در سال ۲۰۱۱ به ارزیابی لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده با مهاربندهای مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی پرداختند. در مطالعه انجام گرفته، سازه‌ها به صورت دو بعدی و در ۶ تراز ارتفاعی ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ طبقه مدل و با روش تاریخچه زمانی غیرخطی، تحت شتاب نگاشت زلزله‌های کوهپریال، طیس و السنترو تحلیل شدند [۶]. جونگ وان هو در سال ۲۰۱۳ به شبیه‌سازی عددی رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی سوپر الاستیک پرداخت. آلیاژهای سوپر الاستیک، مصالح فلزی منحصر بفردی هستند که تغییر شکل‌های بسیار زیادی را تحمل می‌کنند و با حذف تنش، شرایط اولیه خودشان را بدون رفتاری متغیر، مجدداً بازیافت می‌نمایند. جونگ جهت اطمینان از صحت شبیه‌سازی رفتاری این مصالح، آزمایشی را با استفاده از میله‌های ساخته شده با این نوع از آلیاژها انجام داد. نتایج بدست آمده از تحلیل‌های آزمایشگاهی با شبیه‌سازی عددی در نرم افزار OpenSees تطابق مناسبی داشتند [۷]. محمودی و هوران در سال ۲۰۱۴ به ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب‌های فلزی با مهاربندهای ضربدری مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پرداختند. سازه مورد نظر را تحت سه شتابنگاشت طیس، چی چی تایوان و نورتریج مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که اثر حضور آلیاژ در مهاربند باعث بهبود رفتار لرزه‌ای و کاهش ارتعاش سازه می‌شود [۸]. لامین دینگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی آزمایشگاهی و عددی استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی برای کاهش دامنه ارتعاشات کابل‌های بکار رفته در سازه‌های مهندسی از جمله پل‌ها پرداختند. آنها در ابتدا میراگر را به قسمت میانی کابل متصل کردند و در ادامه مراحل پژوهش، مکان میراگر را در طول کابل تغییر دادند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد استفاده از میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی باعث کاهش قابل توجه در نوسانات کابل می‌گردد. نتایج بدست آمده از آزمایش و نرم افزار اجزای محدود در این مورد تطابق مناسبی داشتند [۹]. لوبو و همکاران در سال ۲۰۱۵ ایده ساخت یک میراگر نیمه فعال را بر مبنای استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی مطرح کردند و این میراگر نیمه فعال را در نرم افزار به منظور کنترل پاسخ یک سیستم یک درجه آزادی شبیه‌سازی

امروزه از روش‌های غیرفعال کنترل سازه‌ها در برابر زلزله به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش‌های سنتی نامبرده می‌شود. این سیستم‌ها چنان طراحی می‌شوند که تلاش‌های وارده بر اعضای سازه‌ها را به وسیله جذب و مستهلک کردن قسمتی از انرژی زلزله توسط مکانیزم‌های خاصی کاهش دهند. سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی امروزه به صورت‌های مختلف مانند سیستم‌های اصطکاکی، ویسکوالاستیک، الاستوپلاستیک، هیستریتیک و ویسکوز 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. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به عنوان یک ماده هوشمند دارای خصوصیات یگانه و رفتارهای بسیار جالبی است که می‌تواند برای کاهش صدمات زلزله روی سازه‌ها به شکل‌های گوناگون استفاده شود و مشکلات و محدودیت‌های سیستم‌های ذکر شده را تا حد بسیار زیادی برطرف کند. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی می‌توانند تا کرنش‌های حدود ۱۰٪ را بدون برجا گذاشتن کرنش پسماند و همزمان با رفتار هیستریتیک تحمل کنند. تاکنون محققان زیادی به بررسی استفاده از میراگرهای حافظه‌ای هوشمند در کنترل رفتار لرزه‌ای سازه‌ها پرداخته‌اند. هان و همکاران در سال ۲۰۰۳ به بررسی رفتار ارتعاشی سازه‌ی دو طبقه مقیاس شده به یک سوم مقدار واقعی، به صورت آزمایشگاهی و عددی پرداختند. در این کار اثر حضور آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر رفتار سازه مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج آنها، در حضور این نوع از آلیاژها، میرایی سازه بالاتر می‌رود و انرژی ورودی سریع‌تر مستهلک می‌شود [۱]. مهدی قاسمیه و امیر حسین ایرانمنش در سال ۱۳۸۵، تحقیقی را در زمینه میزان بهبودی در عملکرد سازه‌های فولادی در اثر استفاده از مهاربندهای از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نسبت به مهاربندهای فولادی مقید در برابر کماتش، انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که باتوجه به قابلیت مهاربندهای SMA در بازگرداندن قاب به شکل اولیه و به حداقل رساندن کرنش‌های پسماند در داخل قاب، استفاده از آنها در سازه‌های قابی بسیار مطلوب به نظر می‌رسند [۲]. کرمیک و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی لرزه‌ای قاب‌های مهاربند هم محور فولادی مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی تحت دو شتابنگاشت پرداختند. مطالعه آنها نشان داد که درصد بالایی از دریفت باقیمانده کلی در قاب با مهاربند معمولی در طبقات اول و دوم رخ می‌دهد. نتایج برای طبقات بالاتر برای هر دو مدل یکسان بودند. به همین دلیل استفاده از مهاربندهای مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در طبقات پایینی سازه مؤثرتر و مفیدتر عمل می‌کند. این در حالی است که مهاربندهای فولادی مرسوم را می‌توان در طبقات بالاتر استفاده نمود [۳]. مهدی قاسمیه و اردلان مطهری در سال ۱۳۸۹ حالت‌های مختلف کریستالی مواد حافظه‌دار شکلی در یک میراگر پیشنهادی را به منظور به دست آوردن یک رفتار

