

بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتنی با آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک

محمودرضا شیراوند*، امیر خرمی نژاد^۲، محمدحسین بیانی فر^۳

- ۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
- ۲- دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
- ۳- کارشناس ارشد سازه دانشگاه آزاد اسلامی قزوین

m_shiravand@sbu.ac.ir*

تاریخ پذیرش [۹۶/۰۶/۲۷]

تاریخ دریافت [۹۵/۰۶/۱۴]

چکیده

در ساختمان‌های با سیستم سازه‌ای قاب خمشی، عمده شکل پذیری در نواحی انتهایی تیرها، با تشکیل مفاصل پلاستیک به هنگام تغییرشکل‌های بزرگ در حین زلزله تامین می‌شود. باتوجه به ماندگاری تغییرشکل‌های پسماند سازه پس از وقوع زلزله در سازه‌های رایج و عدم امکان بهره برداری از آنها، استفاده از رفتار هوشمند فلزها و آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به جای میلگردهای طولی در تیرهای بتنی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از مهمترین ویژگی‌های بارز آلیاژهای حافظه‌دار شکلی قابلیت حفظ شکل اولیه در کرنش‌های کمتر از ۸٪، خاصیت فوق ارتجاعی و کاهش تغییرشکل‌های پسماند است. از جمله این مصالح هوشمند می‌توان به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) اشاره نمود. در این پژوهش، قاب‌های بتنی سه، پنج، هفت و نه طبقه با استفاده از نرم‌افزار Seismostruct مدلسازی و تحت ۶ شتاب‌نگاشت حاصل از زلزله‌های حوزه نزدیک قرار گرفته‌اند و پارامترهای تغییر مکان جانبی نسبی طبقات، تغییر مکان جانبی نسبی پسماند طبقات و برش پایه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهند، استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در دو انتهای تیرهای قاب به جای میلگردهای فولادی رایج، باعث افزایش تغییر مکان جانبی سازه هنگام زلزله می‌شود؛ اما تغییر مکان جانبی نسبی پسماند سازه و برش پایه سازه کاهش می‌یابد که منجر به افزایش سرویس دهی و کاهش هزینه‌های بازسازی پس از وقوع زلزله‌های حوزه نزدیک می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آلیاژ حافظه‌دار شکلی، شکل‌پذیری، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، تغییر مکان جانبی پسماند، زلزله حوزه نزدیک

۱- مقدمه

مفاصل پلاستیک موجب اتلاف انرژی زلزله می‌شود اما به علت وجود تغییرشکل‌های غیرارتجاعی بزرگ، تغییر مکان پسماند در سازه افزایش یافته که منجر به مختل شدن سرویس‌دهی سازه پس از وقوع زلزله می‌شود. در زلزله میچوآکن (۱۹۸۵) در مکزیک و زلزله نورثریج (۱۹۹۴) در ایالات متحده آمریکا تعداد بسیار زیادی از سازه‌ها پس از وقوع زلزله به دلیل تغییرشکل‌های ماندگار فراتر از

از جمله مسائل مهم در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بحث شکل‌پذیری و قابلیت استهلاک انرژی است. در قاب‌های بتنی مسلح عمده شکل‌پذیری در نواحی انتهایی تیرها با تشکیل مفاصل پلاستیک به صورت جاری شدن میلگردهای طولی و خرد شدن بتن در ناحیه‌ای به طول عمق تیر از بر ستون بوجود می‌آید. تشکیل

آزمایش‌هایی روی تیرهای دارای آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به وسیله ابدولریدها¹ [3] صورت پذیرفت که این تیرها تحت تاثیر بار چرخه‌ای یکنواخت و چرخه‌ای بازگشتی قرار گرفتند. در این پژوهش نیز نتایج از توانایی بازگشت تغییر مکان غیرخطی در تیرها به مقدار بیش از ۹۳ درصد در مقایسه با تیرهایی با فولادهای معمولی، حکایت داشتند. در پژوهش دیگری که در سال ۲۰۱۳ به صورت آزمایشگاهی و عددی با استفاده از میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی Cu-Al-Mn به عنوان مسلح کننده در تیرها به کار گرفته شد، نشان داد که تیرهای مسلح شده با این آلیاژ توانایی بازیابی شکاف‌های ایجاد شده در تیرها تا بیش از ۸۹ درصد در مقایسه با تیر مسلح شده با فولادهای مرسوم را دارد [4].

۲- آلیاژهای حافظه‌دار شکلی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نوعی آلیاژ با رفتار ویژه است که قابلیت بازیابی شکل اولیه خود را پس از تغییر شکل در اثر دما و تنش دارد. اثر حافظه‌داری شکلی در سال ۱۹۶۲ به وسیله ویلیام بوهرلر و همکارانش در آزمایشگاه تسلیحات نیروی دریایی آمریکا در آلیاژ نیکل-تیتانیوم کشف شد. آنها این ماده را نایتنول نام‌گذاری کردند [4]. امروزه نیز متداولترین نوع آلیاژهای حافظه‌دار شکلی که در کاربردهای مختلف مانند صنعتی، تجاری و پزشکی به کار می‌رود، نایتنول است. از جمله دلایل متداول شدن نایتنول را نیز می‌توان به برجسته بودن ویژگی‌های آن مانند دارا بودن حافظه شکلی، ابرکشسانی و زیست سازگاری نسبت به آلیاژهای مشابه خود نام برد.

دلیل بروز ویژگی‌های رفتاری منحصر به فرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی را باید در چند فازی یا چند ساختاری بودن آنها جستجو نمود. به بیانی دیگر، چینش اتم‌های آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در داخل شبکه کریستالی آنها باعث به وجود آمدن دو حالت رفتاری مارتینزیت و آستنیت می‌شود. حالت آستنیتی در دماهای بالا و تنش پایین پایدار تعریف می‌شود که عامل ایجاد رفتار فوق ارتجاعی است. حالت مارتینزیت در دماهای پایین پایدار بوده و مسئول ایجاد رفتار حافظه‌دار شکلی است. اشکال مختلف فاز مارتینزیت نیز می‌توانند در دماهای پایین به یکدیگر تبدیل شوند و

