

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای زانویی مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

موسی محمودی صاحبی^{۱*}، سجاد منتظری^۲

۱- دانشیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

براساس آیین‌نامه‌های رایج طراحی لرزه‌ای، قابلیت بهره‌برداری سازه‌ها، پس از وقوع زلزله‌های شدید ضروری نیست و فقط نجات جان انسان‌ها حائز اهمیت است. این موضوع سالانه سبب هدررفت سرمایه‌ی عظیمی در جهان می‌شود. در سال‌های اخیر، محققان با استفاده از روش‌ها و مصالح جدید، قابلیت ترمیم و بهره‌برداری سازه را پس از وقوع زلزله‌های شدید، مدنظر قرار داده‌اند. به عنوان مثال، استفاده از مصالح دارای خاصیت ارتجاعی بالا و کرنش پسماند اندک، همانند آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA)، پیشنهاد شده است. در این تحقیق کاربرد این آلیاژها در مهاربندهای زانویی فولادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سیستم مهاربندی زانویی، امکان استفاده مجدد سازه را پس از زلزله، فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: مهاربند زانویی، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، تحلیل تاریخچه زمانی، برگشت پذیری، تغییر شکل پسماند.

*نویسنده مسئول: موسی محمودی صاحبی

پست الکترونیکی: m.mahmoudi@srutu.edu

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۰۹

۱- مقدمه

زلزله پدیده‌ای است که باعث می‌شود در مدتی کوتاه، انرژی زیادی در زمین آزاد شده و این انرژی باعث ایجاد تکان‌های شدید در قسمت‌های بالایی زمین شود. با وقوع زلزله، انواع مختلف موج‌ها در تمام جهات در زمین منتشر می‌شوند. موج‌های منتشر شده باعث ایجاد حرکت‌های افقی و قائم در سطح زمین می‌شوند. در اثر این حرکت، پی ساختمان نیز شروع به حرکت می‌کند و حرکت زمین را به بخش‌های بالایی ساختمان انتقال می‌دهد. به‌خاطر تفاوت زمانی دریافت این حرکات توسط جرم‌های قسمت‌های مختلف، تمام اجزای ساختمان با هم حرکت نمی‌کنند و نسبت به هم جابجایی‌های متفاوتی را بروز می‌دهند. این پدیده به‌عنوان تغییرشکل ساختمان یا پاسخ ساختمان نامیده می‌شود.

نیازهای اصلی سازه در برابر زلزله عبارتند از: سختی، مقاومت و شکل‌پذیری. نوع نیازهای اصلی ساختمان‌ها در برابر زلزله‌های ضعیف، متوسط، شدید و ماکزیمم با توجه به اهداف تعریف شده جهت مقابله با زلزله، متفاوت خواهد بود. در زلزله‌های ضعیف، سختی و مقاومت به ترتیب برای جلوگیری از خسارت اجزای غیرسازه‌ای و سازه‌ای و در زلزله‌های شدید، سختی، مقاومت و شکل‌پذیری جهت جلوگیری از تخریب اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای است [۱]. علاوه بر نیازهای ذکر شده، نیاز برگشت‌پذیری نیز حائز اهمیت است. در نیاز برگشت‌پذیری کرنش پسماند در اعضای سازه پس از زلزله، معیار اندازه‌گیری قرار می‌گیرد.

یکی از راه‌های تأمین نیازهای سختی، مقاومت و شکل‌پذیری، استفاده از سیستم قاب خمشی یا مهاربندی فولادی است. این سیستم‌ها بر حسب میزان سختی، شکل‌پذیری و مقاومت دارای انواع مختلفی هستند که هر یک، عملکردهای متفاوتی از خود بروز می‌دهند. اگر بتوان این سیستم مهاربندی را به‌وسیله مصالح دارای خاصیت ارتجاعی بالا و کرنش پسماند اندک، نظیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) تسلیح کرد، می‌توان به یک سیستم با برگشت‌پذیری بالا دست یافت.

در سال‌های اخیر، توجه محققان به استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سیستم‌های مهاربندی معطوف شده است. غفارزاده و منصور با مطالعه تاثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر روی قاب‌های مهاربندی ضربدری، نشان دادند که استفاده از این آلیاژها باعث افزایش ضریب شکل‌پذیری سازه می‌شود. این افزایش برای ساختمانهای مرتفع بیشتر است [۲].

جیسون و همکاران با مطالعه تاثیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی بر روی قاب‌های مهاربندی شورون، نشان دادند استفاده از این آلیاژها باعث کاهش تغییرمکان پسماند طبقات می‌شود که این کاهش در طبقات پایین، مشهودتر است [۳].

هوشمند و همکاران در پژوهش‌های خود نشان دادند بهترین محل برای استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در اعضای مهاربندی، در دوسر آنها و در محل اتصال است [۴].

محمودی و حواریان [۵] با بررسی رفتار مهاربندهای ضربدری در دو حالت با و بدون آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (در محل اتصال مهاربندها به اتصالات تیر - ستون) به این نتیجه رسیدند که استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در ساخت مهاربند ضربدری می‌تواند سبب کاهش تغییرمکان نسبی طبقات در سازه به‌خصوص در ساختمان‌های بلند شود.

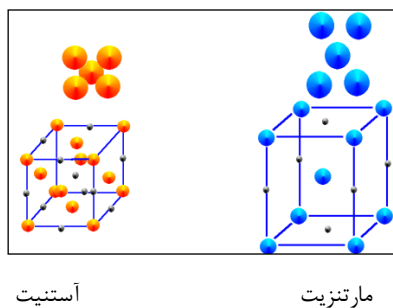
محمد عمر در تحقیق مشابه، قاب‌های مهاربندی مرکزی تسلیح شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را با قاب‌های مهاربندی سوپر ایکس مقایسه کرد و نشان داد استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در استهلاک نیروهای برشی وارد بر سازه عملکرد بهتری دارند [۶].

هدف این مقاله، ارزیابی عملکرد مهاربندهای زانویی مسلح به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی است. در ارزیابی عملکرد سازه‌ها، خصوصیات سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و برگشت‌پذیری مد نظر قرار می‌گیرد.

۲- آلیاژهای حافظه دار شکلی

سیستم‌های هوشمند در مهندسی سازه به سیستم‌هایی اطلاق می‌شود که به‌طور خودکار قابلیت انطباق رفتار سازه در پاسخ به بارگذاری غیر مترقبه را دارا هستند تا بدین وسیله، ایمنی، افزایش عمر و کارایی سازه تأمین شود. یکی از تکنولوژی‌های جدیدی که امکان دستیابی به این اهداف را میسر می‌سازد، ساخت و توسعه مواد هوشمند نظیر آلیاژهای حافظه‌دار شکلی است که به علت دارا بودن خصوصیات میکروسکوپی و ماکروسکوپی ممتازی همچون ظرفیت میرایی بالا، دوام، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی، خاصیت فوق ارتجاعی یا شبه ارتجاعی، تغییر شکل‌ها و کرنش‌های بزرگ و برگشت‌پذیر که در مصالح سنتی موجود نیست، کاربردهای زیادی در زمینه‌های مختلف علوم و صنعت پیدا کرده‌اند [۷ - ۸].

