



# ارزیابی لرزه‌های قاب‌های فولادی با مهاربندهای ضد کمانش دارای هسته فولادی و هسته با مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی

فتاح تجلی<sup>۱</sup>، علی گل افشار<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی سمنان، سمنان

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

\* تهران، صندوق پستی ۱۹۴۱۶۱۶۳۴۳، a.golafshar@semnaniau.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۰۳)

## چکیده

در سال‌های اخیر برای افزایش قابلیت استهلاک انرژی در قاب‌های مهاربندی، مهاربندهای ضد کمانش (کمانش تاب) ارائه گردید که در آن مهاربند فشاری نیز به تسلیم می‌رسد. یکی از مسایلی موجود در خصوص مهاربندهای ضد کمانش متداول با هسته فولادی، وجود تغییر شکل‌های پسماند در انتهای لرزه به دلیل سختی کم هسته فولادی در ناحیه پس از تسلیم می‌باشد. وجود تغییر شکل‌های پسماند پس از لرزه نه تنها سرویس دهی سازه را به مخاطره می‌اندازد بلکه پتانسیل آسیب سازه به دلیل وقوع پس لرزه‌ها را نیز بالا می‌برد. برای حل این مساله در این مقاله از مهاربندهای ضد کمانش با هسته دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی استفاده شده است. بررسی منحنی رفتاری آلیاژهای حافظه‌دار شکلی نشان می‌دهد در این مصالح، تغییر شکل‌های پسماند تحت بار سیکلی در اثر ورود مصالح به ناحیه غیر خطی کم بوده و لذا می‌تواند به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب جهت کاهش تغییر شکل‌های پسماند در سازه مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله کاربرد مهاربندهای ضد کمانش با مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی در قاب‌های کوتاه و میان مرتبه با استفاده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیر خطی صورت گرفته و با نتایج قاب‌های دارای مهاربند ضد کمانش متداول با هسته فولادی مقایسه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد استفاده از مهاربندهای ضد کمانش با آلیاژ حافظه‌دار شکلی در کاهش تغییر شکل‌های پسماند در قاب‌ها بسیار موثر بوده ولی در بررسی سایر پارامترهای سازه‌ها، مهاربندهای ضد کمانش با هسته فولادی به لحاظ لرزه‌ای دارای پاسخ مناسب‌تر هستند.

## واژگان کلیدی

مهاربند ضد کمانش (کمانش تاب)، هسته فولادی، آلیاژ حافظه‌دار شکلی، تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی

## Evaluation of Steel Frames Equipped with Buckling Restrained Braces (BRB) with Steel Core and Shape Memory Alloy (SMA) core

F. Tajali, A. Golafshar

### Abstract

Buckling Restrained Braced Frame (BRBF) is one of the earthquake resisting systems. In this system braces yield in tension and compression without buckling. One of the drawbacks of conventional BRBF with steel core is residual displacement in frames that are equipped with BRB at the end of earthquakes. For solution of this problem, in this paper BRB is used in the frames with Shape Memory Alloy (SMA) core because of stress-strain diagram of SMA shows small residual strain during cyclic loading. For evaluation of BRB with SMA core, 4 and 8 story 2D frames are selected and equipped with BRB that has steel core and BRB that has SMA core. Frames have been analyzed under Nonlinear Time History with three Earthquake Records. Assessment of results reveal that residual drifts of BRB frames with SMA core are decrease respect to BRB frames with steel core. Evaluation of the rest parameters like maximum lateral story displacement, maximum story drift ratio and maximum story shear shows that BRB frames with steel core have better responses respect to BRB frames with SMA core in most cases.

### Keywords

BRB, Steel core, Shape memory alloy, Nonlinear time history analysis



سیستم مهاربندهای ضد کمانش (کمانش تاب) به عنوان یکی از سیستم‌های مقاوم لرزه ای می‌باشد که در اثر بارهای سیکنی رفتار متقارن و پایداری در کشش و فشار از خود نشان می‌دهد و به دلیل عدم کمانش مهاربند در فشار، قابلیت استهلاک انرژی در آن‌ها نسبت به سیستم مهاربندهای متداول افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، بررسی‌های انجام شده توسط Ariyaratana و Fahnestock [۱]، Kiggins و [۲] Uma، و همکارانش [۳] Mahdavi pour و همکارانش [۴] نشان می‌دهد نقص بزرگ این سیستم، وجود تغییر شکل‌های پسماند بزرگ در سازه در انتهای لرزه می‌باشد که علت آن سختی کم مهاربندها در ناحیه پس از تسلیم بوده و تغییر در مقدار سختی پس از تسلیم بر روی تغییر شکل‌های پسماند سیستم اثر گذار است. اهمیت تغییر شکل‌های پسماند نه تنها در سرویس دهی سازه پس از زلزله مهم است، بلکه مطالعات Garcia و Miranda [۵] و [۶] نشان می‌دهد مقدار تغییر شکل‌های پسماند در رفتار لرزه‌ای سازه تحت پس لرزه‌ها نیز بسیار مهم خواهد بود.

در مطالعات انجام شده توسط Fahnestock و Ariyaratana [۱] مقدار نسبت تغییر مکان پسماند طبقات در سیستم‌های دارای مهاربند ضد کمانش از طریق مطالعات عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مطالعات آنها حاکی از آن است که مقدار تغییر مکان پسماند طبقات برای زلزله‌های با احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال حدود ۰/۵٪ بوده و برای زلزله‌های با احتمال وقوع ۲٪ در ۵۰ سال حدود ۱٪ می‌باشد. بررسی Fahnestock و همکارانش [۷] از طریق مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از میز لرزه نشان می‌دهد در سیستم‌های ضد کمانش نسبت تغییر مکان‌های پسماند برای زلزله‌های با احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال حدود ۱/۳٪ بوده و برای زلزله‌های با احتمال وقوع ۲٪ در ۵۰ سال حدود ۲/۷٪ می‌باشد. یکی از راهکارهای پیشنهاد شده توسط محققین در این زمینه ترکیب سیستم مهاربند ضد کمانش به همراه سیستم مقاوم لرزه‌ای دیگر و عملکرد آن‌ها به صورت دوگانه می‌باشد. در همین زمینه مطالعات Kiggins و [۲] Uanگ برای قاب‌های ۳ و ۶ طبقه نشان می‌دهد استفاده از سیستم قاب خمشی ویژه به همراه سیستم مهاربندهای ضد کمانش موجب کاهش نسبت تغییر مکان پسماند طبقات تا ۵۰٪ می‌گردد. Marco و همکارانش [۸] در مطالعات خود از ترکیب سیستم قاب خمشی به همراه سیستم مهاربند ضد کمانش با سختی بزرگ پس از تسلیم با استفاده از جزئیات خاص در