حد مجاز و هزینه‌های ترمیم و بازسازی، تخریب و دوباره احداث شده‌اند [1]. به همین علت نیاز به جایگزینی مصالحی با قابلیت حفظ شکل اولیه و داشتن خاصیت فوق ارتجاعی در کرنش‌های بزرگ برای کاهش تغییرشکل‌های پسماند، در نواحی شکل پذیر سازه لازم و ضروری است. از جمله این مواد می‌توان به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی اشاره نمود. عدم نیاز به تعویض پس از زلزله، مقاومت بالا در برابر خوردگی و خستگی، قابلیت بازگشت به حالت اولیه به وسیله اعمال دما و قابلیت استهلاک انرژی زیاد و تحمل کرنش تا حدود کمتر از ۸ درصد بدون بر جای گذاشتن کرنش پسماند از دیگر مزایای استفاده از این نوع مصالح است. استفاده از این آلیاژها، در نواحی بحرانی سازه مانند محل تشکیل مفاصل پلاستیک، سبب کاهش تغییرشکل‌های پسماند پس از زلزله، امکان ارائه سرویس دهی مطلوب سازه و احتمالاً عدم نیاز به تخریب یا بهسازی آن می‌شود. در حالی که در سازه‌های بتنی مسلح شده با آرماتور فولادی امکان برگشت پذیری تنش‌های وارد شده به حالت اولیه امکان پذیر نیست. عموماً میزان تخریب و یا وجود تغییرشکل‌های پسماند ماندگار در سازه‌هایی که نزدیک گسل واقع شده‌اند، بسته به پارامترهای دینامیکی آنها، نسبت به زلزله‌های حوزه دور بیشتر است که این امر ناشی از وجود حرکت‌های پالس گونه با پریود بلند در ابتدای شتاب نگاشت‌ها، مقدار شتاب، سرعت و جابه‌جایی بالاتر و اعمال نیروی ضربه‌گونه به سازه نسبت به زلزله‌های حوزه دور است. در سال ۲۰۱۲ علم و همکاران [2] به بررسی قاب‌های سه، شش و هشت طبقه با سه نوع متفاوت آرایش در میلگردهایی طولی تیرها پرداختند که در آرایش نوع اول، سازه تنها با میلگردهای فولادی مسلح شده بود. در نوع دوم تمامی تیرها با میلگردهایی از جنس آلیاژهای حافظه‌دار شکلی مسلح شده بودند و در نوع سوم تمامی تیرها در نقاط بحرانی (دو انتهای تیر) به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی و در باقی نقاط به فولادهای مرسوم مسلح شده بود. برای تمامی مدل‌ها، میلگرد ستون‌ها از نوع فولادهای مرسوم در نظر گرفته شده بود. در این پژوهش، سازه‌ها تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که نیاز لرزه‌ای قاب‌ها با کاهش ۲۰-۱۵ درصدی در سازه‌های دارای آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در مقایسه با قاب معمولی، همراه است. در سال ۲۰۱۳ نیز

¹ Abdulridha

(بارگذاری) می‌شود. با برداشتن تنش اعمالی فاز مارتنزیت ناپایدار شده و تبدیل معکوس اتفاق می‌افتد که در نتیجه این تبدیل ماده حالت اولیه خود را باز می‌یابد و دیگر کرنش پسماندی باقی نمی‌ماند. به این رفتار آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، خاصیت فوق ارتجاعی گفته می‌شود [7,8] (شکل ۱).

پروسه جهت گیری دوباره یا جفت شدگی و نشدگی را شکل دهند [5,6].

شکل ۱ منحنی تنش کرنش خاصیت فوق ارتجاعی [۱۳]

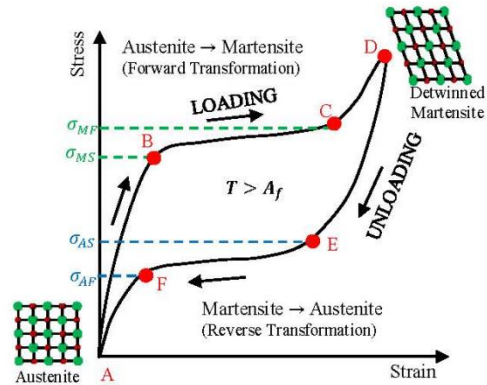


Fig. 1. Stress-strain curve of super-elasticity property

۳- مطالعه عددی قاب‌های بتنی

۳-۱- معرفی مدل‌های تحلیلی

به منظور ارزیابی رفتار قاب‌های بهسازی شده با آلیاژ حافظه‌دار شکلی، قاب‌های بتنی با چهار ارتفاع متفاوت (سه، پنج، هفت و نه طبقه) استفاده شده است. پلان تمامی سازه‌ها یکسان بوده و با توجه به تقارن سازه تنها به بررسی قاب میانی پرداخته شده است. در شکل (۲) مشخصات سازه‌ای قاب‌های سه، پنج، هفت و نه طبقه نشان داده شده است. طول دهانه تمامی تیرها، ۴/۵ متر و ارتفاع تمام طبقات ۳/۲ متر است.

اگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی در فاز استنیت و دمای بالاتر از A_f دمای پایان تبدیل فاز مارتنزیت به استنیت) باشد، اعمال تنش به این ماده موجب تبدیل فاز استنیت به مارتنزیت به وسیله اعمال تنش

شکل ۲. مقاطع مورد استفاده در قاب‌ها (a) - سه طبقه (b) - پنج طبقه (c) - هفت طبقه (d) - نه طبقه

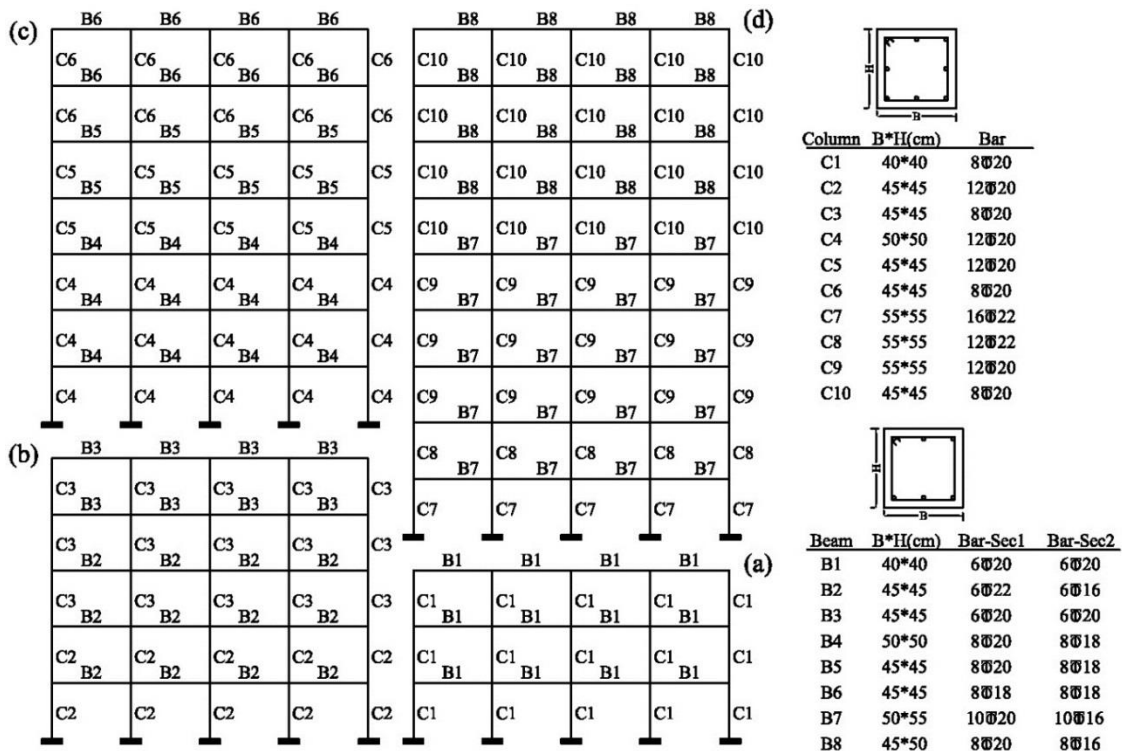


Fig. 2. Section properties of frames, (a) Three-story, (b) Five-story, (c) Seven-story, (d) Nine-story

غیرخطی محوری هر کدام از فیبرها که در طول و مقطع عرضی اعضا قرار دارند تعیین می‌شود. تمام مصالح بکار رفته در این پژوهش، در نرم‌افزار **Seismostruct** به صورت پیش فرض قابل دسترس است.