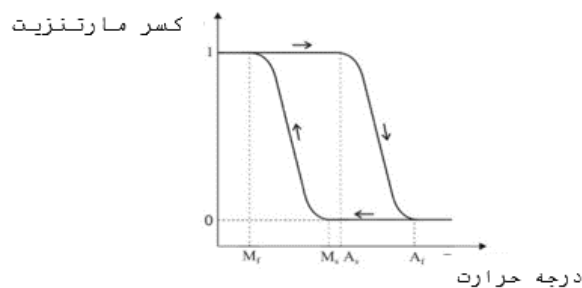
فاز غالب در این آلیاژها، وابسته به دما و تنش‌های اعمالی است و با توجه به ترکیب شیمیایی و فرآیندهای ترمومکانیکی زمان ساخت، تنظیم می‌شوند [۹]. فاز پایدار در دمای بالا استنیت و فاز پایدار در دمای پایین مارتنزیت نامیده می‌شود. ساختار کریستالی استنیت به صورت مکعبی است و دارای فاز دمایی بالا و استحکام بالا است. مارتنزیت دارای فاز دمایی پایین، ساختار مونوکلینیک و تقارن کمتر نسبت به استنیت است. این دو فاز با اعمال دما یا تنش، قابل تبدیل به همدیگر می‌شوند و تمامی خصوصیات مکانیکی، الکتریکی و حرارتی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (شکل ۱) [۱۰]. در شکل ۲ رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در حالت بدون تنش و صرفاً تحت تأثیر تغییرات دما نشان داده شده است [۱۱].



آستنیت

مارتنزیت

شکل ۱: فازهای اصلی در آلیاژهای حافظه‌دار شکلی.

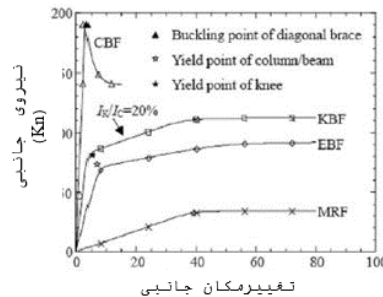


شکل ۲: رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در حالت بدون تنش و تحت تأثیر تغییرات دما [۱۱].

در این نمودار چهار دمای شاخص مشاهده می‌شود. M_s و M_f به ترتیب دمای شروع و پایان تبدیل فاز استنیت به مارتنزیت و A_s و A_f به ترتیب دمای شروع و پایان تبدیل فاز مارتنزیت به استنیت را مشخص می‌کند. در هنگام سرد کردن، ماده در فاز کاملاً استنیت باقی می‌ماند تا هنگامی که دمای ماده به M_s می‌رسد. در این دما، فاز استنیت شروع به تبدیل شدن به فاز مارتنزیت می‌کند و در دمای M_f ماده به طور کامل به مارتنزیت تبدیل می‌شود. با افزایش دما، تبدیل معکوس اتفاق می‌افتد [۱۲].

۳- مهاربندهای زانویی

قاب‌های فولادی به چهار گروه قاب خمشی، قاب مهاربندی هم محور، قاب مهاربندی برون محور و قاب مهاربند زانویی تقسیم می‌شوند. شکل ۳ تفاوت‌های عملکرد جانبی قاب‌های ذکر شده را نشان می‌دهد [۱۳].



شکل ۳: مقایسه عملکرد سیستم‌های متداول قاب‌های فولادی [۱۳].

با توجه به شکل فوق و با مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی برای انواع قاب‌ها مشخص می‌شود که قاب‌های خمشی دارای کمترین سختی و مقاومت هستند زیرا هم دارای کمترین شیب اولیه در منحنی هستند و هم منحنی مربوط به آنها کمترین ارتفاع را دارد. اگرچه سیستم قاب خمشی یک سیستم با استهلاک انرژی بسیار خوب و فوق العاده است، اما اعضای آن باید با مقاطع بزرگ غیراقتصادی طراحی شوند. علاوه بر این، تأمین ملاحظات مربوط به شکل‌پذیری ویژه در اتصالات این سیستم مخصوصاً در اتصالات جوشی با مشکلاتی همراه است [۱۴]. سیستم قاب با مهاربند هم‌مرکز، مقاوم‌تر و سخت‌تر از بقیه سیستم‌ها است اما به‌خاطر کماتش اعضای مهاربندی، نمی‌تواند شکل‌پذیری مناسبی ارائه نماید.

برای غلبه بر اشکالات موجود در قاب‌های خمشی و قاب‌های با مهاربندی هم‌مرکز، پوپوف (Popov) و راوردر (Reorder) در سال ۱۹۷۸ قاب با مهاربندی برون‌محور را پیشنهاد کردند. این سیستم علاوه بر داشتن سختی بالا در ناحیه خطی، شکل‌پذیری مناسبی نیز دارد. در این قاب‌ها، تیرهای پیوند به‌عنوان المان‌های شکل‌پذیر (کنترل شونده توسط تغییر مکان)، بخشی از اعضای اصلی سازه (تیرها) هستند. بنابر این امکان تعویض سریع و کم هزینه این اعضا بعد از وقوع یک زلزله شدید وجود ندارد [۱۳].

آریستیزابال اوچوا (Aristizabal Ochoa) در سال ۱۹۸۶، یک قاب مهاربندی شده جدید، به نام قاب مهاربندی زانویی با همه خصوصیات مناسب قاب‌های ذکر شده، اما بدون داشتن نقص‌های آنها پیشنهاد کرد. این سیستم توسط محققین دیگری از جمله سام (Sam) (۱۹۹۵)، خسروی و مفید (۲۰۰۰)، بالندرا (Balendra) (۲۰۰۱) و ویلیام (William) (۲۰۰۲) نیز مورد بررسی قرار گرفت [۱۵].

در سیستم قاب با مهاربند زانویی، برای اطمینان از شکل‌پذیری لازم، به جای اتصال برشی از یک عضو سازه‌ای ثانویه (عضو زانویی)، استفاده می‌شود. در عین حال وجود مهاربند قطری، سبب ایجاد سختی جانبی قابل توجهی خواهد شد. با تشکیل مفصل‌های پلاستیک در عضو زانویی، قسمت‌های اصلی سازه ایمن و سالم باقی می‌ماند. در این حالت اصلاح و ترمیم سازه به‌آسانی با تعویض عضو زانویی صورت می‌گیرد.

