نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۲، سال ۱۴۰۱، صفحات ۶۴۹ تا ۶۷۰
DOI: 10.22060/ceej.2021.19030.7038

ارزیابی رفتار لرزهای قا ب های دوگانه فولادی با مهاربند برون محور دارای میله ی آلیاژ حافظه دار شکلی

منصور باقری* ، سید عباس حسینی[۲]،امین وداد[۳]

۱-گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.
۲-دانشکده صنعت و معدن چرام، دانشگاه یاسوج، چرام، ایران.
۳-مؤسسه آموزش عالی بعثت کرمان، کرمان، ایران .

خلاصه: به دلیل مناسب بودن سیستم مهاربندهای برون محور از نظر عملکرد و شکل‌پذیری مطلوب و نیز بررسی میزان تأثیر مصالح برگشت پذیر مانند آلیاژ حافظه دار شکلی در کاهش تغییر مکان پسماند در انتهای زمان زلزله، ارزیابی لرزه ای سازه های با تعداد طبقات مختلف در این پژوهش انجام شد. سازه های دارای سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی با مهاربند برون محور در ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با میله ی آلیاژ حافظه دار شکلی، تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه ی زمانی قرار گرفته و بیشینه جابجایی مطلق بام و نسبی طبقات، بیشینه تغییر مکان پسماند بام، بیشینه برش پایه و شتاب بام در قاب‌های مورد نظر، ارزیابی و مقایسه شدند. نتایج نشان داد که تغییر مکان مطلق و نسبی بین طبقه ای در هر سه سازه مورد نظر دارای میله آلیاژهای حافظه دار شکلی به دلیل ضریب کشسانی پایین این آلیاژ بیشتر از سازه بدون آن می باشد. از طرفی نیز، مقادیر تغییر مکان پسماند به سبب خاصیت فوق الاستیک مصالح آلیاژ حافظه دار شکلی و نیز برش طبقات و شتاب نظیر طبقه بام با توجه به افزایش زمان تناوب و نرمی سازه ، در مدل های دارای این نوع آلیاژ نسبت به سازه های بدون آن، کاهش مشخصی داشته اند. همچنین مقایسه ی پاسخ های سازه در طبقات مختلف نیز حاکی از اثر کاهشی بیشتر در تغییر مکان پسماند سازه ی ۵ طبقه و نیز در برش پایه و شتاب بام سازه-های ۱۰ و ۱۵ طبقه دارد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۹
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۱۰
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۷

کلمات کلیدی:
قاب دوگانه ی فولادی با مهاربند واگرا
آلیاژ حافظه دار شکلی
تغییر مکان پسماند
تحلیل دینامیکی تاریخچه ی زمانی غیرخطی

۱- مقدمه

مشاهده عملکرد سازه‌ها در هنگام وقوع زلزله و همچنین مطالعات تحلیلی و بررسی‌های آزمایشگاهی و جمع آوری اطلاعات مربوط به زمین لرزه‌های چهار دهه اخیر، امکان ارائه روشی مدرن برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله را فراهم آورده است. مطالعات فراوانی در زمینه کنترل پاسخ سازه‌ها در برابر زلزله صورت پذیرفته به طوری که برای مستهلک کردن انرژی، سه سیستم فعال، نیمه فعال و غیرفعال ابداع شده است. سیستم‌های کنترل فعال سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها سازه به سیستم پردازش‌گر مجهز شده و در هر لحظه متناسب با بار جانبی وارد شده، به یک منبع نیرو برای کنترل سازه احتیاج است. سیستم‌های کنترل غیرفعال نیز سیستم‌هایی هستند که در آن‌ها سازه به وسیله تجهیزات از پیش طراحی شده، مانند میراگر و جداگر لرزه‌ای و بدون احتیاج به منبع خارجی در مقابل بارهای جانبی مقاومت می‌کند و بخش نسبتاً زیادی از انرژی ورودی به سازه را تحت مکانیزم‌های مختلف جذب می‌نمایند [۱]. در این میان با پیشرفت علم، مبحث کاربرد سیستم‌های نوین در مهندسی مطرح و پیشنهادهای مختلفی در این زمینه ارائه شده است.

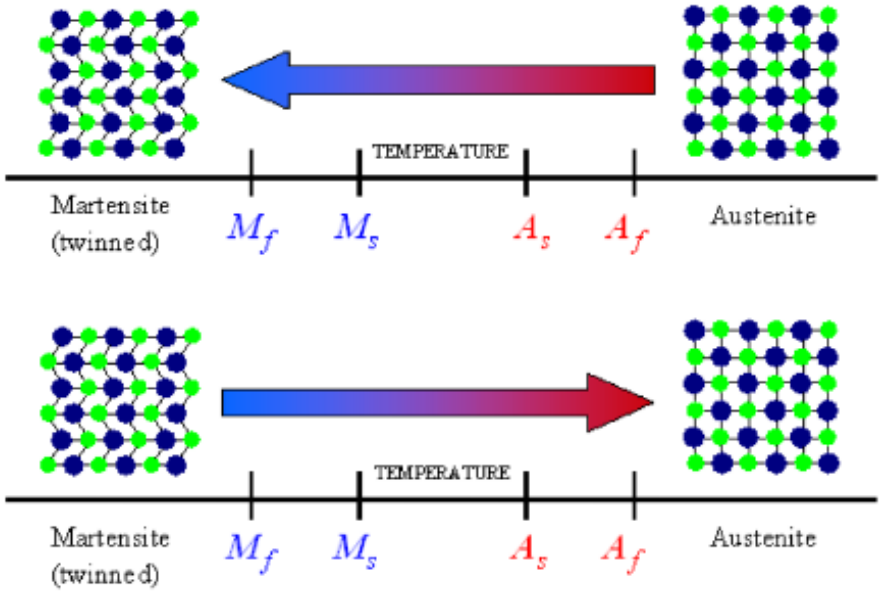
یکی از انواع کنترل کننده‌های هوشمند، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی[1] بوده که کاربردهای گسترده‌ای در علوم مهندسی و پزشکی پیدا کرده است. از جمله کاربردهای اصلی این نوع آلیاژها، مهار جابجایی‌های پلاستیک پسماند به علت داشتن خصوصیاتی همچون ظرفیت میرایی بالا، دوام و نیز مقاومت در برابر خستگی و خوردگی می‌باشد. به طوری که با افزایش میرایی سازه و استهلاک انرژی زمین‌لرزه، نیروهای وارده و تغییر مکان‌های پسماند ایجاد شده توسط زلزله در ساختمان به صورت هم‌زمان به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد، در حالی که کاهش هم‌زمان این دو در روش‌های سنتی مقاوم‌سازی معمولاً امکان‌پذیر نیست. کاربرد الیاف حافظه‌دار شکلی با سیستم‌های جداگر لرزه‌ای، میراگرهای انرژی، اتصالات سازه‌ای، بتن مسلح هوشمند و کامپوزیت‌ها، نمونه‌هایی از کاربردهای این آلیاژ می‌باشند [۲].

آلیاژهای حافظه‌دار عنوان گروهی از مواد محرک می‌باشند که خواص متمایز و برتری نسبت به سایر آلیاژها دارند. عکس‌العمل شدید این مواد نسبت به برخی از مشخصه‌های ترمودینامیکی و مکانیکی و قابلیت بازگشت به شکل اولیه در اثر اعمال مشخصه‌های مذکور به گونه‌ای است که

1 Shape Memory Alloys (SMAs)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mnsrbagheri@birjandut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.



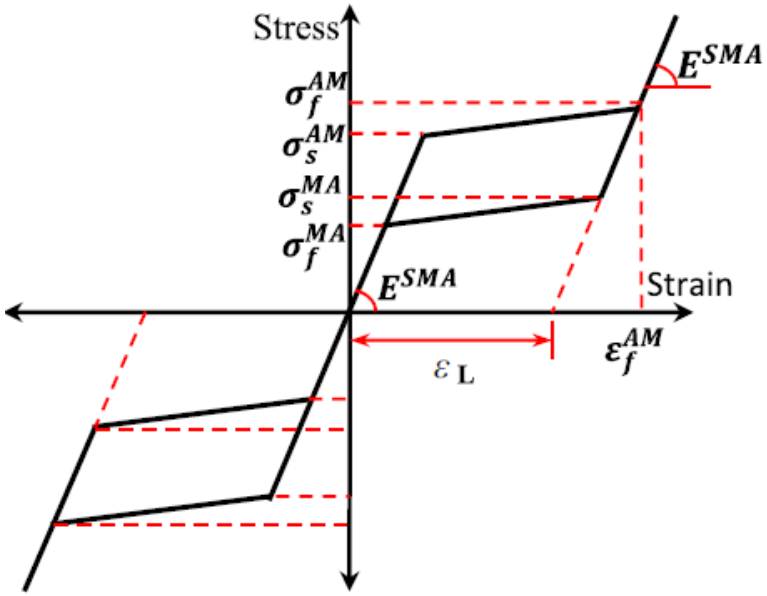
شکل ۱. تغییر شکل مارتنزیتی با تغییر دما در غیاب بار خارجی [۴]

Fig.1. Martensite deformation with temperature change in the absence of external load

می‌تواند رفتار سیستم را بهبود بخشد. مکانیسم اصلی که خواص آلیاژهای حافظه‌دار را کنترل می‌کند در رابطه با تغییر کریستالی آلیاژ است [۳]. به این معنی که ساختار مارتنزیتی در دمای پایین با افزایش دما به ساختار آستنیتی تبدیل می‌شود و در هنگام سرد شدن، فرآیند عکس رخ خواهد داد. اگر در این آلیاژها در دمای پائین و هنگامی‌که فاز مارتنزیت حاکم است تغییر فرم پلاستیکی روی دهد، ساختار کریستالی دوقلو شده‌ای برای آلیاژ ایجاد می‌شود که ناشی از تغییر فرم پلاستیک می‌باشد. با گرم کردن آلیاژ تغییر فرم‌یافته تا دمای شروع فاز آستنیت می‌توان شکل اولیه را بازگرداند که این توانایی به عنوان اثر حافظه‌ی شکل خوانده می‌شود. در حقیقت در اثر فرآیند برگشت به شکل اولیه، تنش‌هایی در آلیاژ تولید می‌گردد که این تنش باعث تحریک شده و به آن تنش بازیافتی می‌گویند. بهبود توزیع تنش و کرنش، بهبود خواصی چون مدول یانگ و تنش تسلیم و توانائی کنترل رفتار سیستم، از جمله آثار مفید تنش‌های بازیافتی می‌باشد. تغییر شکل برگشت‌پذیر مارتنزیتی با سرد و گرم کردن در غیاب بار خارجی در شکل ۱ نمایش داده شده است.

اعمال تنش به یک ماده حافظه‌دار شکلی که در حالت اولیه آستنیت قرار دارد و دمای آن بالاتر از A_f می‌باشد، موجب می‌شود که آستنیت به مارتنزیت ایجاد شده توسط تنش تبدیل شود، چرا که آستنیت در تنش‌های بالا پایدار نمی‌باشد. این تبدیل منحنی تنش-کرنش، ماده را به صورت غیرخطی درمی‌آورد. در انتها تمامی آستنیت‌ها به مارتنزیت بدل شده و لذا ماده دچار سخت شدگی خواهد شد. در هنگام باربرداری، مارتنزیت ناپایدار می‌شود و تبدیل معکوس رخ می‌دهد. تبدیل معکوس از روی یک مسیر متفاوت ماده را به مکان اولیه می‌رساند. این رفتار را که در شکل ۲ نشان داده شده است، فوق الاستیک یا شبه الاستیک می‌نامند چرا که هیچ کرنش پسماندی روی ماده باقی نمی‌ماند. اهمیت بررسی تغییر شکل‌های پسماند این است که با ورود سازه به ناحیه غیرخطی و شروع تغییر شکل‌های غیرارتجاعی، پس از حذف عامل خارجی بار، تغییر شکل‌های ماندگار در سازه باقی می‌ماند که وجود این نوع تغییر شکل‌های دائمی تأثیر منفی در عملکرد ساختمان‌های به خصوص با اهمیت زیاد و خیلی زیاد می‌گذارد [۵].

