

## مطالعه ضریب رفتار و تغییر مکان های نسبی ماندگار قاب های بتنی مسلح شده با آلیاژ حافظه دار سوپر الاستیک

مسعود میرطاهری<sup>۱\*</sup>، محمدرضا رجبی<sup>۲</sup>، حمید میرزایی فرد<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
۲- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
۳- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

استفاده از آلیاژهای حافظه دار سوپرالاستیک (SMAs) به عنوان میلگرد در سازه های بتنی در میان پژوهشگران به تدریج در حال افزایش است. به دلیل تفاوت خواص مکانیکی SMA در مقایسه با فولاد معمولی، استفاده از میلگرد SMA در بتن ممکن است تغییراتی در پاسخ سازه، تحت بارهای لرزه ای به وجود آورد. در این مطالعه، تأثیر استفاده از میلگرد های SMA در سازه های بتنی بر روی ساختمان های بتن مسلح با طبقات ۳، ۶ و ۸ به روش تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر ساختمان سه نحوه متفاوت میلگرد گذاری در نظر گرفته شده است: ۱- تمام میلگرد ها از جنس فولاد معمولی، ۲- در ناحیه مفاصل پلاستیک تیر، میلگرد ها از جنس SMA و در سایر قسمت ها از جنس فولاد معمولی و ۳- میلگرد SMA در تمام طول تیر و میلگرد فولادی در دیگر قسمت ها. به منظور بدست آوردن پاسخ لرزه ای سازه های مجهز به میلگرد SMA تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) با استفاده از ده رکورد معروف زمین لرزه، برای هر سه نحوه آرماتور گذاری توسط برنامه OpenSees انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد، در قاب های سه طبقه ظرفیت فروریزش قاب ها تقریباً یکسان است، اما در مورد قاب های ۶ و ۸ طبقه ظرفیت فروریزش قاب های Steel بیشتر می باشد، ضریب رفتار ۳ و ۶ طبقه در حالات متفاوت آرماتور گذاری تغییر زیادی ندارد ولی در قاب ۸ طبقه این تغییر محسوس است. در مورد تغییر مکان های نسبی ماندگار هم در همه قاب ها استفاده از آلیاژهای حافظه دار، این تغییر مکان ها را کاهش داده است.

کلمات کلیدی: ساختمان بتنی مسلح، آلیاژ حافظه دار، تحلیل دینامیکی افزایشی، ضریب رفتار، تغییر مکان نسبی ماندگار

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.109187.1398	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.109187.1398	۱۳۹۸/۰۹/۰۱	۱۳۹۷/۰۲/۲۰	۱۳۹۷/۰۲/۲۰	۱۳۹۷/۰۱/۰۲	۱۳۹۶/۰۹/۱۲
مسعود میرطاهری mmirtaheri@kntu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## Study of Structural Behaviour and Residual Drift of Concrete Frames Reinforced with Shape Memory Alloy Rebar

Masoud Mirtaheri<sup>1\*</sup>, Mohammadreza Rajabi<sup>2</sup>, Hamid mirzaeefard<sup>3</sup>

1- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- M.Sc. Student in Earthquake Engineering, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

3- Ph.D. Student in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

### ABSTRACT

Buildings in high seismic regions are prone to severe damage and collapse during earthquakes due to large lateral deformations. The use of superelastic shape memory alloys (SMAs) as reinforcements in concrete structures is gradually gaining interest among researchers. In this study, the effect of SMAs as reinforcement in concrete structures is analytically investigated for 3, 6 and 8-story reinforced concrete (RC) buildings. Each building has five bays in both directions with the same bay length of 5m. For each concrete building, three different reinforcement details are considered: (1) steel reinforcement (Steel) only, (2) SMA bar used in the plastic hinge region of the beams and steel bar in other regions (Steel-SMA), and (3), beams fully reinforced with SMA bar (SMA) and steel bar in other regions. For each case, columns are reinforced with the steel bar. Incremental Dynamic Analyses (IDA) are performed using ten different ground motion records to determine the seismic performance of Steel, Steel-SMA and SMA RC buildings using OPENSEES program. Results obtained from the analyses indicate that the value of  $S_a$  in Steel-SMA frames are higher than SMA frames, and its recovery capacity is almost similar with SMA frames. However, the SMAs materials are expensive, and the use of Steel-SMA frames can be reasonably effective in seismic zones. The comparison between frames with various reinforcement's details shows that  $S_a$  of 3-story frames with various reinforcements are almost identical. But, in 6- and 8-story frames,  $S_a$  of Steel frames are higher than others. In other words, frames with SMA bars in the all length or plastic hinge region of the beam have reached the same level of seismic demand under lower spectral acceleration which can be resulted from the decreased stiffness caused by SMA bars. Furthermore, the results indicate that structural behaviour factor in 3 and 6 story buildings with different types of reinforcement is not much change, but this change is perceptible in the 8-story frame. In the case of residual drift in all cases, the use of shape memory alloys will reduce these drifts.

### ARTICLE INFO

Received: 03/12/2017

Revised: 22/03/2018

Accepted: 10/05/2018

### Keywords:

Concrete structures,  
Superelastic shape memory alloys,  
IDA,  
Residual drift,  
Structural behavior factor.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.109187.1398

\*Corresponding author: Masoud Mirtaheri

Email address: mmirtaheri@kntu.ac.ir

## ۱- مقدمه

ساختمان‌ها و پل‌ها در نواحی با خطر لرزه ای زیاد مستعد خرابی‌های شدید و فروپاشی به دلیل تغییر شکل‌های جانبی زیاد در حین زلزله می‌باشند. به ویژه، المان‌های تیر-ستون در سازه‌های بتنی مسلح به شدت آسیب پذیر هستند و به عنوان ضعیف‌ترین المان در چنین سیستم‌های سازه ای به حساب می‌آیند [۱]. در طراحی لرزه ای مرسوم سازه‌های بتنی مسلح، انتظار می‌رود که آرماتورها به حد تسلیم برسند تا با تغییر شکل‌های دائمی آرماتورهای فولادی پس از تسلیم و خرابی بتن غیر محصور، انرژی مستهلک گردد.

آلیاژ حافظه دار سوپرالاستیک ماده‌ی ویژه ای است که قادر به تحمل تغییر شکل‌های غیر الاستیک بزرگ می‌باشد که شکل اصلی خود را با برداشت تنش باز می‌یابد، بنابراین می‌تواند نقطه‌ی روشنی برای مشکل تغییر شکل‌های دائمی باشد.

المان‌های تیر-ستون مسلح شده با آلیاژ حافظه دار به مهندسان سازه اجازه می‌دهند تا اتصالات سازه‌های بتنی مسلح<sup>۱</sup> (RC) را به گونه ای طراحی کنند که خرابی کم و کاهش تعمیرات پس از زمین لرزه را دارا باشند. آلیاژ حافظه دار مدول الاستیسیته و حلقه‌های هیسترتیک نسبتاً کوچک‌تری در مقایسه با فولاد دارد، بنابراین استفاده از آلیاژ حافظه دار در مقاطع سازه‌های بتنی مسلح ممکن است تغییرات قابل توجهی در رفتار این سازه‌ها را نتیجه دهد. از این رو استفاده از آلیاژهای حافظه دار، اهمیت کاربردی در طراحی سازه‌های بتنی مسلح دارد [۲]. اگر چه انواع مختلفی از آلیاژهای حافظه دار وجود دارد، اما یکی از این مواد که بیشتر در دسترس است و خواص و رفتار مناسب دارد، آلیاژ نیکل-تیتانیوم است. این آلیاژ از ترکیب اتمی مساوی نیکل و تیتانیوم ساخته می‌شود و هر دو خاصیت سوپرالاستیک و حافظه‌داری را دارد. آلیاژ نیکل-تیتانیوم در بارگذاری سیکلی خصوصیات پایداری دارد، همچنین مقاومت بالایی در برابر خوردگی از خود نشان می‌دهد.