۴- روش تحقیق

به‌منظور نیل به اهداف این تحقیق، سه ساختمان فولادی ۳، ۵ و ۷ طبقه با مهاربند زانویی به ارتفاع هر طبقه ۳ متر و با دهانه ۵ متری انتخاب شد. این ساختمان‌ها در منطقه با خطر لرزه‌خیزی زیاد و نوع خاک II، مطابق با ضوابط آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله

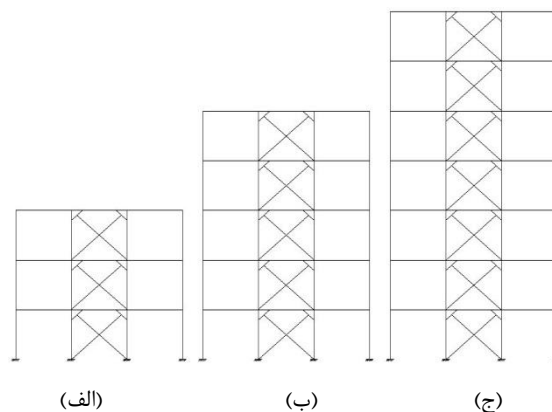
(استاندارد ۲۸۰۰)، با فرض شکل پذیری متوسط (قاب خمشی متوسط) و دارای کاربری مسکونی طراحی شدند. بر این اساس شتاب مبنای طرح (A) مساوی ۰/۳۵، ضریب اهمیت ساختمان (I) برابر یک و ضریب رفتار (R) معادل ۷ فرض شده است.

به منظور اطمینان از اتلاف انرژی مناسب و جاری شدن فولاد عضو زانویی، اتصالات عضو زانویی به تیر و ستون به صورت گیردار فرض شده است. همچنین سطح مقطع اعضای مورب، به گونه‌ای اختیار شده‌اند که علاوه بر تأمین ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران، قبل از ایجاد مفصل پلاستیک در عضو زانویی، کمانش نکنند.

برای تعیین پاسخ سازه‌ها، تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور) و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی تحت رکوردهای شتاب-زمان مختلف انجام شد. به منظور ارزیابی تأثیر المان‌های فولادی حافظه‌دار شکلی، این قاب‌ها یک‌بار بدون این مصالح و بار دیگر با استفاده از این مصالح مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای طراحی و تحلیل اولیه مدل‌ها از نرم‌افزار SAP2000 v15، برای بررسی و هم‌پایه‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها از نرم‌افزار SeismoSignal v4.3.0، برای تحلیل اجزا محدود از نرم‌افزار OpenSees v2.4.3 و برای آنالیز عددی نتایج و هم‌چنین رسم نمودارها از نرم‌افزارهای MATLAB vR2012a، Excel v2010 و BiLine استفاده شده است.

۵- نمونه‌های انتخابی

در این تحقیق، پلان کلی مدل‌ها، ضوابط بارگذاری و سایر شرایط طراحی، ثابت فرض شده است. ارتفاع طبقات، برابر با ۳ متر و عرض دهانه‌ها برابر با ۵ متر در نظر گرفته شده است. قاب‌های اولیه (قبل از اضافه کردن میله‌های SMA) تحت عنوان KBF و قاب‌های دارای میله‌های SMA تحت عنوان KBFS نامگذاری می‌شود. عددی پس از نام اختصاری قاب‌ها ذکر می‌شود که بیانگر تعداد طبقات است. در شکل ۴، نمای قاب‌های KBF مورد بررسی و در جداول ۱ تا ۳ نتایج حاصل از طراحی قاب‌های KBF ارائه شده است.



شکل ۴: قاب‌های KBF مورد بررسی: الف-سه طبقه، ب-پنج طبقه، ج-هفت طبقه.

هندسه قاب‌های KBFS دقیقاً شبیه قاب‌های KBF است با این تفاوت که در آن‌ها از یک میله SMA برای اتصال امتداد مهاربند قطری به محل اتصال تیر به ستون استفاده شده است. با صرف نظر کردن از سختی اندک خمشی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، اتصال این عضو به صورت دو سر مفصل در نظر گرفته می‌شود. مقاطع طراحی شده برای این قاب‌ها نیز همان مقاطع اختصاص یافته به قاب‌های KBF (جداول ۱ تا ۳) است.

جدول ۱: مشخصات اعضای قاب سه طبقه KBF.

عضو زانویی		اعضای مهاربند		تیر		ستون میانی		ستون کناری	
مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه
IPE160	۱،۲	BOX100*100*14.2	۱	IPE270	۱،۲،۳	IPB180	۱	IPB100	۱،۲،۳
IPE140	۳	BOX90*90*12.5	۲	-	-	IPB160	۲،۳	-	-
-	-	BOX80*80*10	۳	-	-	-	-	-	-

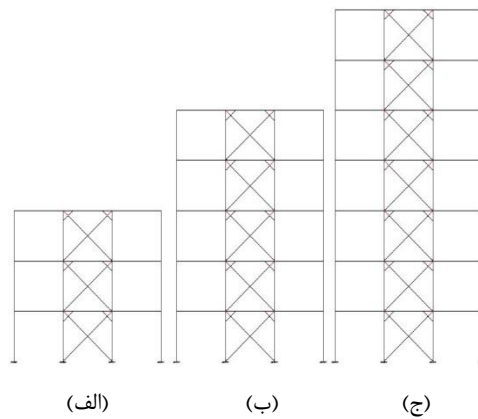
جدول ۲: مشخصات اعضای قاب پنج طبقه KBF.

عضو زانویی		اعضای مهاربند		تیر		ستون میانی		ستون کناری	
مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه
IPE200	۱	BOX120*120*12.5	۱	IPE270	۵،۴،۳،۲،۱	IPB240	۱	IPB120	۱،۲
IPE180	۲،۳	BOX100*100*14.2	۲،۳،۴	-	-	IPB220	۲	IPB100	۳،۴،۵
IPE160	۴	BOX80*80*10	۵	-	-	IPB200	۳	-	-
IPE140	۵	-	-	-	-	IPB140	۴،۵	-	-

جدول ۳: مشخصات اعضای قاب هفت طبقه KBF.