مک‌کورمیک و همکاران [۶]، با مطالعه تأثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر روی قاب‌های مهاربندی شورون، نشان دادند که تغییر مکان پسماند به خصوص در طبقات پایین به طور محسوسی کاهش می‌یابد. محمودی و همکاران [۷]، به بررسی قاب‌های مهاربند زانویی مجهز به میله‌های SMA پرداخته و نتیجه گرفتند که میله‌های با قطر ۱۲ میلی‌متر عملکرد مناسب‌تری داشته و به طور کلی، استفاده از SMA به طور قابل ملاحظه‌ای موجب کاهش تغییر مکان پسماند و تغییر سختی، شکل‌پذیری و مقاومت سازه‌ها



شکل ۲. رفتار فوق الاستیک آلیاژ حافظه دار شکلی [۵]

Fig. 2. Ultra-elastic behavior of SMA

می‌شود. همچنین مرادی و همکاران [۸] مطالعات متعددی جهت بررسی قابلیت کاربرد این آلیاژها در مهندسی سازه و زلزله انجام دادند که حاکی از کاهش تغییر شکل‌های پسماند پس از زلزله در صورت استفاده از این آلیاژ به خصوص در سازه‌های مهاربندی شده بود. مسّاح و دورور [۹] در مطالعه خود به اثر SMA در قاب‌های فولادی ۴، ۹ و ۱۴ طبقه دارای تیر پیوند عمودی پرداختند. نتایج نشان‌گر این بود که مصالح فوق ارتجاعی مزبور موجب بهبود شکل‌پذیری سازه، ظرفیت برگشت‌پذیری عالی و مقاومت جانبی مطلوب می‌شود و هر دو تغییر مکان نسبی و پسماند را کاهش می‌دهد. میرزایی و عطار نژاد [۱۰] نیز به بررسی عملکرد نوعی مهاربند برون محور با پیوند عمودی دارای SMA پرداختند که ارائه پایین‌ترین سطح تغییر مکان پسماند برای این سیستم از مهم‌ترین نتایج این تحقیق بود. همچنین کیو و ژو [۱۱]، روش طراحی مبتنی بر عملکرد قاب‌های مهاربندی فولادی با مهارهای برگشت‌پذیر ساخته شده از SMA را بررسی نمودند. همچنین با توجه به ضرورت بررسی عملکرد میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قاب‌های مهاربندی شده‌ی واگرا، ژو و همکاران [۱۲] در پژوهشی پیرامون برگشت‌پذیری در قاب‌های مهاربندی برون محور با کابل و میله‌ی SMA، تأثیر شکل جزئیات اتصال تیر پیوند را روی عملکرد چرخه‌ای سیستم EBF بررسی نمودند.

یکی از مشکلات مهاربندهای همگرا، عدم رفتار مناسب در تغییر شکل‌های غیرارتجاعی آن‌ها می‌باشد که برای حل مشکل کاهندگی مهاربند تحت بار متناوب، از مهاربند برون محور استفاده شده که با ایجاد تسلیم در اعضای خمشی می‌توان از کمانش آن تحت فشار جلوگیری کرد. از طرف دیگر، مطابق آیین نامه فولاد امریکا ویرایش ۲۰۱۰ [۱۳]، تیر پیوند به عنوان فیوز عمل کرده و ضعیف است و عضو مهاربند، ستون و تیر خارج از آن نیز باید قوی باشد. از طرفی، میله‌های SMA می‌توانند هم در محل اتصال تیر پیوند به تیر خارج از پیوند و هم در محل اتصال مهاربند به تیر استفاده شده و در صورت پاسخ‌های مطلوب مانند کاهش برش پایه و شتاب طبقات و نیز تغییر مکان پسماند، میزان اثر گذاری آن در کاهش پاسخ‌های سازه بررسی شود.

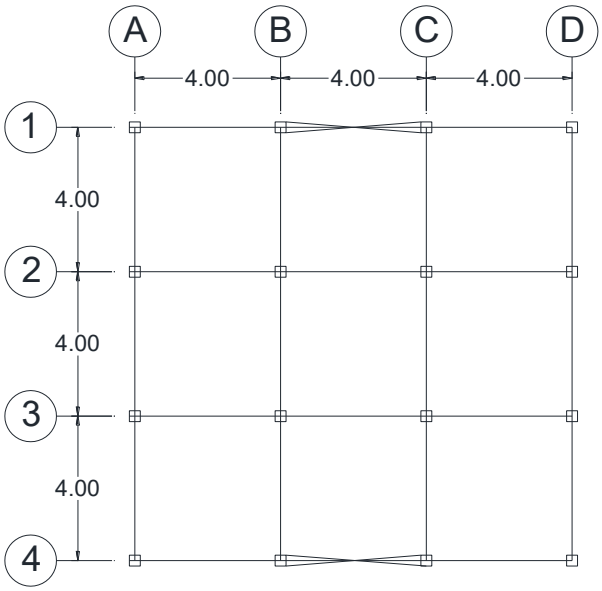
۲- نوآوری تحقیق

با توجه به انجام تحقیقات متعدد در مورد استفاده از میله‌ی آلیاژ حافظه‌دار شکلی در محل اتصال تیر به ستون قاب‌های خمشی و نیز در انتهای مهاربندهای همگرا [۸-۶] و همچنین در محل اتصال تیر پیوند به تیر خارج پیوند [۱۲]، در این مطالعه نوع جدیدی از اتصال میله SMA به مهاربندهای برون محور در سازه‌های با طبقات مختلف مدل‌سازی، تحلیل

و نتایج حاصل با حالت بدون این آلیاژ مقایسه گردید. در این پژوهش، قاب خمشی فولادی دوگانه با مهاربند برون محور شورون در ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه دارای میله از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی (EBF-SMA) و یا بدون این آلیاژ (EBF) در نرم‌افزار سایزمو استراکت [۱۴] مدل‌سازی و تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی قرار گرفته است. سپس میزان حداکثر پاسخ‌های لرزه‌ای شامل جابجایی مطلق بام، تغییر مکان نسبی طبقات، تغییر مکان پسماند بام، برش پایه و شتاب بام و همچنین شرایط تشکیل مفاصل پلاستیک اعضای قاب و میزان جذب انرژی مهاربندها، ارزیابی و مقایسه گردید.

۳- مدل‌های مورد بررسی

مدل این سازه‌ها شامل سه دهانه ۴ متری در راستاهای x و y با ارتفاع هر طبقه برابر با ۳/۲۰ متر در منطقه با شدت لرزه خیزی زیاد روی خاک نوع D و با کاربری مسکونی مطابق پلان شکل ۳ است. همچنین مقدار بار ثقلی به صورت بار مرده و زنده به ترتیب برابر با ۵۱۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع وارد بر کف طبقات می‌باشد که این بارها توسط دال سقف و تیرهای خمشی تحمل شده و به ستون‌ها منتقل می‌گردد.



شکل ۳. پلان سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه

Fig. 3. Plan of 5, 10, and 15-stories structures

جهت طراحی سازه‌ها با سیستم قاب خمشی فولادی متوسط با مهاربند برون محور از آئین‌نامه‌ی فولاد آمریکا ویرایش سال ۲۰۱۰ استفاده شده است. کنترل ضوابط لرزه‌ای مانند دریفت طبقات و نیز اعمال ترکیبات بار ۱۰۰ درصد جهت اصلی و ۳۰ درصد جهت متعامد بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ انجام شده و همچنین نسبت تنش در تمام اعضای مدل‌های سازه‌ای کمتر از یک می‌باشد. مشخصات مقاطع کلیه اجزای سازه‌ها شامل ستون‌ها، تیرها و مهاربندهای برون محور شورون در جداول ۱ و ۲ آمده است. با توجه به طرح لرزه‌ای مبحث دهم مقررات ملی ساختمان فشرده لرزه‌ای بودن مقطع تیر پیوند با استفاده از جدول ۱۰-۳-۴ مرجع مزبور بررسی و کنترل گردید.

فولاد مورد استفاده در این تحقیق بر اساس خصوصیات تعریف شده در نرم‌افزار سایزمو استراکت از نوع دو خطی بوده که با عنوان stl_bl شناخته می‌شود و دارای ضریب کشسانی و مقاومت حد تسلیم به ترتیب برابر با ۲×۱۰^{۸} و ۲۴×۱۰^{۴} کیلوپاسکال و سختی کرنشی سینماتیکی ۰/۰۰۵ است و محدوده الاستیک در بارگذاری‌های مختلف ثابت می‌ماند. منحنی تنش- کرنش این فولاد و نیز منحنی تنش- کرنش آلیاژ حافظه‌دار شکلی در شکل ۴ نمایش داده شده است.

همچنین مشخصات مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیز بر اساس مطالعه محمودی و همکاران [۷] مطابق جدول ۳ می‌باشد. برای این مصالح، ضریب کشسانی برابر ۲۷۶۰۰ مگاپاسکال لحاظ شده است. این ضریب تقریباً ۷ برابر کمتر از ضریب کشسانی فولاد می‌باشد که بر اساس روابط مقاومت مصالح روی پاسخ‌های سازه مربوط به تغییر مکان جانبی اثر قابل ملاحظه‌ای دارد. همچنین مقاومت تسلیم و نهایی حالت آستنیت به مارتنزیت به ترتیب ۴۱۴ و ۵۵۰ و همچنین مقاومت تسلیم و نهایی حالت مارتنزیت به آستنیت به ترتیب برابر با ۳۹۰ و ۲۰۰ مگاپاسکال با کرنش نهایی ۵/۵ درصد در نظر گرفته شده است.

برای انجام مدل‌سازی در نرم‌افزار سایزمو استراکت، از مقاطع معرفی شده در جداول ۱ و ۲ که حاصل تحلیل و طراحی اولیه‌ی مدل‌ها در نرم‌افزار ایتبس [۱۵] می‌باشد، استفاده شده است. در این نرم‌افزار، مقاطع مورد نظر به صورت انتخاب خودکار به قاب‌های مدل شده اختصاص داده شده و ترکیبات بار مربوط به سازه‌های فولادی تعریف و سپس تحلیل استاتیکی معادل انجام شده و مقاطع اولیه برای ستون، تیر و مهاربند مشخص شدند. از سوی دیگر نیز با توجه به اینکه امکان تعریف مصالح با خصوصیات آلیاژ حافظه‌دار شکلی با عنوان se_sma به طور مستقیم در نرم‌افزار سایزمواستراکت وجود دارد، لذا از این نرم‌افزار برای مدل‌سازی و انجام تحلیل تاریخچه زمانی

جدول ۱. مشخصات مقاطع ستون در سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه

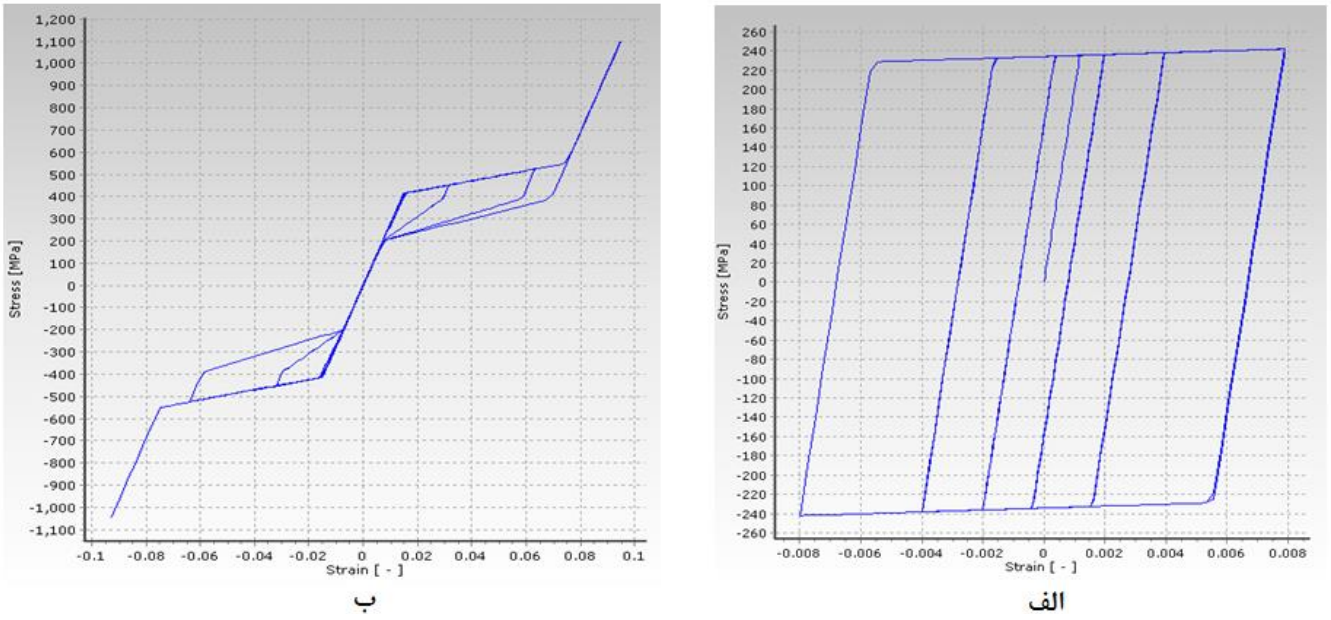
Table 1. Section properties of columns for 5, 10, and 15-stories structures

