



http://journaliss.ir

# مقایسه تأثیر پس‌لرزه بر عملکرد قاب مهاربندی‌شده مجهز به آلیاژ حافظه‌دار شکلی با قاب خمشی

محسن گرامی<sup>۱</sup>، مه‌رسا میرزا‌حسینی<sup>۲\*</sup>، الهام کاظمی<sup>۳</sup>

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۲- دانش‌آموخته دکتری مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۳- دانش‌آموخته مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

\*سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱، mirzahosseini@semnan.ac.ir

## چکیده

استفاده از آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به‌عنوان ابزاری نوین به‌دلیل خاصیت مرکزگرا جهت کاهش آسیب و کنترل رفتار لرزه‌ای سازه می‌تواند مؤثر باشد. با توجه به این که وقوع پس‌لرزه‌ها می‌تواند همواره سبب تجمع خسارت در سازه‌ها شود، لذا بررسی عملکرد سیستم‌های فوق تحت پس‌لرزه اهمیت می‌یابد. تحقیق حاضر، یک قاب فولادی چهارطبقه در حالت بدون مهاربند و با مهاربند همگرا مجهز به میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی را مورد ارزیابی قرار داده است. جهت بررسی اثر پس‌لرزه بر رفتار دو قاب و انجام تحلیل دینامیکی افزایشی از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. برای این منظور ۲۹ رکورد مربوط به لرزه اصلی و پس‌لرزه واقعی ثبت‌شده مورد استفاده قرار گرفته است. جهت بررسی پاسخ سازه‌ها ابتدا لرزه اصلی تا رسیدن سازه به سطح فروپاشی مقیاس شده و سپس پس‌لرزه با در نظر گرفتن سه سطح دررفت سازه (۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴) تحت لرزه اصلی به قاب‌ها اعمال گردید. نتایج نشان می‌دهد که سازه مهاربندی مجهز به میراگر، نسبت به سازه بدون مهاربند، در پس‌لرزه پس از تجربه دررفت ۰/۰۴ ناشی از لرزه اصلی، ۱۳٪ شتاب بیش‌تر، ۳۰٪ دررفت پسماند کم‌تر و نیز ۲۱٪ دررفت نسبی کم‌تری را تجربه کرده است. همچنین در هر دو سازه تحت پس‌لرزه در سطح دررفت بالاتر ناشی از لرزه اصلی، آثار مخرب‌تری مشاهده شده است.

## واژگان کلیدی

آلیاژ حافظه‌دار شکلی، پس‌لرزه، تحلیل دینامیکی افزایشی، قاب فولادی

## Comparison of the effects of aftershocks on the performance of a concentrically braced frame equipped with a shape memory alloy damper and a steel moment resisting frame

M. Gerami, M. Mirza Hosseini, E. kazemi

### Abstract

Using shape memory alloys as a novel tool due to their self-centering property to reduce damage and control seismic behavior of structures can be effective. Considering that the occurrence of aftershocks can always cause cumulative damage in structures, it is important to investigate the performance of the above systems under aftershocks. The present study evaluates a four-story steel frame in the state without braces and with convergent braces equipped with shape memory alloy dampers. To investigate the effect of aftershocks on the behavior of the two frames and perform incremental dynamic analysis, the OpenSees software was used. For this purpose, 29 records related to the main earthquake and the actual recorded aftershock were used. To investigate the response of the structures, first, the main earthquake was scaled to bring the structure to the collapse level, and then the aftershock was applied to the frames considering three levels of drift structure (0.01, 0.025, and 0.04) under the main earthquake. The results show that the braced structure equipped with a damper, compared to the structure without braces, experiences 13% more acceleration, 30% less residual drift, and 21% less relative drift after experiencing 0.04 drift caused by the main earthquake. Additionally, in both structures, more destructive effects are observed when they are under aftershock.

### Keywords

SMA Damper, Aftershock, Incremental Dynamic Analysis, Steel Frame



آلیاژ حافظه‌دار شکلی (SMA)<sup>۱</sup>، آلیاژ فلزی تقریباً جدیدی است که توجه زیادی را به عنوان یک ماده هوشمند، به خود جلب نموده است. این آلیاژ طیف گسترده‌ای از بخش‌های صنعتی را دربرمی‌گیرد. از ویژگی‌های منحصربه‌فرد این نوع آلیاژ می‌توان به این مورد اشاره نمود که با افزایش دما و یا باربرداری به شکل اولیه خود بازمی‌گردد [۱]. همچنین از دیگر خواص آن، می‌توان به ظرفیت بالای میرایی، کنترل خوب نیروها، مقاومت بالا در برابر خستگی و بازیابی کرنش‌ها اشاره نمود که سبب می‌شود آلیاژهای حافظه‌دار به یک ماده مؤثر برای کاربردهای لرزه‌ای تبدیل شود [۲ و ۳].