برای مدل رفتاری اعضای فولاد مانند میلگردها، از مدل تنش- کرنش محوری با در نظر گرفتن سخت شونده‌گی کرنشی دوباره استفاده شده است. برای مدل رفتاری مصالح بتنی از مدل رفتاری ارایه شده به وسیله مندر و همکاران [13] که در سال ۱۹۸۸ ارایه و به وسیله مارتینز- روادو و النشای [14] در سال ۱۹۷۷ اصلاح، و استفاده شده است. در این مدل آثار فولادهای عرضی به صورت یک ضریب ثابت منظور می‌شود. برای مدل رفتاری آلیاژ حافظه‌دار شکلی نیز از مدل رفتاری محوری که به وسیله آریوکو و ساکو ارائه شده، استفاده می‌شود [15].

جدول (۱). پارامترهای مورد نیاز برای معرفی هر یک از مصالح آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح به کار رفته در مدل‌های اجزاء محدود

Material	Material Properties	Value	Unit
Concrete	Compressive Strength	35	MPa
	Ultimate strain	0.2	%
	Modulus of elasticity	200000	MPa
Steel	Yield Stress	400	MPa
	Strain hardening	0.5	%
	Modulus of elasticity	60000	MPa
SMA	Austenite to Martensite start Stress	400	MPa
	Austenite to Martensite finish Stress	500	MPa
	Martensite to Austenite start Stress	300	MPa
	Martensite to Austenite finish Stress	100	MPa

Table 1. Material properties used in FE models

۳-۲- شتابنگاشت‌ها

۶ شتاب‌نگاشت از میان شتاب‌نگاشت‌هایی که سامرویل برای مطالعات پروژه فولادی SAC گردآوری نموده، انتخاب شده‌اند [16]. کلیه شتاب‌نگاشت‌ها از نوع حوزه نزدیک بوده و روی خاک نوع II مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ثبت شده‌اند. در جدول (۲) نام و سایر

سازه‌ها بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و مبحث ششم و نهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده‌اند. بار مرده در نظر گرفته شده برای طبقات ۷۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و بار زنده نیز برابر ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع لحاظ شده است.

دو نوع سازه در این پژوهش بررسی می‌شود که سازه اول قاب بتنی مسلح شده با فولاد مرسوم و سازه دوم قاب بتنی مسلح شده با آلیاژ حافظه‌دار شکلی در ناحیه تشکیل مفاصل پلاستیک به طول L_p در دو انتهای تیرها و استفاده از فولادگذاری مرسوم در سایر نقاط تیر است. به عبارتی آرماتورهای فولادی قاب بتن مسلح طراحی شده با آرماتورهایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی جایگزین شد تا مقایسه لرزه‌ای بین قاب بتنی معمولی و قاب بتنی با آلیاژ SMA صورت گیرد. ستون‌های استفاده شده در هر دو قاب یکسان بوده و با آرماتورهای فولادی مرسوم مسلح شده‌اند. تفاوت قاب‌ها، تنها در آرماتورگذاری دو انتهای تیرها (ناحیه تشکیل مفصل پلاستیک) از نظر نوع مصالح بکار رفته در آرماتورگذاری این ناحیه است. طول مفاصل پلاستیک در تیرها توسط روابط تجربی توصیه شده به وسیله پائولی [9]، علم [10] و ونگ [11] در نظر گرفته شده است. در رابطه (۱)، چگونگی به دست آوردن طول مفاصل پلاستیک نشان داده شده است.

$$L_p = 0.08(L) + 0.022d_{steel} \times f_y \quad (1)$$

در رابطه فوق، L_p طول ناحیه پلاستیک تیر، L طول خالص تیر، d_{steel} قطر میلگرد استفاده شده در عضو و f_y تنش جاری شدن میلگردها است.

در این پژوهش، طول مفصل پلاستیک برای میلگردهای با قطر ۲۰ میلی‌متر برابر ۵۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. که این مقدار از بر ستون محاسبه شده است. به منظور اتصال میلگرد-های آلیاژهای حافظه‌دار شکلی فرض می‌شود که از کوپلرهای (جفت کننده) مکانیکی که به وسیله علم پیشنهاد شده است، استفاده می‌شود [12]. به منظور تخمین صحیح رفتار غیرخطی عضو، از مدل فایبر برای در نظر گرفتن توزیع غیرخطی مصالح استفاده شده است. برای این منظور سطح مقطع عضو به تعداد مش ۲۰۰ در ۲۰۰ تقسیم بندی شده است. همچنین تیرها به شش المان و ستون‌ها به چهار المان در طول خود تقسیم شده‌اند. وضعیت تنش- کرنش هر مقطع توسط جمع رفتار

البته در بعضی از پاسخها تغییر مکان جانبی نسبی بیشینه قاب‌های بهسازی شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نسبت به قاب‌های با فولاد مرسوم کاهش داشته است که دلیل این موضوع را می‌توان در کاهش دوره تناوب و ماهیت زلزله حوزه نزدیک جست‌وجو کرد. در بعضی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌های حوزه نزدیک، افزایش سختی باعث جذب نیروی بیشتری از زلزله توسط سازه می‌شود. در شکل (۳)، نمودارهای تغییر مکان جانبی نسبی طبقات برای قاب بتنی سه طبقه با فولادگذاری مرسوم و مسلح شده با آلیاژ SMA نشان داده شده است.

حالت استفاده از فولادگذاری مرسوم و SMA، به جز شتاب‌نگاشت‌های ۴ و ۶ از مقدار مجاز آیین‌نامه (برابر با ۲٪) فراتر رفته است که نشان می‌دهد زلزله‌های حوزه نزدیک اثر موثرتری بر این قاب‌ها تحت هر دو حالت داشته‌اند. با توجه به شکل (۴)، تغییر مکان جانبی نسبی طبقات در قاب پنج طبقه حتی در حالت استفاده از SMA به جز شتاب‌نگاشت‌های ۲ و ۳، از مقدار مجاز آیین‌نامه (برابر با ۲٪) فراتر نرفته است. بیشترین افزایش نسبی تغییر مکان جانبی نسبی در قاب‌های مسلح شده با SMA نسبت به قاب‌های عادی، در معرض شتاب نگاشت ۴ قابل مشاهده است. برای نمونه می‌توان به افزایش حدود ۵۰ درصدی تغییر مکان جانبی نسبی در طبقه دوم قاب مسلح شده با SMA شده نسبت به قاب بتنی با فولاد مرسوم اشاره نمود.

مشخصات زلزله‌های استفاده شده در این پژوهش آورده شده است. کلیه شتاب نگاشت‌ها بر مبنای شتاب بیشینه 0.35g مقیاس شده‌اند.