ستون جانبی			ستون میانی			
۱۵ طبقه	۱۰ طبقه	۵ طبقه	۱۵ طبقه	۱۰ طبقه	۵ طبقه	طبقه
BOX180×15	BOX150×10	BOX150×10	BOX200×20	BOX180×15	BOX150×10	۴-۱
BOX180×15	BOX150×10	BOX150×10	BOX180×15	BOX150×10	BOX150×10	۵
BOX180×15	BOX150×10	-	BOX180×15	BOX150×10	-	۶
BOX180×15	BOX150×10	-	BOX180×15	BOX150×10	-	۹-۷
BOX150×15	BOX150×10	-	BOX150×15	BOX150×10	-	۱۰
BOX150×15	-	-	BOX150×15	-	-	۱۲ و ۱۱
BOX150×10	-	-	BOX150×10	-	-	۱۵-۱۳

جدول ۲. مشخصات مقاطع تیر و مهاربند برون محور شورون در سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه

Table 2. Section properties of beams and Chevron eccentrically brace for 5, 10, and 15-stories structures

مهاربند برون محورشورون			تیر خارج از دهانه مهاربند			تیر دهانه مهاربند			
۱۵ طبقه	۱۰ طبقه	۵ طبقه	۱۵ طبقه	۱۰ طبقه	۵ طبقه	۱۵ طبقه	۱۰ طبقه	۵ طبقه	طبقه
2UNP120	2UNP100	2UNP80	IPE270	IPE200	IPE180	IPE400	IPE270	IPE200	۱
2UNP120	2UNP100	2UNP80	IPE270	IPE200	IPE180	IPE360	IPE270	IPE200	۵-۲
2UNP100	2UNP80	-	IPE270	IPE200	-	IPE360	IPE200	-	۶
2UNP100	2UNP80	-	IPE270	IPE200	-	IPE270	IPE200	-	۱۰-۷
2UNP80	-	-	IPE270	-	-	IPE270	-	-	۱۱
2UNP80	-	-	IPE240	-	-	IPE240	-	-	۱۴-۱۲
2UNP80	-	-	IPE180	-	-	IPE180	-	-	۱۵



شکل ۴. منحنی تنش -کرنش تعریف شده در نرم افزار سایزمو استراکت (الف): فولاد- (ب): آلیاژ حافظه دار شکلی [۱۴].

Fig. 4. Stress-strain curve defined in SeismoStruct software for; a:steel-b:SMA

جدول ۳. مشخصات مکانیکی آلیاژ حافظه دار شکلی [۷]

Table 3. Mechanical properties of SMA

کمیت	مقدار (مگاپاسکال)
مدول الاستیسیته	۲۷۶۰۰
مقاومت تسلیم (آستنیت به مارتنزیت)	۴۱۴
مقاومت نهایی (آستنیت به مارتنزیت)	۵۵۰
مقاومت تسلیم (مارتنزیت به آستنیت)	۳۹۰
مقاومت نهایی (مارتنزیت به آستنیت)	۲۰۰
کرنش نهایی	۵/۵ درصد

که در آن، t_f ضخامت بال و t_w ضخامت جان و d ارتفاع کل تیر پیوند است. لذا نسبت مقاومت محوری مورد نیاز تیر پیوند به مقاومت تسلیم محوری تیر پیوند (P_u/P_c) برابر با ۰/۰۵۰۴ شده و کمتر از ۰/۱۵ است، بنابراین مطابق تبصره انتهای همین بند، هیچ محدودیتی برای طول تیر پیوند وجود ندارد و تنها کافی است که طول کوچکی برای آن لحاظ گردد لذا طول تیر پیوند در مدل‌سازی این پژوهش به میزان ۲۰ درصد کل طول تیر دهانه‌ی مهاربندی به مقدار ۸۰ سانتی‌متر لحاظ شده است.

از دیگر سو، میزان بیشینه دوران مجاز برای تیر پیوند نسبت به تیر خارج از آن به ترتیب برابر با ۰/۰۸ اگر $e < 1.6\ M_p/V_p$ و ۰/۰۲ اگر $e \geq 2.6$ M_p/V_p است که در آن، متغیر e طول تیر پیوند بوده و M_p، V_p و Z

جدول ۴. نتایج تحلیل مقادیر ویژه مدل های EBF-SMA وEBF در مود اول

Table 4. Results of Eigenvalue analysis of EBF-SMA and EBF models in the first mode

سازه	مدل	زمان تناوب اصلی (ثانیه)	تغییر مکان جهت x
۵ طبقه	EBF	۰/۴۸	۵/۹۵
	EBF-SMA	۰/۵۱	۶/۰۵
۱۰ طبقه	EBF	۱/۱۱	۷/۹۷
	EBF-SMA	۱/۲۱	۸.۱۳
۱۵ طبقه	EBF	۱/۹۵	۹/۵۱
	EBF-SMA	۲.۱۱	۹/۷۲

غیرخطی کمک گرفته شده است. پس از تعریف مصالح SMA، از قسمت مربوط به مقاطع در نرم‌افزار مزبور، مقطع دایره‌ای از نوع circular solid section را انتخاب و قطر میله مشخص می‌شود. این المان بر اساس دستورالعمل نرم‌افزار سایزمواستراکت به صورت تک محوری و مطابق با پژوهش آریچیو و ساکو [۱۶] بوده و در آن فرض شده است که مهارهای SMA تحت فشار محوری دچار کمانش نشوند و سختی آن‌ها تحت رفتار آستنیت و مارتنزیت کامل، ثابت باشد. ضمناً برای کنترل یکسان بودن سختی کلی سازه، مدل‌های با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی از نظر زمان تناوب اصلی با هم مقایسه شده و پس از انجام تحلیل مقادیر ویژه به نتایج مشابهی رسیده‌اند که در جدول ۴ مقادیر زمان تناوب اصلی سازه‌ها و تغییر مکان جهت x در مود اول سازه آمده است.

پس از تعریف مصالح و مقاطع لازم برای ستون‌ها، تیرها، مهاربندها و همچنین اعضای SMA، گره‌های دو سر اعضا تعیین شده و با انتخاب گره‌های مورد نظر و تعیین مقطع مورد نظر از لیست موجود، مدل‌سازی سازه‌ها انجام می‌گیرد. همچنین برای میله‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی به کار رفته در انتهای مهاربندها، قطر ۱۲ میلی‌متر مطابق مطالعه‌ی محمودی و همکاران [۷] و همچنین مطالعه‌ی وانگ و همکاران [۱۷] انتخاب شده است. از طرف دیگر و همان‌طور که در قسمت مقدمه نیز بیان شد، در پژوهش دسروچز و همکاران [۱۸] نیز مهارهای SMA در انتهای قاب فولادی با مهاربند همگرای شورون معکوس مورد بررسی لرزه‌ای قرار گرفته که قطر متوسط مهار آلیاژ حافظه‌دار شکلی برابر با ۱۲/۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

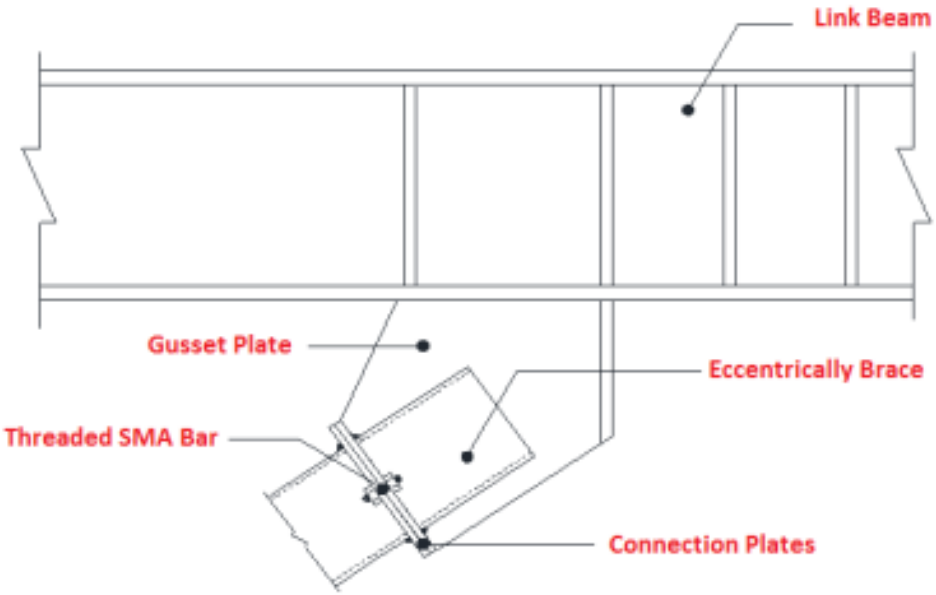
برای بررسی و کنترل مشخصات لرزه‌ای تیر پیوند استفاده شده در قاب‌های مورد نظر، مطابق با بند ۱۰-۳-۱۲-۴ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در خصوص طول تیر پیوند در مهاربندهای برون محور ویژه و با توجه به اینکه خروجی نرم‌افزار ایتبس برای مقاومت محوری (P_u) و مقاومت برشی (V_u) مورد نیاز تیر پیوند طبقه اول سازه ۵ طبقه از IPE۲۰۰ به ترتیب برابر با ۳۴۵۰/۱۶۹ و ۱۹۶۲/۳۹۴ کیلوگرم بوده است، مقاومت تسلیم محوری و نیز مقاومت تسلیم برشی تیر پیوند از روابط (۱) و (۲) بر حسب کیلوگرم حاصل می‌شود:

$$P_c = F_y A_g = 2400 \times 28.5 = 68400 \quad (۱)$$

$$V_c = 0.6 \times F_y A_w = 0.6 \times 2400 \times 10.248 = 14757.12 \quad (۲)$$

که در آن، F_y تنش حد تسلیم فولاد، P_c مقاومت تسلیم محوری، V_c مقاومت برشی و نیز A_g و A_w به ترتیب برابر با مساحت کل مقطع و مساحت جان تیر پیوند برای مقاطع I-شکل می‌باشند که از رابطه (۳) بر حسب سانتی‌متر به دست می‌آید.

$$A_w = (d - 2t_f) t_w = (20 - 2 \times 0.85) \times 0.56 = 10.248 \quad (۳)$$



شکل ۵. نحوه اتصال میله آلیاژ حافظه دار شکلی به ورق اتصال مهاربند برون محور

Fig. 5. Connection of threaded SMA bar to eccentrically brace gusset plate

به ترتیب لنگر برحسب کیلوگرم سانتی‌متر، برش برحسب کیلوگرم و اساس مقطع پلاستیک برحسب سانتی‌متر مکعب مقطع تیر پیوند هستند و برای تیر پیوند مزبور مطابق روابط (۴) و (۲) به دست می‌آیند.