۲. هندسه مدل‌ها، فرضیات تحلیل و طراحی و اعتبارسنجی

در این پژوهش از سه قاب با ارتفاع متغیر ۲، ۳ و ۹ طبقه، جهت ارزیابی عملکرد سازه مهاربندی مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی استفاده شده است. مدل اولیه انتخاب شده در این پژوهش، مدل آزمایشگاهی هان و همکاران بوده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. برنامه آزمایشگاهی آنها شامل انجام یک آزمایش ارتعاش آزاد روی یک قاب سه بعدی دو طبقه بود. قاب مورد مطالعه، ارتفاع دو متر، طول یک متر و عرض ۰٫۲۵ متر دارد که در دو حالت قاب خمشی و قاب خمشی با مهاربند مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی بررسی می‌شود. شکل ۱ پرسپکتیوی از قاب مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی را نشان می‌دهد. بلوک‌های نشان داده شده در شکل، نماینده چهار جرم متمرکز به وزن هر کدام ۲۰ کیلوگرم می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است ۸ میراگر SMA (در داخل ۸ عضو مهاربندی) تعبیه شده‌اند. هر میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی شامل دو میلگرد فولادی به قطر هفت میلیمتر و یک سیم آلیاژ حافظه‌دار شکلی به قطر ۰٫۷۵ میلیمتر می‌باشد. بخش فولادی به طول ۵۸۲ میلیمتر و بخش آلیاژی به طول ۲۵۰ میلیمتر می‌باشد. جانمایی میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در مهاربند در شکل ۲ آمده است. سیم آلیاژ حافظه‌دار شکلی استفاده شده بعنوان میراگر از جنس نیکل-تیتانیوم است. مدل رفتاری این نوع آلیاژ در شکل ۳ نشان داده شده است. دلیل استفاده از این نوع آلیاژ توانایی آن در استهلاک انرژی و مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی می‌باشد. به دلیل اینکه سختی کششی فولاد بسیار بیشتر از سیم آلیاژ حافظه‌دار شکلی است، در هنگام ارتعاش قاب، سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی تقریباً تمام تغییر شکل‌ها را تحمل می‌کنند و به طور مؤثری باعث استهلاک می‌شوند.

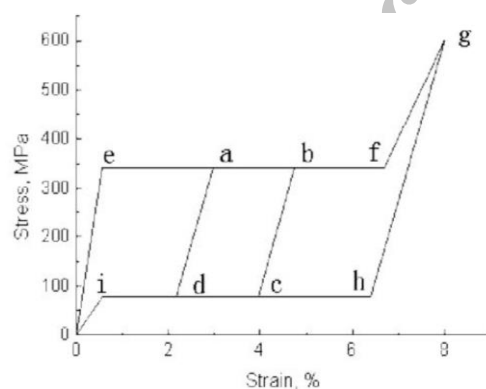
نمودند. نتایج بررسی‌ها نشان داد وسیله پیشنهادی آنها قادر است استهلاک انرژی مناسبی داشته باشد و در حفاظت از سازه در حیطه رفتار غیرخطی مناسب عمل می‌کند [۱۰]. سوروا گور و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی به بررسی پاسخ لرزه‌ای تصادفی ساختمان‌های مجهز به میراگر سوپر الاستیک پرداختند. میراگر سوپر الاستیک پیشنهادی آنها در حقیقت شکل تکامل یافته‌ای از میراگرهای تسلیمی هیسترتیک بود که در آن بجای فلز از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بدلیل ویژگی نیرو-تغییر مکان سوپر الاستیک این مصالح استفاده شده بود. همچنین آنها پارامترهای بهینه را برای طراحی مناسب این نوع از میراگرها محاسبه نمودند. نتایج، عملکرد مناسب میراگر پیشنهادی آنها را در مقایسه با میراگرهای تسلیمی عادی نشان می‌داد [۱۱]. از آنجائیکه استفاده از سیستم قاب با مهاربندهای مرسوم و متداول به دلیل محدودیت‌هایی نظیر شکل‌پذیری پایین، کم‌انرژی مهاربند در فشار و کاهش ظرفیت باربری جابجایی نیاز سازه نیست. لذا استفاده از مصالح و روش‌های نوین از جمله بکارگیری آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در مهاربندها می‌تواند راه گشا باشد. لذا در این تحقیق به بررسی تأثیر میراگرهای آلیاژهای حافظه‌دار هوشمند در استهلاک انرژی و کاهش دامنه ارتعاش قاب فولادی چند طبقه پرداخته می‌شود. همچنین میزان کارایی آنها با افزایش ارتفاع بررسی می‌شود.



شکل ۱- قاب دو طبقه (ابعاد به میلیمتر هستند) [۱]

steel wire chuck SMA wire chuck steel wire

شکل ۲- جانمایی میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در المان مهاربند [۱]



شکل ۳- نمودار تنش- کرنش آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیکل-تیتانیوم [۱]

مساحت زیر نمودار آن، انرژی مستهلک شده بوسیله این آلیاژ خواهد بود. لذا در این پژوهش سیم آلیاژ حافظه‌دار شکلی طوری در نظر گرفته می‌شود که رابطه تنش-کرنش آن بصورت منحنی b-c-d-a-b باشد و برای معرفی آن به برنامه از سابروتین SMA_UM نوشته شده در این زمینه استفاده می‌شود. پارامترهای مورد نیاز برای مصالح در این سابروتین، شامل مدول یانگ برای هر دو فاز آستنیت و مارتنزیت، ضرائب انبساط حرارتی، دماهای شروع و پایان فازهای آستنیت و مارتنزیت در تنش صفر، حداکثر کرنش تبدیل تک محوری، ضرائب تأثیر تنش در حالت‌های آستنیت و مارتنزیت و ثابت‌های سخت شوندگی (بسته به مدل) می‌باشد. ثوابت مورد نظر برای آلیاژ حافظه‌دار