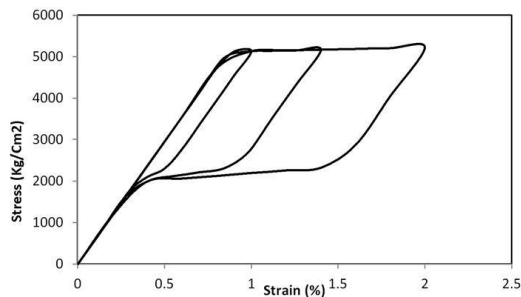
تیرها و اتصالات استفاده نمودند. بررسی‌های Marco و همکارانش [۸] نشان می‌دهد تحت زلزله‌های مختلف، میانگین نسبت تغییر مکان‌های پسماند برای زلزله‌های با احتمال وقوع ۱۰٪ در ۵۰ سال حدود ۰/۶٪ بوده و برای زلزله‌های با احتمال وقوع ۲٪ در ۵۰ سال حدود ۰/۱۲٪ می‌باشد. ایده دیگر برای کاهش تغییر شکل‌های پسماند که توسط Boston [۹] و Craft [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است، طراحی برخی از المان‌ها به صورتی است که در زلزله در ناحیه الاستیک باقی مانده و بدین ترتیب موجب کاهش تغییر شکل‌های پسماند در سیستم مهاربندهای ضد کمانش گردند. بطور نمونه یکی از راهکارهای پیشنهاد شده توسط Craft [۱۰] در نظر گیری برخی طبقات به صورت الاستیک در سیستم دارای مهاربندهای ضد کمانش می‌باشد که در همین زمینه پیشنهاد شده است برای ساختمان‌های بیش از ۶ طبقه بهتر است بین هر سه طبقه یک طبقه طوری طراحی گردد که تحت زلزله در ناحیه الاستیک باقی بماند. بررسی روش پیشنهادی Craft برای قاب‌های ۴ الی ۱۶ طبقه نشان می‌دهد میزان نسبت تغییر مکان‌های پسماند طبقات بین ۳۴٪ الی ۶۵٪ کاهش می‌یابد. با توجه به مطالب عنوان شده، هدف این پژوهش کاهش تغییر شکل‌های پسماند در سیستم مهاربندهای ضد کمانش با استفاده از مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی می‌باشد.

## ۲- صحت سنجی

در این پژوهش برای انجام مدل‌سازی قاب‌ها و صحت سنجی از نرم افزار OPENSEES [۱۱] استفاده شده است. در این نرم افزار برای مدل‌سازی رفتار مصالح دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی از گزینه UniaxialMaterial SelfCentering استفاده می‌گردد. منحنی رفتاری مصالح آلیاژ حافظه‌دار در شکل (۱) نشان داده شده است. برای در نظر گیری رفتار غیر خطی از قابلیت پلاستیسیته گسترده استفاده شده است.

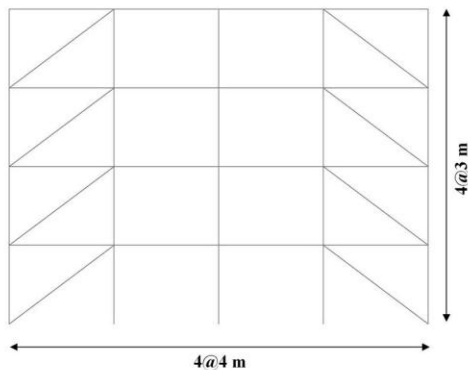
برای اطمینان از مدل‌سازی و صحت سنجی از مطالعات Fugazza [۱۲] استفاده گردیده است. در این مطالعه یک المان مهاربند دو سر مفصل با مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی تحت نیروهای محوری مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخصات رفتاری مصالح مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. برای اطلاعات بیشتر این زمینه می‌توان به مرجع شماره ۱۲ مراجعه نمود.





شکل ۳- منحنی بدست آمده در این پژوهش با استفاده از نرم افزار OPENSEES

فولادی برای کنترل تغییر مکان‌های جانبی طبقات به آن‌ها اضافه شده اند. پس از تعیین سطح مقطع مهاربندهای ضد کماتش با هسته فولادی، جهت بررسی اثر مهاربندهای ضد کماتش با مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی، مهاربندهای ضد کماتش دارای هسته فولادی با مهاربندهای دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی با سطح مقطع یکسان جایگذاری شده اند. نمای قاب‌های مورد مطالعه در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. مقطع تیرها و ستون‌ها و سطح مقطع مهاربندها در طبقات مختلف برای قاب ۴ و ۸ طبقه در جدول‌های (۲) تا (۵) آورده شده است.



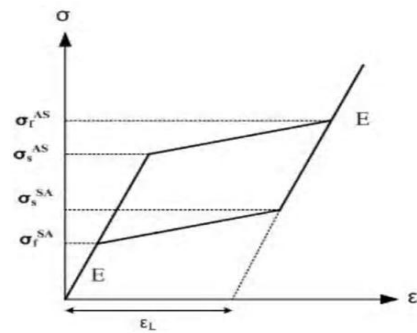
شکل ۴- نمای قاب ۴ طبقه مجهز به مهاربند ضد کماتش

جدول ۲- مقاطع تیرها و ستون‌ها در قاب ۴ طبقه

مقدار	اعضا
IPE180	تیرها
BOX220X220X10	ستون‌های طبقه اول و دوم
BOX200X200X10	ستون‌های طبقه سوم و چهارم

جدول ۳- سطح مقطع مهاربندها در قاب ۴ طبقه

شماره طبقه	سطح مقطع مهاربند (سانتیمتر مربع)
۲ و ۱	۳۰
۳ و ۴	۲۵



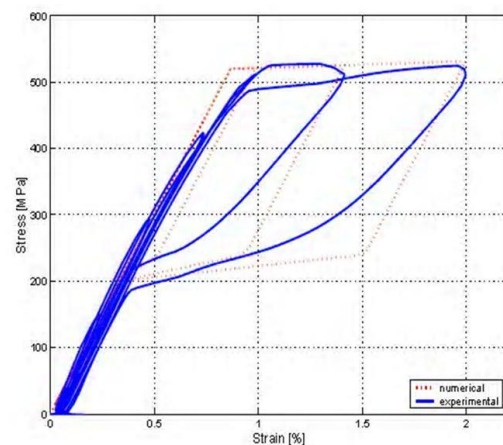
شکل ۱- منحنی رفتاری تنش-کرنش در مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی

جدول ۱- مشخصات رفتاری مصالح آلیاژ حافظه‌دار در مدل

صحت سنجی

مقدار	واحد	خواص
۶۰۰۰۰	MPa	$E$
۵۲۰	MPa	$\sigma_s^{AS}$
۶۰۰	MPa	$\sigma_f^{AS}$
۲۴۰	MPa	$\sigma_s^{SA}$
۲۰۰	MPa	$\sigma_f^{SA}$
۸	(%)	$\epsilon_L$