**گاز<sup>۲</sup> و همکاران** به بررسی تحلیل شکنندگی لرزه‌ای قاب‌های ساختمان فولادی نصب‌شده با میراگرهای آلیاژ حافظه‌دار شکلی سوپرالاستیک پرداختند و رفتار سیستم را با میراگر تسلیم مقایسه نمودند. آن‌ها دریافتند که به دلیل ویژگی‌های مکانیکی منحصربه‌فرد آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (نظیر سوپرالاستیسیت، اتلاف انرژی زیاد و سخت‌شدن تنش در سطوح کرنش بالا)، میراگرهای SMA، معمولاً کارآمدتر و قابل‌اعتمادتر از میراگرهای تسلیم در کنترل لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی هستند. مطالعات انجام‌شده بر روی قاب ساختمان مجهز به میراگرهای SMA، دریافت پسماند ناچیزی را نشان می‌دهد که ناشی از ویژگی مرکزگرایی قابل‌توجه میراگر SMA بوده است [۴].

**ژانگ<sup>۳</sup> و کزیا<sup>۴</sup>** به توسعه یک میراگر با شکل تغییر یافته جدید پرداختند. آن‌ها دریافتند که ظرفیت مرکزگرایی و اتلاف انرژی میراگر می‌تواند در مقایسه با حالت بدون تقویت، بهتر باشد. نتایج به‌دست‌آمده عملکرد مناسب این میراگر را در کنترل جابه‌جایی، مرکزگرایی و ظرفیت اتلاف انرژی نشان داده است [۵ و ۶].

برخی از پژوهشگران با مطالعه در زمینه پس‌لرزه چنین دریافتند که اثرات پس‌لرزه می‌تواند در بعضی مواقع بیش‌تر از زلزله اصلی باعث صدمه شود. یعنی سازه‌هایی که در لرزش اصلی آسیب کم‌تری داشتند در پس‌لرزه‌ها متوجه آسیب بیش‌تری شدند [۷-۱۰].

**گودا<sup>۵</sup>** مطالعه‌ای بر روی انتخاب رکوردهای پس‌لرزه برای تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)<sup>۶</sup> انجام داد. او در پژوهش خود

عنوان کرد که یک ویژگی مهم برای انتخاب رکورد، شکل طیفی پاسخ است و بزرگی زلزله اصلی به‌طور متوسط از بزرگی پس‌لرزه بیش‌تر است و در این مقاله نشان داد که اثرات انتخاب رکورد پس‌لرزه، بر ارزیابی آسیب‌پذیری پس‌لرزه مؤثر است [۱۱].

**نورالدین و همکاران**، تأثیر دستگاه‌های اتلاف انرژی بر روی آسیب سازه‌ها تحت پس‌لرزه را بررسی کردند. آن‌ها دو سازه سه و هشت طبقه تحت پس‌لرزه با ۱۲ رکورد به همراه سه سطح دریافت لرزه اصلی (۰/۰۷۵، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۳۵) را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مقاوم‌سازی با میراگر برای کاهش آسیب به سازه‌هایی که تحت توالی لرزه اصلی-پس‌لرزه، هستند، اهمیت دارد و بهبود بسیاری ایجاد شده است [۱۲].

**ابریک<sup>۷</sup>** به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن مسلح با آلیاژهای حافظه‌دار شکلی تحت خطر لرزه‌ای متوالی پرداخته است. ساختمان‌های انتخاب‌شده تحت تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی با استفاده از ۲۰ رکورد زلزله مختلف مقیاس‌بندی‌شده در سطوح مختلف شتاب قرار گرفتند. وی در این مقاله ذکر کرده است که آسیب ممکن است در زلزله‌های متوالی جمع شده و آثار خرابی بیش‌تری باقی گذارد [۱۳].

**کو<sup>۸</sup>** و همکارش به ارزیابی سازه تحت آنالیز دینامیکی فزاینده (تحت لرزه اصلی-پس‌لرزه) پرداختند زیرا پس‌لرزه‌ها همواره سبب آسیب گسترده‌تر شده است. پژوهشگران این مقاله از ۱۳ رکورد اصلی استفاده و همان رکوردهای اصلی را به عنوان پس‌لرزه به سازه وارد نموده و سپس نمودارهای IDA را با توجه به دریافت طبقات و دریافت پسماند برای هر رکورد رسم کردند. نتایج این مطالعه نشان داد زمانی که پس‌لرزه اعمال شده است، پاسخ سازه افزایش یافته است [۱۴].

ارزیابی رفتار سازه‌ها عموماً بر اساس زلزله طرح انجام می‌شود و اثرات تشدیدکننده پس‌لرزه در سیستم‌های لرزه‌ای نوین کم‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرد. این درحالی است که در بسیاری موارد، اثرات پس‌لرزه بر پاسخ سازه (به‌ویژه در مقادیر دریافت پسماند) خسارت وارده به آن را افزایش می‌دهد. از طرفی با توجه به نتایج گذشته، زلزله و پس‌لرزه‌هایی که به‌صورت مصنوعی ایجاد می‌شوند، عموماً نتایج دقیقی از خود باقی نمی‌گذارند. بنابراین بررسی رفتار سازه تحت لرزه اصلی و