۳-۳- مدل‌سازی نرم‌افزاری

تحلیل مدل‌های ساخته شده با استفاده از نرم‌افزار Seismostruct و به روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده است. در این پژوهش از روش HHT (Hilber-Huges-Taylor) برای انتگرال‌گیری زمانی در تحلیل دینامیکی استفاده شده است.

۴- نتایج

۴-۱- تغییر مکان جانبی نسبی طبقات

تغییر مکان جانبی نسبی طبقات یکی از مهم‌ترین و در عین حال آسانترین راه برای بررسی میزان خرابی ایجاد شده در یک سازه است. در شکل‌های (۳ تا ۶) تغییر مکان جانبی نسبی بیشینه طبقات در قاب‌های سه، پنج، هفت و نه طبقه با فولادگذاری مرسوم و آلیاژ SMA، تحت تاثیر شتاب نگاشت‌های ۱ تا ۶ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در بیشتر قاب‌های بهسازی شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، چشم‌پوشی از ارتفاع آنها تغییر مکان جانبی نسبی طبقات افزایش پیدا نموده است. دلیل این افزایش تغییر مکان جانبی نسبی را می‌توان کمتر بودن مدول الاستیسته این آلیاژها نسبت به فولاد (تقریباً $\frac{1}{3}$) دانست. که استفاده از آنها در قاب‌ها کاهش سختی سازه، افزایش شکل‌پذیری، افزایش دوره تناوب اصلی و افزایش تغییر مکان جانبی نسبی طبقات را به همراه داشته است.

جدول ۲. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در این پژوهش

PGA	Distance (km)	Directivity effect	Fault type	Mw	Year	Station	Earthquake	#
0.57g	3.5	Forward	Normal	7	1989	Los Gatos	Loma Prieta	1
0.44g	6.3	Forward	Normal	7	1989	Lex. Dam	Loma Prieta	2
0.73g	8.5	Forward	Normal	7.1	1992	Petrolia	C. Mendocino	3
0.6g	2	Forward	Normal	6.7	1992	Erzincan	Erzincan	4
0.76g	1.1	Forward	Normal	7.3	1992	Landers	Landers	5
0.87g	7.5	Forward	Normal	6.7	1994	Rinaldi	Nothridge	6

Table 2. Characteristics of near-field accelerograms

شکل ۳. تغییر مکان جانبی نسبی قاب سه طبقه در دو حالت قاب بتنی با فولاد و قاب بتنی با آلیاژ حافظه‌دار

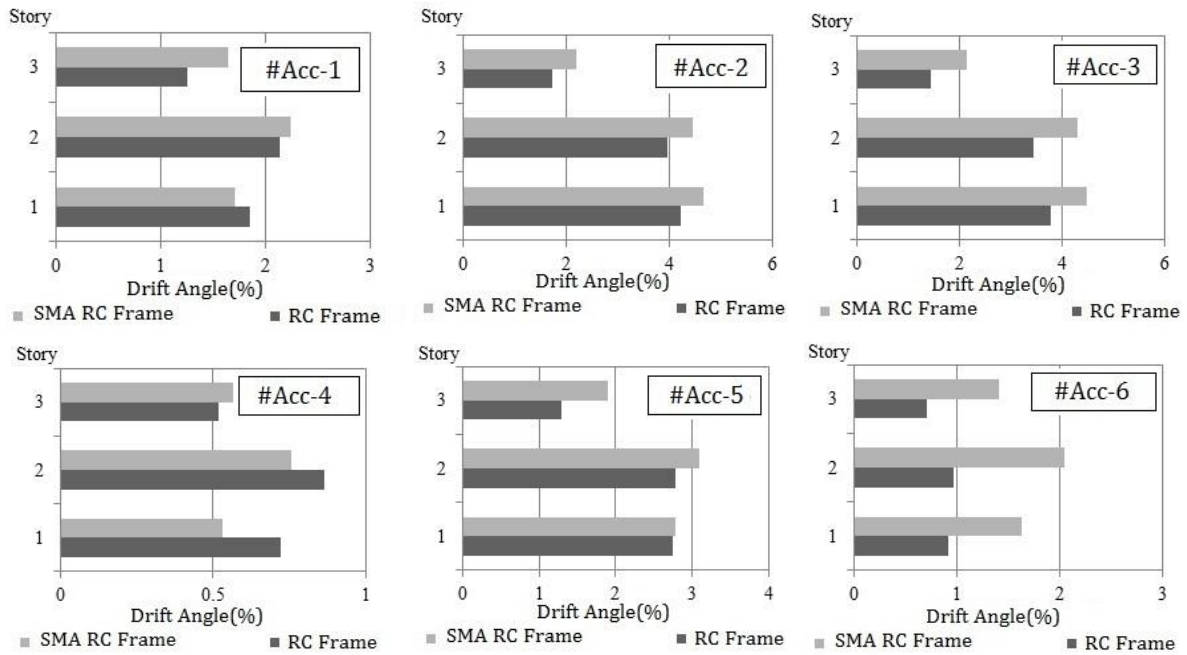


Fig. 3. Relative lateral displacement for 3-story RC & SMA RC frame

شکل ۴. تغییر مکان جانبی نسبی قاب پنج طبقه در دو حالت قاب بتنی با فولاد و قاب بتنی با آلیاژ حافظه‌دار

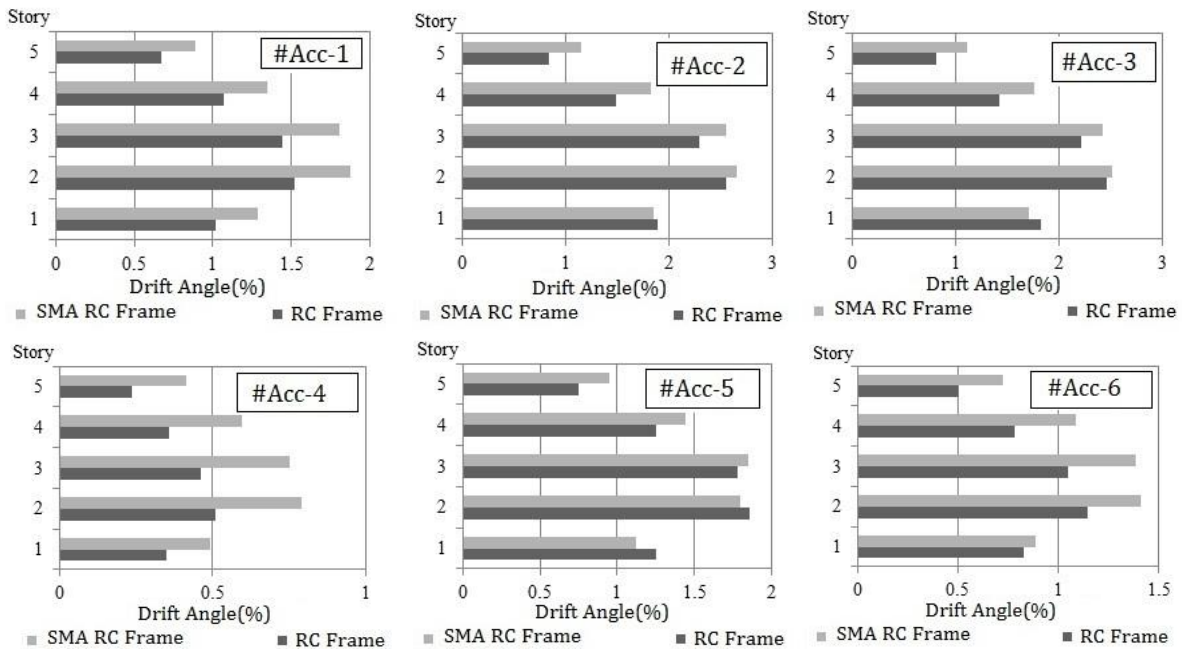


Fig. 4. Relative lateral displacement for 5-story RC & SMA RC frame

شکل ۵. تغییر مکان جانبی نسبی قاب هفت طبقه در دو حالت قاب بتنی با فولاد و قاب بتنی با آلیاژ حافظه‌دار