منحنی رفتاری حاصل از مطالعات Fugazza در شکل (۲) و منحنی بدست آمده در این پژوهش با استفاده از نرم افزار OPENSEES در شکل (۳) نشان داده شده است. مقایسه منحنی‌ها تطابق مناسبی را بین نتایج مدل‌سازی عددی و نتایج مطالعه آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

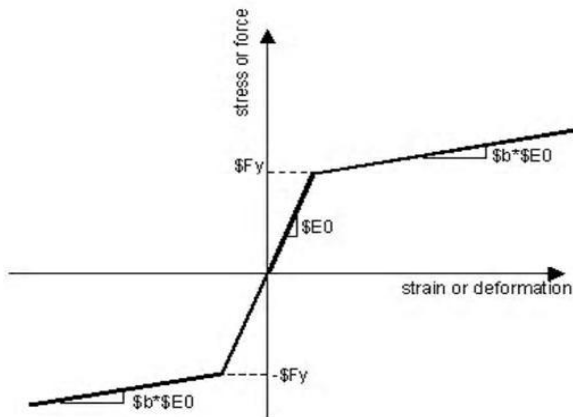


شکل ۲- منحنی بدست آمده از مطالعات Fugazza [۱۲]

### ۳- معرفی قاب‌های مورد مطالعه

قاب‌های مورد مطالعه در این تحقیق شامل قاب‌های دو بعدی ۴ و ۸ طبقه می‌باشند که مهاربندهای ضد کماتش دارای هسته

گیری رفتار غیر خطی از پلاستیسیته گسترده در المان‌ها استفاده گردیده است.



شکل ۶- مدل رفتاری مصالح فولاد معمولی [۱۱]

جدول ۶- مشخصات مصالح فولاد معمولی

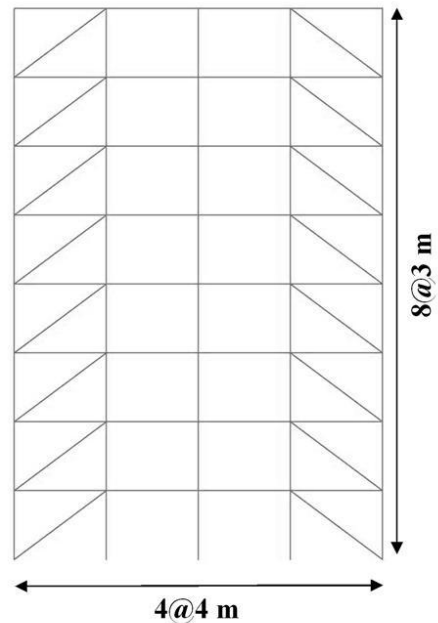
مقدار	واحد	خواص
۲۰۰۰۰۰	MPa	$E_0$
۲۴۰	MPa	$F_y$
۰	---	$b$

جدول ۷- مشخصات رفتاری مصالح آلیاژ حافظه‌دار در قاب‌های ۴ و ۸ طبقه

مقدار	واحد	خواص
۲۷۵۷۹	MPa	$E$
۴۱۴	MPa	$\sigma_s^{AS}$
۵۵۰	MPa	$\sigma_f^{AS}$
۳۹۰	MPa	$\sigma_s^{SA}$
۲۰۰	MPa	$\sigma_f^{SA}$
۳/۵	(%)	$\epsilon_L$

#### ۴- تحلیل تاریخیچه زمانی غیر خطی

در این پژوهش از سه رکورد نزدیک به گسل منتخب از مطالعات Baker [۱۳] استفاده شده که این رکوردها بر روی خاک تیپ ۲ با سرعت موج برشی بین ۳۷۵ و ۷۵۰ متر بر ثانیه ثبت شده‌اند. مشخصات زلزله‌های مورد استفاده در جدول (۸) نشان داده شده است. رکوردهای مذکور بر اساس شتاب حداکثر برابر با  $0.3g$  نرمال شده و به سازه‌ها اعمال شده‌اند.



شکل ۵- نمای قاب ۸ طبقه مجهز به مهاربند ضد کمانش

جدول ۴- مقاطع تیرها و ستون‌ها در قاب ۸ طبقه

مقدار	اعضا
IPE220	تیرهای طبقه اول الی چهارم
IPE200	تیرهای طبقات چهارم الی هشتم
BOX300X300X10	ستون‌های طبقه اول الی سوم
BOX250X250X10	ستون‌های طبقه چهارم الی ششم
BOX200X200X10	ستون‌های طبقه هفتم و هشتم

جدول ۵- سطح مقطع مهاربندها در قاب ۸ طبقه

شماره طبقه	سطح مقطع مهاربند (سانتی‌متر مربع)
۱ الی ۳	۳۴
۴ الی ۶	۳۰
۷ و ۸	۲۵

برای تحلیل غیر خطی قاب‌ها، مدل قاب‌ها در نرم افزار OPENSEES ساخته شده است. جهت مدل‌سازی رفتار مصالح تیرها و ستون‌ها از گزینه UniAxialMaterial Steel01 استفاده شده است. مدل رفتاری مربوط به گزینه Steel01 در شکل (۶) نشان داده شده است. مشخصات مصالح فولاد تیرها و ستون‌ها در جدول (۶) آمده است. در قاب‌هایی که جنس هسته مهاربند از فولاد می‌باشد، مشخصات مصالح مهاربندها نیز همانند تیرها و ستون‌ها می‌باشد و در قاب‌هایی که جنس هسته مهاربند از مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی می‌باشد، مشخصات مورد استفاده برای مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی مطابق جدول (۷) می‌باشد. همانطور که در بخش صحت سنجی نیز ذکر شد برای در نظر



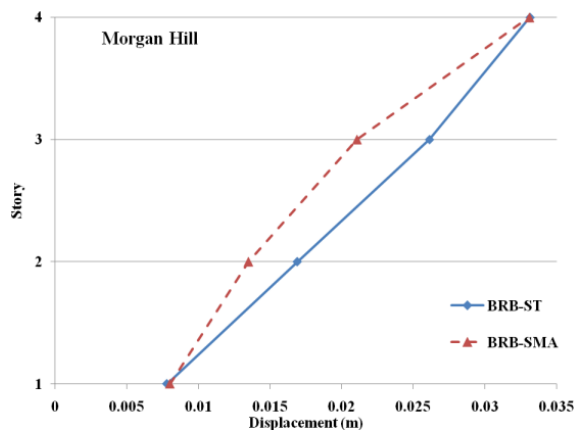
جدول ۸- مشخصات رکوردهای اعمالی در تحلیل تاریخچه زمانی

غیر خطی

PGD (cm)	PGV (cm/s)	PGA (g)	ایستگاه	زلزله
۳۹	۱۱۴/۵	۱/۲	پاکویما دم	سانفرناندو
۱/۱۳	۶/۸۴	۰/۱۸	گیلوری آلی	کویوت لیک
۱۲/۷	۵۲/۹	۰/۷۱	کوله غربی دم	مرگان هیل