$$M_p = F_Y Z = 2400 \times 221 = 530400 \quad (۴)$$

بنابراین داریم:

$$1.6M_p/V_p = 57.51; 2.6M_p/V_p = 93.45 \quad (۵)$$

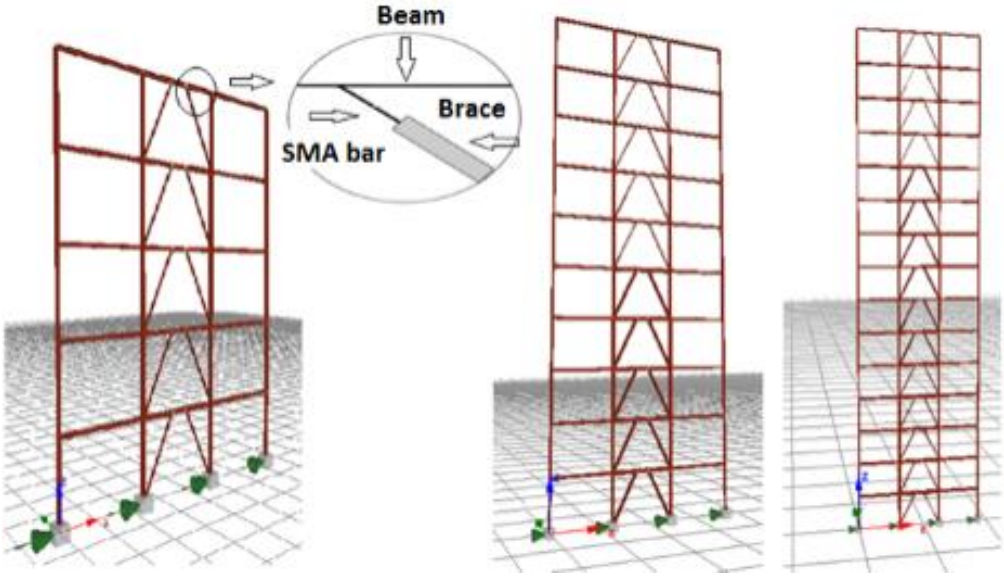
و چون طول تیر پیوند بین دو عدد و برابر با ۸۰ سانتی‌متر است، لذا به کمک درون‌یابی، بیشینه دوران غیرالاستیک مجاز تیر پیوند مورد نظر برابر با ۰/۰۴۲۴ رادیان به دست می‌آید. همچنین مقادیر دوران غیرالاستیک تیر پیوند برای سازه ۵ طبقه EBF و SMA-EBF به ترتیب برابر با ۰/۰۳۰۲ و ۰/۰۴۲۱ رادیان بوده که کمتر از مقدار مجاز است. این مقادیر به کمک روابط (۶) و (۷) و با استفاده از شکل ۱۰-۳-۱۲-۱ مبحث دهم به دست می‌آیند که در آن، γ_p دوران غیرالاستیک تیر پیوند نسبت به ناحیه خارج از آن برحسب رادیان، Δ تغییر مکان جانبی نسبی طرح و L و h نیز به ترتیب برابر با طول دهانه قاب دارای مهاربند برون محور و ارتفاع طبقه می‌باشند.

$$\gamma_p = (L.\Delta)/(e.h) = (400 \times 1.935)/(80 \times 320) = 0.0302 < 0.0424 \quad (۶)$$

$$\gamma_p = (L.\Delta)/(e.h) = (400 \times 2.694)/(80 \times 320) = 0.0421 < 0.0424 \quad (۷)$$

همچنین نحوه اتصال میله SMA در انتهای مهاربند به ورق‌های اتصال مهاربند برون محور به تیر در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این جزئیات، از دو ورق اتصال برای مونتاژ مهاربند استفاده شده و با ایجاد رزوه در میله‌ی SMA، آلیاژ به ورق پیچ شده است.

همچنین در شکل ۶ نیز مدل کلی سازه‌های این پژوهش در ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با وجود مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی در انتهای مهاربند نمایش داده شده است.



شکل ۶. مدل سازه های ۵، ۱۰ و۱۵ طبقه در نرم‌افزار سایزمو استراکت و جانمایی محل آلیاژ حافظه دار شکلی

Fig. 6. 5, 10, and 15-stories structural models in SeismoStruct software and SMA locating

۴- تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی

تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی روشی پیچیده، زمان‌بَر و در عین حال دقیق بوده و برای ارزیابی نیازهای غیرارتجاعی سازه تحت شتاب‌نگاشت‌های حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحلیل، آثار مودهای بالاتر و تغییرات مدل بار اینرسی به علت نرم شدگی سازه در حین زلزله به صورت خودکار در نظر گرفته شده و به طور مستقیم، تغییر مکان کلی حداکثر که توسط یک رکورد لرزه‌ای مشخص به سازه اعمال می‌گردد، تعیین شده و نیازی به تخمین زدن این مشخصه بر پایه روابط تجربی تئوریک نمی‌باشد. به طور کلی، این روش در مقایسه با روش پوش آور استاتیکی به دلیل اجتناب از تقریب‌های موجود جهت ساده سازی مدل سازه‌ای، از دقت بالاتری برخوردار است و برای تحلیل همه نوع سازه از نظر آیین‌نامه‌ها قابل انجام است. از این رو در این پژوهش، از این نوع تحلیل به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های دو بعدی استفاده شده است. از طرف دیگر، رکوردهای زلزله برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی بر اساس مشخصه‌های متفاوت دسته‌بندی می‌شوند که از جمله می‌توان به دسته‌بندی بر اساس بزرگی زلزله، نوع خاک، فاصله سایت تا منبع، مکانیسم گسل، مدت تداوم زلزله و مقادیر دامنه اشاره نمود. رکوردهای استفاده شده در این مطالعه نیز مربوط به شتاب نگاشت‌های دور از گسل برای سایت D که مشابه خاک نوع III استاندارد ۲۸۰۰ ایران و در منطقه با خطر لرزه‌خیزی زیاد می‌باشد، از جدول ۳-C دستورالعمل FEMA۴۴۰ [۱۹]، انتخاب شده است. در جدول ۵ لیست شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده آمده است.

همچنین برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی و امکان مقایسه نتایج، کلیه‌ی شتاب‌نگاشت‌های به کار رفته به کمک نرم‌افزار سایزموسیگنال به عدد شتاب گرانش زمین مقیاس شده‌اند. پس از تکمیل مدل‌سازی و بارگذاری، برای تمامی نمونه‌های سازه‌ای مورد مطالعه در نرم‌افزار سایزمواستراکت، تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی تحت شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر و با مدت زمان‌های متفاوت از ۳۸ تا ۸۰ ثانیه، انجام شده است.

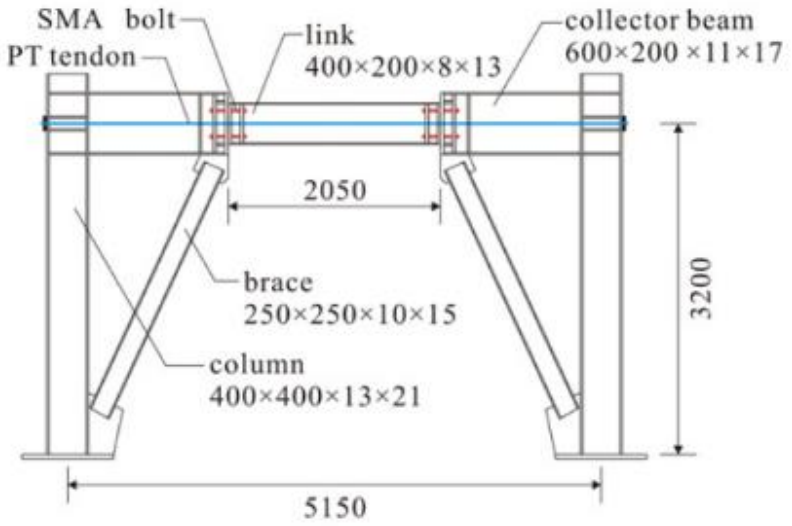
۵- صحت سنجی

به منظور کنترل صحت مراحل مدل‌سازی قاب دوگانه فولادی با آلیاژ حافظه‌دار شکلی در نرم‌افزار سایزمواستراکت، از مطالعه ژو و همکاران [۱۲] استفاده شده که در آن، یک مدل آزمایشگاهی یک طبقه‌ی تک دهانه شامل ستون و تیر پیوند فولادی با مهاربند واگرای شورون معکوس تحت بار جانبی سیکلی قرار گرفته است. این قاب مجهز به کابل‌های پس کشیده و میله‌های SMA می‌باشد. ابعاد مقاطع استفاده شده برای ستون، تیر و مهاربند در شکل ۷ نشان داده شده است. فولاد به کار رفته از نوع A۵۷۲ Grade ۵۰ به صورت I-شکل برای مقاطع مختلف می‌باشد. همچنین

جدول ۵. مشخصات شتاب نگاشت های مورد استفاده [۱۹]

Table 5. Properties of applied earthquake records [21]

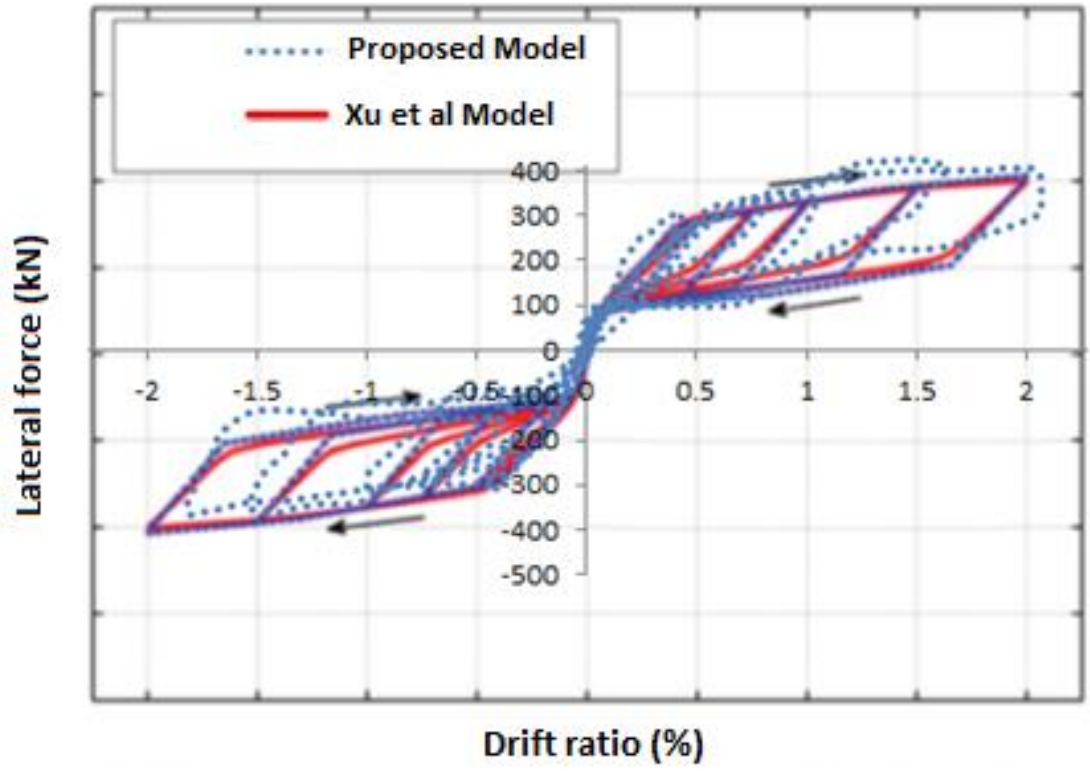
شماره	تاریخ وقوع	نام زلزله	نام ایستگاه	حداکثر سرعت (cm/s)	شدت (ریشتر)	جهت (درجه)	حداکثر شتاب (cm/s^2)
۱	10/01/87	Whittier Narrows	Los Angeles, 116th St School	۱۱/۴	۶/۱	۲۷۰	۲۸۸/۴
۲	10/15/79	Imperial Valley	Calexico, Fire Station	۲۲/۴۵	۶/۸	۲۲۵	۲۶۹/۶
۳	6/28/92	Landers	Yermo, Fire Station	۵۱/۳۹	۷/۵	۲۷۰	۲۴۰
۴	01/17/94	Northridge	Los Angeles, Hollywood Storage Bldg.	۲۱/۷۱	۶/۸	۳۶۰	۳۸۱/۴
۵	01/17/94	Northridge	Santa Monica City Hall	۴۱/۶۰	۶/۸	۹۰	۸۶۶/۲
۶	10/17/89	Loma Prieta	Gilroy #3, Sewage Treatment Plant	۱۳/۳۰	۷/۱	۰	۵۳۱/۷
۷	04/24/84	Morgan Hill	Gilroy #4, 2905 Anderson Rd	۱۷/۳۰	۶/۱	۳۶۰	۳۴۱/۴



شکل ۷. مدل قاب مهاربندی شده ی مطالعه ژو و همکاران [۱۲].