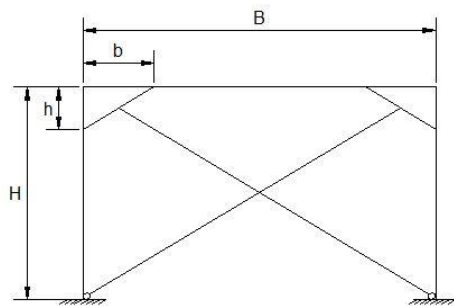
عضو زانویی		اعضای مهاربند		تیر		ستون میانی		ستون کناری	
مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه	مقطع	طبقات مشابه
IPE220	۱	BOX120*120*12.5	۱،۲،۳،۴	IPE270	۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷	IPB320	۱	IPB140	۱،۲،۳،۴
IPE200	۲،۳،۴	BOX100*100*14.2	۵	-	-	IPB260	۲،۳	IPB100	۵،۶،۷
IPE180	۵،۶	BOX90*90*12.5	۶	-	-	IPB200	۴،۵،۶،۷	-	-
IPE160	۷	BOX80*80*10	۷	-	-	-	-	-	-

از آنجایی که عملاً امکان تعریف مصالح SMA در هیچ یک از نرم افزارهای طراحی وجود ندارد و از سوی دیگر استفاده از روابط مقاومت مصالح در رابطه با این مصالح، به علت ماهیت رفتاری، دقت مناسبی ندارد، برای طراحی مقطع این عضو، از روش آزمایش و خطا استفاده شده است. بدین صورت که پس از اختصاص المان خرابایی به این عضو در نرم افزار OpenSees، مقطع عضو از میله یک میلیمتری شروع و به تدریج افزایش یافت تا برگشت پذیری بیش از ۵۰ درصد در سازه مشاهده شود. اولین اثرات در جهت بهبود عملکرد کلی سازه در میله با مقطع ۱۱ میلیمتری رخ داد. بنابراین با تیپ کردن این قطر مقطع، تمامی میله های SMA به صورت مشابه (یعنی میله های با قطر ۱۱ میلیمتر) در نظر گرفته شد. نمای قاب های KBFS در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: قاب های KBFS مورد بررسی: الف-سه طبقه، ب-پنج طبقه، ج-هفت طبقه.

بهترین ابعاد برای سیستم بادبند زانویی مطابق شکل ۶ زمانی است که نسبت $(b/B)/(h/H)$ برابر یک باشد [۱۶]. در این تحقیق نیز از همین رابطه برای کلیه قاب ها استفاده شده است. بنابراین با فرض مقدار h/H برابر $0/2$ و ابعاد b و h به ترتیب برابر ۱ و $0/6$ به دست آمد.



شکل ۶: معرفی پارامترهای به کار رفته در مهاربند زانویی.

۶- رکوردهای شتاب-زمان

شتاب نگاشت های مورد استفاده در تحلیل ها منطبق با ضوابط مندرج در آیین نامه ی ۲۸۰۰ به گونه ای انتخاب شد تا حتی المقدور نمایانگر حرکت واقعی زمین محل ساخت سازه در اثر زلزله باشد. این شتاب نگاشت ها برای تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۴).

جدول ۴: مشخصات رکوردهای انتخابی.

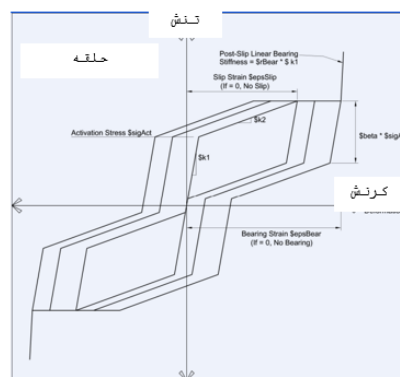
نام زلزله	PGA (g)	بزرگی (M)	زمان مؤثر (s)	فاصله تا گسل (km)	نوع خاک	منبع داده‌ها	ایستگاه ثبت رکورد	تاریخ وقوع
Chi-Chi	۰/۳۷۸	۷/۶	۱۳/۲۴	۴۳/۴۴	USGS (B)	CWB	TCU095	۱۹۹۹/۰۹/۲۰
Northridge	۰/۳۷	۶/۷	۱۰/۷۲	۲۷/۶	USGS (B)	CDMG	24538 Santa Monica City Hal	۱۹۹۴/۰۱/۱۷
Tabas	۰/۳۲۸	۷/۴	۱۲/۳	۱۷/۰	CWB (B)	-	Dayhook	۱۹۷۸/۰۹/۱۶
Imperial Valley	۰/۳۱۲	۶/۵	۶۳/۷۱	۲۶/۵	USGS(B)	Cerro Prieto	UNAM/UCSD	۱۹۷۹/۱۰/۱۵
Landers	۰/۴۱۷	۷/۳	۲۷/۹۵	۲۱/۲	USGS(B)	Coolwater	SCE	۱۹۹۲/۰۶/۲۸

۷- مدل‌سازی

در ادامه هریک از این قاب‌ها به وسیله نرم‌افزار OpenSees v2.4.3 مدل‌سازی گردید و مدل‌ها ابتدا تحت تحلیل استاتیکی خطی و بعد از آن تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی قرار گرفت. در این تحقیق برای در نظر گرفتن اثر دقیق رفتار غیرخطی فولاد از دستور ساخت مصالح فولادی **Giuffre-Menegotto-Pinto** با سخت‌شوندگی ایزوتروپیک استفاده شد [۱۷-۱۸]. برای مدل‌سازی رفتار سوپرالاستیک و سایر ویژگی‌های آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، از مدل ماده یک‌جهتی خود مرکز با رفتار لغزشی غیربازیافتی و یک افزایش سختی اختیاری در کرنش‌های بالا (رفتار تکیه‌گاه) استفاده شد. برای انطباق این مصالح با ویژگی‌های SMA از پارامترهای ارائه شده در جدول ۵ استفاده شد. نمودار تنش-کرنش ماده یک‌جهتی خود مرکز و پارامترهای ذکر شده در جدول ۵ در شکل ۷ قابل مشاهده است.

جدول ۵: مقادیر عددی پارامترهای ماده یک‌جهتی خود مرکز (واحدها برحسب نیوتن و متر).

سختی اولیه	سختی بعد از فعال‌سازی	تنش / نیروی پیش-فعال‌سازی sigAct	نسبت تنش / نیروی پیش فعال‌سازی به فعال‌سازی معکوس beta	کرنش / تغییرشکل لغزشی epsSlip	کرنش / تغییرشکل تکیه‌گاه epsBear	نسبت سختی تکیه‌گاه به سختی اولیه eBear
K1	K2					
۲۷۶۰۰۰۰۰۰	۴۷۰۰۰۰۰۰۰	۴۱۴۰۰۰۰۰۰	۰/۵۹۳۶	۰/۰۴۳۶	۰/۰	۱/۰



شکل ۷: پارامترهای ماده یک‌جهتی خود مرکز [۱۳].