### ۵- ارزیابی نتایج قاب‌های ۴ طبقه

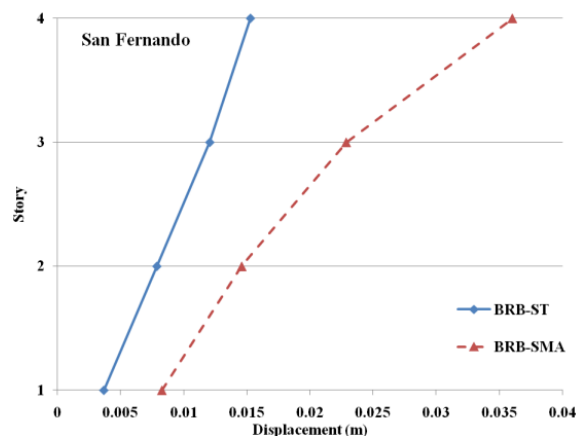
جهت ارزیابی پاسخ قاب‌ها، پارامترهای مختلفی در قاب‌ها تحت اثر زلزله‌های اعمالی مورد بررسی واقع شده‌اند. تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات در قاب ۴ طبقه در شکل‌های (۷) تا (۹) نشان داده شده است.



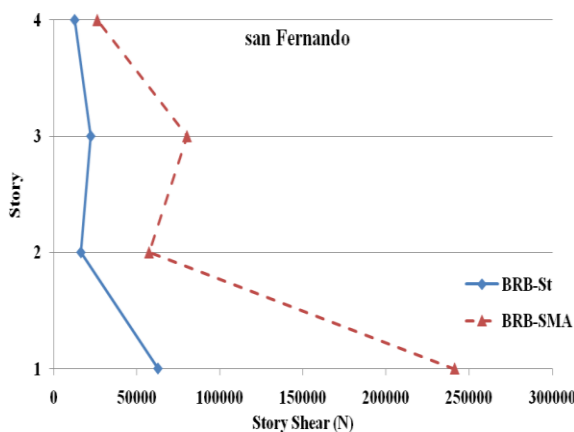
شکل ۹- تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله مرگان هیل

برش حداکثر طبقات در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲)، نسبت تغییر مکان حداکثر طبقات در شکل‌های (۱۳) تا (۱۵) و نسبت تغییر مکان پسماند طبقات در شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) نشان داده شده است.

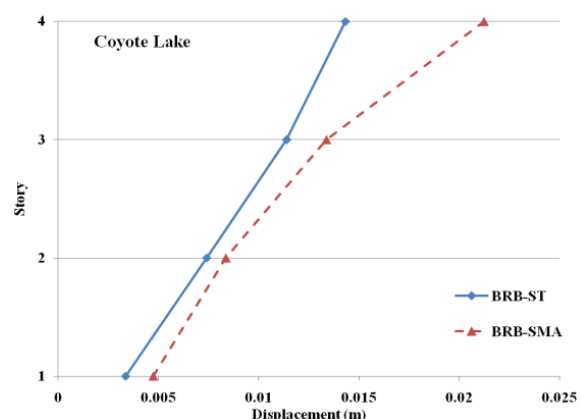
ارزیابی تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات برای قاب ۴ طبقه نشان‌دهنده روند یکسانی در تمامی زلزله‌ها نبوده ولی در اکثر موارد، تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات در قاب دارای مهاربند ضد کمانش با هسته مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به قاب دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی بیشتر می‌باشد که از علل آن می‌تواند مرتبط با تفاوت سختی در دو قاب مهاربندی به علت تفاوت در خواص مصالح فولاد و آلیاژ حافظه‌دار شکلی در ناحیه خطی و غیر خطی باشد.



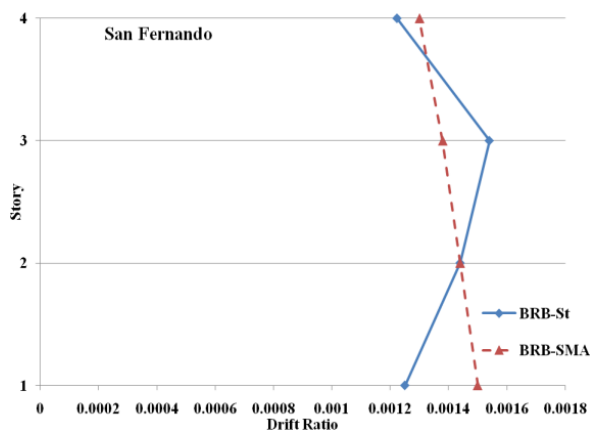
شکل ۷- تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله سانفرناندو



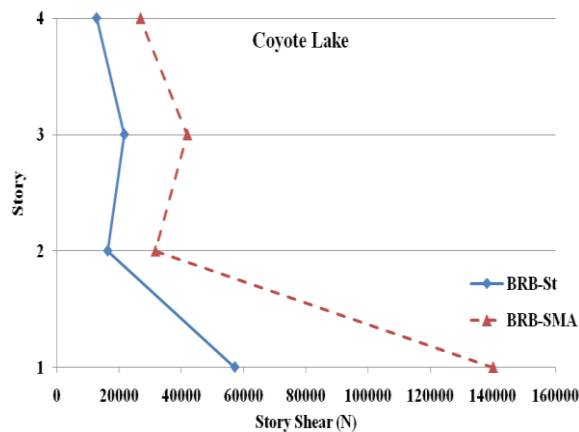
شکل ۱۰- برش حداکثر طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله سانفرناندو



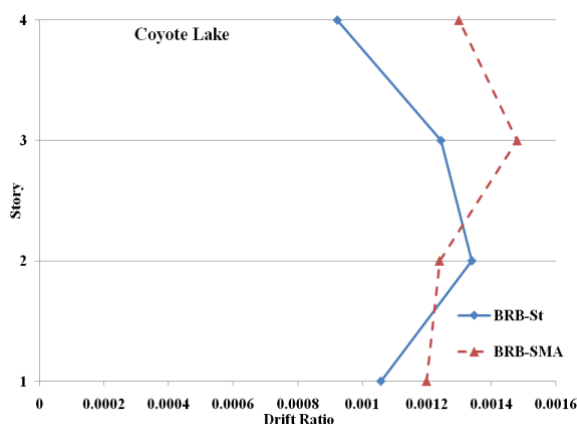
شکل ۸- تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله کویوت لیک