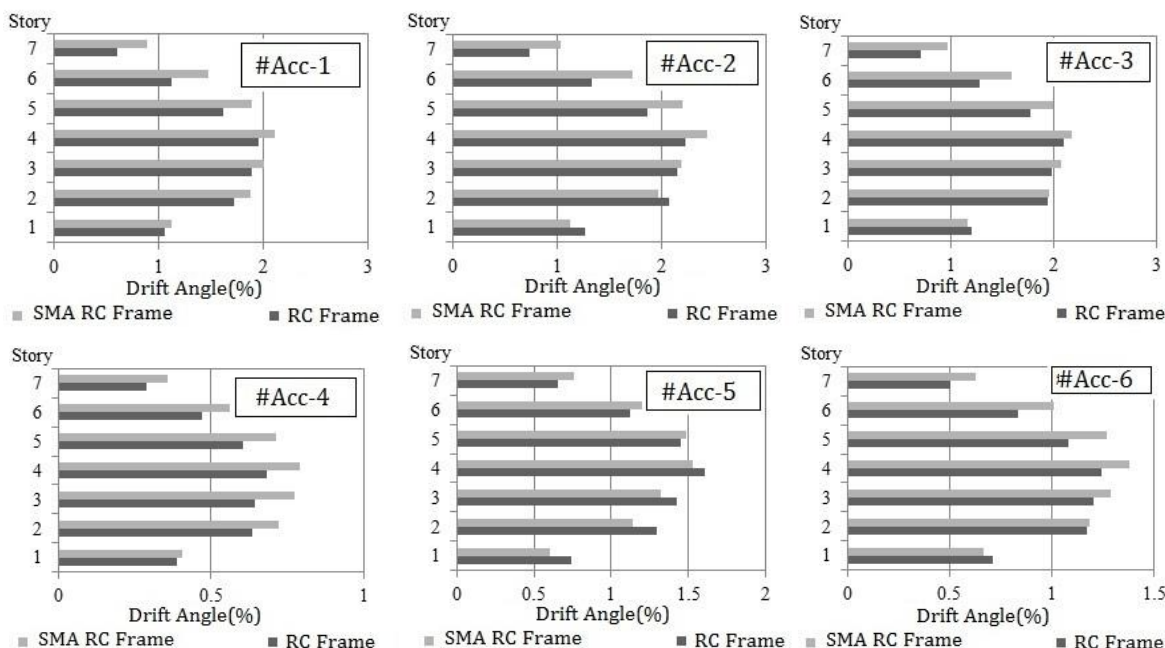


Fig. 5. Relative lateral displacement for 7-story RC & SMA RC frame

شکل ۶. تغییر مکان جانبی نسبی قاب نه طبقه در دو حالت قاب بتنی با فولاد و قاب بتنی با آلیاژ حافظه‌دار

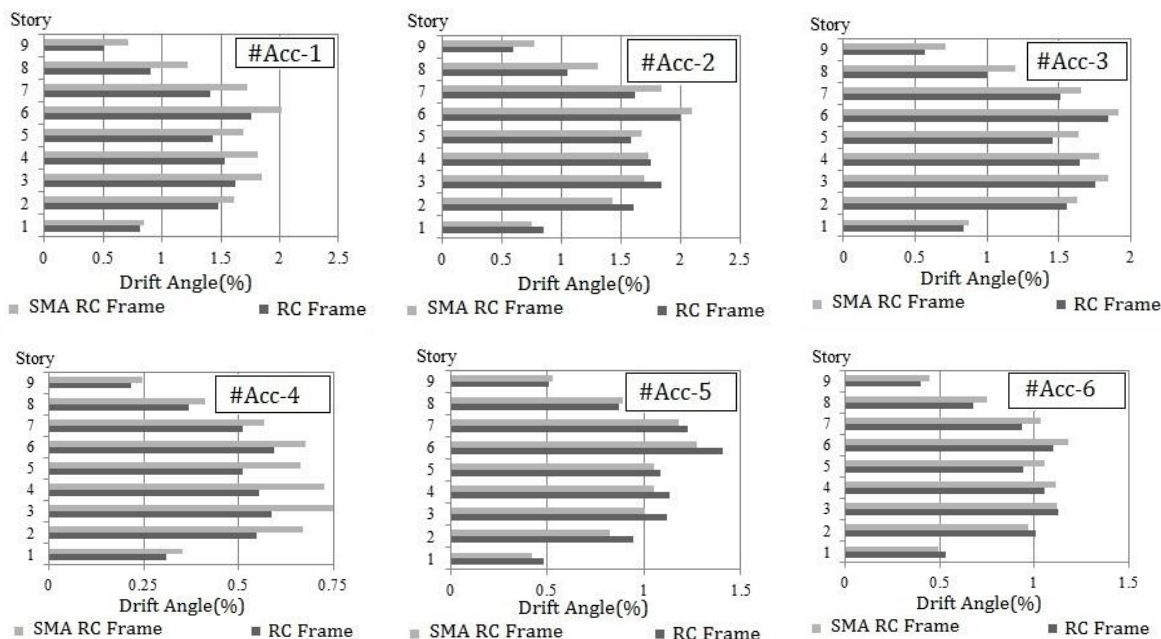


Fig. 6. Relative lateral displacement for 9-story RC & SMA RC frame

عمده دلیل این افزایش، کمتر بودن مدول الاستیسیته SMA نسبت به فولاد است که انتظار افزایش در پارامتر تغییر مکان جانبی نسبی طبقات را نیز با خود به همراه دارد. با توجه به شکل (۶)، تغییر مکان جانبی نسبی طبقات قاب نه طبقه در بیشتر موارد به جز شتاب‌نگاشت ۵، در حالت استفاده از SMA

با توجه به شکل (۵)، در قاب هفت طبقه، تغییر مکان جانبی نسبی طبقات در معرض شتاب‌نگاشت‌های یک تا ۶، در حالت استفاده از SMA نسبت به قاب‌های عادی افزایش یافته است. اما تحت هر دو حالت تسلیح، مقدار تغییر مکان جانبی نسبی طبقات از مقدار مجاز آیین‌نامه (برابر با ۲/۵۰٪) کمتر است.