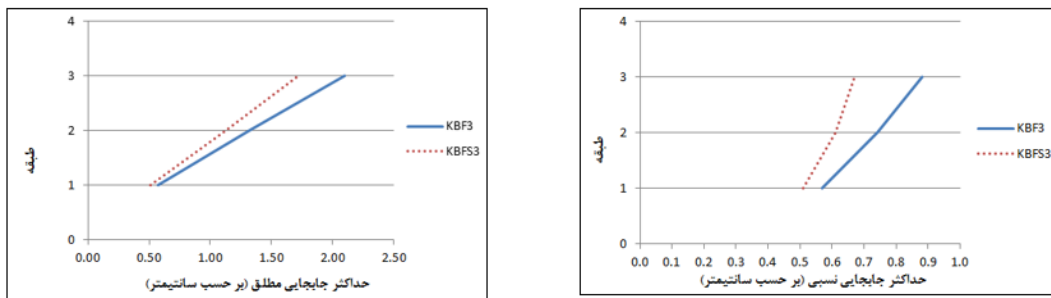
برای مدل‌سازی مقطع کلی اعضا، از مقطع Fiber و برای مدل‌سازی اعضای مورب، تیر و ستون‌ها از المان element disp Beam Column با ۵ نقطه انتگرال‌گیری در طول المان استفاده شد. مقطع Fiber، یک شکل هندسی عمومی دارد که از نواحی با اشکال ساده‌تر و منظم‌تر مانند نواحی مستطیلی، دایروی و مثلثی تشکیل شده است. نواحی نامبرده اصطلاحاً Pach نامیده می‌شوند که برای مقاطع I شکل از جمله مقطع عضو زانویی، از دستور patch quad و برای مقطع میله‌های SMA با توجه به صرف نظر کردن از رفتار خمشی این عضو و دوسر مفصل بودن آن از pach circ بهره‌گیری شده است. در روند ساخت این نوع مقاطع، از مصالح تک‌محوری با خاصیت خرابایی موسوم به element truss استفاده می‌شود که فرضیه‌های تیر برنولی را تحمیل می‌کنند. به منظور در نظر گرفتن اثر کمانش در ستون‌ها و اعضای مهاربندی علاوه بر در نظر گرفتن تبدیل هندسی P- Δ ، از نقص اولیه جزئی در مدل‌سازی ستون‌ها و اعضای مهاربندی استفاده شد. برای این کار، اعضای مذکور به صورت دوتکه مدل شد که در وسط آنها انحراف از محور طولی به مقدار ۰/۰۰۱ به عنوان نقص اولیه جزئی لحاظ شده است.

۸- نتایج

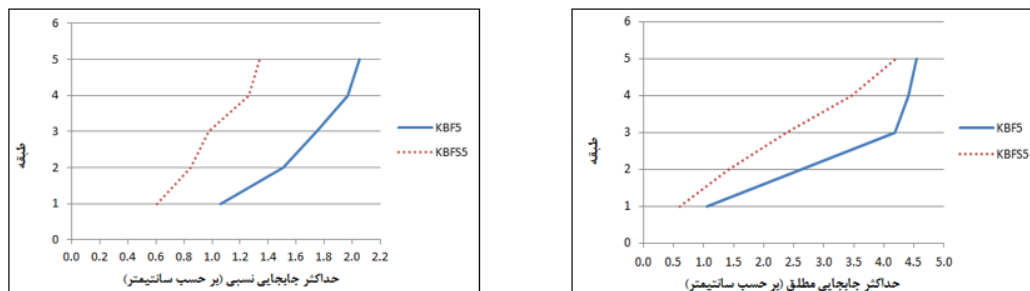
نتایج حاصل از این تحقیق در چهار بخش سختی، شکل‌پذیری، مقاومت و برگشت‌پذیری به شرح زیر ارائه می‌شود:

۸-۱- ارزیابی ظرفیت سختی

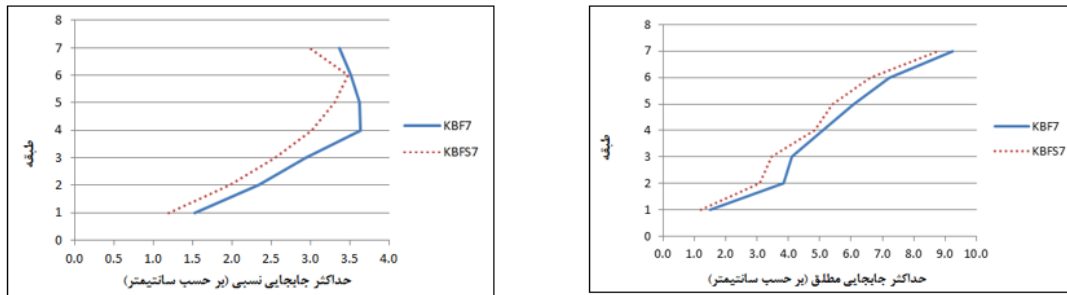
در یک تعریف کلی، مقاومت در مقابل تغییر مکان، سختی نام دارد. به منظور بررسی سختی قاب‌ها، تغییر مکان‌های مطلق و نسبی طبقات تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های طبس (Tabas)، نورتریج (Northridge)، چیچی (Chi-Chi)، ایمپریال ولی (Imperial Valley) و لندرز (Landers) تعیین شد و از متوسط مقادیر نتایج به دست آمده برای مقایسه استفاده شده است. شکل‌های ۸ تا ۱۰ نتایج حاصله برای طبقات مختلف را به ترتیب برای ساختمان‌های سه، پنج و هفت طبقه نشان می‌دهد.



شکل ۸: مقایسه‌ی میانگین ماکزیمم جابجایی نسبی و مطلق طبقات قاب سه طبقه.



شکل ۹: مقایسه‌ی میانگین ماکزیمم جابجایی نسبی و مطلق طبقات قاب پنج طبقه.



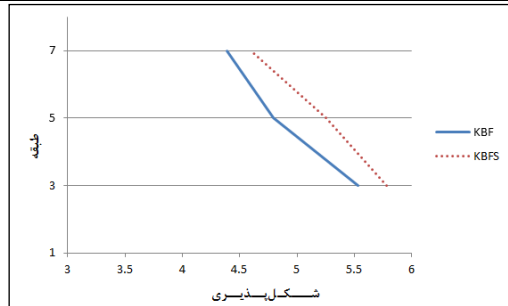
شکل ۱۰: مقایسه‌ی میانگین ماکزیمم جابجایی نسبی و مطلق طبقات قاب هفت طبقه.