Fig. 7. Restrained frame of Xu et al. experiment [12]

کابل‌های با مقاومت بالا به قطر ۱۵ میلی‌متر در میانه‌ی ارتفاع تیر پیوند به صورت پس کشیده و نیز ۴ میله‌ی SMA به قطر ۳۰ میلی‌متر به طور متقارن در محل اتصال تیر به تیر پیوند قرار دارد. مقاومت تسلیم و نهایی حالت آستنیت به مارتنزیت به ترتیب ۳۸۰ و ۴۹۰ و همچنین مقاومت تسلیم و نهایی حالت مارتنزیت به آستنیت به ترتیب برابر با ۲۲۰ و ۱۲۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی ۵۰ گیگا پاسکال با کرنش نهایی ۰/۰۵ می‌باشد. مدل‌های مورد مطالعه در تحقیق مزبور عبارت از قاب مهاربندی شده با میله‌های SMA و کابل‌های پس کشیده می‌باشد.



شکل ۸. مقایسه دو منحنی چرخه ای به دست آمده از سایزمو استراکت و مدل آزمایش ژو و همکاران.

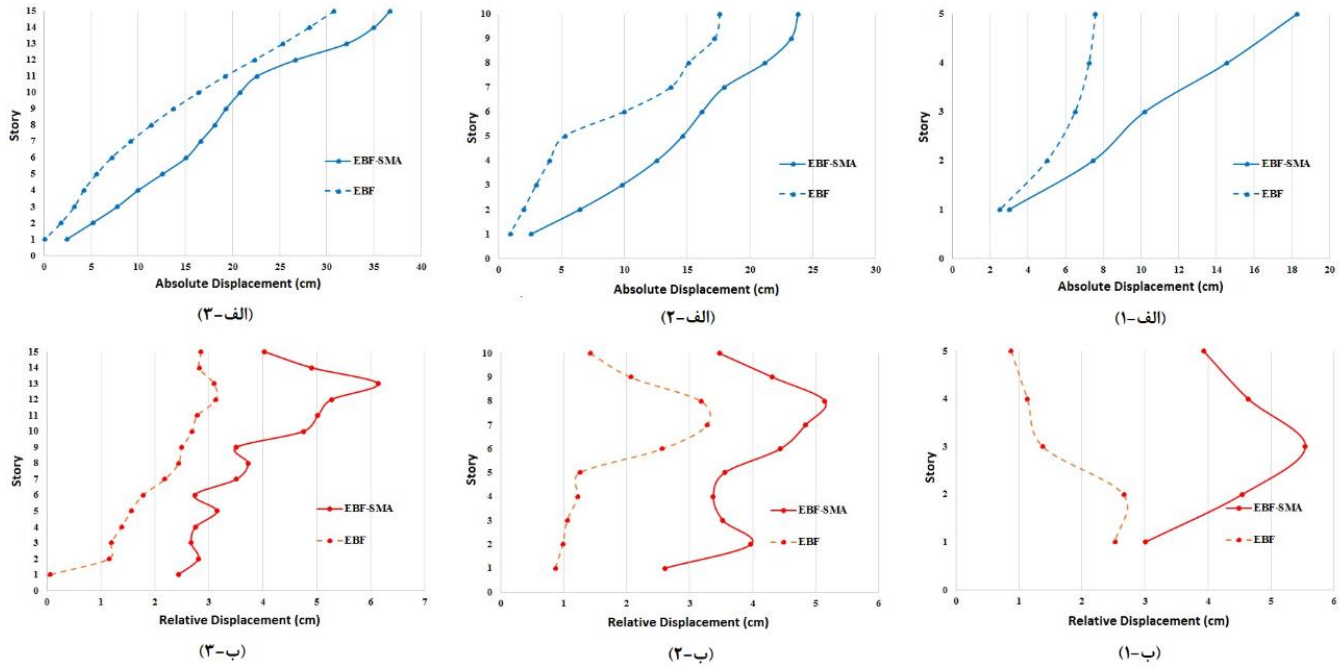
Fig. 8. Xu et al. experiment and SeismoStruct hysteresis curves

پس از مدل‌سازی و اعمال بار جانبی به مدل EBF-T۰ که مدل قاب مهاربندی شده با میله‌های SMA و بدون کابل‌های پس‌کشیده است، منحنی چرخه‌ای به دست آمده با منحنی مدل مطالعه شده مطابق شکل ۸ مقایسه شد که انطباق مناسبی بین منحنی مطالعه‌ی ژو و همکاران و نیز منحنی قاب مدل‌سازی شده در نرم‌افزار سایزمواستراکت را نشان می‌دهد.

۶- بررسی نتایج

پس از انجام تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی روی سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با SMA (مدل EBF-SMA) و بدون SMA (مدل EBF)، مجموعه‌ای از نتایج شامل حداکثر تغییر مکان مطلق طبقات، حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای، حداکثر تغییر مکان پسماند در پایان زمان مؤثر زلزله، حداکثر نیروی برش پایه و نیز حداکثر شتاب بام در ادامه مطالب آمده و توضیحاتی بیان شده است.

با توجه به نمودارهای شکل ۹ مربوط به تغییر مکان مطلق طبقات مختلف سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل EBF-SMA و EBF مشخص می‌شود که به طور کلی در مقادیر متوسط شتاب‌نگاشت‌های اعمال شده، تغییر مکان مطلق در طبقات برای مدل دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی قرار گرفته در انتهای مهاربند، بیشتر از مدل بدون آلیاژ است. برای سازه ۵ طبقه، اختلاف ایجاد شده در منحنی تغییر مکان مطلق با افزایش ارتفاع سازه، بیشتر شده ولی در دو سازه دیگر کم و بیش با یک شیب مشخص ادامه یافته است. همچنین نمودارهای مربوط به تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای کلیه سازه‌های مورد بررسی در شکل ۹ نیز حاکی از اختلاف معنادار میزان متوسط تغییر مکان نسبی و به خصوص برای سازه ۵ طبقه دارد و همانطور که انتظار می‌رود، میزان این تغییر مکان در یک سوم بالایی سازه‌ها دارای بیشترین مقدار است. لازم به ذکر است که روند تغییر مکان‌های مطلق و نسبی برای تمامی شتاب‌نگاشت‌ها از یک حالت یکسان تبعیت می‌کند به نحوی که این تغییرات برای مدل EBF-SMA بیشتر از EBF بوده است. مقادیر متوسط تغییر مکان مطلق و نسبی طبقات سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه برای مدلهای EBF-SMA و EBF تحت شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر در جداول ۶ و ۷ آمده است.



شکل ۹. (الف-۱) - (الف-۳). متوسط تغییر مکان مطلق (ب-۱) - (ب-۳). متوسط تغییر مکان نسبی، سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل های EBF و EBF-SMA تحت شتاب نگاشت های مختلف.

Fig.9.a1-a3) Absolute displacement average; b1-b3) Relative displacement average; of EBF-SMA and EBF models for 5, 10, and 15-stories structures under different earthquake records

جدول ۶. نسبت متوسط تغییر مکان مطلق طبقات سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل EBF-SMA به EBF.

Table 6. Absolute displacement average ratio of EBF-SMA to EBF models for 5, 10, and 15-stories structures

سازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	متوسط
۵ طبقه	۱/۲	۱/۵	۱/۶	۲/۰	۲/۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱/۷
۱۰ طبقه	۲/۰	۲/۳	۲/۴	۲/۴	۲/۳	۱/۴	۱/۱	۱/۲	۱/۴	۱/۴	-	-	-	-	-	۱/۸
۱۵ طبقه	۳/۲	۲/۸	۲/۴	۲/۴	۲/۲	۲/۱	۱/۸	۱/۶	۱/۳	۱/۰	۰/۹	۰/۸	۰/۹	۰/۹	۱/۰	۱/۷

مطابق اعداد مندرج در جدول ۶ مشخص می‌شود که نسبت مقادیر متوسط تغییر مکان‌های مطلق مدل EBF-SMA به مدل EBF با افزایش ارتفاع سازه بین ۱/۲ تا ۲/۴ برابر می‌شود. این نسبت برای سازه‌های با ارتفاع بیشتر در طبقات پایین‌تر بیشتر از طبقات بالا است. برای سازه‌ی ۱۰ طبقه نسبت مقادیر متوسط تغییر مکان‌های مطلق مدل دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی به مدل بدون آن در یک سوم پایین ارتفاع حداکثر ۲/۴ و در طبقات بالا ۱/۴ برابر می‌باشد. روند تغییرات سازه ۱۵ طبقه نیز مانند ۱۰ طبقه بوده و این نسبت‌ها به ترتیب ۲/۹ و ۲ است. با این حال به طور متوسط میزان

جدول ۷. نسبت متوسط تغییر مکان نسبی طبقات سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل EBF-SMA به EBF.

Table 7. Relative displacement average ratio of EBF-SMA to EBF models for 5, 10, and 15-stories structures

سازه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	متوسط
۵ طبقه	۱/۲	۱/۷	۴/۰	۴/۱	۴/۵	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	**۳/۱**
۱۰ طبقه	۲/۰	۲/۷	۲/۴	۲/۷	۳/۴	۰/۵	۰/۵	۱/۲	۲/۸	۲/۹	-	-	-	-	-	**۲/۱**
۱۵ طبقه	۴/۲	۲/۴	۲/۲	۱/۹	۲/۰	۱/۵	۱/۲	۱/۱	۱/۰	۱/۸	۱/۸	۱/۷	۲/۰	۱/۷	۱/۴	**۱/۹**

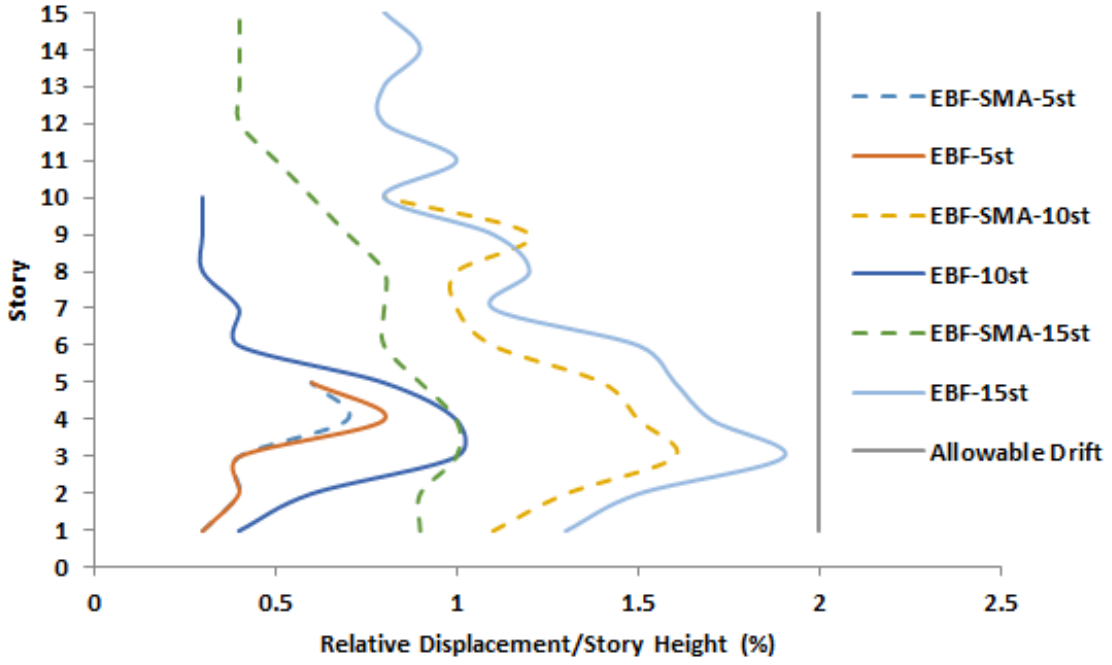
تغییر مکان مطلق سازه مدل EBF-SMA در هر سه سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه بین ۱/۷ تا ۱/۸ برابر مدل EBF بوده که نشان دهنده‌ی پاسخ یکسان سازه‌ها به این مصالح در ارتباط با تغییر مکان مطلق می‌باشد و استفاده یا عدم استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در سازه‌های با تعداد طبقات مختلف، موجب تغییرات زیادی در میزان جابجایی مطلق آن‌ها نمی‌شود.