در این پژوهش، ابتدا به شبیه‌سازی عددی مدل تجربی هان و همکاران در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS اقدام گردید. در این نرم‌افزار امکانات مناسبی جهت مدل‌سازی المان‌های فایبر تیر، ستون و مهاربند فلزی فراهم آمده است و قابلیت فراوانی در مدل کردن رفتار غیرخطی مصالح دارد. رفتار مصالح فولادی به صورت سه خطی ایزوتروپیک همسانگرد در نظر گرفته شده است و مدل رفتاری آلیاژ حافظه‌دار شکلی بر اساس شکل ۳ به برنامه معرفی گردید. زمانیکه در سیم آلیاژ حافظه دار شکلی بدلیل نوسان سازه، تغییر شکل محوری ایجاد می‌شود منحنی b-c-d-a-b یک سیکل از ارتعاش سیم را نشان می‌دهد و

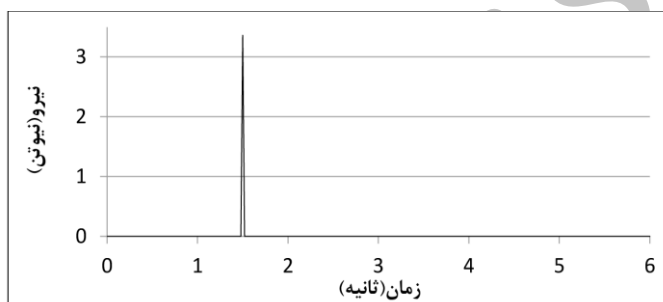
شدند. در اشکال ۷ و ۸ نتایج بدست آمده از نرم افزار ABAQUS در این پژوهش با نتایج آزمایشگاهی هان و همکاران در یک گراف قرار داده شده و با هم مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌گردد که نتایج حاصل از دو روش آزمایشگاهی و عددی تطابق مناسبی نشان می‌دهند لذا می‌توان این پژوهش را برای مدل‌های دیگر با ارتفاع بیشتر تعمیم داد و نتایج را بررسی نمود.

شکلی نیکل-تیتانیوم براساس کار تحقیقاتی تاناکا و همکاران [۱۲] می‌باشد که در مقاله هان نیز استفاده شده است.

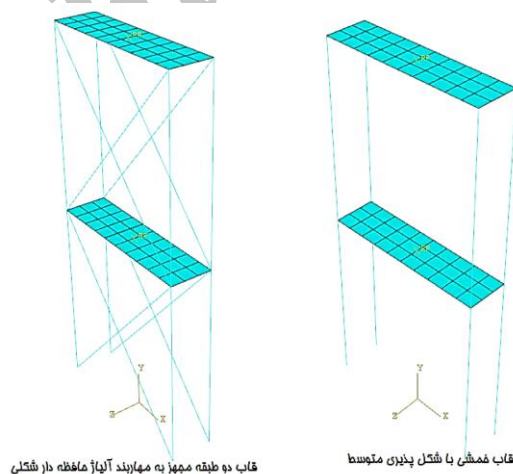
شکل ۶ مدل شبیه‌سازی شده ساختمان‌های مورد مطالعه را در نرم افزار ABAQUS نشان می‌دهد. در ادامه پژوهش، تاریخچه بارگذاری مطابق اشکال ۴ و ۵ به برنامه معرفی شده و نتایج بدست آمده از نرم افزار با نتایج حاصل از آزمایش ارتعاش آزاد هان و همکاران مقایسه



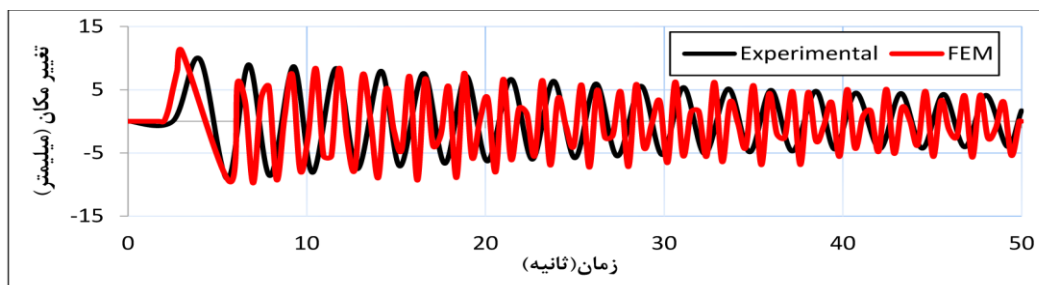
شکل ۴- تاریخچه بارگذاری قاب مهار نشده [۱]



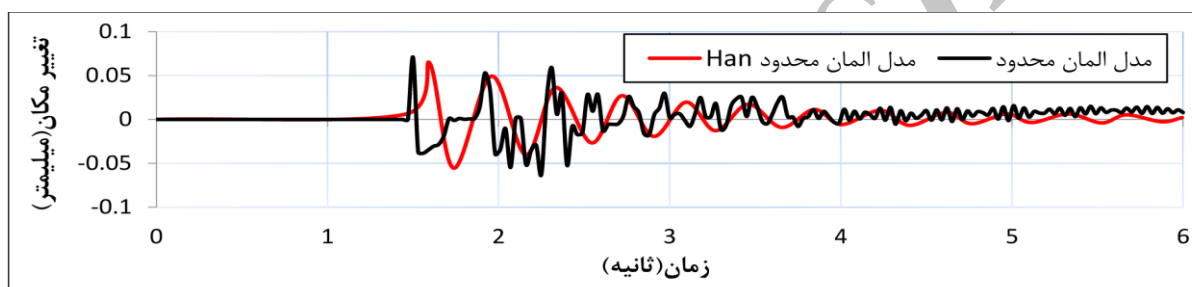
شکل ۵- تاریخچه بارگذاری قاب مهار شده [۱]



شکل ۶- مدل شبیه‌سازی شده ساختمان‌های مورد مطالعه در نرم افزار ABAQUS



شکل ۷- مقایسه نمودار تغییر مکان قاب مهار نشده مدل شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی



شکل ۸- مقایسه نمودار تغییر مکان قاب مهار شده مدل شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی

برای ستون‌های سه طبقه دوم و قطر شش میلیمتر برای ستون‌های سه طبقه آخر استفاده شده است. بقیه اعضا به مانند مدل‌های قبلی می‌باشند. نتایج بدست آمده از تحلیل‌ها در ادامه بطور مفصل بیان می‌شود.