است. همان گونه که در تمامی این شکل‌ها نیز مشخص است، تغییر مکان جانبی نسبی پسماند طبقات در تمامی قاب‌ها فارغ از ارتفاع آنها به طرز قابل توجهی کاهش پیدا کرده است.

نتایج تحلیل قاب سه طبقه بیانگر کاهش زیاد تغییر مکان جانبی نسبی پسماند قاب‌های مسلح شده با آلیاژ SMA نسبت به قاب‌های مسلح شده با فولاد در تمام شتابنگاشت‌ها است (شکل ۷). با توجه به شکل (۸)، تحت تمامی شتابنگاشت‌ها تغییر مکان جانبی پسماند قاب پنج طبقه کاهش چشمگیری داشته است که بیانگر خاصیت فوق ارتجاعی آلیاژهای حافظه‌دار شکلی است. در شکل‌ها (۹ و ۱۰) نیز، تحت تمام شتابنگاشت‌ها تغییر مکان جانبی پسماند قاب‌های هفت و نه طبقه نیز کاهش یافته است که نشان می‌دهد صرف نظر از ارتفاع سازه، آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به علت خاصیت ابرکشسانی خود توانایی زیادی در کاهش تغییر مکان جانبی نسبی پسماند خواهند داشت. لازم به گفتن است تحت سایر شتابنگاشت‌ها نیز نتایج مشابه برای تمامی قاب‌ها پدید آمد.

افزایش یافته است، اما از مقدار ۲/۲ درصد فراتر نرفته است. با توجه به تغییر مکان جانبی نسبی مجاز آیین‌نامه برای قاب‌های بیش از ۵ طبقه که برابر با ۲/۵۰٪ است، می‌توان بیان نمود اگرچه تغییر مکان جانبی نسبی در حالت استفاده از آلیاژ حافظه‌دار بیشتر شده است اما از حدود مجاز آیین‌نامه فراتر نرفته است.

۲-۴- تغییر مکان جانبی پسماند قاب‌ها

در این بخش به بررسی تغییر مکان جانبی پسماند قاب‌های بتنی مطالعه شده پرداخته شده است. تاکنون پژوهش‌های بسیار کمی پیرامون ارزیابی تغییر مکان جانبی نسبی پسماند طبقات صورت پذیرفته است. در این مطالعه، به دلیل اهمیت بررسی توانایی بازیابی شکل اولیه در قاب‌های مسلح شده با SMA، به آن پرداخته شده است. در شکل‌های (۷ تا ۱۰) تغییر مکان‌های پسماند قاب‌های سه، پنج، هفت و نه طبقه ناشی از تحریک شتاب‌نگاشت‌های شماره ۱ تا ۳ به عنوان نمونه نشان داده شده

شکل ۷. تغییر مکان جانبی نسبی پسماند قاب سه طبقه در دو حالت قاب بتنی با فولاد و قاب بتنی با آلیاژ حافظه‌دار

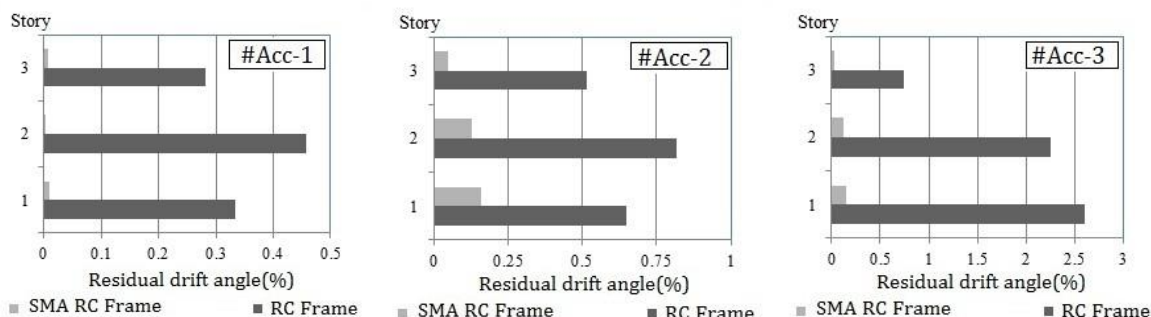


Fig. 7. Residual relative lateral displacement for 3-story RC & SMA RC frame

شکل ۸. تغییر مکان جانبی نسبی پسماند قاب پنج طبقه در دو حالت قاب بتنی با فولاد و قاب بتنی با آلیاژ حافظه‌دار

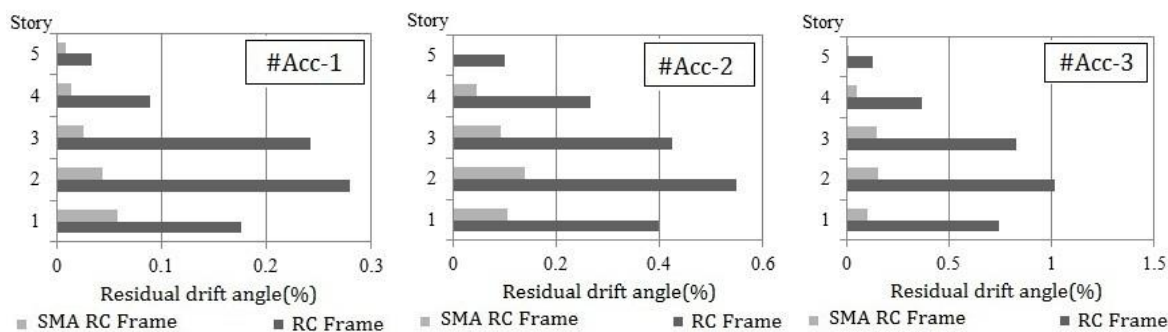


Fig. 8. Residual relative lateral displacement for 5-story RC & SMA RC frame

شکل ۹. تغییر مکان جانبی نسبی پسماند قاب هفت طبقه در دو حالت قاب بتنی با فولاد و قاب بتنی با آلیاژ حافظه دار

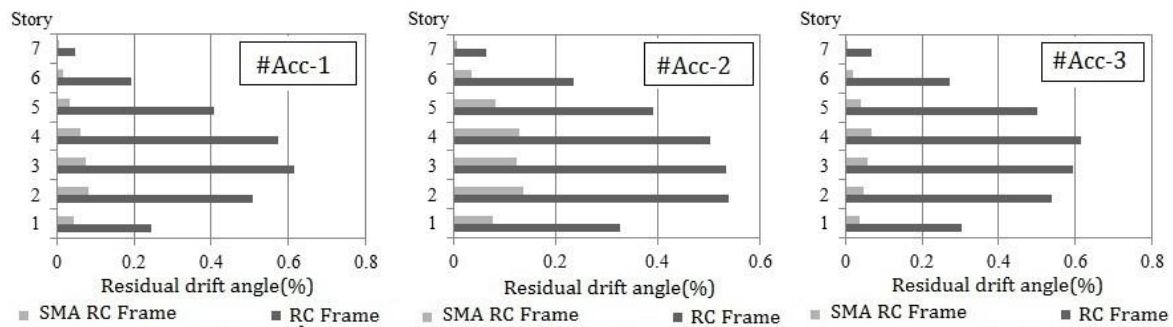


Fig. 9. Residual relative lateral displacement for 7-story RC & SMA RC frame

شکل ۱۰. تغییر مکان جانبی نسبی پسماند قاب نه طبقه در دو حالت قاب بتنی با فولاد و قاب بتنی با آلیاژ حافظه دار