همچنین با توجه به جدول ۷، پاسخ سازه با طبقات کم به تغییر مکان نسبی نسبت به سازه‌های با ارتفاع زیاد، بحرانی‌تر بوده به طوری که به طور کلی نسبت مقادیر متوسط تغییر مکان‌های نسبی مدل EBF-SMA به مدل EBF برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب برابر ۳/۱، ۲/۱ و ۱/۹ است. این مطلب نشان می‌دهد که وجود آلیاژ حافظه‌دار شکلی برای سازه‌های بلند مرتبه موجب افزایش کمتری در تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای آن‌ها می‌شود و شرایط مناسب‌تری برای سازه در حالت بهره‌برداری مهیا می‌نماید.

مطابق شکل ۱۰ و بر اساس بند ۳-۵-۲ استاندارد ۲۸۰۰ ایران، مقدار تغییر مکان نسبی طبقات ساختمان‌های تا ۵ طبقه نباید از ۰/۰۲۵ ارتفاع طبقه و برای ساختمان‌های با طبقات بیشتر از ۰/۰۲ ارتفاع طبقه (۲ درصد)، بیشتر باشد که در شکل مزبور، تمامی مقادیر از بیشینه مجاز کمتر بوده و از این نظر محدودیت آیین نامه رعایت شده است.

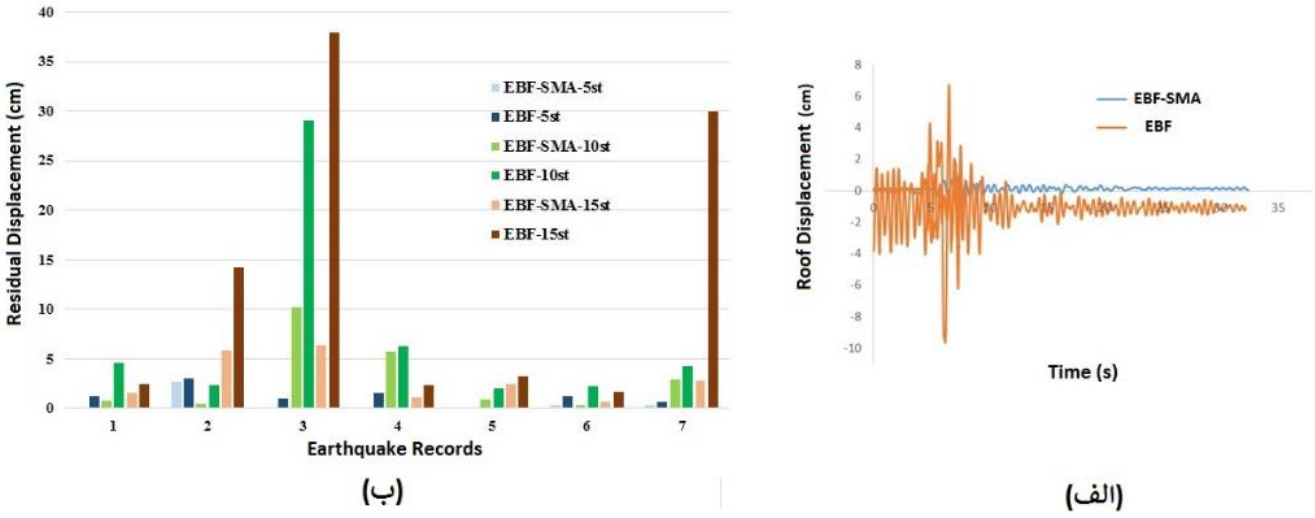
مطابق با شکل ۱۱-الف، میزان تغییر مکان بام سازه ۵ طبقه تحت شتاب‌نگاشت شماره ۱ برای مدل با آلیاژ حافظه‌دار شکلی در پایان مدت زمان مؤثر زلزله به صورت واضحی کمتر از تغییر مکان مدل بدون این آلیاژ بوده است. همچنین به کمک نمودار تغییرات جابجایی بام سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل‌های EBF-SMA و EBF، می‌توان مقدار تغییر مکان پسماند را برای هر کدام از شتاب‌نگاشت‌ها مقایسه نمود که فاصله قابل ملاحظه‌ای بین تغییر مکان پسماند EBF-SMA و EBF وجود داشته و نمایانگر مزیت استفاده از این مصالح در سازه‌های فولادی مهاربندی شده است، به طوری که مدل EBF-SMA برای همه‌ی شتاب‌نگاشت‌ها دارای تغییر مکان پسماند کمتری می‌باشد. در شکل ۱۱-ب، تغییر مکان پسماند مدل‌های EBF و EBF-SMA تحت کلیه شتاب‌نگاشت‌ها و برای هر سه سازه مقایسه شده است.

همچنین با مقایسه مقادیر برش پایه سازه‌های مورد نظر برای مدل‌های EBF-SMA و EBF، مشخص می‌گردد که وجود آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سیستم مهاربندی، موجب کاهش برش پایه و در نتیجه کاهش اعمال نیروی زلزله به سازه شده و متناسب با آن موجب، سبک شدن مقاطع می‌گردد. نمودارهای مقایسه‌ای حداکثر برش پایه در همه شتاب‌نگاشت‌ها در شکل ۱۲-الف قابل مشاهده است. در ادامه می‌توان مقادیر شتاب طبقه بام را برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه EBF و EBF-SMA مطابق شکل ۱۲-ب مورد مقایسه قرار داد. همانطور که مشخص است و نتایج با نتایج حاصل از برش پایه مطابقت دارد، شتاب طبقات این سازه‌ها با وجود SMA از مدل بدون آن به وضوح، کمتر می‌باشد. بنابراین با محاسبه مقادیر متوسط تغییر مکان‌های مطلق و نسبی و همچنین متوسط حداکثر تغییر مکان پسماند و متوسط حداکثر برش پایه سازه‌های با و بدون SMA مشخص می‌گردد که سازه با داشتن مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی در انتهای مهاربندهای خود دارای تغییر مکان مطلق و نسبی بیشتر و حداکثر برش پایه، شتاب بام و تغییر مکان پسماند کمتری می‌باشد.



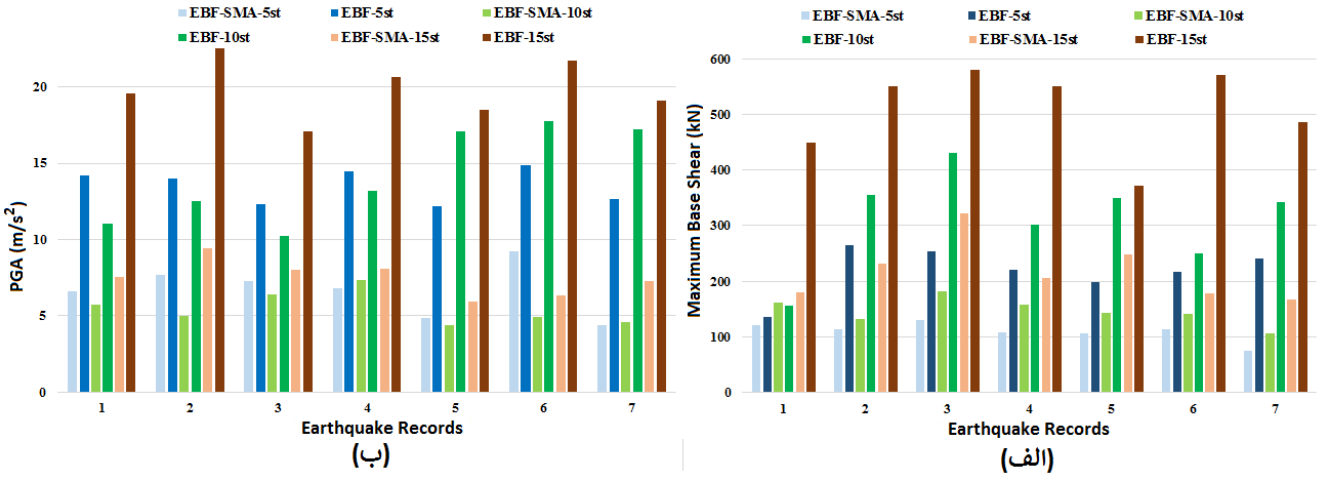
شکل ۱۰. مقایسه نسبت متوسط تغییر مکان نسبی طبقات به ارتفاع طبقه با حداکثر مقدار مجاز برای مدل های EBF و EBF-SMA.

Fig. 10. Comparison of average relative displacement to story height ratio with maximum allowable for EBF-SMA and EBF models



شکل ۱۱-الف. تغییر مکان بام سازه ۵ طبقه در طول زمان زلزله تحت شتاب‌نگاشت شماره ۱-ب. تغییر مکان پسماند سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل های EBF و EBF-SMA در پایان زمان مؤثر زلزله برای کلیه شتاب‌نگاشت ها.

Fig. 11. a) Roof displacement of 5-stories model during the earthquake record No.1; b) Residual displacement of 5, 10, and 15-stories structures of EBF-SMA and EBF models at the end of effective time of all earthquake records



شکل ۱۲-الف. حداکثر برش پایه – ب. حداکثر شتاب بام سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل های EBF و EBF-SMA.

Fig. 12. a) Maximum story shear; b) Maximum roof acceleration of EBF-SMA and EBF models for 5, 10, and 15-stories structures

از طرف دیگر، همانطور که در بخش ۴ نیز بیان شد، عوامل متعددی از جمله جنس خاک، مکانیسم گسل، فاصله سایت تا منبع، بزرگی زلزله و نیز مدت زمان مؤثر زلزله بر پاسخ سازه تأثیر گذاشته و به دنبال آن نتایج متنوعی حاصل می‌شود. بنابراین با اتتخاب تعداد بیشتری رکورد زلزله که تا حد ممکن دارای خصوصیات مشترکی هستند و به دست آوردن متوسط مقادیر، نتایج مورد نظر به واقعیت نزدیک شده و قابل بررسی می‌باشد. در جدول ۸، مقدار کاهش حداکثر تغییر مکان پسماند، حداکثر برش پایه و حداکثر شتاب مدل EBF-SMA نسبت به مدل EBF بر حسب درصد، برای همه شتاب‌نگاشت‌ها آمده است. بر اساس این جدول مشخص می‌شود که کاهش تغییر مکان پسماند برای متوسط شتاب‌نگاشت‌های وارده برای مدل EBF-SMA نسبت به مدل EBF در سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب برابر با ۶۷/۵، ۵۹/۲ و ۵۷/۹ درصد بوده است. همچنین کاهش مقادیر برش پایه برای سازه‌های مزبور به ترتیب ۴۷/۴، ۴۸/۹ و ۵۶/۱ درصد و نیز کاهش شتاب بام به ترتیب ۵۰/۸، ۵۸/۶ و ۴۳/۴ درصد می‌باشد.

نمودارهای میله‌ای شکل ۱۳ نیز بیانگر اثر مثبت وجود SMA در کاهش تغییر مکان‌های پسماند سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در زمان مؤثر زلزله است. بر این اساس، اثر کاهشی تغییر مکان پسماند در سازه‌ی ۵ طبقه بیشتر از ۱۰ و ۱۵ طبقه می‌باشد. همچنین اثر کاهشی برش پایه و شتاب بام نیز به ترتیب در سازه‌ی ۱۵ و ۱۰ طبقه بروز بیشتری داشته است.