۳-۱- بارگذاری رفت و برگشتی در مدل ۳ طبقه

زمانی که قاب سه طبقه خمشی تحت بارگذاری سیکلی قرار گرفت مشاهده شد که حداکثر نیروی قابل تحمل $254/913$ نیوتن می‌باشد و این در حالی است که این نیرو به $368/465$ نیوتن در قاب مهار شده با میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی رسیده است. یعنی به میزان $44/5$ درصد ظرفیت نهایی سازه را افزایش داده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودار نیرو-تغییر مکان سازه آمده است. در قاب مهار نشده تعداد حلقه‌های قابل تحمل توسط سیستم به میزان ۶ سیکل کمتر از قاب مهار شده با آلیاژ حافظه‌دار شکلی می‌باشد. با مقایسه بین نتایج دو قاب در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که انرژی استهلاک شده در حالت قاب مهار

۳- تأثیر افزایش ارتفاع بر پاسخ قاب‌های مجهز به مهاربندی SMA

برای بررسی تأثیر افزایش ارتفاع در پاسخ قاب‌های مجهز به میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی، علاوه بر نمونه اولیه ۲ طبقه که جهت اعتبارسنجی، مدلسازی شده بود، دو مدل با ارتفاع‌های ۳ و ۹ طبقه انتخاب شدند و در دو حالت بدون مهاربند و با مهاربند مجهز به SMA در نرم افزار ABAQUS مدلسازی شدند و تحت تحلیل‌های غیرخطی رفت و برگشتی و دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی قرار گرفتند. در انجام تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی از مؤلفه افقی شتابنگاشت زلزله طیس بهره گرفته شده است و گزینه انتخابی در نرم افزار، Dynamic Explicit بوده است. در مدل قاب سه طبقه مورد بررسی مقاطع اعضا همانند قاب دو طبقه انتخاب شدند و در مدل قاب نه طبقه از اعضای به قطر ۱۰ میلیمتر برای ستون‌های سه طبقه اول، قطر هشت میلیمتر

علاوه بر این، شکل ۱۵ تأثیر قابل ملاحظه حضور آلیاژ حافظه‌دار شکلی را در افزایش میرایی و کاهش ارتعاش، به وضوح نشان می‌دهد. با مشاهده نتیجه حاصله معلوم می‌شود که تغییر مکان حداکثر که در قاب مهار نشده در ثانیه ۱۸ ام به میزان ۶۵۰ میلی‌متر تخمین زده شده بود، در حالت قاب مهار شده به مقدار ۱۸۰ میلی‌متر رسیده است. به عبارتی کاهش ۴۷۰ میلی‌متری در تغییر مکان، معادل ۷۲ درصد پاسخ قاب مهار شده، مشاهده می‌گردد.

۳-۳- بارگذاری رفت و برگشتی در سازه ۹ طبقه

در اشکال ۱۶ و ۱۷ نمودارهای نیرو-تغییر مکان قاب ۹ طبقه، تحت بارگذاری سیکلی و در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده با مهاربندی مجهز به SMA آمده‌اند. مشاهده می‌شود در قاب نه طبقه خمشی تحت بارگذاری سیکلی حداکثر نیروی قابل تحمل ۱۹۹/۲۴ نیوتن می‌باشد و این در حالی است که این نیرو به ۳۷۱/۱۳۴ نیوتن در قاب مهار شده با میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی رسیده است. یعنی به میزان ۸۶/۴ درصد ظرفیت نهایی سازه را افزایش داده است. این درصد افزایش نسبت به سازه ۳ طبقه کمتر است.

با مقایسه بین نتایج دو قاب در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که انرژی مستهلک شده در حالت قاب مهار شده به میزان تقریباً ۹۶٪ قاب مهار نشده، افزایش یافته است. همچنین استفاده از سیستم میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی، باعث شده است سختی اولیه قاب مهار شده در قیاس با قاب مهار نشده از ۱۲۰ نیوتن بر متر به ۳۰۰ نیوتن بر متر افزایش یابد. عبارتی دیگر سختی اولیه ۲/۵ برابر شده است.

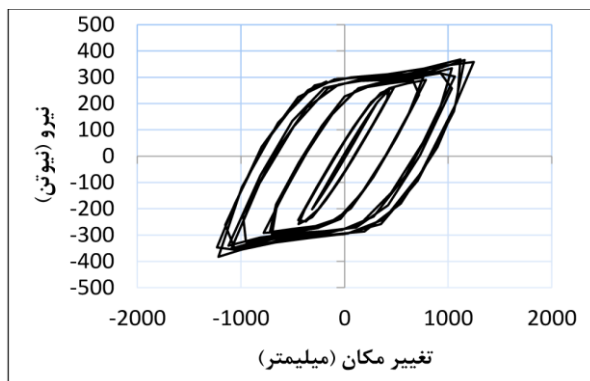
شده به میزان تقریباً ۸۷٪ برابر قاب مهار نشده است. در نتیجه شکل پذیری سازه نیز افزایش یافته است.