همانطور که از این شکل‌ها مشخص است، در ساختمان سه طبقه، استفاده از میله‌های SMA باعث کاهش تغییر مکان‌های نسبی و مطلق طبقات شده است. هرچند این مقدار کاهش در ترازهای پایین قاب‌ها اندک است ولی میزان کاهش با افزایش ارتفاع ساختمان، افزایش می‌یابد. در ساختمان پنج طبقه نیز استفاده از میله‌های SMA باعث کاهش تغییر مکان‌های نسبی و مطلق طبقات شده است. مشابه قاب سه طبقه در اینجا نیز با افزایش ارتفاع به مقدار اختلاف جابجایی نسبی دو قاب افزوده می‌شود ولی در قسمت جابجایی مطلق، از تراز طبقه سوم به بعد، این افزایش اختلاف تغییر می‌کند تا جایی که در تراز طبقه پنجم میزان تفاوت در جابجایی مطلق دو قاب اندک است. در ساختمان هفت طبقه نیز استفاده از میله‌های SMA باعث کاهش تغییر مکان نسبی و مطلق طبقات شده است هرچند این میزان کاهش در تمام طبقات به صورت یکسان نیست. در حالت کلی با مقایسه نتایج به دست آمده مشخص شد که اضافه کردن میله‌های SMA بر روی سختی الاستیک طبقات پایین تأثیر بیشتری نسبت به سختی الاستیک طبقات بالاتر می‌گذارد.

افزایش میزان جابجایی در حالت عدم استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قاب‌های با مهاربندی زانویی، به دلیل رسیدن اعضا و اتصالات سازه به محدوده غیرخطی و پدید آمدن تغییر شکل‌های پسماند در سیکل‌های رفت و برگشتی نیروی زلزله است. این در حالی است که در سازه‌های تجهیز شده به آلیاژ حافظه‌دار شکلی، با افزایش ارتفاع سازه، میله‌های تشکیل شده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی، ترازهای پایین قاب‌ها را به حالت نسبتاً صلب تبدیل کرده و با جذب و استهلاک بخش عمده‌ای از انرژی زلزله باعث کم شدن انرژی در اعضای اصلی سازه و کاهش رفتار غیرخطی آنها می‌شوند.

۸-۲- ارزیابی ظرفیت شکل پذیری

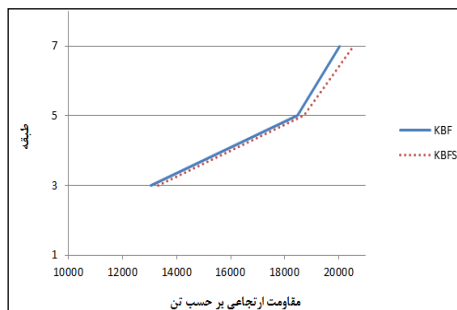
قابلیت استهلاک انرژی به واسطه رفتار غیرارتجاعی کل سازه یا اعضای آن، بدون کاهش قابل ملاحظه در مقاومت را ظرفیت شکل پذیری گویند. به منظور بررسی شکل پذیری قاب‌ها، حداکثر تغییر مکان جانبی و نیز تغییر مکان جانبی نظیر نقطه تسلیم در بالاترین تراز، هر یک از قاب‌های مورد بررسی به وسیله تحلیل‌های تاریخچه زمانی و پوش‌اور تحت اثر میانگین نتایج شتاب‌نگاشت‌های طقس، نورث‌ریج، چیچی، ایمپریال ولی و لندرز تعیین شده و از متوسط نتایج به دست آمده استفاده شده است. در شکل ۱۱ مقدار ظرفیت شکل پذیری قاب‌های سه، پنج و هفت طبقه هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که از شکل مشخص است استفاده از میله‌های SMA باعث افزایش ظرفیت شکل پذیری شده است. این افزایش در قاب پنج طبقه بیشتر است. هم‌چنین با بررسی کلی قاب‌ها مشخص می‌شود که با افزایش ارتفاع قاب‌ها از میزان ظرفیت شکل پذیری کاسته می‌شود.



شکل ۱۱: مقایسه مقدار ظرفیت شکل‌پذیری در قاب‌ها.

۳-۸- ارزیابی ظرفیت مقاومت

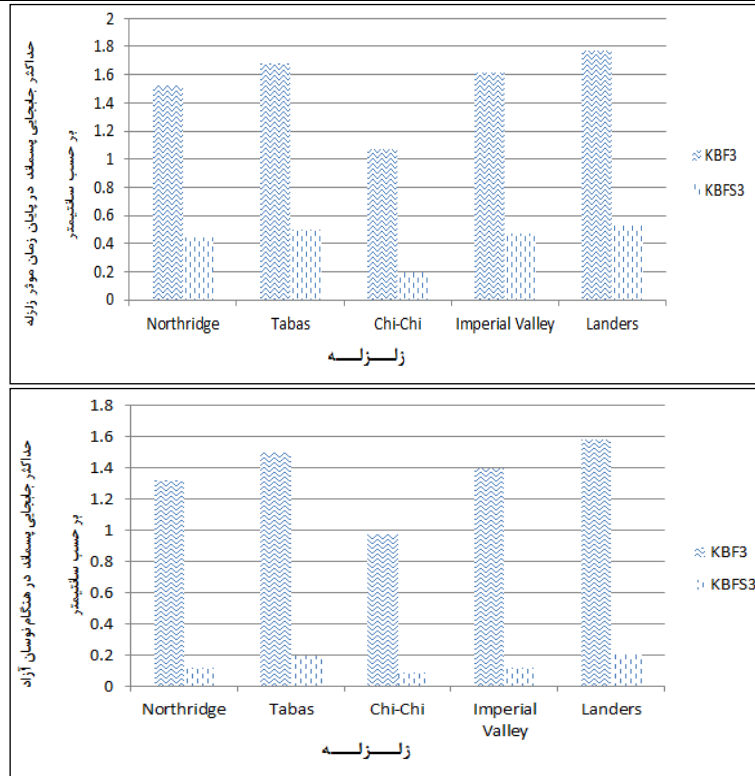
یکی دیگر از معیارهای تعیین‌کننده رفتار لرزه‌ای سازه‌ها مقاومت می‌باشد. به منظور بررسی مقاومت ارتجاعی قاب‌های مورد استفاده در این تحقیق، قاب‌های مورد نظر تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفتند و نمودار پوش‌آور آن‌ها ترسیم شد. برای هر قاب، نیروی برش پایه متناظر با تشکیل اولین مفصل پلاستیک، بیان‌گر مقاومت ارتجاعی قاب مربوطه قرار گرفت. نتایج حاصله در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است استفاده از میله‌های SMA تأثیر چندانی بر ظرفیت مقاومت ارتجاعی قاب‌ها ندارد.