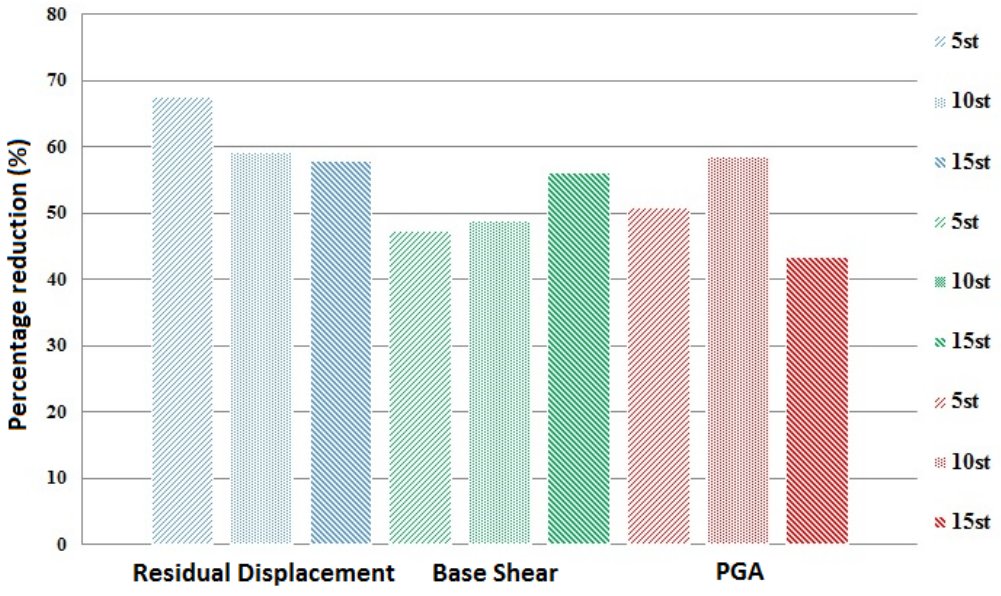
همچنین در شکل ۱۴-الف، مقایسه‌ای بین متوسط پاسخ‌های سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه برای تغییر مکان مطلق طبقات شده است. مقادیر متوسط تغییر مکان مطلق طبقه پنجم سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با SMA، به ترتیب برابر با ۱۸/۲۷، ۱۴/۶۳و ۱۲/۵۸ سانتی‌متر است و نشان می‌دهد که این تغییر مکان در طبقه پنجم سازه ۵ طبقه بیشتر از طبقه نظیر آن در سازه‌های دیگر است. تغییر مکان مطلق طبقه دهم سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه نیز به ترتیب برابر با ۲۳/۸۴ و ۱۶/۷۹ سانتی‌متر است.

از طرف دیگر، مطابق با شکل ۱۴-ب، مقایسه‌ای بین متوسط پاسخ‌های سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه برای تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای شده است. نمودارهای مزبور نشان می‌دهد که تغییر مکان نسبی سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با SMA، در یک سوم فوقانی ارتفاع آن‌ها، دارای بیشترین مقادیر می‌باشد و حداکثر تغییر مکان نسبی سازه‌ی ۵ طبقه بیشتر از تغییر مکان نسبی طبقات نظیر آن در سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه است. به طور مثال با مقایسه مقدار تغییر مکان نسبی طبقه پنجم برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مشخص می‌شود که این پاسخ در سازه با تعداد طبقات کمتر نسبت به سازه مرتفع‌تر، بیشتر بوده است و نشان دهنده عملکرد مناسب‌تر SMA در سازه‌های با ارتفاع بیشتر می‌باشد.

جدول ۸. درصد کاهش حداکثر تغییر مکان پسماند، حداکثر برش پایه و حداکثر شتاب مدل EBF-SMA نسبت به مدل EBF

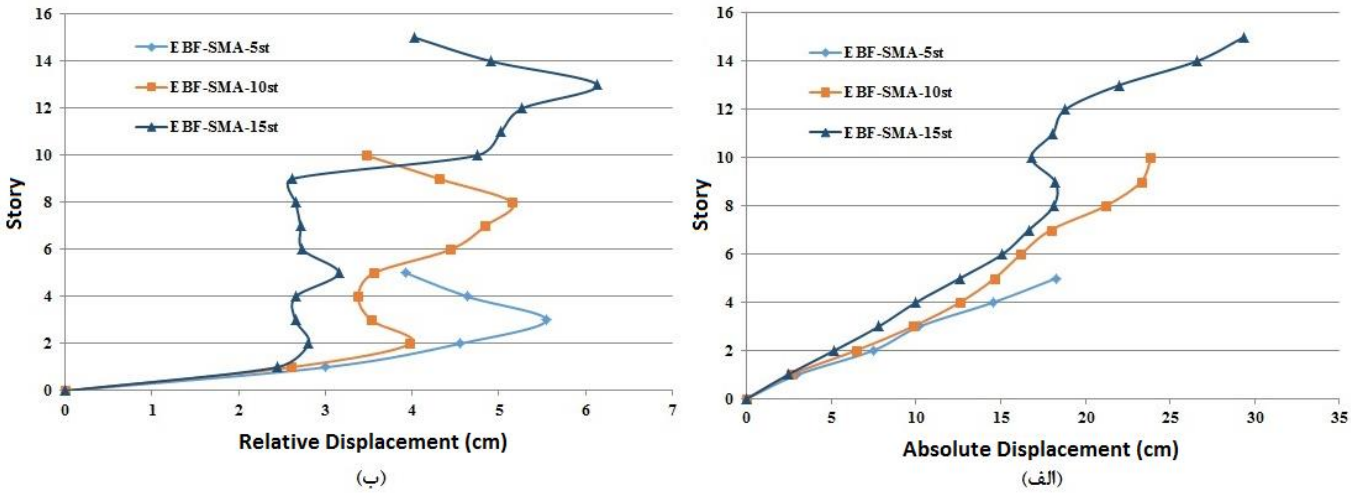
Table 8. Average reduction percent of maximum residual displacement, maximum story shear and maximum acceleration of EBF-SMA compared to EBF

	۵ طبقه			۱۰ طبقه			۱۵ طبقه		
شتاب نگاشت	تغییر مکان پسماند	برش پایه	شتاب بام	تغییر مکان پسماند	برش پایه	شتاب بام	تغییر مکان پسماند	برش پایه	شتاب بام
۱	۹۴/۵	۱۱/۱	۵۳/۶	۸۳/۶	۲/۶۸	۴۸/۱	۳۶/۹	۵۹/۹	۸۶/۷
۲	۹/۸	۵۷/۱	۴۵/۱	۸۲/۶	۶۲/۹	۵۹/۹	۵۹/۱	۵۸/۱	۷۸/۷
۳	۹۹/۸	۴۸/۹	۴۱/۰	۶۴/۹	۵۸/۱	۳۷/۴	۸۳/۳	۴۴/۴	۶۲/۵
۴	۹۱/۴	۵۱/۰	۵۲/۷	۸/۱	۴۷/۴	۴۴/۲	۵۳/۵	۶۲/۶	۵۰/۵
۵	۵۵/۹	۴۶/۶	۵۹/۹	۵۳/۷	۵۸/۹	۷۴/۴	۲۳/۱	۳۳/۳	۱۵/۷
۶	۷۵/۲	۴۷/۹	۳۷/۹	۸۷/۸	۴۳/۹	۷۲/۲	۵۸/۵	۶۸/۷	۵/۷۱
۷	۴۵/۷	۶۹/۲	۶۵/۶	۳۳/۴	۶۸/۷	۷۳/۱	۹۰/۶	۶۵/۶	۴/۱۸
متوسط	۶۷/۵	۴۷/۴	۵۰/۸	۵۹/۲	۴۸/۹	۵۸/۶	۵۷/۹	۵۶/۱	۴۳/۴



شکل ۱۳. مقایسه درصد کاهش متوسط حداکثر تغییر مکان پسماند، حداکثر برش پایه و حداکثر شتاب مدل EBF-SMA نسبت به مدل EBF.

Fig. 13. Average reduction percent of maximum residual displacement, maximum story shear and maximum acceleration of EBF-SMA compared to EBF



شکل ۱۴-الف. مقایسه متوسط تغییر مکان مطلق – ب. مقایسه متوسط تغییر مکان نسبی سازه های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل EBF-SMA و EBF.

Fig.14. a) Average absolute displacement; b), Comparison of average relative displacement EBF-SMA compared to EBF for 5, 10, and 15-stories structures

با دقت در نمودارهای حاصله و نتایج آن به طور کلی می‌توان بیان داشت که بیشینه جابجایی پسماند برای همه شتاب‌نگاشت‌ها در پایان زمان مؤثر زلزله در همه سازه‌های مورد بحث دارای SMA به نحو مشخصی کمتر از سازه‌های بدون SMA است. برش پایه ایجاد شده در سازه با آلیاژ حافظه‌دار تحت شتاب‌نگاشت‌های زلزله نسبت به سازه با فولادگذاری مرسوم و به دلیل افزایش زمان تناوب و نرمی سازه‌ها و به دنبال آن بیشینه شتاب وارد بر طبقه بام سازه‌های دارای SMA کاهش یافته است. همچنین اثر مصالح حافظه‌دار شکلی بسته به تعداد طبقات و نوع پاسخ مورد نظر، متفاوت بوده به طوری که میزان تغییر مکان پسماند، برش پایه و شتاب بام در اثر وجود این آلیاژ برای سازه ۵ طبقه نسبت به ۱۰ و ۱۵ طبقه کاهش بیشتری داشته است.

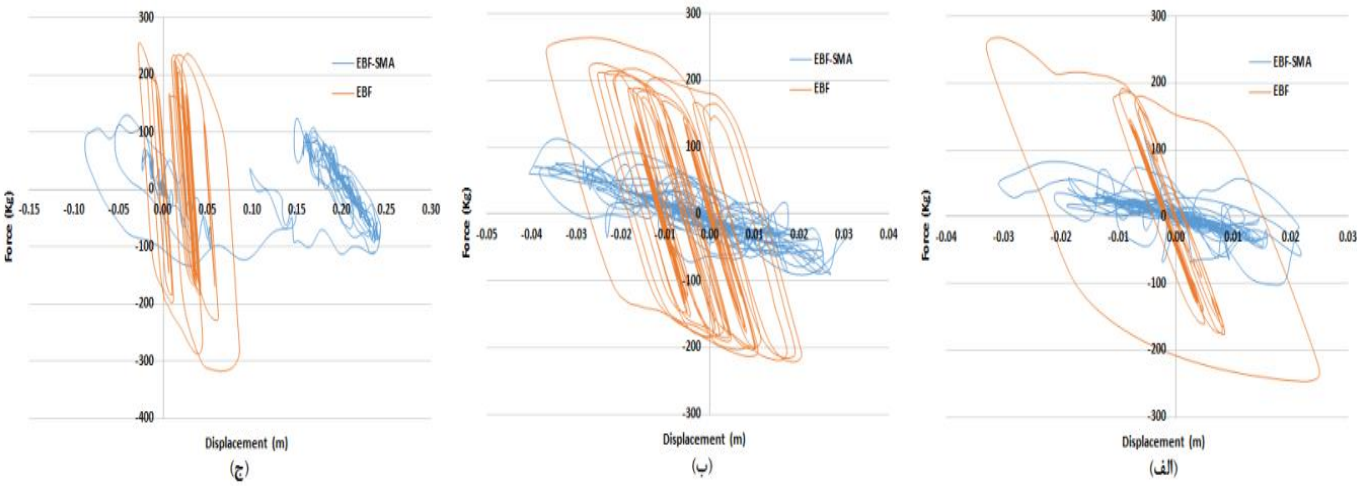
همچنین با انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی در نرم‌افزار سایزمواستراکت، می‌توان اولین گرهی از تیر پیوند که در آن مفصل پلاستیک تشکیل شده است را تحت نقاط عملکردی قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) تشخیص داد. برای این کار، مشخصه‌ها و معیارهای پذیرش در مدل‌سازی رفتار تیر پیوند سیستم سازه‌ای EBF بر اساس جدول ۶-۵ دستورالعمل FEMA356 [۲۰]، استخراج شده که با کمک آن و با توجه به طول تیر پیوند، مقدار بیشینه دوران غیرالاستیک برای هر سطح عملکرد حاصل می‌شود. در جدول ۹، مقدار دوران تیر پیوند و محل تشکیل اولین مفصل پلاستیک در هر کدام از مدل‌های EBF و EBF-SMA برای سازه ۵ طبقه آمده است. مطابق این جدول، اولین مفاصل پلاستیک در تیر پیوند طبقات اول و دوم تشکیل شده است و در سطح عملکرد IO، مدل EBF دارای دوران بیشتر و در سطح عملکرد LS نیز به عکس حالت قبل، مدل EBF-SMA دارای دوران بیشتری است. همچنین در سطح عملکرد آستانه فروریزش و برای تیر پیوند طبقه اول نیز مدل دارای SMA، دوران بیشتری دارد. بنابراین به طور کلی رسیدن به سطوح عملکرد ایمنی جانی و آستانه فروریزش در مدل SMA-EBF دارای دوران بیشتر و برای سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه دارای دوران کمتری است.