۳-۲- تحلیل غیرخطی دینامیکی تاریخچه زمانی در مدل سه طبقه تحت مؤلفه افقی شتاب زلزله طبس

مؤلفه افقی زلزله طبس با حداکثر شتاب ۰/۸۳۶ برابر شتاب ثقل به پای سازه اعمال شد. مشخصات و پارامترهای این زلزله در جدول ۱ ارائه شده است. میرایی برای سازه ۰/۰۵ منظور شد. در صورت استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی میزان میرایی تا ۳۰٪ نیز رسیده است. برای قاب سه طبقه مهار نشده، نمودارهای نیرو و تغییر مکان بر حسب زمان استخراج شده است که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند. همان طور که از شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، بیشترین تغییر مکان در زمان حدوداً ۱۸ ثانیه به میزان ۶۵۰ میلی‌متر رخ داده است. همچنین میزان ارتعاش مشاهده شده خیلی زیاد می‌باشد و میرایی سازه تنها عامل موثر در کاهش پاسخ می‌باشد. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمودارهای نیرو و تغییر مکان بر حسب زمان قاب مهار شده با میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی آمده است. با مقایسه‌ای بین دو شکل ۱۲ و ۱۴ مشخص می‌شود که در زمان حدوداً ۱۸ ثانیه در قاب مهار شده با میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی تغییر مکان به میزان ۷۶ درصد کاهش یافته است. با مقایسه‌ای بین دو نمودار تغییر مکان در شکل ۱۵ می‌توان مشاهده نمود که بزرگترین پاسخ ارتعاش قاب مهار شده با میراگر آلیاژ حافظه‌دار به میزان ۷۰٪ قاب مهار نشده است. با توجه به بیان مطالب فوق میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی پیشنهادی در این پژوهش برای کاهش پاسخ سازه بسیار موثر و مناسب ارزیابی می‌شود.

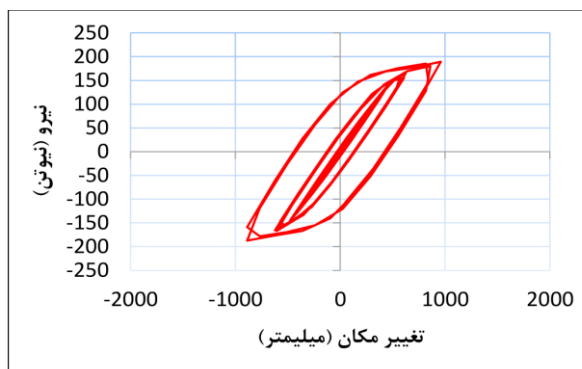
جدول ۱- مشخصات و پارامترهای زلزله طبس

بزرگی، M (ریشر)	سال	ایستگاه ثبت زلزله	متوسط سرعت موج برشی، Vs30 (m/s)	نوع گسل	PGA (g)	PGV (cm/s)
۷/۳۵	۱۹۷۸	طبس- ۹۱۰۱	۷۶۶/۸	ترکیب فشاری و امتداد لغز	۰/۸۳۶	۹۸/۲

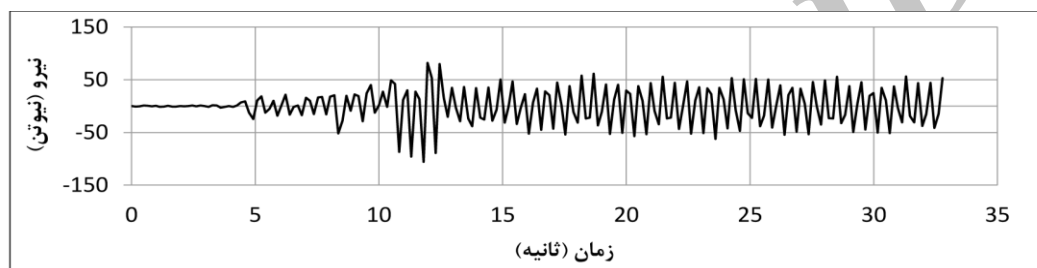


شکل ۱۰- نمودار نیرو- تغییر مکان قاب سه طبقه مهار شده

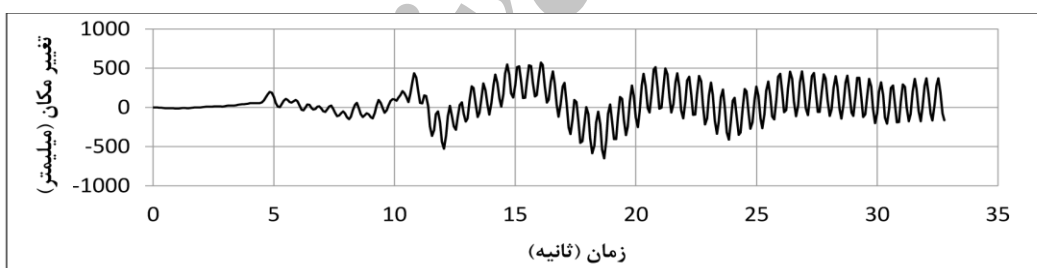
با میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی



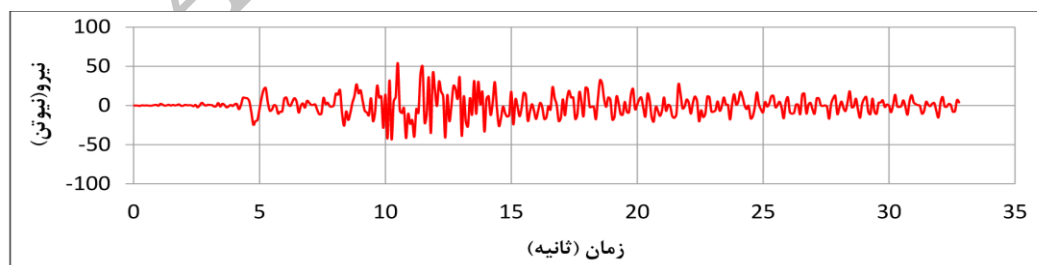
شکل ۹- نمودار نیرو- تغییر مکان قاب سه طبقه ی مهار نشده



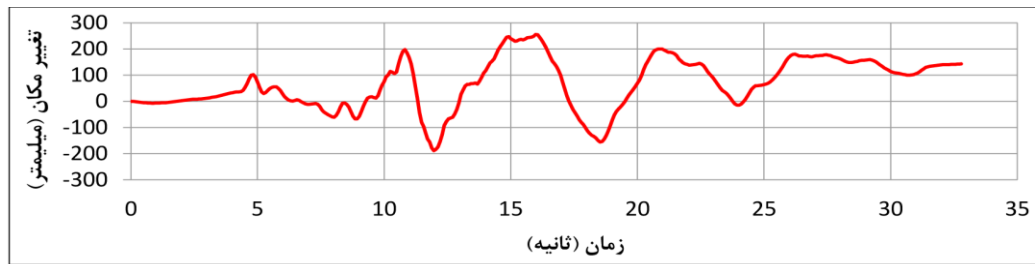
شکل ۱۱- نمودار نیرو-زمان قاب سه طبقه مهار نشده تحت شتابنگاشت زلزله طیس