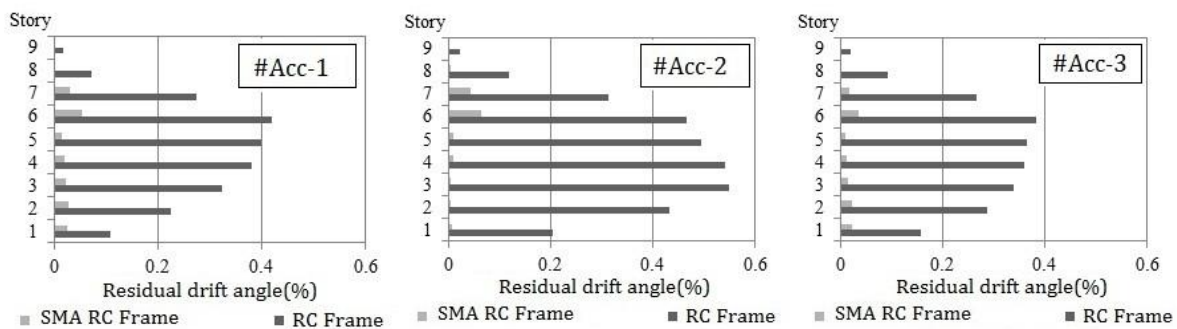


Fig. 10. Residual relative lateral displacement for 9-story RC & SMA RC frame

شکل ۱۱. برش پایه قاب سه طبقه با و بدون وجود آلیاژ حافظه دار شکلی

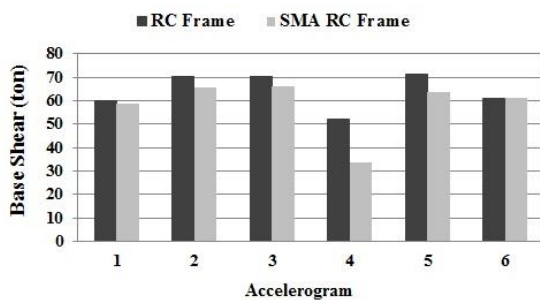


Fig. 11. Base shear comparison of 3-story RC & SMA RC frame

شکل ۱۲. برش پایه قاب پنج طبقه با و بدون وجود آلیاژ حافظه دار شکلی

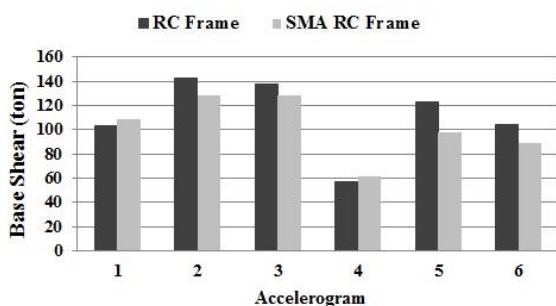


Fig. 12. Base shear comparison of 5-story RC & SMA RC frame

۳-۴- مقایسه برش پایه در قاب‌ها

در این بخش، بیشینه برش پایه ایجاد شده در قاب‌های بتنی با فولادگذاری مرسوم و قاب‌های بتنی مسلح شده با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی تحت هر ۶ شتاب‌نگاشت زلزله حوزه نزدیک بررسی می‌شود. در شکل‌ها (۱۱ تا ۱۴) نمودارهای میله‌ای قاب‌های سه، پنج، هفت و نه طبقه در دو حالت مذکور ارائه شده است. با توجه به نمودارها، فارغ از ارتفاع قاب‌ها، برش پایه در قاب‌های مسلح شده با آلیاژ SMA نسبت به قاب‌های عرف کاهش یافته است. به گونه‌ای که تحت شش شتاب‌نگاشت انتخابی به طور میانگین برای قاب سه، پنج، هفت و نه طبقه حدود ۰.۱۱، ۰.۶۷، ۰.۱۹ و ۰.۱۷ کاهش برش پایه را نشان می‌دهد. این امر به دلیل افزایش زمان تناوب و نرمی سازه‌ها با آلیاژ SMA نسبت به فولادگذاری عرف بوده که باعث کاهش نیروهای لرزه‌ای در المان‌های باربر جانبی می‌شود.

تغییرمکان جانبی پسماند در مقایسه با تغییرمکان جانبی پسماند باقی‌مانده قاب‌های بتنی با فولاد مرسوم بسیار ناچیز است که این امر نشان می‌دهد قاب‌های بتنی با آلیاژ حافظه‌دار پس از وقوع زلزله تغییرمکان ماندگار کمی دارند.

۴. تغییرمکان جانبی نسبی طبقات در هر دو حالت تسلیح با فولاد عرف و SMA در قاب‌های بتنی سه و پنج طبقه از میزان مجاز آیین‌نامه فراتر رفته است حال آنکه در قاب‌های بتنی هفت و نه طبقه در محدوده مجاز آیین‌نامه است. این امر بیانگر تاثیر زلزله‌های حوزه نزدیک بر سازه‌های کوتاهتر است.

۵. برش پایه ایجاد شده در قاب‌های بتنی با آلیاژ حافظه‌دار تحت شتاب نگاشت‌های زلزله‌های حوزه نزدیک فارغ از ارتفاع، نسبت به قاب‌های بتنی با فولادگذاری مرسوم کاهش پیدا کرده است.

۶- مراجع

- [1] Comartin, C., M. Greene, and S. Tubbesing. (1995). The Hyogo-Ken Nanbu earthquake preliminary reconnaissance report. *Earthquake Engineering Research Institute*, Oakland, CA
- [2] Alam, M.S., M. Moni, and S. Tesfamariam, Seismic overstrength and ductility of concrete buildings reinforced with superelastic shape memory alloy rebar. *Engineering Structures*, 2012. **34**: p. 8-20.
- [3] Abdulridha, A., et al., Behavior and modeling of superelastic shape memory alloy reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 2013. **49**, p. 893-904.
- [4] Shrestha, K.C., et al., Feasibility of Cu-Al-Mn superelastic alloy bars as reinforcement elements in concrete beams. *Smart Materials and Structures*, 2013. **22**(2): p. 025025.
- [5] Dolce, M. and D. Cardone. (2001). Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension. *International Journal of Mechanical Sciences*, **43**(11), 2657-2677.
- [6] Ocel, J., et al. (2004). Steel beam-column connections using shape memory alloys. *Journal of Structural Engineering*, **130**(5), 732-740.
- [7] Janke, L., et al. (2005). Applications of shape memory alloys in civil engineering structures overview, limits and new ideas. *Materials and Structures*, **38**(5), 578-592.
- [8] Hossain, A. (2013). Seismic performance of concrete buildings reinforced with superelastic shape memory alloy rebars.
- [9] Paulay, T. and M. Priestley. (1992). Seismic design of reinforced concrete and masonry structures. *J. Wiley & Sons, INC: USA*.
- [10] Youssef, M., M. Alam, and M. Nehdi. (2008). Experimental investigation on the seismic behavior of beam-column joints reinforced with superelastic shape memory