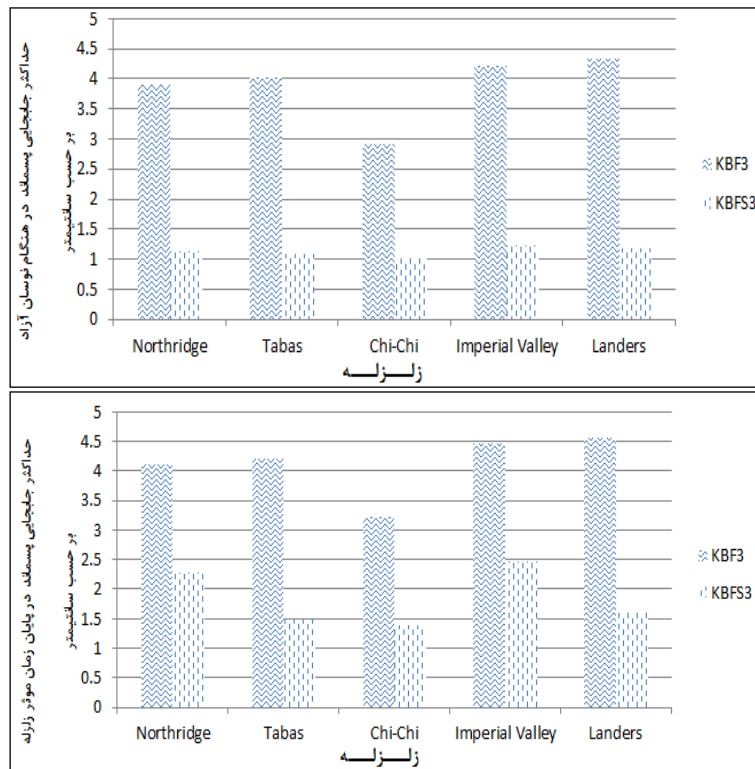
شکل ۱۲: مقایسه مقدار مقاومت ارتجاعی در قاب‌ها.

۴-۸- ارزیابی برگشت‌پذیری

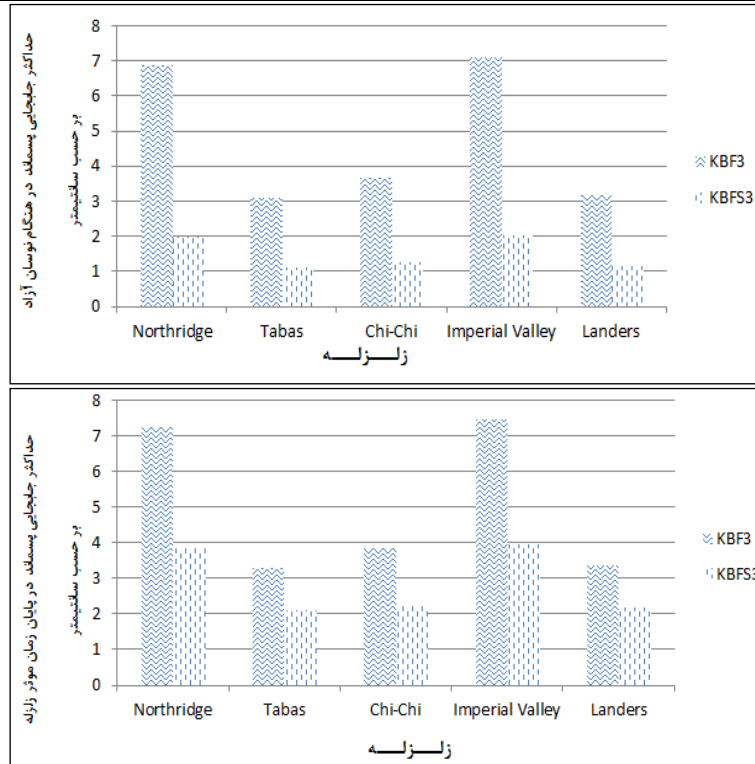
تا زمانی که رفتار کلی سازه در هنگام بارگذاری به صورت خطی باشد و خاصیت ارتجاعی خود را حفظ کند، در هنگام باربرداری و حذف عامل نیرو از روی سازه، سازه به حالت اولیه باز می‌گردد. در غیر این صورت، یعنی هنگامی که سازه وارد ناحیه غیرخطی و تغییرشکل‌های غیرارتجاعی شود، تغییرشکل‌های برگشت‌ناپذیری در سازه به وجود می‌آید که پس از باربرداری در سازه باقی می‌ماند. به این تغییرشکل‌ها اصطلاحاً تغییرشکل‌های پسماند گفته می‌شود. هرچه مقدار تغییرشکل‌های پسماند کمتر باشد، بیانگر این مطلب است که سازه پس از اتمام مرحله بارگذاری و پس از حذف عامل خارجی اعمال نیرو، بهتر می‌تواند به مکان اولیه خود نزدیک شود. به این خاصیت، برگشت‌پذیری گفته می‌شود. به منظور بررسی برگشت‌پذیری قاب‌ها، دو بار (با و بدون استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی) و هر بار با فاصله زمانی متوسط ۲۵ ثانیه (در مجموع، ۵۰ ثانیه تحریک) هریک از شتاب‌نگاشت‌های طبس، نورث‌ریچ، چیچی، ایمپریال ولی و لندرز به‌عنوان تحریک در سازه مدل اعمال شد. ۲۵ ثانیه اول برای در نظر گرفتن اثرات حین وقوع زلزله (با فرض پوشش دادن کامل زمان مؤثر هر زلزله) و ۲۵ ثانیه دوم به منظور در نظر گرفتن اثرات نوسانات آزاد سازه لحاظ شده است. برای مدلسازی واقعی‌تر رفتار مصالح، میرایی از نوع رایلی برای اعضا در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ به ترتیب برای قاب‌های سه، پنج و هفت طبقه ارائه شده است.



شکل ۱۳: مقایسه حداکثر جابجایی پسماند در پایان زمان مؤثر زلزله و در هنگام نوسان آزاد قاب سه طبقه.



شکل ۱۴: مقایسه حداکثر جابجایی پسماند در پایان زمان مؤثر زلزله و در هنگام نوسان آزاد قاب پنج طبقه.



شکل ۱۵: مقایسه حداکثر جابجایی پسماند در پایان زمان مؤثر زلزله و در هنگام نوسان آزاد قاب هفت طبقه.