<sup>7</sup> Abraik

<sup>8</sup> Qu

<sup>1</sup> Shape Memory Alloy

<sup>2</sup> Gur

<sup>3</sup> Zhang

<sup>4</sup> Kezia

<sup>5</sup> Goda

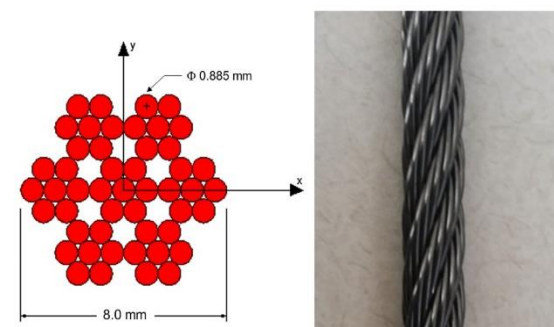
<sup>6</sup> Incremental Dynamic Analysis



پس لرزه‌ها از زلزله‌های واقعی، مهم است. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر پس لرزه بر پاسخ سیستم‌های مهاربندی مجهز به میراگرهای SMA و قاب خمشی و مقایسه نتایج پاسخ‌های تحلیل در دو سیستم بدون مهاربند و دارای مهاربند مجهز به میراگر SMA است. برای این منظور یک قاب ۴ طبقه با و بدون مهاربند مجهز به میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی از مطالعات گذشته انتخاب و ضمن انجام صحت‌سنجی، پس از بررسی نتایج تحلیل مودال و استاتیکی غیرخطی به بررسی قاب‌ها تحت تحلیل دینامیکی افزایشی پرداخته شد. در ادامه روش کار و نتایج به‌طور کامل شرح داده می‌شود.

## ۲- صحت‌سنجی و مدل‌سازی سازه‌های مورد بررسی

همان‌طور که اشاره شد در پژوهش حاضر مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Opensees انجام شده است [۱۵]. این نرم‌افزار در واقع یک کتابخانه قدرتمند به‌صورت کد باز است و شامل مجموعه‌ای از ابزارها جهت شبیه‌سازی سیستم‌های غیرخطی است. برای اطمینان از دقت نتایج حاصله، در ابتدا نتایج آزمایشگاهی یک کابل آلیاژ حافظه‌دار شکلی به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی انتخاب شده است [۱۶]. برای این منظور از مقاله اوزبولت<sup>۱</sup> و همکاران به‌عنوان نمونه آزمایشگاهی استفاده شد [۱]. پیکربندی کابل مورد آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. جنس این کابل متشکل از نیکل و تیتانیوم که پرکاربردترین آلیاژ در این حیطه است، می‌باشد و شامل رفتارهای مکانیکی منحصربه‌فردی مانند خاصیت شبه‌ارتجاعی و اثر حافظه‌داری است.



شکل ۱- نمای کلی از کابل آلیاژ حافظه‌دار شکلی

(اوزبولت و همکاران [۱])

هندسه این کابل شامل هفت رشته است که هر رشته نیز از هفت سیم تشکیل شده است و به‌صورت مارپیچی آرایش شده‌اند. قطر هر سیم ۰/۰۸۸۵ میلی‌متر و قطر خارجی ۸ میلی‌متر است. برای صحت‌سنجی، از یک فنر و مصالح

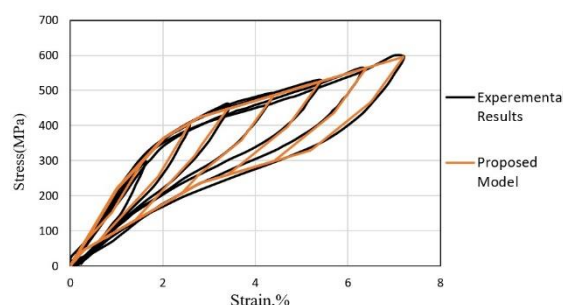
Selfcentering که در کتابخانه نرم‌افزار Opensees موجود می‌باشد، استفاده شد. در واقع این مدل شامل دو ماده مرکزگرا به موازات یک فنر چندخطی است که دو ماده مرکزگرا عمدتاً برای به‌دست‌آوردن سطح شکل پرچم منحنی هیستریزس مورد استفاده قرار می‌گیرند و فنر چندخطی سختی کل مدل مکانیکی را تنظیم می‌کند. با استفاده از اطلاعات مربوط به پارامترهای پیشنهادی مدل کابل آلیاژ حافظه‌دار شکلی که در جدول (۱) بیان شده است، از طریق نرم‌افزار Opensees ساخته شده است.

جدول ۱- پارامترهای پیشنهادی کابل آلیاژ حافظه‌دار شکلی (شی<sup>۲</sup> و

همکاران [۱۶])

| Parameter                                                 | Model |     |     |
|-----------------------------------------------------------|-------|-----|-----|
|                                                           | 1     | 2   | 3   |
| Initial stiffness (MPa/%)                                 | 80    | 90  | 50  |
| Post-transformation stiffness (MPa/%)                     | 13    | 13  | 13  |
| Forward transformation stress (MPa)                       | 160   | 90  | 140 |
| Ratio of forward to reverse activation stress ( $\beta$ ) | 1.0   | 0.7 | 0.0 |

نتایج مقایسه دو مدل عددی و آزمایشگاهی در شکل (۲) ارائه شده است. با توجه به شکل (۲) نتیجه روند مدل‌سازی مورد استفاده در نرم‌افزار Opensees، جهت شبیه‌سازی آلیاژ حافظه‌دار شکلی قابل اعتماد است به‌طوری‌که مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که دو نمودار تقریباً بر هم منطبق هستند، نقاط ماکزیمم و مینیمم حلقه‌ها به یک‌دیگر نزدیک است و درصد خطا کم است (در بیش‌ترین حالت نزدیک به ۵٪).