دلیل اصلی گران بودن این مواد در کاربردهای مهندسی، تولید سخت و مشکل و نیاز به ماشین آلات پیشرفته و گران قیمت است. با این وجود، نیکل تیتانیوم به دلیل داشتن رفتار مناسب، امروزه بیش-ترین کاربرد را به عنوان ماده حافظه دار دارد [۳]. آلیاژهای حافظه دار همچنین در طیف گسترده ای از برنامه‌های کاربردی پزشکی و دندان پزشکی استفاده می‌شود [۴]. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد آلیاژهای حافظه دار، آنها کاربرد‌های گوناگونی در مهندسی سازه به منظور بهبود پاسخ ساختمان‌ها و پل‌ها دارند. از جمله می‌توان به کاربرد آنها در جداگر های لرزه ای، سیستم‌های مهاربندی، ابزار های استهلاک انرژی (میراگر ها)، اتصالات سازه های فولادی، ترمیم و مقاوم سازی و کاربرد آن در بتن اشاره نمود.

دلسه و کاردونه به بررسی رفتار مکانیکی آلیاژ های حافظه دار شکلی برای کاربرد های لرزه ای پرداختند. تغییرات عادی دمای محیط، تأثیر اندکی بر روی پاسخ تنش - کرنش مواد خواهد داشت که قابل چشم پوشی می‌باشد. سرعت بارگذاری در مورد مواد حافظه دار شکلی تأثیر گذار است. این تأثیر در افزایش سرعت از فرکانس‌های بسیار پایین (۰/۱ هرتز) به فرکانس‌های بالا در کاربرد های زلزله (۰/۲ تا ۴ هرتز) بسیار قابل توجه است. کاهش قابل ملاحظه ای در انرژی مستهلک شده و در نتیجه میرایی معادل با افزایش دما که ناشی از گرمای نهان انتقال است رخ می‌دهد که در سرعت‌های کرنش بالا نمی‌تواند انرژی را مستهلک کند در نتیجه در محدوده کاربرد های لرزه ای رفتار پایدار دارند. [۵،۶]. Ocel و همکاران در سال ۲۰۰۴ استفاده از آلیاژ های حافظه دار شکلی را در اتصالات نیمه گیردار فولادی بررسی کردند [۷]. Song و همکاران در سال ۲۰۰۶ برای اولین بار مفهوم بتن مسلح هوشمند<sup>۲</sup> (IRC) را مطرح کردند. در این بتن از سیم‌های مارتنزیتی برای پس کشیدگی استفاده شد. توزیع کرنش در داخل این بتن‌ها با کنترل مقاومت الکتریکی مفتول‌های<sup>۳</sup> SMA با استفاده از پیروزوسرامیک‌ها ارزیابی می‌شود و زمانی که ترک ایجاد می‌گردد، به وسیله‌ی گرمایش الکتریکی، مفتول SMA منقبض و جمع می‌شوند و در نتیجه اندازه ترک کاهش می‌یابد. این نوع بتن به دلیل دارا بودن قابلیت تشخیص ترک و خود ترمیمی<sup>۴</sup>، هوشمند نامیده می‌شود [۸]. Motahari و همکاران در سال ۲۰۰۷، کاربرد لرزه ای آلیاژ های حافظه دار را به عنوان میراگر های کنترل غیر فعال سازه‌ها مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه رفتار سازه قابی فلزی با چهار نوع متفاوت سیستم استهلاک انرژی با رفتار سازه قابی فلزی با مهاربند کمانش ناپذیر مقایسه گردید [۹].

<sup>1</sup> Reinforced Concrete

<sup>2</sup> Intelligent Reinforced Concrete (IRC)

<sup>3</sup> Superelastic Shape memory Alloys

<sup>4</sup> Self Rehabilitation

Abdulridha و همکاران در سال ۲۰۱۰ در یک برنامه جامع آزمایشگاهی در دانشگاه Ottawa به بررسی استفاده از میلگرد های SMA در ناحیه مفصل پلاستیک تیرها و دیوار های برشی بتن مسلح پرداختند [۱۰]. Khaloo و همکاران در سال ۲۰۱۰ به بررسی تأثیر نسبت میلگردهای آلیاژ حافظه دار، دامنه بارگذاری و مقاومت بتن بر رفتار تیر های بتن مسلح با میلگرد های SMA به روش المان محدود و مطالعه پارامتری برای تعیین تأثیر پارامترهای مختلف بر روی پاسخ چرخه ای پرداختند [۱۱]. رفتار لرزه ای قاب های فولادی با سیستم های SMA مختلف از جمله مهاربند قطری، مهاربندی زانویی را ارزیابی گردید [۱۲]. Alvandi و همکاران در سال ۲۰۱۴ ترکیبی از SMA و سیستم جداسازی شالوده را به عنوان سیستم کنترل فعال در ساختمان و یا ساخت و ساز پل پیشنهاد کردند. کارایی و امکان پذیری دو مکانیسم نیز توسط چند مورد مناسب ارائه شد [۱۳]. اتلاف انرژی لرزه ای در ساختمان های بتن مسلح از طریق تسلیم آرماتورهای فولادی و تغییر شکل های غیرالاستیک است. اگرچه ایمنی جانی ارائه شده است، تغییر شکل سازه بتن مسلح منجر به خسارت و زیان اقتصادی می گردد. در این مقاله، استفاده از SMA به عنوان تقویت کننده در ساختمان های بتن مسلح بررسی شد. بدین منظور از مدل های معرفی شده توسط Alam و همکاران در سال ۲۰۱۲ که به بررسی رفتار قابهای بتنی با میلگردهایی از جنس آلیاژ حافظه دار پرداختند استفاده گردیده است [۱۴]. توضیحات کامل فرضیات و روش های طراحی در این تحقیق برگرفته از تحقیق آلام و همکاران در سال ۲۰۰۹ بوده است [۱۵]. سپس، قاب های بتنی دوبعدی مختلف برحسب ارتفاع و جزئیات تقویت از مدل های سه بعدی انتخاب شده، و با استفاده از نرم افزار OPENSEES مدل سازی شد. تحلیل دینامیکی افزایشی<sup>۵</sup> (IDA) با استفاده از مجموعه ده زلزله برای تعیین رفتار لرزه ای جزئیات آرماتور مختلف در قاب ها انجام شد. علاوه بر این، ضریب رفتار سازه ها و همچنین تغییر مکان های نسبی ماندگار آن ها استخراج و با هم مقایسه شد. [۱۶].