همان‌طور که شکل‌ها نشان می‌دهند استفاده از میله‌های آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در قاب سه طبقه، باعث کاهش جابجایی‌های پسماند شده است. این مقدار کاهش هم در پایان زمان مؤثر زلزله و هم در هنگام نوسان آزاد مشاهده می‌شود ولی مقدار کاهش در زمان نوسان آزاد سازه، به مراتب بیشتر است به‌صورتی که در زلزله Chi Chi بیش از ۸۲ درصد جابجایی‌ها مستهلک شده است. استفاده از میله‌های آلیاژهای حافظه‌دار هوشمند در قاب پنج طبقه نیز، باعث کاهش جابجایی‌های پسماند شده است. این مقدار کاهش هم در پایان زمان مؤثر زلزله و هم در هنگام نوسان آزاد مشاهده می‌شود ولی مقدار کاهش در زمان نوسان آزاد سازه، به مراتب بیشتر است به‌صورتی که در زلزله Chi Chi بیش از ۹۴ درصد جابجایی‌ها مستهلک شده است. استفاده از میله‌های آلیاژهای حافظه‌دار هوشمند در قاب هفت طبقه نیز، باعث کاهش جابجایی‌های پسماند شده است. این مقدار کاهش هم در پایان زمان مؤثر زلزله و هم در هنگام نوسان آزاد مشاهده می‌شود ولی مقدار کاهش در زمان نوسان آزاد سازه، به مراتب بیشتر است به‌صورتی که در زلزله Northridge بیش از ۴۶ درصد جابجایی‌ها مستهلک شده است.

با مقایسه نتایج به‌دست آمده در این بخش مشخص شد در سازه‌های مسلح به میله‌های متشکل از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، تغییرشکل‌های نهایی و دائمی ناچیزی باقی می‌ماند و رفتار لرزه‌ای سازه‌ها در هنگام وقوع زلزله یا پس از آن نیز بهبود قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. در تمامی نمونه‌های بررسی شده، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی تأثیرات قابل ملاحظه‌ای در کاهش جابجایی‌ها، تغییرشکل نسبی و تغییرشکل‌های دائمی داشته‌اند. میزان کاهش تغییرشکل‌های پسماند به ارتفاع سازه و ماهیت فرکانسی آن بستگی دارد ولی به‌طور کلی با افزایش ارتفاع سازه توانایی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در بازگرداندن سازه به مکان اولیه خود کاهش می‌یابد.

۹- نتیجه گیری

هدف این مقاله بررسی تأثیر استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در بهبود عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای زانویی است. برای این منظور سه قاب سه، پنج و هفت طبقه با مهاربندی زانویی انتخاب شد و پارامترهای لرزه‌ای، پیش و پس از اضافه کردن میله‌های SMA مورد

بررسی قرار گرفت. در ارزیابی آن ها از تحلیل استاتیکی غیر خطی و تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی استفاده شده است. مطالعه حاضر نشان داد:

- تجهیز سازه به میله‌های تشکیل شده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی، در کاهش جابجایی نسبی و مطلق سازه تأثیر دارد.
- استفاده از میله‌های تشکیل شده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی باعث کاهش جابجایی نظیر نقطه تسلیم و نیز کاهش جابجایی حداکثر سازه و در نتیجه افزایش اندک ظرفیت شکل پذیری می‌شود.
- استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به علت ماهیت ساختاری آنها تأثیر اندکی در مقاومت ارتجاعی قاب‌ها می‌گذارد.
- استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در سازه‌ها تا حدود زیادی منجر به حداقل شدن تغییرشکل‌های پسماند پس از وقوع زلزله می‌شود.

مراجع

- [۱] محمودی صاحبی م.، فلسفه طراحی لرزه ای بر اساس عملکرد، ۱۳۸۸، انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.
- [2] Ghaffarzade H., Mansouri A., 2008, Investigation of the Behavior Factor in SMA Braced Frames, The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 2008, Beijing, China.
- [3] Jason M., Reginald D., Davide F., Ferdinando A., 2007, Seismic Assessment of Concentrically Braced Steel Frames with Shape Memory Alloy Braces, Journal of structural engineering ASCE.
- [4] Hooshmand M., Rafezy B., Khali-Allafi J., 2013, Study of Seismic Behaviour in Steel Structures by Using of Combination Braces of Steel and SMA, Journal of Civil and Environmental Engineering, Volume 43, Issue 3.
- [۵] محمودی صاحبی م.، حواریان، ا.، ۱۳۹۱، کاربرد مصالح هوشمند در کاهش آسیب پذیری لرزه ای، اولین کنفرانس ملی مدیریت بحران، زلزله و آسیب پذیری اماکن و شریانه‌های حیاتی.
- [6] Mohamed O., 2014, Seismic Response of Braced Steel Frames with Shape Memory Alloy and Mega Bracing Systems, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering, Vol:8, No:2, 2014.
- [۷] آشتیانی م.، ۱۳۸۸، آشنایی با آلیاژهای حافظه دار، نشریه علمی، فنی و تخصصی مهارت، شماره ۵۹.
- [8] Auricchio F., Taylor R.L. and Lubliner R.L., 1997, Shape Memory Alloys: Macromodelling and Numerical Simulations of the Super Elastic Behavior, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 146, PP. 281-312.
- [9] Dolce M., Cardone D., 2001, Mechanical Behaviour of Shape Memory Alloys for Seismic Application, Martensite and Austenite Ni-Ti Bars Subjected to Torsion, International Journal of Mechanical Science; 43: 2631-2656.
- [10] Auricchio F., Sacco E., 1997, A One-Dimensional Model for Superelastic Shape-Memory Alloys with Different Elastic Properties Between Austenite and Martensite, Volume 32, Issue 6, November, Pages 1101-1114.
- [۱۱] مطهری ا.، ۱۳۸۵، کاربرد آلیاژهای حافظه دار شکلی در حالت های مختلف به منظور کنترل غیر فعال سازه‌ها، رساله دکترا، دانشگاه تهران.
- [12] Otsuka K., Wayman C.M., 1999, Shape Memory Materials, University of Illinois.
- [13] Kasai K., Popov E.P., 1986, A Study of Seismically Resistant Eccentrically Braced Steel Frame Systems, Earthquake engineering research center, Report No. UCB/EERC. 86/01. Berkeley (CA): University of California.
- [14] Aristizabal-Ochoa J.D., 1986, Disposable Knee-bracing Technique in Steel Frames, Engineering Journal AISC 04/1986.
- [15] Balendra T., Sam M.T., Liaw D.Y., 1990, Diagonal Brace with Ductile Anchor for a Seismic Steel Frames, Earthquake engineering and structural dynamics; 19,847-58.
- [16] Liang C, Rogers CA. "Design of shape memory alloy actuators". Mechanical Design 1992; 144:223-30.
- [17] Chandra R., 2001, Active Shape Control of Composite Blades Using Shape Memory Actuation, Smart Materials and Structures, 10: 1018-24.
- [18] Menegotto M., Pinto P.E., 1973, Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frame Including Change in Geometry and Non-linear Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending, Proc. Of IABSE symposium on resistance and ultimate deformability of structures acted on by well defined repeated loads, Vol.13, 1973: 15-22.