شکل ۱۳. برش پایه قاب هفت طبقه با و بدون وجود آلیاژ حافظه‌دار شکلی

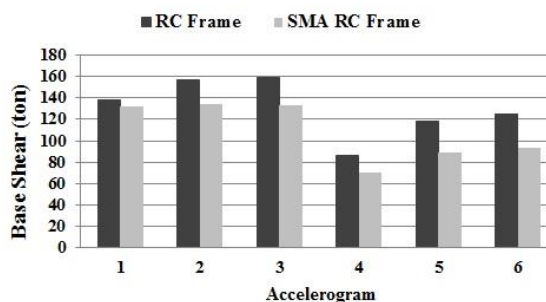


Fig. 13. Base shear comparison of 7-story RC & SMA RC frame

شکل ۱۴. برش پایه قاب نه طبقه با و بدون وجود آلیاژ حافظه‌دار شکلی

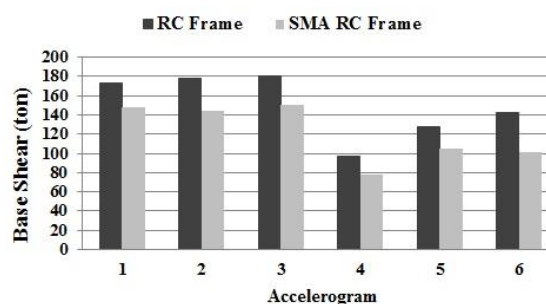


Fig. 14. Base shear comparison of 9-story RC & SMA RC frame

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ویژگی‌های آلیاژهای حافظه‌دار شکلی از جمله ابرکشسانی، قابلیت استهلاک انرژی و کاهش کرنش پسماند، به عنوان جایگزینی مناسب برای میلگردهای فولادی در ناحیه تشکیل مفاصل پلاستیک تیرها بررسی شد. سازه‌های بتنی با تعداد طبقات سه، پنج، هفت و نه طبقه تحت تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی تحت ۶ شتاب‌نگاشت حاصل از زلزله‌های حوزه نزدیک قرار گرفتند. عمده نتایج پژوهش به شرح زیر است:

۱. استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به طور کلی باعث افزایش پارامتر تغییرمکان جانبی نسبی طبقات قاب‌های بتنی هنگام زلزله‌های حوزه نزدیک نسبت به قاب‌های مسلح شده با فولاد می‌شود.
۲. یکی از عوامل اصلی افزایش تغییرمکان جانبی نسبی طبقات در قاب‌های مسلح شده با آلیاژ حافظه‌دار شکلی، مدول الاستیسیته پایین این آلیاژها نسبت به فولاد است (حدود ۱/۳)، که منجر به کاهش سختی مقطع بتن آرمه می‌شود.
۳. در تمامی قاب‌های بتنی با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی،

- [14] Martínez-Rueda, J. E. and A. Elnashai. (1997). Confined concrete model under cyclic load. *Materials and Structures*, **30**(3), 139-147.
- [15] Auricchio, F. and E. Sacco. (1997). A superelastic shape-memory-alloy beam model. *Journal of intelligent material systems and structures*, **8**(6), 489-501.
- [16] Somerville, P. G. and S. J. Venture. (1997). Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project: SAC Joint Venture.
- alloys. *Journal of Earthquake Engineering*, **12**(7), 1205-1222.
- [11] Saiidi, M. S. and H. Wang. (2006). Exploratory study of seismic response of concrete columns with shape memory alloys reinforcement. *ACI structural journal*, **103**(3).
- [12] Alam, M. S., M. A. Youssef, and M.L. Nehdi, Exploratory investigation on mechanical anchors for connecting SMA bars to steel or FRP bars. *Materials and Structures*, 2010. **43**(S1): p. 91-107.
- [13] Mander, J. B., M. J. Priestley, and R. Park. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, **114**(8), 1804-1826.

An overview on the Seismic behavior of SMA reinforced concrete frames in comparison with typical RC frames

M. R. Shiravand^{1*}, A. Khorrami Nejad² & M. H. Bayanifar³

1-Assistant Professor, Faculty of Water, environment and Civil Engineering, Shahid Beheshti University

2-Ph.D. student, Faculty of Water, environment and Civil Engineering, Shahid Beheshti University

3- M.Sc. of Structural Engineering, Qazvin Branch of Islamic Azad University

m_shiravand@sbu.ac.ir

Abstract: A significant number of concrete structures have been suffered extensive damages during past earthquakes. Since the Northridge (1994) and Kobe (1995) earthquakes, numerous analytical and experimental researches have been undertaken to employ new methods for design and retrofit the seismic resisting concrete structures. Stiffness, strength and ductility are the main parameters in seismic performance of any structure. In general, stiffness and strength are the factors that control structural and non-structural damages; and ductility is a structural characteristic that provides the structure to withstand the inelastic deformations and controls the structural members' failure. Ductility is the key parameter for earthquake energy dissipation rather than the other effective parameters. It depends on the formation of plastic hinges at the beam ends in concrete structures during an earthquake. Formation of plastic hinges at the beam ends arising from the large displacements causes an increase in the ductility and energy dissipation in moment resisting frames. Although, formation of plastic hinges leads to energy dissipation, but large inelastic deformation results in an increase in the residual displacement of structures. In common reinforced concrete structures, post-earthquake residual strains and displacements play an important role. Therefore, the serviceability of structures may be disrupted after an earthquake and in few cases they need to be rebuilt. Using Shape Memory Alloy (SMA) materials with the ability of super-elasticity in large strains at beam plastic hinges instead of reinforcing bars reduce residual displacements and deformations. High fatigue and corrosion resistance, ability to regain the original shape after a heat treatment, and high energy dissipation capacity are the advantages of using these material. Also there is no need to replace SMA members after an earthquake. Using shape memory alloy materials in the critical zones of structures such as plastic hinge zones decreases post-earthquake residual displacement, provides serviceability, and prevents the need for destruct or retrofit the structures. One of the most important features of the shape memory alloy materials is the ability to regain their original shape in strains less than 8%. In this paper five concrete moment resisting frames with 3, 5, 7 and 9 stories are modeled and subjected to near-field earthquakes. The amount of damages in the structures that are subjected to near-field ground motions due to the presence of the long-period pulse at the beginning of the record, is more extensive than far-field earthquakes. The non-linear time history analyses have been performed by "SeismoStruct" finite element software. Relative lateral displacement of stories (drift angle), residual relative lateral displacement of stories and base shears are investigated. Results showed that using shape memory alloy (SMA) materials instead of steel reinforcing bars at beam plastic hinges reduces the residual displacement of the structure and relative repair cost after earthquake. The relative lateral displacement of stories is increased in the SMA RC frames. Also base shear of SMA RC frames are decreased. In general, the SMA RC frames that are subjected to near-field earthquakes showed desirable performance. It can be deduced that using shape memory materials (SMA) instead of steel reinforcing bars at the beam plastic hinges reduce structural damages.

Keywords: Shape Memory alloy, Ductility, Nonlinear Time History Analysis, Residual Lateral Displacement, Near-field Earthquake