شکل ۲- مقایسه نمودار تنش-کرنش در حالت عددی و

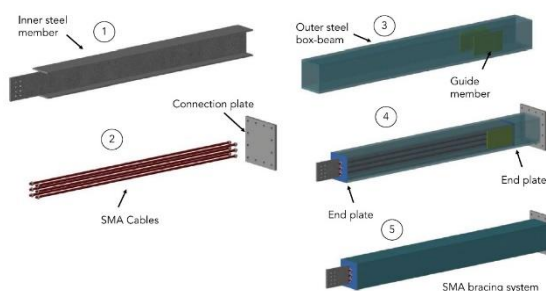
آزمایشگاهی

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی عملکرد مطلوبی در کنترل و جلوگیری از خرابی و استهلاک انرژی دارند [۱۷ و ۱۸]؛ اما به‌علت قیمت بالای ماده آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، امکان

<sup>۲</sup> Shi

<sup>۱</sup> Ozbulut

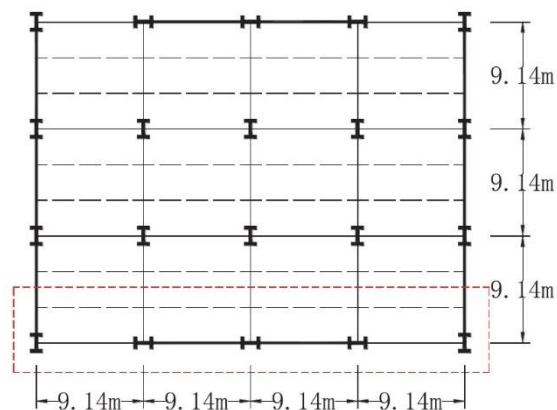
استفاده از آن‌ها به‌طور گسترده در سازه وجود ندارد و باید آن‌ها را طوری طراحی و اجرا کرد که هم از لحاظ اقتصادی به‌صرفه باشد و هم حداکثر بازدهی را در یک سازه ایجاد کند؛ به همین دلیل استفاده از یک میراگر آلیاژ حافظه‌دار، پیشنهاد شده است. در این پژوهش از یک سیستم میراگر مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در عضو مهاربندی استفاده شده است که از مقاله شی و همکاران [۱۹] انتخاب شده و نمای مقطع آن مطابق شکل (۳) می‌باشد. این سیستم از یک عضو داخلی، یک عضو خارجی، تاندونی از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی، دو صفحه انتهایی، دو صفحه هدایت‌کننده و یک عضو اتصال تشکیل شده است.



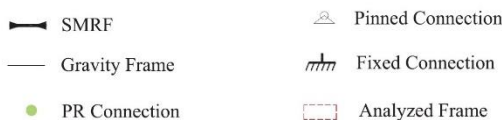
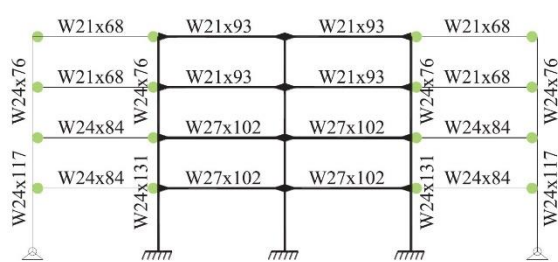
شکل ۳- نمای مقطع میراگر مورد استفاده در این پژوهش (شی و همکاران [۱۹])

به‌منظور بررسی اثر پس‌لرزه و مقایسه عملکرد قاب خمشی و قاب مهاربندی شامل میراگر SMA، از مجموعه قاب‌های موجود در مطالعه شی و همکاران [۱۶] استفاده شده است. بر اساس مقاله مذکور ابتدا قاب خمشی مدل‌سازی شده و سپس همان قاب با مقطع کاهش‌یافته مدل می‌شود و در انتها بر روی مهاربند قاب کاهش‌یافته، میراگری از جنس آلیاژ حافظه‌دار قرار داده می‌شود و تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار می‌گیرد و نمودار بار افزون آن‌ها رسم می‌شود.