## ۲- مبانی تئوری محاسبه ضریب رفتار

هدف اصلی در طراحی لرزه ای ساختمان ها بر این مبنا می باشد که رفتار ساختمان در مقابل نیروهای ناشی از زمین لرزه های کوچک بدون خسارت و در محدوده خطی مانده و در مقابل نیروهای ناشی از زمین لرزه های شدید، ضمن حفظ پایداری کلی خود خسارت های سازه ای و غیر سازه ای را تحمل کند. به همین دلیل مقاومت لرزه ای که مورد نظر آیین نامه های طراحی در برابر زمین لرزه است عموماً کمتر و در برخی موارد خیلی کمتر از مقاومت جانبی مورد نیاز برای حفظ پایداری سازه در محدوده ارتجاعی، در یک زمین لرزه شدید است. بنابراین، رفتار سازه ها به هنگام رخداد زمین لرزه های متوسط و بزرگ وارد محدوده غیر ارتجاعی می گردند و برای طراحی آن ها نیاز به یک تحلیل غیر ارتجاعی است، ولی به دلیل پرهزینه بودن این روش و عدم گستردگی برنامه های تحلیل غیر ارتجاعی و سهولت روش ارتجاعی، روش های تحلیل و طراحی های متداول بر اساس تحلیل ارتجاعی سازه و با نیروی کاهش یافته زمین لرزه صورت می گیرد. کاهش مقاومت سازه از مقاومت ارتجاعی مورد نیاز عموماً با استفاده از ضرایب کاهش مقاومت انجام می شود. بدین منظور آیین نامه های طراحی لرزه ای کنونی با شیوه ذکر شده، نیروهای لرزه ای برای طراحی ارتجاعی ساختمان را از یک طیف خطی که وابسته به زمان تناوب طبیعی ساختمان و شرایط خاک محل احداث ساختمان است، به دست می آورند و برای لحاظ کردن اثر رفتار غیر ارتجاعی و اتلاف انرژی بر اثر رفتار هیسترتیک، میرایی و اثر مقاومت افزون سازه، این نیروی ارتجاعی را به وسیله ضریب کاهش مقاومت (ضریب رفتار) به نیروی طراحی تبدیل کند. همانطور که در شکل ۱ دیده می شود رفتار غیر خطی سازه ها توسط رفتار دوخطی ایده آل می شود. نیروی جاری شدن برابر  $V_y$  و متناظر با بیشینه برش پایه سازه در حالت رفتار دو خطی می باشد و تغییر مکان متناظر با آن برابر  $\Delta_y$  می باشد. در این شکل  $V_e$  (برابر با  $V_{max}$ ) مقاومت الاستیک سازه می باشد. نسبت بیشینه برش پایه ( $V_e$ ) به بیشینه برش پایه در حالت رفتار دو خطی  $V_y$  برابر با ضریب کاهش شکل پذیری<sup>۶</sup> می باشد. این ضریب باعث کاهش نیروهای زمین لرزه از  $V_e$  به  $V_y$  می شود. در حقیقت بر اثر شکل پذیری، ساختمان ظرفیتی برای استهلاک انرژی هیسترتیک خواهد داشت.

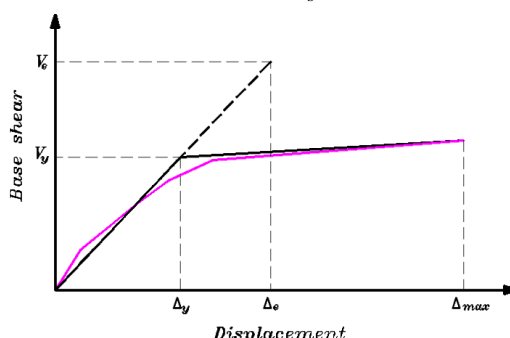
<sup>5</sup> Incremental dynamic analysis

<sup>6</sup> Ductility reduction factor

$$R_{\mu} = \frac{V_e}{V_y} \quad (1)$$

ضریب اضافه مقاومت<sup>۷</sup> سازه برابر با نسبت  $V_y$  به برش پایه در شروع اولین مفصل پلاستیک ( $V_s$ ) در سازه می باشد.

$$R_s = \frac{V_y}{V_s} \quad (2)$$



شکل ۱: تعیین پارامترهای موثر در طراحی لرزه ای سازه ها با استفاده از منحنی پوش آور [۲۰]

به طور کلی عوامل زیادی در مقدار ضریب اضافه مقاومت تأثیر گذارند. این عوامل شامل اضافه مقاومت سازه در نتیجه باز توزیع نیروهای داخلی، محدودیت های آیین نامه های مربوط به تغییر مکان جانبی نسبی طبقات، بیشتر بودن مقاومت واقعی مصالح نسبت به مقاومت اسمی، سخت شوندگی کرنشی، بزرگ تر در نظر گرفتن مقاطع نسبت به مقاطع مورد نیاز به علت تیپ بندی، ترکیبات بار گذاری غیر لرزه ای و... می باشد. در سال ۲۰۱۷ دکتر میرطاهری و همکاران ضریب رفتار سازه های فلزی مجهز به میراگر اصطکاکی سیلندری را به دست آوردند. [۲۰]

### ۳- طراحی مدل سازه ای

به منظور بررسی اثر آلیاژهای حافظه دار، سه قاب با طبقات متفاوت ۳، ۶ و ۸ طبقه در این مطالعه در نظر گرفته شده اند که هر قاب دارای سه نوع میلگردگذاری متفاوت در تیرهایشان می باشند. دسته اول: قاب هایی که در تیرهای آنها تنها از میلگردهایی از جنس فولاد استفاده گردیده است. این قاب ها با نام Steel نام گذاری شده اند. دسته دوم: قاب هایی که میلگردهای به کار رفته در تیرهای آنها ترکیبی از فولاد و آلیاژ حافظه دار است. این قاب ها با نام Steel-SMA نام گذاری شده اند. دسته سوم: قاب هایی که میلگرد های به کار رفته در تیرهای آنها از جنس SMA است. این قاب ها با نام SMA نام گذاری شده اند.

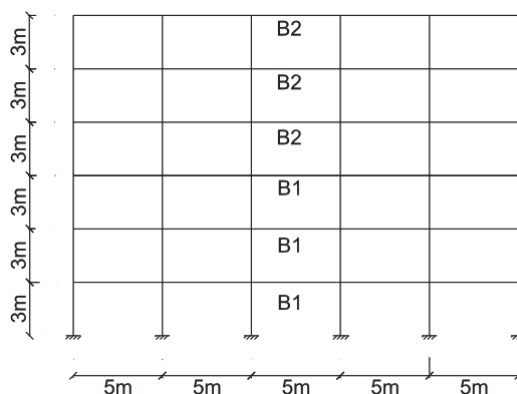
قابل ذکر است که میلگردهای به کار رفته در ستون های هر سه دسته از قاب ها از جنس فولاد می باشد.

هر قاب دارای پنج دهانه در دو جهت می باشد که طول دهانه ها ۵ متر می باشد. سه قاب بتنی مسلح با فولاد با طبقات متفاوت به وسیله NBCC تحلیل گردیده اند و مطابق آیین نامه CSA<sup>۸</sup> برای قاب با شکل پذیری متوسط بر اساس روش نیرو معادل استاتیکی طراحی شده اند [۱۸-۱۷]. برای هر نوع قاب فاکتورهای Rd و Ro یکسانی استفاده شده است. فرض شده است که ساختمان ها در ناحیه ونکوور واقع شده است.

<sup>7</sup> Over strength factor

<sup>8</sup> Canadian Standards Association

جدول ۱ مشخصات مصالح استفاده شده برای طراحی و استفاده در تحلیل المان محدودی را نمایش می‌دهد. به منظور بررسی اثر آلیاژهای حافظه‌دار، سه ساختمان با طبقات متفاوت ۳، ۶ و ۸ طبقه در این مطالعه در نظر گرفته شده‌اند که هر ساختمان دارای سه نوع میلگردگذاری متفاوت در تیرهایشان می‌باشند. شکل ۲ نمای ساختمان ۶ طبقه را نشان می‌دهد [۱۹]. قابل ذکر است که میلگردهای به کار رفته در ستون‌های هر سه دسته از ساختمان‌ها از جنس فولاد می‌باشد.