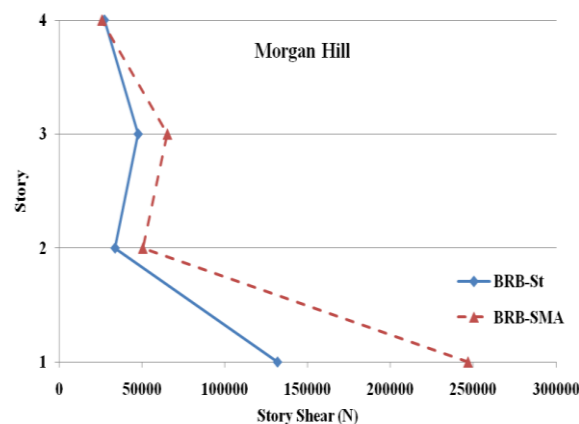
شکل ۱۳- نسبت تغییر مکان حداکثر طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله سانفرناندو



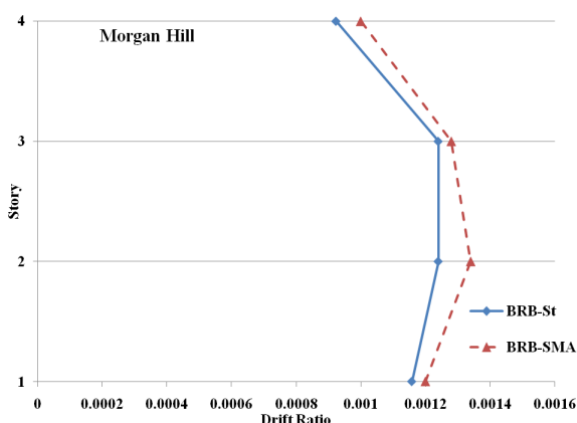
شکل ۱۱- برش حداکثر طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله کوپوت لیک



شکل ۱۴- نسبت تغییر مکان حداکثر طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله کوپوت لیک



شکل ۱۲- برش حداکثر طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله مرگان هیل



شکل ۱۵- نسبت تغییر مکان حداکثر طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله مرگان هیل

ارزیابی برش حداکثر طبقات برای قاب ۴ طبقه نشان‌دهنده روند یکسانی در تمامی زلزله‌ها بوده و همواره برش حداکثر طبقات در قاب دارای مهاربند ضدکمانش با هسته مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به قاب دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی بیشتر می‌باشد و اختلاف برش پایه در طبقه اول نسبت به بقیه طبقات بیشتر می‌باشد که از علل آن می‌تواند اثر سختی مرتبط با رفتار مصالح در دو قاب مهاربندی باشد که در نهایت منجر به ایجاد برش طبقات بزرگتر در قاب مهاربندی با هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی می‌گردد.

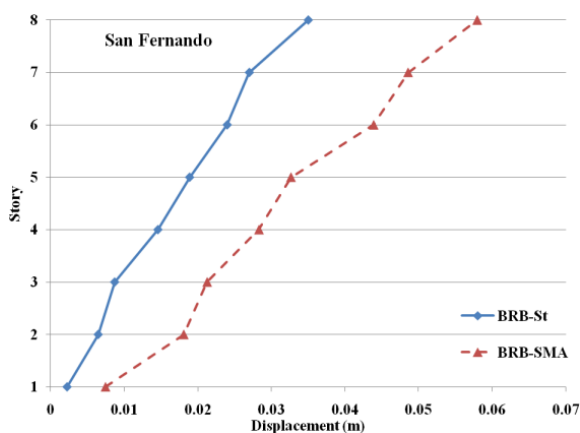
ارزیابی نسبت تغییر مکان حداکثر طبقات برای قاب ۴ طبقه نشان‌دهنده روند یکسانی در تمامی زلزله‌ها نبوده و بسته به رکورد زلزله اعمالی متفاوت می‌باشد.



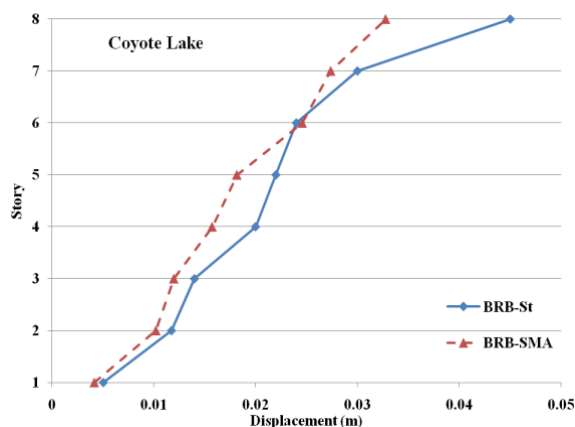
ارزیابی نسبت تغییر مکان پسماند طبقات برای قاب ۴ طبقه نشان می‌دهد همواره قاب دارای مهاربند ضدکمانش با هسته دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی دارای نسبت تغییر مکان پسماند کمتری نسبت به قاب دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی می‌باشد که علت آن ویژگی رفتاری مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی در وضعیت باربرداری می‌باشد که دارای تغییر شکل‌های پسماند نزدیک به صفر در این حالت می‌باشد.

#### ۶- ارزیابی نتایج قاب‌های ۸ طبقه

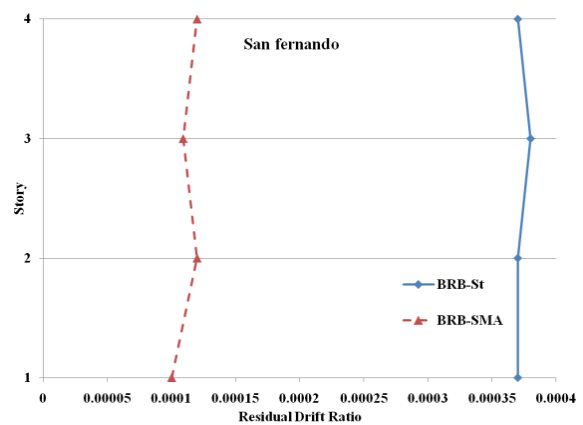
مشابه قاب‌های ۴ طبقه، برای قاب‌های ۸ طبقه نیز، تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱)، برش حداکثر طبقات در شکل‌های (۲۲) تا (۲۴)، نسبت تغییر مکان حداکثر



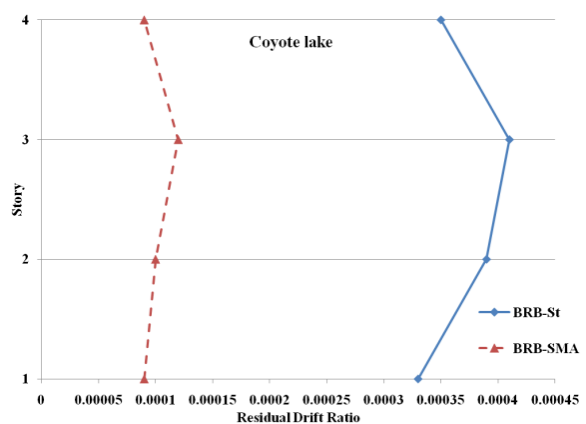
شکل ۱۹- تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله سانفرناندو