ساختمان نمونه اولیه که برای مدل‌سازی قاب خمشی فولادی با ۴ دهانه و ۴ طبقه انتخاب شده است، یک ساختمان اداری است که در خاک نوع D در لس‌آنجلس قرار دارد. اندازه دهانه‌های این قاب ۹/۱۴×۹/۱۴ متر است که پلان آن در شکل (۴) نمایش داده شده است [۱۶]. ارتفاع طبقه اول برابر با ۴/۶ متر و ارتفاع سایر طبقات ۳/۶ متر است. اندازه و نوع مقاطع در شکل (۵) و همچنین بارگذاری آن در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۴- پلان قاب خمشی (شی و همکاران [۱۶])



شکل ۵- قاب خمشی ویژه (شی و همکاران [۱۶])

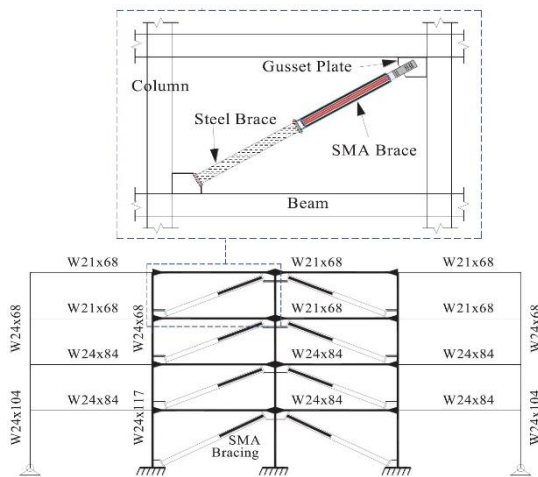
جدول ۲- مقادیر وزن لرزه‌ای در طبقات

| Floor | Calculated | Units | Design | Units |
|-------|------------|-------|--------|-------|
| Roof  | 1181       | kips  | 1200   | kips  |
| 4     | 1054       | kips  | 1050   | kips  |
| 3     | 1054       | kips  | 1050   | kips  |
| 2     | 1064       | kips  | 1070   | kips  |
| total | 4349       | kips  | 4370   | kips  |

به‌منظور مدل‌سازی این قاب، از روش مفصل متمرکز (ایبارا-مدینا-کراوینکلر)<sup>۲</sup> که زوال مقاومت و سختی را در پی دارد، استفاده شده است [۲۰]. در این روش، جهت انجام آنالیز غیرخطی برای شبیه‌سازی مفصل با استفاده از مدل متمرکز شده پلاستیک که متشکل از المان تیر-ستون الاستیک متصل به فنر در هر دو انتهای تیر و ستون است و رفتار غیرخطی را مدل‌سازی می‌کند، استفاده می‌شود. فنرها در این مدل از نوع المان به طول صفر هستند. همچنین، چشمه‌های اتصال که محل اتصال تیرها و ستون‌ها هستند نیز مدل‌سازی شده‌اند. جهت

<sup>2</sup> Ibarra-Medina-Krawinkler

<sup>1</sup> Pushover Curve



شکل ۷- قاب مهاربندی مجهز به میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی  
(شی و همکاران [۱۶])

## ۲-۱ تحلیل مودال و تحلیل استاتیکی غیرخطی

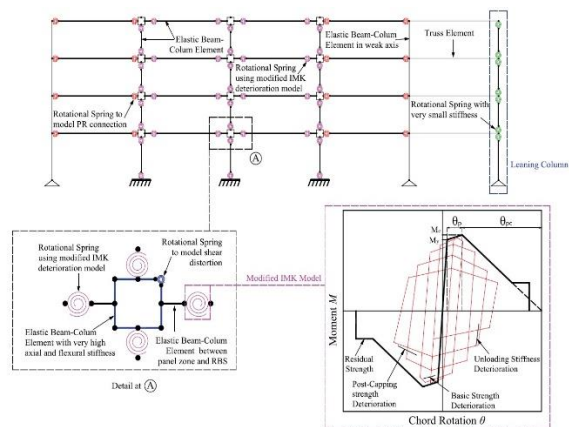
در تحلیل مودال، پریودهای مود اول که بیش‌ترین پریود است در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر زمان تناوب متناظر با مود اول در Opensees

| نوع قاب                               | زمان تناوب |
|---------------------------------------|------------|
| قاب خمشی                              | ۱/۰۲۹      |
| قاب خمشی با مقطع کاهش‌یافته           | ۱/۱۸       |
| قاب مهاربندی مجهز به میراگر با شکست   | ۱/۱۰۵      |
| قاب مهاربندی مجهز به میراگر بدون شکست | ۱/۱۰۵      |

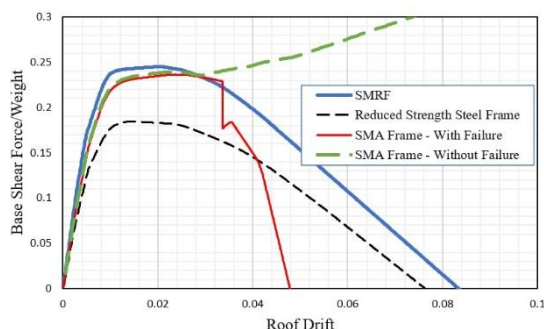
جهت بررسی پاسخ سازه نظیر برش پایه و جابه‌جایی نسبی از تحلیل استاتیکی غیرخطی یا تحلیل بارافزون، استفاده می‌شود. برای این منظور، چهار نمونه قاب شامل مدل قاب خمشی ویژه، قاب خمشی با مقطع کاهش‌یافته، قاب مهاربندی مجهز به میراگر بدون شکست و قاب مهاربندی مجهز به میراگر با شکست، از تحقیق شی [۱۶] در نرم‌افزار Opensees ایجاد شد و نمودارهای بارافزون چهار قاب ذکرشده، بر اساس برش پایه و دریافت بام رسم شده است. برای به‌دست‌آوردن منحنی بارافزون، بار جانبی به نسبت سختی و جرم وارد شده است. قاب خمشی ویژه برای دستیابی به تغییرمکان هدف که برابر با ۱۰٪ است، پوش داده می‌شود و به همین ترتیب قاب کاهش‌یافته و قاب مجهز به میراگر، برای ایجاد تغییرمکان ۸٪، پوش داده شد. در قاب مهاربندی مجهز به میراگر، هنگامی که اثر شکست مد نظر است، تحلیل با در نظر گرفتن کرنش نهایی کابل آلیاژی انجام می‌شود. نمودارهای بارافزون به‌دست‌آمده در شکل (۸) نمایش داده شده است.