شکل ۲: ساختمان بتن مسلح ۶ طبقه، نما [۱۹]

جدول ۱: مشخصات مصالح استفاده شده در تحلیل‌های المان محدود [۱۹]

Material	Mechanical Property	Value
Concrete	Compressive strength (MPa)	35
	Tensile strength (MPa)	3.5
	Strain at peak stress (%)	0.2
Steel	Modulus of elasticity (MPa)	200000
	Yield strength (MPa)	400
	Strain hardening parameter (%)	0.5
	Modulus of elasticity (MPa)	60000
	Austenite to martensite starting stress (MPa)	400
Austenite to martensite		500

Storey ID	Floor level	Description	Column ID	
			C1	C2
3 Storey building	Up to roof	Size (mm × mm)	375 × 375	300 × 300
		Main reinforcement	8-15 M	4-20 M
6 Storey building	Up to 3rd floor	Size (mm × mm)	450 × 450	300 × 300
		Main reinforcement	8-25 M	6-20 M
	3rd floor to roof	Size (mm × mm)	450 × 450	300 × 300
		Main reinforcement	8-20 M	4-20 M
8 Storey building	Up to 3rd floor	Size (mm × mm)	500 × 500	300 × 300
		Main reinforcement	8-25 M	6-25 M
	3rd floor to roof	Size (mm × mm)	500 × 500	300 × 300
		Main reinforcement	6-25 M	6-20 M

جدول ۱-۱: ابعاد و نحوه آرماتور ستون‌ها [۱۹]

جدول ۱-۰: ابعاد و نحوه آرماتور تیرها [۱۹]

## ۴- تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)

## ۴-۱- کلیات

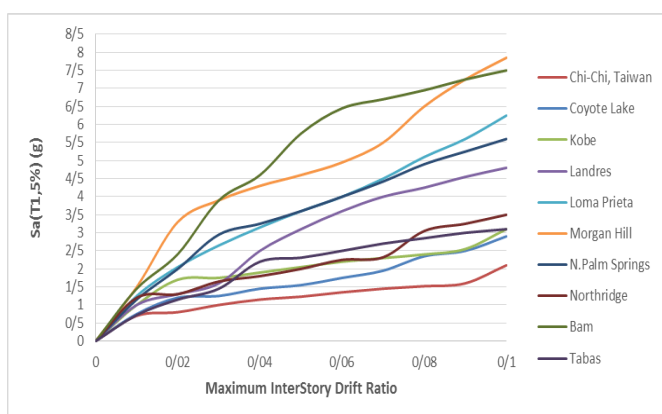
تحلیل دینامیکی افزایشی، یک روش تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها و بر اساس عملکرد می‌باشد که به کمک آن می‌توان مقدار خسارت وارده را بر حسب شدت تحریک زلزله، مشخص ساخت. در این فروریزش سازه پوشش دهد، استفاده می‌گردد. به عبارت دیگر در این روش که همچنین به منظور در نظر گرفتن اثر عدم قطعیت ذاتی موجود در زلزله، در ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها ابداع شده است، برای لحاظ کردن عدم قطعیت موجود در محتوای فرکانسی و شکل طیفی زلزله‌ها، می‌بایست تعداد مناسبی از رکوردهای زلزله مورد استفاده قرار گیرد.

Storey ID	Beam ID	Size	Section 1-1 Main reinforcement		Section 2-2 Main reinforcement		Section 3-3 Main reinforcement	
			Top (M)	Bottom (M)	Top (M)	Bottom (M)	Top (M)	Bottom (M)
			3 Storey building	B1	300 × 450	2-20	2-20	2-20
6 Storey building	B1	300 × 500	3-25	4-25	3-25	4-25	5-25	4-20
	B2	300 × 500	2-20	2-20	2-20	3-20	2-20	3-20
8 Storey building	B1	300 × 500	3-25	4-25	3-25	4-25	5-25	4-20
	B2	300 × 500	3-20	3-20	3-20	3-20	3-20	3-20

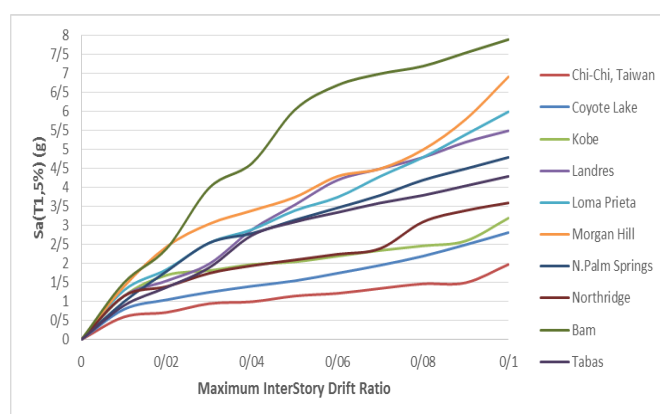
سپس هر رکورد زلزله به نحوی مقیاس می‌شود تا گستره مناسبی از شدت‌های لرزه‌ای و نیز رفتار سازه، از حد الاستیک تا خرابی را پوشش دهد. در انتها با استفاده از نتایج این تحلیل و مشخص نمودن حالت حدی خرابی مورد نظر و خلاصه‌سازی و تفسیر مناسب دسته منحنی‌های حاصله، می‌توان به بررسی عملکرد و رفتار سازه تحت رکوردهای مختلف زلزله پرداخت و نیز با نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی ضریب رفتار سازه‌ها و همچنین تغییر مکان‌های نسبی ماندگار را بدست می‌آوریم.

## ۴-۲- دسته منحنی‌های IDA

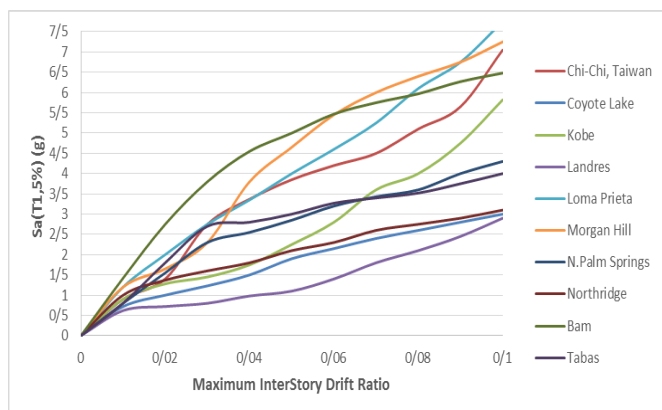
نه مدل سازه‌ای ۳، ۶ و ۸ طبقه با میلگرد گذاری متفاوت در تیرها در ابتدا تحت اثر ۱۰ رکورد زلزله قرار گرفته و تحلیل دینامیکی افزایشی و تحلیل دینامیکی غیر خطی بر روی آن‌ها انجام شده است. سپس دسته منحنی‌های IDA، برای هر کدام از قاب‌ها ترسیم گردیده و خلاصه‌سازی شده است. در نهایت ضریب رفتار سازه‌ها و تغییر مکان‌های نسبی ماندگار محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده اند.



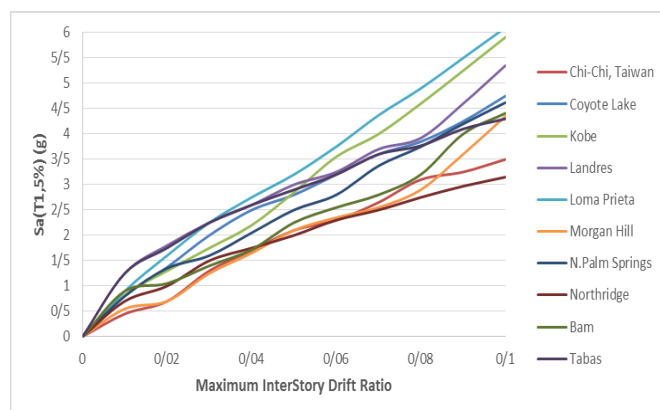
شکل ۳-۰: دسته منحنی‌های IDA برای قاب ۳ طبقه Steel



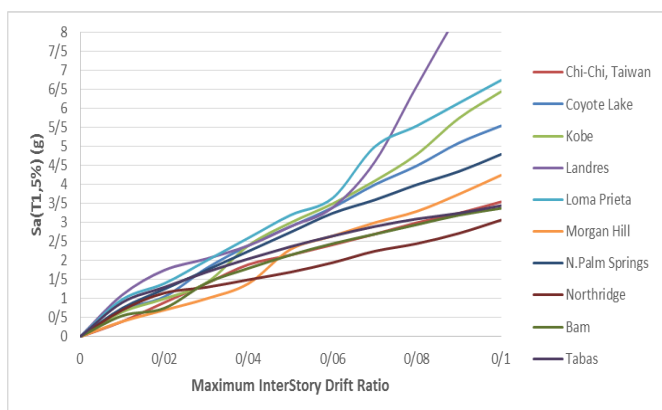
شکل ۳-۱: دسته منحنی‌های IDA برای قاب ۳ طبقه Steel-SMA