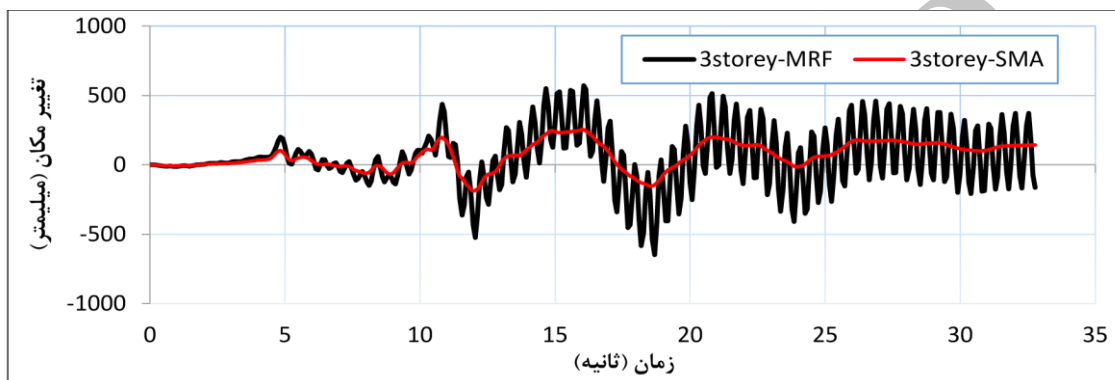
شکل ۱۲- نمودار تغییر مکان-زمان بام قاب سه طبقه مهار نشده تحت شتابنگاشت زلزله طیس



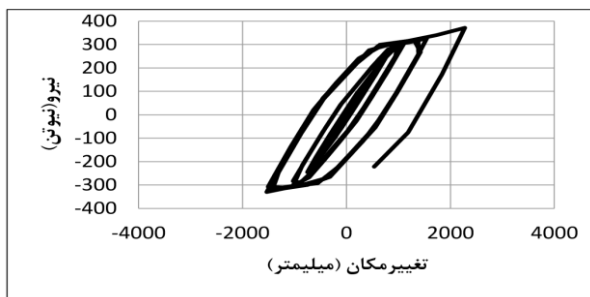
شکل ۱۳- نمودار نیرو-زمان قاب سه طبقه مهار شده تحت شتابنگاشت زلزله طیس



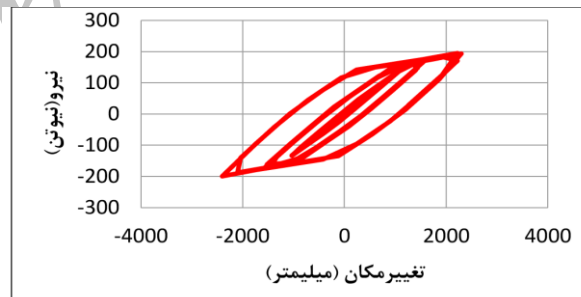
شکل ۱۴- نمودار تغییر مکان-زمان بام قاب سه طبقه مهار شده تحت شتابنگاشت زلزله طبرس



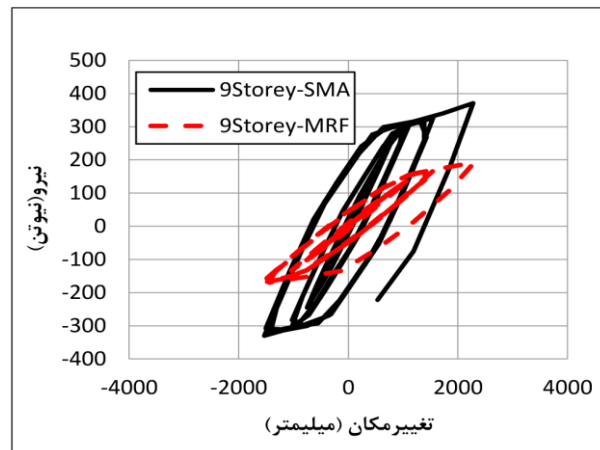
شکل ۱۵- مقایسه ی نمودار تغییر مکان-زمان بام قاب سه طبقه مهار نشده و مهار شده تحت شتابنگاشت زلزله طبرس



شکل ۱۷- نمودار نیرو-تغییر مکان قاب نه طبقه مهار شده



شکل ۱۶- نمودار نیرو-تغییر مکان قاب نه طبقه مهار نشده

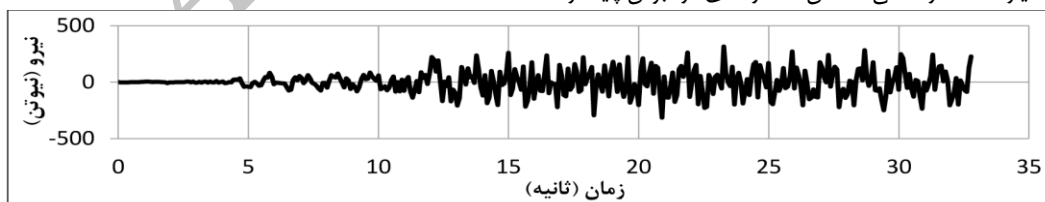


شکل ۱۸- مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان قاب نه طبقه مهار نشده و مهار شده تحت بار رفت و برگشتی