شبیه‌سازی رفتار واقعی سازه در هنگام بارگذاری، از ماده Bilin در Opensees استفاده شده است. این ماده، به جهت تعیین رفتار چرخشی اتصالات سازه، مدل‌سازی اثرات سخت‌شوندگی کرنشی و کاهش سختی، استفاده می‌شود. جزئیات مدل مفصل متمرکز و منحنی ظرفیت مصالح Bilin در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- جزئیات مدل‌سازی مفصل متمرکز (ایبارا و همکاران [۲۰])

جهت سهولت در محاسبات، سازه‌ها به صورت دوبعدی طراحی شده‌اند و اثرات P-Delta ناشی از بار ثقلی به صورت یک ستون تکیه‌گاهی دوسر مفصل که توسط یک لینک صلب به سازه اصلی متصل شده است، در نظر گرفته می‌شود. در ادامه یک قاب با سیستم مهاربندی که مهاربندهای آن به صورت قطری ایجاد شده و سختی قابل مقایسه‌ای با قاب خمشی ویژه در بخش قبل داشته باشد، در نظر گرفته شده است. برای رسیدن به این هدف مقاطع تیر و ستون ذکرشده در بخش قبل را کاهش داده و سپس بر روی قاب با مقطع کاهش‌یافته، مهاربند قطری نصب می‌شود و در آخر بر روی مهاربند، میراگری از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی که در بخش‌های قبل ویژگی آن ذکر شد، قرار داده می‌شود. نمای کلی و مقاطع این قاب مهاربندی در شکل (۷) ارائه شده است. بر اساس مطالعه شی و همکاران [۱۶] برای قاب مهاربندی‌شده مجهز به میراگر، مساحت و طول کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار شکلی برای طبقات اول و دوم به ترتیب برابر با ۶۰۰ میلی‌متر مربع و ۲۰۰۰ میلی‌متر و برای طبقات سوم و چهارم به ترتیب برابر با ۳۵۰ میلی‌متر مربع و ۱۷۰۰ میلی‌متر است.



شکل ۸- نمودارهای بار افزون به دست آمده مطالعه حاضر برای قاب‌های خمشی، کاهش یافته و مهاربندی مجهز به میراگر با و بدون شکست

با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود که در قاب خمشی ویژه، مقاومت سازه تا دررفت ۳٪ ماکزیمم مقدار خود را تجربه کرده است و با ادامه بارگذاری، کاهش سختی و مقاومت سیستم مشاهده می‌شود و سیر نزولی آن تا نزدیکی ۱۰٪ ادامه می‌یابد و سازه دچار فروپاشی می‌گردد و همچنین در قاب خمشی ویژه با مقاطع کاهش یافته، سازه مقاومت کمتری دارد و زودتر دررفت متناظر با ۳٪ را تجربه می‌کند. در قاب مجهز به میراگر، زمانی که شکست مهاربند در نظر گرفته می‌شود، شکست اولیه نمودار در طبقه اول رخ می‌دهد که کرنشی برابر ۰/۰۳۲ ایجاد می‌شود و باعث کاهش ناگهانی مقاومت سازه می‌گردد. از سوی دیگر، هنگامی که برای مهاربندهای آلیاژ حافظه‌دار، شکستی در نظر گرفته نمی‌شود، مقاومت این قاب پس از تسلیم اولیه قاب برای رانش سقف تا ۰/۰۴ تقریباً ثابت باقی می‌ماند و بعد از آن به دلیل رفتار سخت‌شوندگی مهاربندهای مجهز به میراگر، افزایش می‌یابد. در حالت بدون شکست، در صورتی که قاب در معرض زلزله شدید قرار گیرد، پاسخ بیش از حد تخمین زده می‌شود.