از طرف دیگر، مطابق شکل ۱۵، نمودار چرخه‌ای مهاربند طبقه همکف سازه ۵ طبقه با و بدون مصالح حافظ دار شکلی که تحت سه شتاب‌نگاشت اول جدول ۵ قرار گرفته است، بیان می‌دارد که با وجود مصالح SMA، سطح زیر نمودار نسبت به حالت بدون آن کمتر بوده و جذب انرژی زلزله توسط مهاربند کمتر و بیشتر انرژی زلزله توسط آلیاژ حافظه‌دار شکلی جذب می‌گردد. بنابراین مهاربندها می‌تواند دارای مقطع اقتصادی‌تری بوده و نهایتاً منجر به طرح تیر پیوند با مقطع ضعیف‌تری شود.

جدول ۹. مقدار دوران تیر پیوند و محل تشکیل اولین مفصل پلاستیک سازه ۵ طبقه در مدل های EBF-SMA و EBF.

Table 9. Rotation value of link beam and the location of the first plastic hinge of EBF-SMA and EBF models for 5 stories structure

سازه	محل اولین مفصل پلاستیک تیر پیوند		مقادیر دوران غیر الاستیک اولین مفصل پلاستیک		
محدوده مجاز دوران بر اساس FEMA356	محل گره	طبقه	IO:۰/۰۰۳۴	LS:۰/۰۴۷	CP:۰/۰۶۲
EBF	انتها	اول	۰/۰۰۹۴	۰/۰۵۲۱	**۰/۰۶۷۳**
EBF	انتها	دوم	۰/۰۱۰۶	۰/۰۵۵۹	**۰/۰۷۳۷**
EBF	ابتدا	اول	–	–	**۰/۰۶۲۴**
EBF-SMA	انتها	اول	۰/۰۰۸۹	۰/۰۷۵۵	**۰/۰۷۵۵**
EBF-SMA	انتها	دوم	۰/۰۰۸۴	۰/۰۶۲۸	**۰/۰۶۲۸**
EBF-SMA	ابتدا	اول	–	۰/۰۶۴۱	**۰/۰۶۴۱**
EBF-SMA	ابتدا	دوم	–	۰/۰۴۷۴	–



شکل ۱۵. (الف-ج). مقایسه نمودار چرخه ای مهاربند مدل های ۵ طبقه مدل های EBF و EBF-SMA تحت شتاب‌نگاشت های شماره ۱ تا ۳.

Fig. 15. a-c) Comparison of hysteresis curves of 5-stories structure for EBF-SMA and EBF models under earthquake records No.1-3

جدول ۱۰. مقدار انرژی جذب شده مهاربند طبقه اول سازه ۵ طبقه در مدل های EBF-SMA و EBF بر حسب Kg.m.

Table 10. Energy absorption of the first story of 5-stories structure for EBF-SMA and EBF models according to kg.m

شتاب نگاشت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	متوسط
EBF	۲۰/۰۹	۵۷/۲۵	۷۹/۷۳	۴۴/۲۵	۴/۳۹	۲۲/۶۹	۳۳/۵۲	**۳۷/۴۳**
EBF-SMA	۴/۸۶	۱۱/۳۱	۶۷/۵۸	۱۰/۲۹	۳/۸۷	۷/۳۱	۵/۹۵	**۱۵/۸۸**
نسبت میزان جذب انرژی مدل EBF و EBF-SMA	۴/۱۳	۵/۱	۱/۱۸	۴/۳	۱/۱۳	۳/۱	۵/۶۳	**۲/۳۶**

بنابراین میزان جذب انرژی مهاربند طبقه همکف در حالات با و بدون مصالح حافظه‌دار شکلی مطابق جدول ۱۰ مشخص می‌شود که با استفاده از SMA تا حد زیادی جذب انرژی توسط این میله‌ها انجام شده و مهاربندها نقش کمتری در جذب انرژی زلزله دارند. مطابق جدول مزبور برای سازه ۶ طبقه، میزان جذب انرژی ناشی از زلزله مهاربند طبقه اول مدل EBF به طور متوسط ۲/۳۶ برابر مهاربند مدل EBF-SMA است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به مدل‌سازی نمونه‌های سازه‌ای دو بعدی با سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی متوسط و مهاربند واگرای شورون در تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ پرداخته شد که در انتهای مهاربندها نیز از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی استفاده شده است. سپس سازه‌های مزبور در نرم‌افزار سایزمواستراکت تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی قرار گرفتند و پاسخ‌های سازه‌ای به صورت حداکثر جابجایی مطلق بام، حداکثر تغییر مکان نسبی طبقات، حداکثر تغییر مکان پسماند بام، حداکثر برش پایه و حداکثر شتاب بام مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. در ادامه نتایج شاخص تحقیق حاضر ارائه شده است.

۱-مطابق با نمودارهای مربوط به تغییر مکان مطلق طبقات سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه تحت شتاب نگاشت‌های زلزله مشخص گردید که به طور کلی، استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در انتهای مهاربند شورون واگرا، موجب افزایش تغییر مکان مطلق نسبت به سازه بدون این مصالح شده است. یکی از دلایل این افزایش پاسخ مربوط به تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای تحت اثر زلزله در سازه‌های دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی به دلیل افزایش ضریب کشسانی پایین این آلیاژها نسبت به فولاد است، که منجر به کاهش سختی سازه می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل مشخص شد که نسبت تغییر مکان مطلق مدل‌های دارای SMA به مدل‌های بدون آلیاژ ۱/۷ برابر است. همچنین این نسبت برای تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای در سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب برابر۳/۱، ۲/۱ و ۱/۹ است. این مطلب نشان می‌دهد که سازه‌های بلند مرتبه دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به سازه‌های کوتاه مرتبه افزایش کمتری در تغییر مکان نسبی داشته‌اند که موجب ایجاد شرایط مناسب‌تری برای سازه در حالت بهره‌برداری و ایمنی ساکنین می‌شود.

۲-با توجه به این که مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی پس از تحمل یک کرنش بزرگ، قادر است به حالت اولیه خود بازگردد و میزان جذب انرژی را افزایش دهد، نتایج حاصل از نمودارهای مربوط به حداکثر جابجایی پسماند برای همه شتاب‌نگاشت‌ها در پایان زمان مؤثر زلزله مؤید این موضوع می‌باشند. به نحوی که میزان متوسط بیشترین جابجایی پسماند همه شتاب‌نگاشت‌ها در سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با SMA به ترتیب حدود ۶۷/۵، ۵۹/۲ و ۵۷/۹ درصد کمتر از سازه‌های بدون SMA بود. این مطلب نشان دهنده‌ی عملکرد بسیار مناسب این نوع مصالح در کاهش خسارات ناشی از زلزله در اعضای اصلی و فرعی ساختمان بوده و هزینه‌های مربوط به تعمیرات و بازسازی را تا حد بالایی کاهش می‌دهد.

۳-برش پایه ایجاد شده در سازه با آلیاژ حافظه‌دار تحت شتاب نگاشت‌های زلزله نسبت به سازه با فولادگذاری مرسوم، کاهش پیدا کرده است. این امر به دلیل افزایش زمان تناوب و نرمی سازه‌ها با آلیاژ SMA نسبت به فولاد گذاری مرسوم بوده که باعث کاهش نیروهای لرزه‌ای در المان‌های باربر جانبی می‌شود. متوسط میزان کاهش برش پایه برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه دارای SMA نسبت به سازه‌های بدون SMA، به ترتیب برابر با ۴۷/۴، ۴۸/۹ و ۵۶/۱ درصد می‌باشد.

۴-کاهش حداکثر شتاب وارد بر طبقه بام سازه‌های دارای SMA نسبت به سازه‌های بدون این نوع آلیاژ برابر با ۵۰/۸، ۵۸/۶ و ۴۳/۴ درصد به ترتیب در مدل‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه بوده و در واقع موجب کاهش برش پایه ایجاد شده نیز شده است.

۵-اثر مصالح حافظه‌دار شکلی بسته به تعداد طبقات و نوع پاسخ مورد نظر، متفاوت بوده است به طوری که میزان تغییر مکان پسماند، برش پایه و شتاب بام در اثر وجود این آلیاژ برای سازه ۵ طبقه نسبت به ۱۰ و ۱۵ طبقه کاهش بیشتری داشته است.

۶-با بررسی و مقایسه منحنی‌های چرخه‌ای مربوط به مهاربندهای مدل دارای SMA مشخص می‌شود که وجود این آلیاژ موجب کاهش انرژی جذب شده به عضو مهاربندی و در نتیجه کاهش مقطع مهاربند و تیر پیوند متصل به آن شده و به طور متوسط ۲/۳۶ درصد از انرژی زلزله توسط عضو SMA جذب می‌گردد.

منابع

[1] M.C. Constantinou, T.T. Soong, G.F. Dargush, Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit, (1998).

[2] G. Song, N. Ma, H.-N. Li, Applications of shape memory alloys in civil structures, Engineering structures, 28(9) (2006) 1266-1274.

[3] J. Van Humbeeck, Damping capacity of thermoelastic martensite in shape memory alloys, Journal of Alloys and Compounds, 355(1-2) (2003) 58-64.

[4] M. Hosseini, P. Beiranvand, A. Dehestani, K. Dehestani, Shape memory alloys and offering super-elastic property opportunity in reinforced concrete structures, Archives of Materials Science and Engineering, 85(1) (2017) 5-13.

[5] H. Abou-Elfath, Ductility characteristics of concrete frames reinforced with superelastic shape memory alloys, Alexandria engineering journal, 57(4) (2018) 4121-4132.

[6] J. McCormick, R. DesRoches, D. Fugazza, F. Auricchio, Seismic assessment of concentrically braced steel frames with shape memory alloy braces, Journal of Structural Engineering, 133(6) (2007) 862-870.

[7] M. Mahmoudi, S. Montazeri, M.J.S. Abad, Seismic performance of steel X-knee-braced frames equipped with shape memory alloy bars, Journal of Constructional Steel Research, 147 (2018) 171-186.

[8] S. Moradi, M.S. Alam, B. Asgarian, Incremental dynamic analysis of steel frames equipped with NiTi shape memory alloy braces, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 23(18) (2014) 1406-1425.

[9] S.R. Massah, H. Dorvar, Design and analysis of eccentrically braced steel frames with vertical links using shape memory alloys, Smart materials and structures, 23(11) (2014) 115015.

[10] N. Mirzai, R. Attarnejad, Seismic performance of EBFs equipped with an innovative shape memory alloy damper, Scientia Iranica, 27(5) (2020) 2316-2325.

[11] C.-X. Qiu, S. Zhu, Performance-based seismic design of self-centering steel frames with SMA-based braces, Engineering Structures, 130 (2017) 67-82.

[12] X. Xu, Y. Zhang, Y. Luo, Self-centering eccentrically braced frames using shape memory alloy bolts and post-tensioned tendons, Journal of Constructional Steel Research, 125 (2016) 190-204.

[13] A. Committee, Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-10), American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois, (2010).

[14] S. SeismoSoft, A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures, in, ed, 2007.

[15] A. Habibullah, ETABS-three dimensional analysis of building systems, users manual, Computers and Structures Inc., Berkeley, California, (1997).

[16] F. Auricchio, E. Sacco, A superelastic shape-memory-alloy beam model, Journal of intelligent material systems and structures, 8(6) (1997) 489-501.

[17] W. Wang, T.-M. Chan, H. Shao, Y. Chen, Cyclic behavior of connections equipped with NiTi shape memory alloy and steel tendons between H-shaped beam to CHS column, Engineering Structures, 88 (2015) 37-50.

[18] R. DesRoches, J. McCormick, M. Delemont, Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and

bars, Journal of Structural Engineering, 130(1) (2004) 38-46.

[19] A. Fema, 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures, FEMA-440, Redwood City, 7(9) (2005) 11.

[20] F. Prestandard, commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356), Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 7(2) (2000).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Bagheri , S. A. Hosseini, A. Vedad , Evaluation of seismic behavior of eccentric braced dual steel frames equipped with shape memory alloys, Amirkabir J. Civil Eng., 54(2) (2022) 649-670.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19010.7028

این صفحه عمداً خالی است