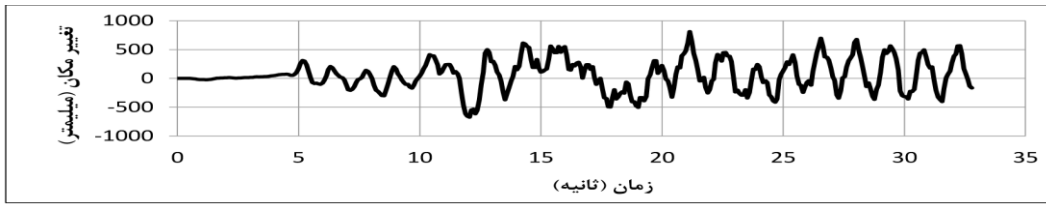
مقایسه با قاب مهار نشده، بوده است. نکته قابل توجه اینکه میزان کاهش برش پایه در قاب نه طبقه در قیاس با قاب سه طبقه کمتر بوده است و این مطلب بیانگر کاهش اثر بخشی این میراگر با افزایش ارتفاع می‌باشد. با مقایسه‌ای بین دو نمودار تغییر مکان در شکل ۲۳ نتیجه‌گیری می‌شود که بزرگترین پاسخ ارتعاش قاب مهار شده با میراگر آلیاژ حافظه‌دار به میزان $57/8\%$ قاب مهار نشده است. در جداول ۲ و ۳ خلاصه نتایج در دو حالت بارگذاری و برای دو قاب با ارتفاع‌های مختلف آمده است. با مقایسه نتایج بین قاب‌های مهار شده با میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی و قاب مهار نشده می‌توان اثر بخشی این نوع میراگرها را در کاهش پاسخ سازه و استهلاک انرژی ورودی ناشی از تحریک زمین، مشاهده نمود. همچنین با افزایش ارتفاع از میزان تأثیر این نوع مهاربند در کاهش پاسخ تغییر مکان و افزایش ظرفیت باربری سازه، کمی کاسته می‌شود. با این وجود این کاهش حداکثر به میزان ۱۰ الی ۱۵ درصد می‌باشد.

۳-۴- تحلیل غیرخطی دینامیکی تاریخچه زمانی در مدل نه طبقه تحت مؤلفه افقی شتاب زلزله طیس

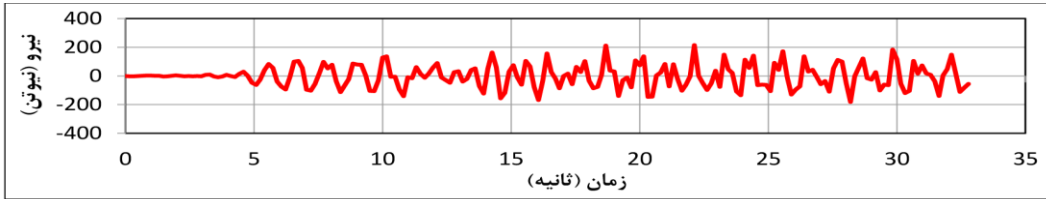
در سازه نه طبقه نیز مشابه سازه سه طبقه، مؤلفه افقی زلزله طیس با حداکثر شتاب $0/836$ برابر شتاب ثقل به پای سازه اعمال شد. دو نمودار نیرو و تغییر مکان بر حسب زمان استخراج شده است که در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده‌اند. همان طور که از شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، بیشترین تغییر مکان در زمان حدوداً ۲۱ ثانیه به میزان 800 میلیمتر رخ داده است. در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نمودارهای نیرو و تغییر مکان بر حسب زمان قاب مهار شده با میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی آمده است. با مقایسه‌ای بین دو شکل ۲۰ و ۲۲ مشخص می‌شود که در زمان حدوداً ۲۱ ثانیه در قاب مهار شده با میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی، تغییر مکان به میزان ۷۵ درصد کاهش یافته است. همچنین بیشترین نیروی برش پایه در قاب مهار نشده تقریباً 300 نیوتن بود که در حالت قاب کنترل شده به مقدار حدوداً 200 نیوتن رسیده است. به بیانی دیگر، تأثیر حضور آلیاژ حافظه‌دار شکلی، کاهش ۳۳ درصدی در برش پایه در



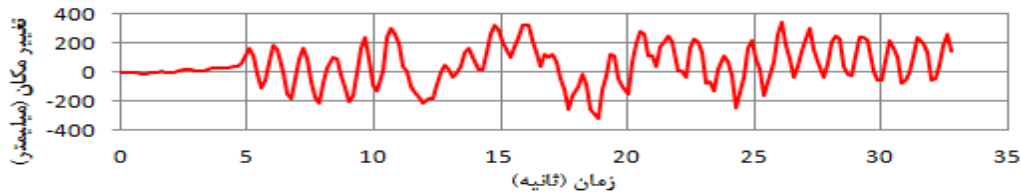
شکل ۱۹- نمودار نیرو-زمان قاب نه طبقه مهار نشده تحت شتابنگاشت زلزله طیس



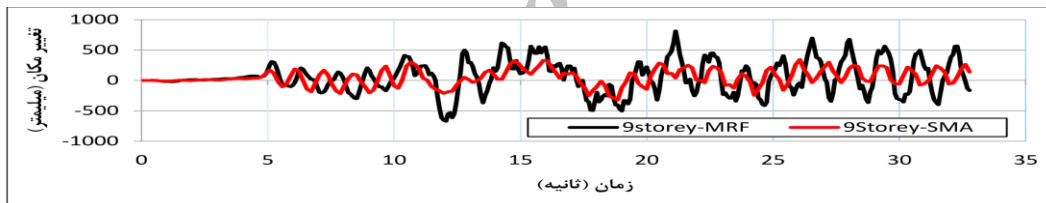
شکل ۲۰- نمودار تغییر مکان-زمان بام قاب نه طبقه مهار نشده تحت شتابنگاشت زلزله طیس



شکل ۲۱- نمودار نیرو-زمان قاب نه طبقه مهار شده تحت شتابنگاشت زلزله طیس



شکل ۲۲- نمودار تغییر مکان-زمان بام قاب نه طبقه مهار شده تحت شتابنگاشت زلزله طیس



شکل ۲۳- مقایسه نمودار تغییر مکان-زمان بام قاب نه طبقه مهار نشده و مهار شده تحت شتابنگاشت زلزله طیس