### ۳- نتایج آنالیز دینامیکی افزایشی

به منظور بررسی پاسخ سازه فولادی مهاربندی مجهز به میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی و قاب خمشی ویژه با مقطع کاهش یافته، از تحلیل دینامیکی افزایشی استفاده شده است. این فرایند، درک مناسبی از نیازهای لرزه‌ای و تغییرات رفتار سازه‌ها توسط سطوح

مختلف زمین لرزه را ارائه می‌دهد. درواقع این روش، یک تحلیل دینامیکی غیرخطی است که در آن مجموعه‌ای از رکوردهای لرزه‌ای جهت ارزیابی پاسخ سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر رکورد لرزه‌ای تحت گستره‌ای از سطوح شتاب طیفی متفاوت مقیاس می‌شود تا رفتار سازه را از حد الاستیک تا لحظه فروپاشی نشان دهد. در هر مرحله ضریب مقیاس در رکورد لرزه‌ای اعمال شده و سازه تحت تحلیل دینامیکی در سطح شتاب معین قرار می‌گیرد، پس از اتمام هر مرحله خروجی پاسخ سازه شامل دررفت، دررفت پسماند، شتاب و ... قابل ثبت می‌باشد. در نتیجه مجموعه نتایج، تحلیل دقیق‌تری از روند عملکرد سازه ارائه خواهد داد. در این پژوهش جهت اعمال تحلیل دینامیکی افزایشی از روش هانت-فیل<sup>۱</sup> استفاده شده است.

### ۳-۱ سناریوی انتخاب لرزه اصلی و پس لرزه

با توجه به اهمیت پس لرزه و شناخت اثرات آن توسط آنالیز دینامیکی غیرخطی، در این پژوهش از ۲۹ رکورد لرزه اصلی و پس لرزه واقعی ثبت شده، برای انجام تحلیل استفاده شده است. رکوردهای مورد بررسی در این پژوهش بر اساس مطالعات هان<sup>۲</sup> و همکاران [۲۱] انتخاب و جزئیات رکوردها در جدول (۴) نشان داده شده است. همچنین طیف پاسخ زلزله و پس لرزه در شکل (۹) ارائه شده است. در زلزله‌های واقعی عموماً هر لرزه اصلی از چندین پس لرزه تشکیل شده است، با توجه به این که در نظر گرفتن تمامی پس لرزه‌ها زمان تحلیل را افزایش خواهد داد، لذا در تحقیق حاضر از میان توالی پس لرزه‌ها، تنها یک پس لرزه با حداکثر بزرگا، انتخاب شده است. اطلاعات مربوط به زلزله‌ها از دو پایگاه اطلاع داده CESMD<sup>۳</sup> و PEER<sup>۴</sup> استخراج شده است. مکان وقوع زلزله‌های انتخابی، غرب ایالات متحده می‌باشد و در گروه زلزله‌های دور از گسل طبقه‌بندی شده‌اند. برای مشخص شدن اثرات پس لرزه و مقایسه آن با لرزه اصلی، ابتدا لرزه اصلی به تنهایی تا لحظه فروریزش مورد تحلیل قرار گرفت و سپس پس لرزه‌ها به صورت یک زوج لرزه اصلی-پس لرزه، بررسی شدند. برای مشاهده اثرات پس لرزه، ابتدا سه سطح دررفت ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴ انتخاب شد و زلزله اصلی در هر مرحله تا رسیدن به سطوح دررفت اشاره شده مقیاس شده است.

<sup>1</sup> Hunt-Fill

<sup>2</sup> Han

<sup>3</sup> Center for Engineering Strong Motion Data

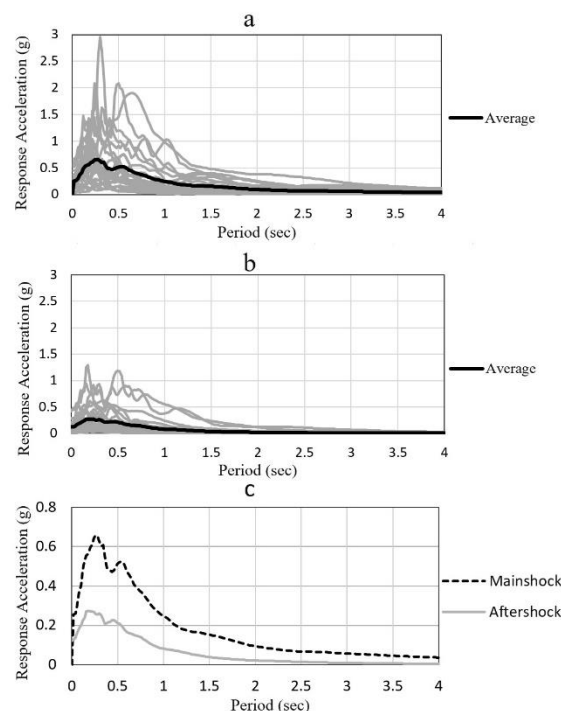
<sup>4</sup> Pacific Earthquake Engineering Research Center