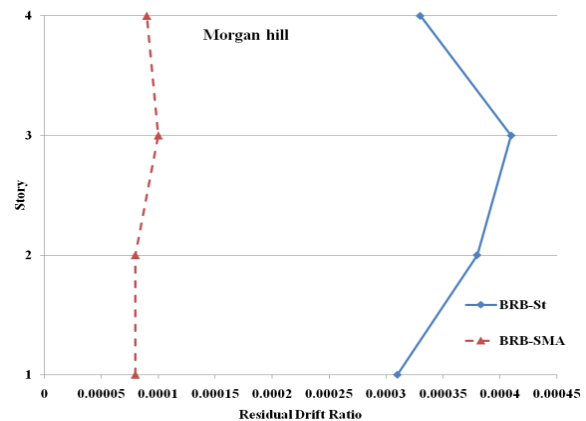
شکل ۲۰- تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله کوپوت لیک



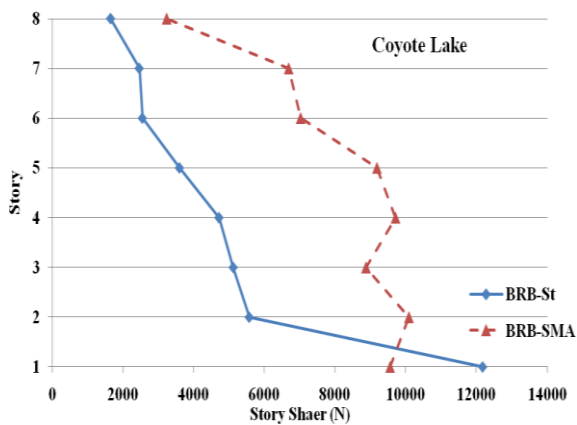
شکل ۱۶- نسبت تغییر مکان پسماند طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله سانفرناندو



شکل ۱۷- نسبت تغییر مکان پسماند طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله کوپوت لیک

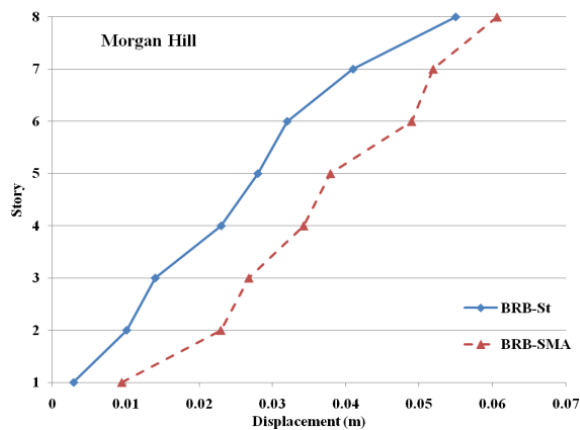


شکل ۱۸- نسبت تغییر مکان پسماند طبقات در قاب ۴ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله مرگان هیل

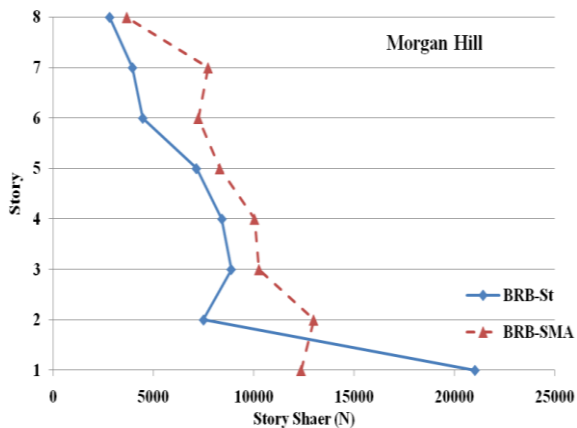


شکل ۲۳- برش حداکثر طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله کوپوت لیک

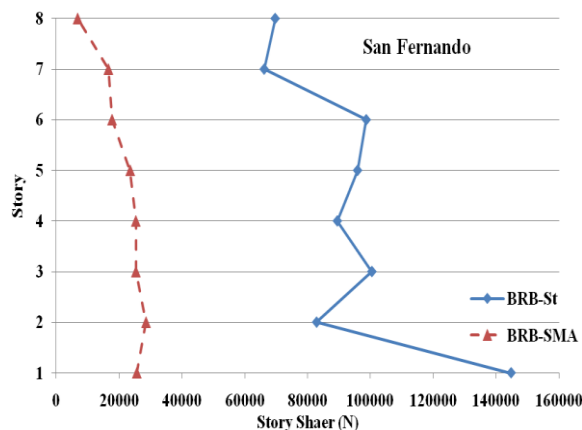
طبقات در شکل‌های (۲۵) تا (۲۷) و نسبت تغییر مکان پسماند طبقات در شکل‌های (۲۸) تا (۳۰) نشان داده شده است.



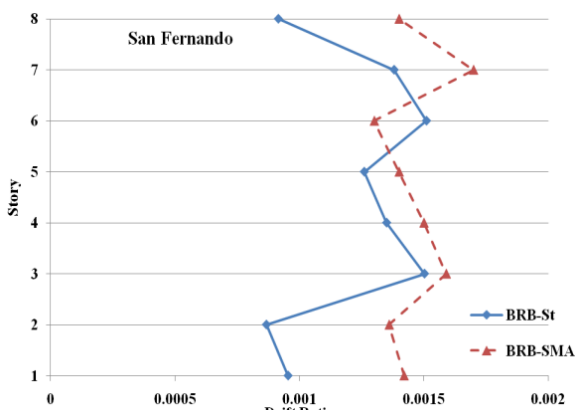
شکل ۲۱- تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله مورگان هیل



شکل ۲۴- برش حداکثر طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله مورگان هیل



شکل ۲۲- برش حداکثر طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله سانفرناندو

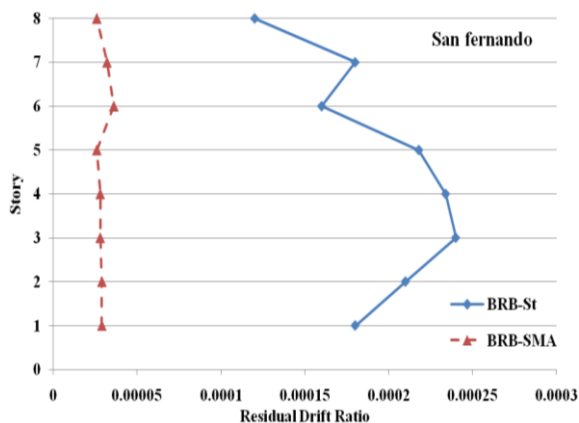


شکل ۲۵- نسبت تغییر مکان حداکثر طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله سانفرناندو