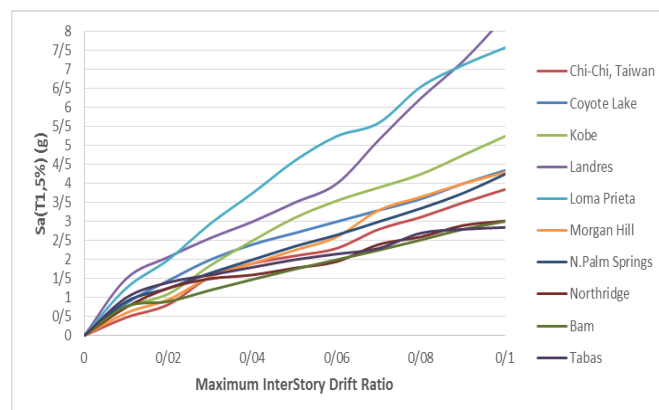
شکل ۲-۴: دسته منحنی‌های IDA برای قاب ۳ طبقه SMA



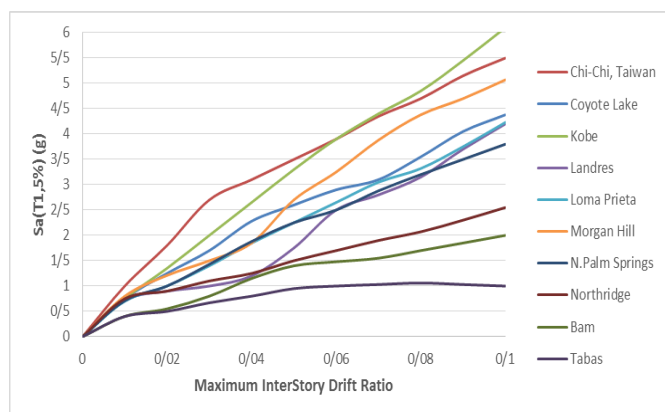
شکل ۱-۰: دسته منحنی‌های IDA برای قاب ۶ طبقه Steel



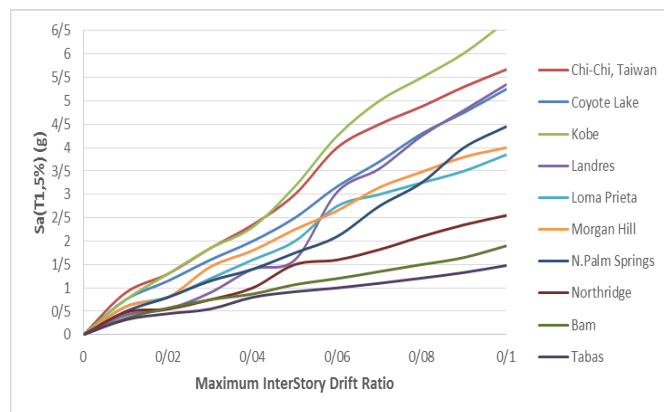
شکل ۴-۰: دسته منحنی‌های IDA برای قاب ۶ طبقه Steel-SAM



شکل ۴-۰: دسته منحنی‌های IDA برای قاب ۶ طبقه SMA

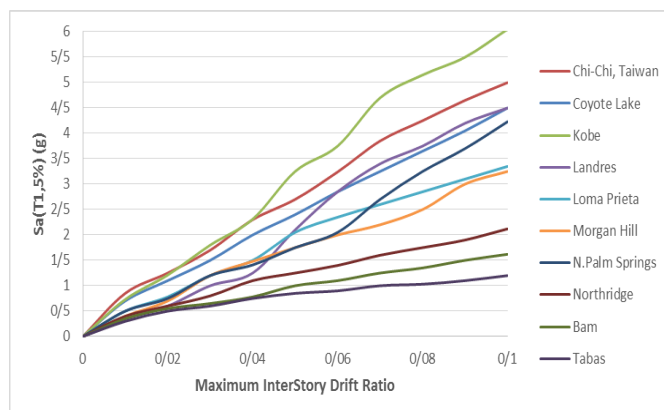


شکل ۵-۰: دسته منحنی‌های IDA برای قاب ۸ طبقه Steel



شکل ۵-۰: دسته منحنی‌های IDA برای قاب ۸ طبقه Steel-SMA





شکل ۵-۰: دسته منحنی‌های IDA برای قاب ۸ طبقه SMA

در این بخش جهت تحلیل دینامیکی افزایشی مدل‌های مورد بررسی از ۱۰ رکورد زلزله معروف دنیا که همگی از لحاظ سرعت موج برشی ساختگاه، متناظر خاک نوع II می‌باشند استفاده گردیده است. مشخصات رکوردهای استفاده شده در **Error! Reference source not found.** آورده شده است.

## ۵- بررسی نتایج

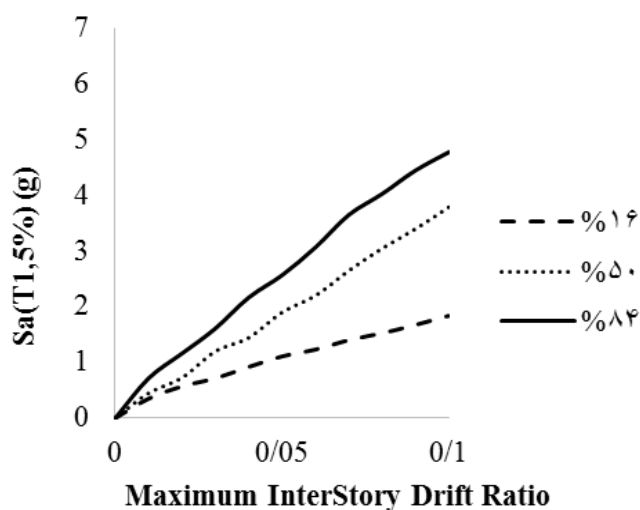
بعد از انجام تحلیل IDA تحت چندین رکورد مختلف زلزله، دسته‌ای از منحنی‌های IDA بدست آمد که با توجه به تعداد حالت کلی از رفتار سازه و کاهش پراکندگی اطلاعات می‌توان دسته منحنی‌های IDA را خلاصه نمود. این امر از طریق روش‌های آماری میسر می‌گردد و به این صورت می‌توان میزان ظرفیت ساختمان‌های مورد مطالعه را به طور ملموس‌تری ارزیابی نمود. از این رو در این بخش مطابق شکل ۶ سه مقدار آماری صدک‌های ۱۶٪، ۵۰٪ و ۸۴٪ از هر یک از دسته منحنی‌های IDA استخراج گردیده و از آن برای مقایسه دسته منحنی‌های مختلف با یکدیگر و ارزیابی احتمالاتی سازه‌های استفاده شده است. همچنین در اشکال ۷ تا ۹ مقادیر میانه هر سه دسته منحنی IDA شامل Steel-SMA، Steel-SMA و SMA مربوط به قاب‌های ۳، ۶ و ۸ طبقه جهت مقایسه در کنار یکدیگر نشان داده شده است. همانطور که در اشکال ۷ تا ۹ مشاهده می‌گردد، برای هر سه قاب با طبقات متفاوت، حالات Steel-SMA، Steel-SMA و SMA رفتاری مشابه و نزدیک و به هم دارند، همچنین مقدار میانه Sa، متناظر با حالت حدی فروریزش در منحنی IDA ( $Drift = 0.1$ )، برابر ظرفیت Sa سازه‌ها نامیده می‌شود. با توجه به منحنی‌های اشکال ۷ تا ۹، می‌توان گفت حالت SMA در قاب سه طبقه و حالت Steel در قاب‌های شش و هشت طبقه دارای ظرفیت Sa بالاتری می‌باشد.