جدول ۲- نتایج مدل‌های شبیه سازی شده در حالت بارگذاری رفت و برگشتی

		حداکثر باربری (نیوتن)	سختی اولیه (N/mm)	انرژی جذبی (N.mm)	درصد افزایش ظرفیت باربری نسبت به قاب مهار نشده (%)
سه طبقه	مهار نشده	۱۸۹/۶	۰/۳۲	۳۱۵۶۸۲	-----
	مهار شده	۳۵۸/۷	۰/۶۷	۸۰۶۵۱۸	۸۹/۲
نه طبقه	مهار نشده	۱۹۹/۲۴	۰/۱۳	۸۵۶۸۲۰	-----
	مهار شده	۳۷۱/۱۳۴	۰/۳۳	۱۲۹۵۶۰۷	۸۶/۳

جدول ۳- نتایج مدل های شبیه سازی شده در حالت بارگذاری دینامیکی غیر خطی

		حداکثر برش پایه (نیوتن)	حداکثر تغییر مکان (mm)	در صد کاهش تغییر مکان نسبت به قاب مهار نشده (%)
سه طبقه	مهار نشده	۱۰۵/۹۵	۶۴۷/۳۳	-----
	مهار شده	۵۳/۸۷	۲۵۶	۶۰/۴۵
نه طبقه	مهار نشده	۳۱۶/۱۵	۸۱۱/۷۶	-----
	مهار شده	۲۱۵/۸۱	۳۴۲/۲۲	۵۷/۸۴

قابلیت جذب و استهلاک انرژی ۲/۵ برابر و سختی اولیه سیستم سازه‌ای ۲ برابر حالت اولیه می‌گردد. با افزایش ارتفاع سختی اولیه به میزان ۱/۵ برابر و جذب انرژی ۱/۶ برابر رشد می‌یابد. طبق نتایج بدست آمده، با افزایش ارتفاع اثر بخشی این میراگر در کنترل پاسخ-های لرزه‌ای بین ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش می‌یابد با این وجود، بدلیل مشخصات مکانیکی فوق العاده این نوع آلیاژ در استهلاک انرژی و مقاومت بالا در برابر خوردگی (آلیاژ حافظه دار شکلی نیکل-تیتانیوم) می‌توان ادعان نمود که این مهاربند به عنوان وسیله‌ی میراگر برای کنترل ارتعاش سازه بسیار مناسب است.

۴. نتایج

در این مقاله به تأثیر استفاده از میراگر آلیاژ حافظه‌ای هوشمند در استهلاک انرژی و کاهش دامنه ارتعاش قاب‌های فولادی چند طبقه پرداخته شد. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی می‌تواند باعث افت سریع در دامنه ارتعاش سازه شود. استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در قاب سه طبقه باعث افزایش ۹۰ درصدی ظرفیت باربری و کاهش ۶۰ درصدی تغییر مکان در قیاس با قاب بدون آلیاژ می‌شود. با افزایش ارتفاع به ۹ طبقه این مقادیر حدوداً ۱۰ درصد کاهش می‌یابند. در حضور آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت بارگذاری رفت و برگشتی برای سازه ۳ طبقه

vibration amplitudes of bridge cables, Engineering Structures, Vol.56, 2013, pp 1547-1556.

10- Lobo, P.S., Almeida, J. and Guerreiro, L., Semi-active damping device based on super-elastic shape memory alloys, Structures, Vol.3, 2015, pp 1-12.

S., Mishra, S.K. and Roy, K., 11. Gur, Stochastic seismic response of building with super-elastic damper, Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, Article in Press.

12- Lin, P.H., Tobushi, H., Tanaka, K. and Ikai, A., Deformation properties of TiNi shape memory alloy, JSME International Journal, Vol.39, No.1, 1996, pp 108-116.

۵. مراجع

Y.L., Li, Q.S., Li, A.Q., Leung, A. Y. 1. Han, T. and Lin, P.H., Structural vibration control

by shape memory alloy damper, Earthquake Engng Struct. Dyn., Vol.32, No.3, 2003, pp 483-494.

۲. قاسمیه، م. و ایرانمنش، ا.، ارزیابی بهبود عملکرد سازه‌های قابی تحت بارگذاری چرخه‌ای با استفاده از مهارندهای از جنس آلیاژهای حافظه دار شکلی، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۵، ۱۳۸۵، صفحات ۶۸۹-۶۹۹.

3. McCormick, J., Roches, R.D., and Auricchio, F., Seismic Assessment of Centrally Braced Steel Frames with Shape Memory Alloy Braces, Journal of Structural Engineering, Vol.133, No.6, 2007, pp 862-870.

۴. قاسمیه، م. و مطهری، ا.، کاهش پاسخ سازه‌های فولادی با استفاده از میراگرهای حافظه دار شکلی، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری دانشکده فنی، دوره ۴۴، شماره ۱، ۱۳۸۹، صفحات ۱۰۱-۹۳.

۵. قاسمیه، م. و کاری، ا.، اثر ارتفاع سازه در پاسخ لرزه‌ای سازه های فولادی با بادبندهای نوین، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۴، ۱۳۹۰، صفحات ۴۶۷-۴۷۸.

6. Asgarian, B. and Moradi, S., Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces, Journal of Constructional Steel Research, Vol.67, No.1, 2011, pp 65-74.

7. Hu, J. W., Numerical simulation for the behavior of superelastic shape memory alloys, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.27, No.2, 2013, pp 381-386.

8. Mahmoudi, M. et al., Seismic behavior of X-braced frames with shape memory alloys, Journal of Advances in Civil and Environmental Engineering, Vol.02, No.1, 2014, pp 01 -19.

9. Dieng, L., Helbert, G., Chirani, S.A., P., Use of shape memory alloys damper device to mitigate