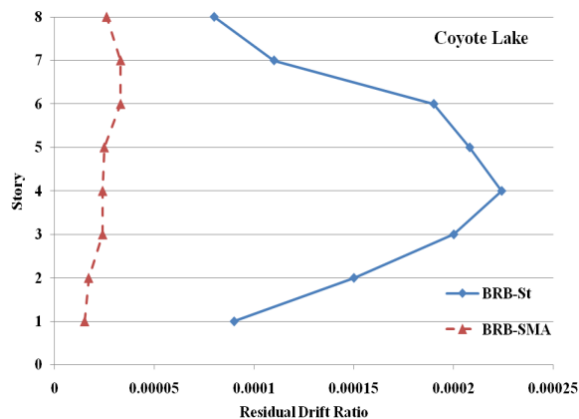
ارزیابی تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات برای قاب ۸ طبقه نشان‌دهنده روند یکسانی در تمامی زلزله‌ها نبوده ولی مشابه قاب ۴ طبقه در اکثر موارد، تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات در قاب دارای مهاربند ضدکمانش با هسته مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به قاب دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی بیشتر می‌باشد که از علل آن می‌تواند مرتبط با تفاوت سختی در دو قاب مهاربندی به علت تفاوت در خواص مصالح فولاد و آلیاژ حافظه‌دار شکلی در ناحیه خطی و غیر خطی باشد.



شکلی موجب نزدیک تر شدن نسبت تغییر مکان حداکثر در طبقات مختلف شده است.



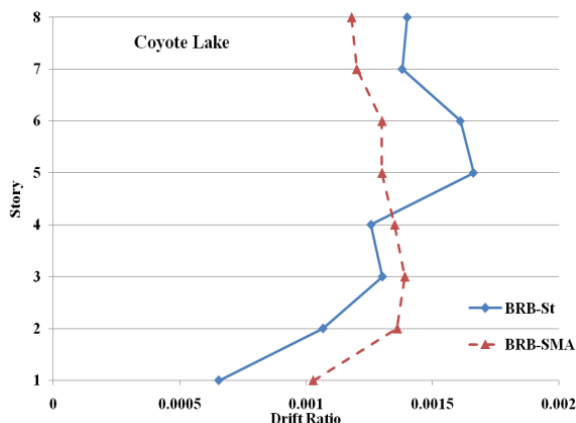
شکل ۲۸- نسبت تغییر مکان پسماند طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله سانفرناندو



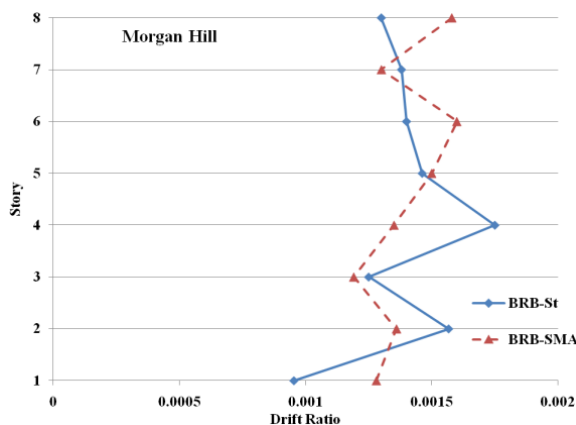
شکل ۲۹- نسبت تغییر مکان پسماند طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله کوپوت لیک

ارزیابی نسبت تغییر مکان پسماند طبقات برای قاب ۸ طبقه نشان می‌دهد همواره قاب دارای مهاربند ضدکمانش با هسته دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی دارای نسبت تغییر مکان پسماند کمتری نسبت به قاب دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی میباشد که علت آن ویژگی رفتاری مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی در وضعیت بار سیکلی میباشد که دارای تغییر شکل‌های پسماند نزدیک به صفر در وضعیت باربرداری می‌باشد. همچنین میزان نسبت تغییر مکان پسماند طبقات در هنگام استفاده از مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی بسیار کوچک بوده و به یکدیگر نزدیک می‌باشد.

ارزیابی برش پایه حداکثر طبقات برای قاب ۸ طبقه نشاندهنده روند یکسانی در تمامی زلزله‌ها نبوده و با روند قاب ۴ طبقه نیز متفاوت می‌باشد بطوریکه در اکثر موارد برش حداکثر طبقات در قاب دارای مهاربند ضد کمانش با هسته مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی نسبت به قاب دارای مهاربند ضد کمانش با هسته فولادی بیشتر می‌باشد ولی برای طبقه اول، برش حداکثر طبقه در قاب با مهاربندی ضد کمانش با هسته مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی کمتر از قاب دارای مهاربند ضد کمانش با هسته فولادی می‌باشد.



شکل ۲۶- نسبت تغییر مکان حداکثر طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله کوپوت لیک



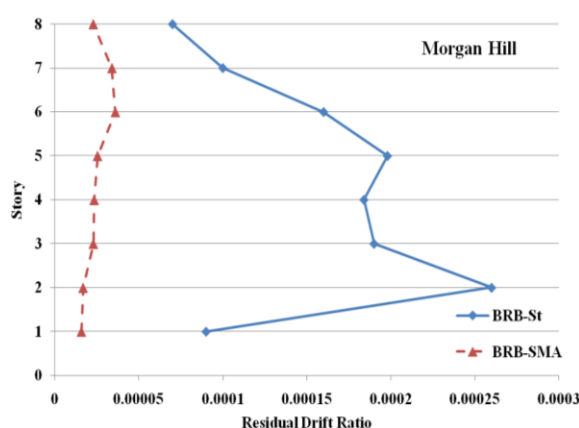
شکل ۲۷- نسبت تغییر مکان حداکثر طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضدکمانش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله مرگان هیل

ارزیابی نسبت تغییر مکان حداکثر طبقات برای قاب ۸ طبقه نشاندهنده روند یکسانی در تمامی زلزله‌ها نبوده و برای زلزله‌های مختلف تفاوت‌ها بین دو قاب دارای مهاربندی مشهود است ولیکن استفاده از مصالح دارای آلیاژ حافظه‌دار

حافظه‌دار شکلی نسبت به هسته فولادی برای زلزله های سانفرناندو، کویوت لیک و مرگان هیل به ترتیب ۶۸، ۷۰ و ۷۵ درصد کاهش نشان می‌دهد.

در قاب‌های ۸ طبقه دارای مهاربند ضد کماتش با هسته فولادی، میزان تغییر مکان حداکثر بام در زلزله سانفرناندو، کویوت لیک و مرگان هیل نسبت به مهاربند ضد کماتش با هسته دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی به ترتیب ۳۹ درصد کاهش، ۳۷ درصد افزایش و ۹ درصد کاهش نشان داده است. همچنین میزان حداکثر برش پایه در قاب‌های ۸ طبقه دارای مهاربند ضد کماتش با هسته فولادی نسبت به هسته دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در زلزله‌های سانفرناندو، کویوت لیک و مرگان هیل به ترتیب ۴۶۰ درصد، ۲۷ درصد و ۷۰ درصد افزایش نشان داده است. همچنین حداکثر نسبت تغییر مکان طبقات در قاب ۸ طبقه مجهز به مهاربند ضد کماتش با هسته فولادی نسبت به هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی برای زلزله‌های سانفرناندو، کویوت لیک و مرگان هیل به ترتیب ۸۶، ۸۶ و ۸۵ درصد کاهش نشان می‌دهد.