جدول ۲: رکوردهای استفاده شده در تحلیل‌ها

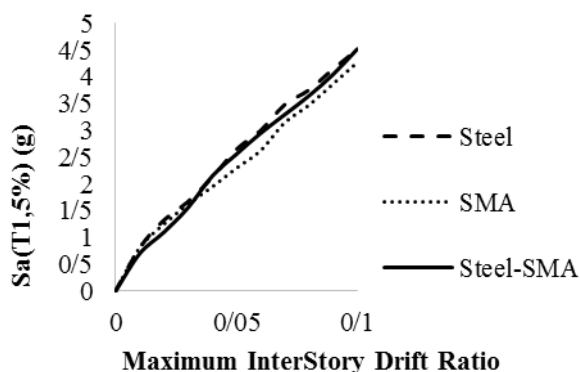
NO	Earthquake	Station	Soil type	PGA(g)
1	Chi-Chi, Taiwan, 1999	CHY080	II	0.902
2	Coyote Lake, 1979	Gilroy Array 3	II	0.434
3	Kobe, 1995	KJMA	II	0.821
4	Landers, 1992	Coolwater	II	0.417
5	Loma Prieta, 1989	Corralitos	II	0.644
6	Morgan Hill, 1984	Anderson Dam	II	0.423

7	N. Palm Springs, 1986	N. Palm Springe	II	0.694
8	Northridge, 1994	Santa Monica	II	0.883
9	Bam, 2003	Bam	II	0.767
10	Tabas, 1978	9101 Tabas	II	0.917

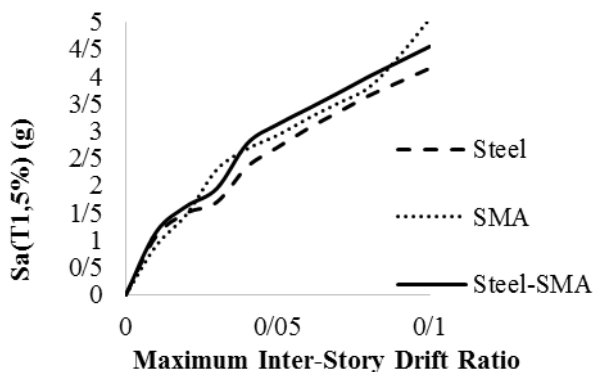
همچنین در اشکال ۱۰ تا ۱۲ مقادیر میانه هر سه دسته منحنی IDA شامل قاب‌های ۶، ۳ و ۸ طبقه مربوط به حالات Steel، SMA و Steel-SMA جهت مقایسه در کنار یکدیگر نشان داده شده است.



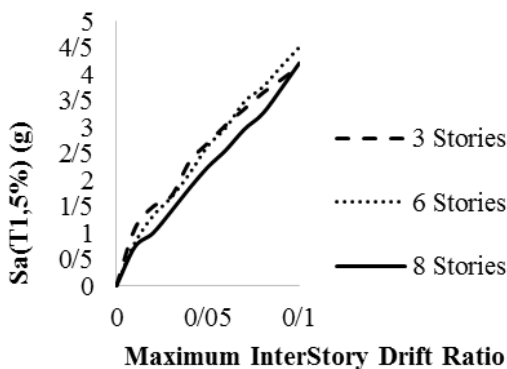
شکل ۶: دسته منحنی‌های خلاصه شده‌ی IDA برای قاب ۸ طبقه SMA



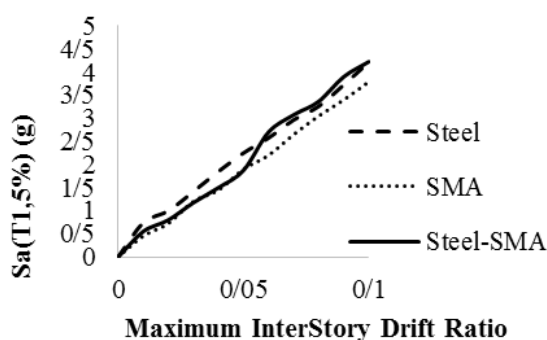
شکل ۸: مقادیر میانه منحنی‌های IDA قاب‌های ۶ طبقه



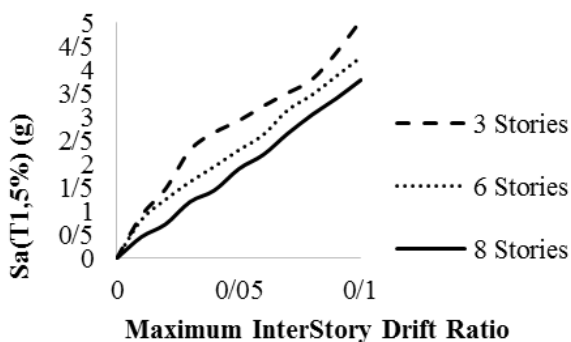
شکل ۷: مقادیر میانه منحنی‌های IDA قاب‌های ۳ طبقه



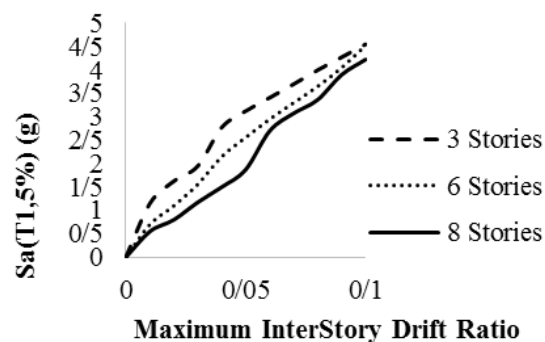
شکل ۱۰: مقادیر میانه منحنی‌های IDA قاب‌های فولادی



شکل ۹: مقادیر میانه منحنی‌های IDA قاب‌های ۸ طبقه



شکل ۱۲: مقادیر میانه منحنی‌های IDA قاب‌های SMA



شکل ۱۱: مقادیر میانه منحنی‌های IDA قاب‌های Steel-SMA

مقایسه رفتار قاب‌های با ارتفاع مختلف نشان می‌دهد که ظرفیت فروریزش سازه‌ها با افزایش ارتفاع سازه کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر سازه‌های بلندتر، تحت اثر میزان کمتری از شتاب طیفی به یک سطح تقاضای لرزه‌ای یکسان می‌رسند که این امر می‌تواند به نوعی ناشی از کاهش شکل پذیری سازه، با افزایش ارتفاع باشد.

مقایسه رفتار قاب‌های با میلگرد گذاری متفاوت نشان می‌دهد که در قاب‌های سه طبقه ظرفیت فروریزش قاب‌ها تقریباً یکسان است، اما در مورد قاب‌های ۶ و ۸ طبقه ظرفیت فروریزش قاب‌های Steel بیشتر می‌باشد، به عبارت دیگر سازه‌های دارای میلگرد حافظه‌دار در تمام تیر یا در ناحیه مفصل پلاستیک، تحت اثر میزان کمتری از شتاب طیفی به یک سطح تقاضای لرزه‌ای یکسان می‌رسند که این امر می‌تواند به نوعی ناشی از کاهش سختی سازه، در اثر استفاده از SMA باشد.

### ۵-۱- ضریب رفتار

در جداول ۳ تا ۵ ضرایب رفتار برای سازه‌های مختلف آمده است. در این جداول مقادیر برش پایه  $V_s$  ها برای سازه‌های مختلف، مقادیر میانگین ۱۰ رکورد زلزله مقیاس شده است که سازه‌ها تحت آن‌ها تحلیل دینامیکی غیر خطی شده‌اند. و مقادیر  $V_e$  مقادیر حداکثر برش پایه در تحلیل دینامیکی خطی است.

ضریب رفتار قاب ۳ طبقه در سه حالت آرماتور گذاری مختلف تفاوت چندانی با هم ندارند، ولی با مقدار ذکر شده در آیین نامه ASCE 7-05 ( $R=5$ ) و نیز آیین نامه طراحی لرزه ای ایران ( $R_w = 7 = 1.4 \times 5$ ) تطابق خوبی ندارد. با افزایش ارتفاع استفاده از آلیاژهای حافظه دار مقدار ضریب رفتار را افزایش داده است و به مقدار آیین نامه نزدیکتر شده است. و این تطابق در مورد قاب ۸ طبقه بسیار نزدیک است.