بطور کلی استفاده از مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی در هسته مهاربندهای ضد کماتش در زلزله‌های مختلف و برای قاب‌های مورد مطالعه موجب کاهش نسبت تغییر مکان‌های پسماند و یکنواخت شدن آن در انتهای زلزله نسبت به مهاربند با هسته فولادی شده است. بررسی برش پایه حداکثر طبقات نشان می‌دهد در قاب ۴ طبقه مقدار برش حداکثر طبقات در قاب دارای مهاربند ضد کماتش با هسته مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی بیش از قاب دارای مهاربند ضد کماتش با هسته فولادی بوده ولی در قاب ۸ طبقه عکس این روند مشاهده می‌گردد. بررسی نسبت تغییر مکان حداکثر طبقات نیز در قاب‌های مختلف نشان‌دهنده روند یکسانی نبوده اما میتوان بیان نمود که استفاده از مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی به یکنواخت تر شدن نسبت تغییر مکان حداکثر طبقات کمک می‌نماید. بررسی تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات برای قاب‌های مورد مطالعه تحت رکورد زلزله‌های اعمالی نیز نشان می‌دهد در اکثر موارد قاب‌های دارای مهاربند ضد کماتش با هسته از جنس مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی دارای تغییر مکان‌های حداکثر بیشتری نسبت به قاب متناظر با مهاربند ضد کماتش با هسته فولادی می‌باشد.



شکل ۳۰- نسبت تغییر مکان پسماند طبقات در قاب ۸ طبقه دارای مهاربند ضد کماتش با هسته فولادی و هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار تحت زلزله مرگان هیل

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله کاربرد استفاده از مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی به عنوان هسته در مهاربندهای ضد کماتش برای کاهش تغییر شکل‌های پسماند در قاب‌های فولادی کوتاه و میان مرتبه ۴ و ۸ طبقه مورد ارزیابی قرار گرفته و با قاب‌های دارای مهاربند ضد کماتش با هسته فولادی مقایسه شده است. ارزیابی قاب‌ها از طریق انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیر خطی صورت گرفته و پارامترهای متفاوتی در مورد قاب‌ها مقایسه و بررسی شده است. ارزیابی نتایج نشان‌دهنده وابستگی نتایج به زلزله‌های اعمالی و خواص هندسی قاب‌ها و رفتار مصالح مهاربندها در قاب‌ها می‌باشد. در قاب‌های ۴ طبقه دارای مهاربند ضد کماتش با هسته فولادی، میزان تغییر مکان حداکثر بام در زلزله سانفرناندو و کویوت لیک نسبت به مهاربند ضد کماتش با هسته دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی به ترتیب ۵۷ و ۳۲ درصد کاهش نشان داده و برای زلزله مرگان هیل تقریباً با یکدیگر برابر هستند. همچنین میزان حداکثر برش پایه در قاب‌های ۴ طبقه دارای مهاربند ضد کماتش با هسته فولادی نسبت به هسته دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی در زلزله‌های سانفرناندو، کویوت لیک و مرگان هیل به ترتیب ۷۴ درصد، ۵۹ درصد و ۴۶ درصد کاهش نشان داده است. همچنین حداکثر نسبت تغییر مکان طبقات در قاب ۴ طبقه مجهز به مهاربند ضد کماتش با هسته فولادی نسبت به هسته دارای مصالح آلیاژ حافظه‌دار شکلی برای زلزله‌های سانفرناندو، کویوت لیک و مرگان هیل به ترتیب ۲/۶، ۹/۴ و ۷/۴ درصد کاهش نشان می‌دهد. نسبت تغییر مکان پسماند حداکثر طبقات در قاب ۴ طبقه مجهز به مهاربند ضد کماتش با هسته دارای آلیاژ



- [1] Ariyaratana, C. and Fahnestock, L.A. (2011), "Evaluation of Buckling-Restrained Braced Frame Seismic Performance Considering Reserve Strength", *Engineering Structures*, Vol. 33, No. 1, pp. 77-89.
- [2] Kiggins, S. and Uang, C.M. (2006), "Reducing Residual Drift of Bckling-Restrained Braced Frames as a Dual System", *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 11, pp. 1525-1532.
- [3] Uma, S.R., Pampanin, S. and Christopoulos, C. (2006), "A Probabilistic Framework for Performance-Based Seismic Assessment of Structures Considering Residual Deformations", *First European conference on earthquake engineering and seismology*, Geneva, Switzerland.
- [4] Mahdavi pour, M.A. and Deylami, A. (2014), "Probabilistic Assessment of Strain Hardening Ratio Effect on Residual Deformation Demands of Buckling-Restrained Braced Frames", *Engineering Structures*, Vol. 81, pp. 302-308.
- [5] Ruiz-Garcia, J. and Miranda, E. (2005), "Performance-Based Assessment of Existing Structures Accounting for Residual Displacements", *Department of Civil and Environmental Engineering Stanford University*, Report No. 153.
- [6] Ruiz-Garcia, J. and Miranda, E. (2010), "Probabilistic Estimation of Residual Drift Demands for Seismic Assessment of Multi-Story Framed Buildings", *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 1, pp. 11-20.
- [7] Fahnestock, L.A., Sause, R. and Ricles, J.M. (2007), "Experimental Evaluation of a Large-Scale Buckling-Restrained Braced Frame", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, No. 9, pp. 1205-1214.
- [8] Baiguera, M., Vasdravellis, G. and Karavasilis, T.L. (2016), "Dual Seismic-Resistant Steel Frame with High Post-Yield Stiffness Energy-Dissipative Braces for Residual Drift Reduction", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 122, pp. 198-212.
- [9] Boston, M. (2012), "Reducing Residual Drift in Buckling-Restrained Braced Frames by Using Gravity Columns as Part of a Dual System," *MSc Thesis*, Department of Civil and Environmental Engineering Brigham Young University.
- [10] Craft, J. (2012), "Reducing Drifts in Buckling Restrained Braced Frames Through Elastic Stories," *MSc Thesis*, Department of Civil and Environmental Engineering Brigham Young University.
- [11] Mazzoni, S., McKenna, F. (2012), *OpenSees Command Language Manual*.
- [12] Fugazza, D. (2003), "Shape Memory Alloy Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Constitutive Modeling and Numerical simulation," *MSc Thesis*, European School of Advanced Structures in Reduction of Seismic Risk.
- [13] Baker, J. (2007), "Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 5, pp. 1468-1501.