در مقایسه حالات مختلف آرماتور گذاری نیز حالت Steel-SMA نسبت به حالت‌های دیگر افزایش مقدار ضریب رفتار بیشتری دارد. که این نشان می‌دهد، استفاده از این آلیاژها در مفاصل پلاستیک تیرها، هم مقرون به صرفه است و هم شکل پذیری سازه را بیشتر می‌کند.

جدول ۳: ضریب رفتار برای حالت SMA

	$R_w=R*Y$	R	$V_e$ (N)	$V_s$ (N)
3 Story	5.091234	3.636596	928784.1	306479.2
6 Story	6.200943	4.429245	1504580	339692.3
8 Story	7.561968	5.401405	1791987	331763.1

جدول ۴: ضریب رفتار برای حالت Steel

	$R_w=R*Y$	R	$V_e$ (N)	$V_s$ (N)
3 Story	5.583629	3.988307	955000.8	287340.2
6 Story	5.429772	3.878409	2104248	542554.5
8 Story	6.731571	4.808265	1153229	287811.6

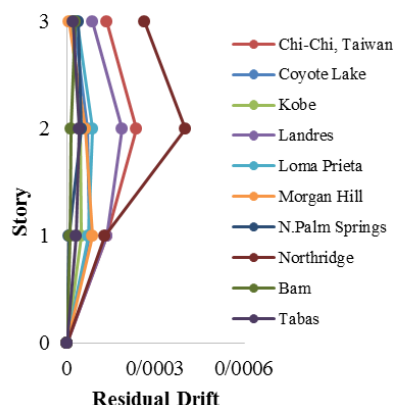
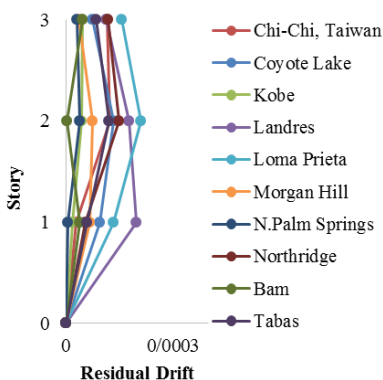
جدول ۵: ضریب رفتار برای حالت Steel-SMA

	$R_w=R*Y$	R	$V_e$ (N)	$V_s$ (N)
3 Story	5.542799	3.959142	754615.2	257310.9
6 Story	7.125948	5.089963	1450421	341948.6
8 Story	8.135267	5.810905	1104941	190149.5

### ۵-۲- تغییر مکان های نسبی ماندگار

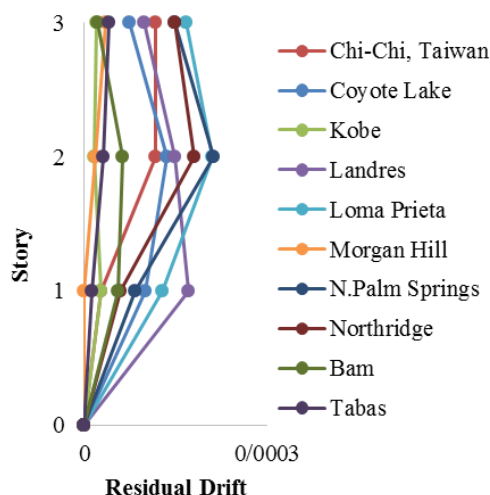
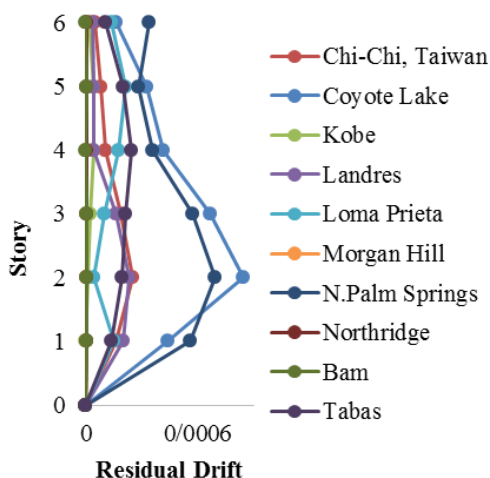
تغییر مکان های نسبی ماندگار در پایان اعمال رکورد زلزله محاسبه می شود، که برای همه طبقات سازه ها و برای همه رکورد ها در نمودار های ۱۳ تا ۲۱ آمده است.

همانطور که از شکل های ۱۳ تا ۲۱ مشخص است آلیاژ حافظه دار باعث کاهش تغییر شکل های نسبی ماندگار در سازه می شود و در این مورد نیز حالت SMA نتایج بهتری دارد. همچنین می توان این نتیجه را گرفت که هرچه پیوند سازه بیشتر باشد، تغییر شکل های نسبی ماندگار آن نیز بزرگ تر است.



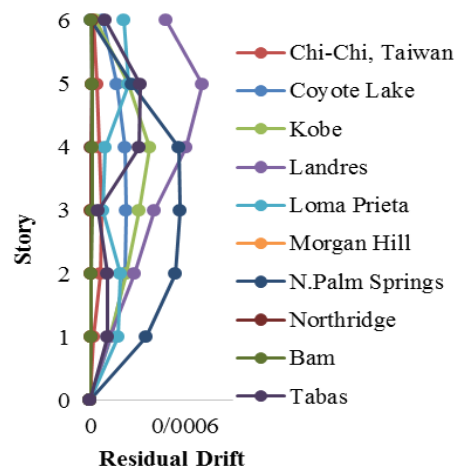
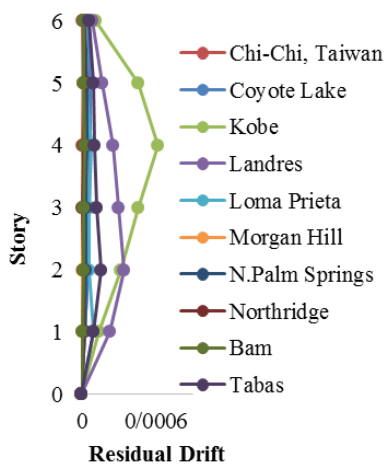
شکل ۱۴: نمودار تغییر مکان های نسبی ماندگار برای قاب ۳ طبقه Steel-SMA

شکل ۱۳: نمودار تغییر مکان های نسبی ماندگار برای قاب ۳ طبقه Steel

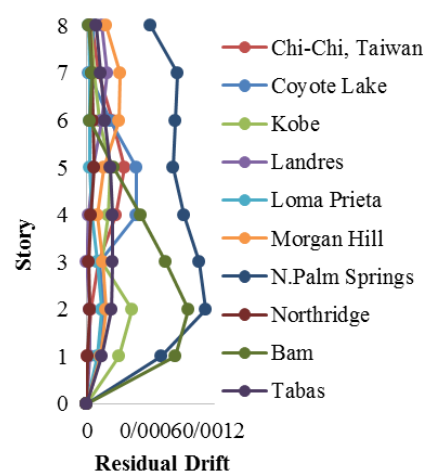
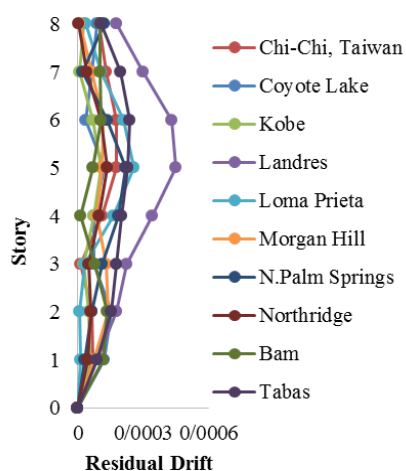


شکل ۱۶: نمودار تغییر مکان های نسبی ماندگار برای قاب ۶ طبقه Steel

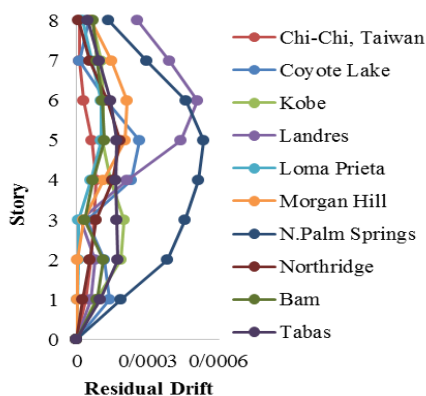
شکل ۱۵: نمودار تغییر مکان های نسبی ماندگار برای قاب ۳ طبقه SMA



شکل ۳: نمودار تغییر مکان های نسبی ماندگار برای قاب ۶ طبقه Steel-SMA      شکل ۱۸: نمودار تغییر مکان های نسبی ماندگار برای قاب ۶ طبقه SMA



شکل ۴: نمودار تغییر مکان های نسبی ماندگار برای قاب ۸ طبقه Steel-SMA      شکل ۱۹: نمودار تغییر مکان های نسبی ماندگار برای قاب ۸ طبقه SMA



شکل ۲۱: نمودار تغییر مکان های نسبی ماندگار برای قاب ۸ طبقه SMA

در مقایسه تغییر مکان های نسبی ماندگار حالت Steel-SMA از حالت SMA تغییر مکان های نسبی ماندگار کمتری دارد. و حالت SMA نیز نسبت به حالت Steel تغییر مکان های نسبی کمتری دارد.

## ۶- نتیجه گیری

با توجه به مطالعه صورت گرفته روی قاب‌های بتنی با میلگردهای آلیاژ حافظه‌دار ، برخی از دستاوردهای این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- این مطالعه یک مقایسه جالب و مفید بین قاب‌های خمشی بتن مسلح منظم با میلگردهای SMA و بدون آن انجام داده است. بررسی این خاصیت برای درک بهتر عملکرد سازه‌های مسلح شده با SMA قبل از به کارگیری آن‌ها در ساخت و ساز ضروری به نظر می‌رسد.
- در تمامی قاب‌ها نحوه میلگرد گذاری مشابه است و به دلیل مدل الاستیسیته کمتر SMA در مقایسه با فولاد، قاب‌های Steel- SMA و SMA جابه‌جایی بین طبقات بیشتری را تجربه می‌کنند.
- جابه‌جایی‌های زیاد باقی مانده به عنوان یکی از علل اصلی پرهزینه شدن و سخت شدن بهسازی سازه‌ها و پل‌های آسیب دیده در برابر زلزله می‌باشد.
- SMA تنها ماده‌ای است که می‌تواند بیشتر جابه‌جایی‌های غیر الاستیک بزرگ را بازیابی کند.
- اگر SMA به عنوان آرماتور در المان تیر- ستون و یا مفاصل به کار می‌رود، یک پیشرفت بزرگ را در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها به وجود می‌آورد که به موجب آن هزینه تعمیرات کاهش پیدا می‌کند و سازه‌ها حتی پس از زلزله‌های شدید نیز می‌توانند قابل استفاده باشند.
- سازه‌های دارای میلگرد حافظه‌دار در تمام تیر یا در ناحیه مفصل پلاستیک، تحت اثر میزان کمتری از شتاب طیفی به یک سطح تقاضای لرزه‌ای یکسان می‌رسند که این امر می‌تواند به نوعی ناشی از کاهش سختی سازه، در اثر استفاده از SMA باشد.
- آلیاژ حافظه دار باعث کاهش تغییر شکل های نسبی ماندگار در سازه می شود و در این مورد نیز حالت SMA نتایج بهتری دارد.
- در مقایسه حالات مختلف آرماتور گذاری نیز حالت Steel-SMA نسبت به حالت های دیگر افزایش مقدار ضریب رفتار بیشتری دارد. که این نشان می دهد، استفاده از این آلیاژها در مفاصل پلاستیک تیرها، هم مقرون به صرفه است و هم شکل پذیری سازه را بیشتر می کند.

## مراجع

- [1] Alam, M.S., Youssef, M.A. and Nehdi, M. (2008), "Analytical prediction of the seismic behavior of superelastic shape memory alloy reinforced concrete elements", *Engineering Structures*, 30, pp. 3399–3411.
- [2] Alam, M.S., Youssef, M.A. and Nehdi, M. (2007), "Seismic behavior of concrete beam-column joints reinforced with super-elastic shape memory alloys", 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering June 2007, ON, Canada, Paper No.1125, p. 10.
- [3] Srinivasan, A.V. and McFarland, M.D. (2001), "Smart structures – analysis and design", Cambridge university press.
- [4] Anson, T., (1999), "Shape Memory Alloys - Medical Applications", *Materials World*, Vol. 7, No. 12, December 1999, pp. 745–747.
- [5] Dolce, M. and Cardone, D. (2001), "Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications1. Martensite and austenite NiTi bars subjected to torsion", *International Journal of Mechanical Sciences*, 43, pp. 2631–2656.

- [6] Dolce, M. and Cardone, D. (2001), "Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension", *International Journal of Mechanical Sciences*, 43, pp. 2657–2677.
- [7] Ocel, J., DesRoches, R., T.Leon, R., Hess, W.G., Krumme, R., Hayes, J.R. and Sweeney, S.(2004), "Steel beam-column connections using shape memory alloys", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, pp. 732-740.
- [8] G. Song, N. Maa, H.-N. Li., (2006), "Applications of shape memory alloys in civil structures" *Engineering Structures*, 28, pp. 1266–1274
- [9] Motahari, S.A., Ghassemieh, M. and Abolmaali, S.A., (2007), "Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations" *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 63, No. 12, pp. 1570–1579.
- [10] Abdulridha, A., Palermo, D., and Foo, S. (2010), "Seismic behavior of SMA reinforced concrete beams" 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering: Reaching Beyond Borders, Toronto, Canada, and July, 2010.
- [11] Khaloo, A. R., Eshghi, I. and Piran Aghl, P. (2010), "Study of Behavior of Reinforced Concrete Beams with Smart Bars Using Finite Element Modeling", *International Journal of Civil Engineering*. Vol. 8, No. 3, September 2010.
- [12] Omar, M. (2011), "Analytical prediction of seismic response of steel frames with superelastic shape memory alloy". *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* Vol. 5, No. 11.
- [13] Alvandi, S. and Ghassemieh, M. (2014), "Application of shape memory alloys in seismic isolation". *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 47(2), pp. 153 – 171.
- [14] Alam, M.S., Moni, M. and Tesfamariam, S. (2012), "Seismic over-strength and ductility of concrete buildings reinforced with superelastic shape memory alloy bar", *Engineering Structures*, 34 pp. 8–20.
- [15] Alam, M.S., Nehdi, M and Maged, A.Y. (2009), "Seismic performance of concrete frame structures reinforced with superelastic shape memory alloys", *Smart Structures and Systems*, Vol. 5, No. 5 pp. 565-585.
- [16] FEMA. Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings. Report No. FEMA-350, SAC Joint Venture, Federal Emergency Management Agency, Washington DC 2000.
- [17] NBCC., 2005, National Building Code of Canada, Canadian Commission on Building and Fire Codes. Ottawa: National Research Council of Canada.
- [18] CSA, 2004, A23.3-04. Design of Concrete Structures. 5th ed. Rexdale, ON, Canada: Canadian Standards Association.
- [19] Alam, M.S., Moni, M. and Tesfamariam, S. (2012), "Seismic over-strength and ductility of concrete buildings reinforced with superelastic shape memory alloy bar", *Engineering Structures*, 34 (2012) 8–20.
- [20] H. Mirzaeefard; S.M. Mirtaeheri; H. Rahmani Samani(2016) "Response modification factor of steel structures equipped with cylindrical frictional dampers." *Amirkabir Journal of Civil & Environmental Engineering (In Persian)* 31-40:(3)49