جدول ۴- رگردهای اصلی و پس‌لرزه‌های متناظر با آن رکورد (هان و همکاران [۲۱])

| Record | Earthquake       | Magnitude | Record name                               | Station name                | Database |
|--------|------------------|-----------|-------------------------------------------|-----------------------------|----------|
| 1      | Coalinga         | 6.36      | NGA_no_368_H-PVY045.AT2                   | Pleasant Valley P.P.-Yard   | PEER NGA |
|        |                  | 5.09      | NGA_no_383_A-PVY045.AT2                   |                             |          |
| 2      | Coalinga         | 6.36      | NGA_no_368_H-PVY135.AT2                   | Pleasant Valley P.P.-Yard   | PEER NGA |
|        |                  | 5.09      | NGA_no_383_A-PVY135.AT2                   |                             |          |
| 3      | Chalfant Valley  | 6.19      | ChalfantValley86_CE54171P.V2              | Number 54171                | CESMD    |
|        |                  | 5.44      | ChalfantValley86C_CE54171P.V2             |                             |          |
| 4      | Chalfant Valley  | 6.19      | ChalfantValley86_CE54428P.V2              | Number 54428                | CESMD    |
|        |                  | 5.44      | ChalfantValley86B_CE54428P.V2             |                             |          |
| 5      | Chalfant Valley  | 6.19      | ChalfantValley86_CE54424P.V2              | Number 54424                | CESMD    |
|        |                  | 5.44      | ChalfantValley86B_CE54424P.V2             |                             |          |
| 6      | Imperial Valley  | 6.53      | NGA_no_162_H-CX0315.AT2                   | Calexico Fire STA           | PEER NGA |
|        |                  | 5.01      | NGA_no_195_A-CX0315.AT2                   |                             |          |
| 7      | Imperial Valley  | 6.53      | NGA_no_174_H-E11140.AT2                   | El Centro Array 11          | PEER NGA |
|        |                  | 5.01      | NGA_no_199_A-E11140.AT2                   |                             |          |
| 8      | Imperial Valley  | 6.53      | NGA_no_178_H-E03230.AT2                   | El Centro Array 3           | PEER NGA |
|        |                  | 5.01      | NGA_no_201_A-E03230.AT2                   |                             |          |
| 9      | Imperial Valley  | 6.53      | NGA_no_172_H-E01230.AT2                   | El Centro Array 1           | PEER NGA |
|        |                  | 5.01      | NGA_no_197_A-E01230.AT2                   |                             |          |
| 10     | Imperial Valley  | 6.53      | NGA_no_169_H-DLT262.AT2                   | Delta                       | PEER NGA |
|        |                  | 5.01      | NGA_no_196_A-DLT262.AT2                   |                             |          |
| 11     | Livermore        | 5.80      | Livermore80A_CE57187P.V2                  | Number 57187                | CESMD    |
|        |                  | 5.42      | Livermore80B_CE57187P.V2                  |                             |          |
| 12     | Livermore        | 5.80      | Livermore80A_CE67070P.V2                  | Number 67070                | CESMD    |
|        |                  | 5.42      | Livermore80B_CE67070P.V2                  |                             |          |
| 13     | Livermore        | 5.80      | NGA_no_212_A-DVD246.AT2                   | Del Valle Dam               | PEER NGA |
|        |                  | 5.42      | NGA_no_219_B-DVD246.AT2                   |                             |          |
| 14     | Livermore        | 5.80      | NGA_no_215_A-SRM070.AT2                   | San Ramon                   | PEER NGA |
|        |                  | 5.42      | NGA_no_219_B-DVD246.AT2                   |                             |          |
| 15     | Mammoth Lakes    | 6.06      | NGA_no_231_I-LUL090.AT2                   | Long Valley Dam UPR L       | PEER NGA |
|        |                  | 5.9       | NGA_no_250_L-LUL090.AT2                   |                             |          |
| 16     | Mammoth Lakes    | 6.06      | NGA_no_231_I-LUL090.AT2                   | Long Valley Dam UPR L       | PEER NGA |
|        |                  | 5.70      | NGA_no_243_B-LUL090.AT2                   |                             |          |
| 17     | Mammoth Lakes    | 6.06      | NGA_no_231_I-LUL090.AT2                   | Long Valley Dam UPR L       | PEER NGA |
|        |                  | 5.69      | NGA_no_234_J-LUL090.AT2                   |                             |          |
| 18     | Northridge       | 6.69      | NGA_no_963_ORR090.AT2                     | Castaic-Old Ridge Route     | PEER NGA |
|        |                  | 5.93      | NGA_no_1676_CASTA090.AT2                  |                             |          |
| 19     | Northridge       | 6.69      | NGA_no_1039_MRP090.AT2                    | Moorpark                    | PEER NGA |
|        |                  | 5.93      | NGA_no_1681_MPARK090.AT2                  |                             |          |
| 20     | Northridge       | 6.69      | NGA_no_1005_TEM090.AT2                    | Los Angeles-Temple and Hope | PEER NGA |
|        |                  | 5.28      | NGA_no_1712_TEMPL090.AT2                  |                             |          |
| 21     | Northridge       | 6.69      | NGA_no_971_EL180.AT2                      | Elizabeth Lake              | PEER NGA |
|        |                  | 5.93      | NGA_no_1677_ELIZL180.AT2                  |                             |          |
| 22     | Northridge       | 6.69      | NGA_no_945_ANA180.AT2                     | Anaverde Valley-City Ranch  | PEER NGA |
|        |                  | 5.93      | NGA_no_1675_ANAVE180.AT2                  |                             |          |
| 23     | Northridge       | 6.69      | NGA_no_990_LAC180.AT2                     | Los Angeles-City Terrace    | PEER NGA |
|        |                  | 5.93      | NGA_no_1678_CTYTE180.AT2                  |                             |          |
| 24     | Northridge       | 6.69      | NGA_no_1007_UNI095.AT2                    | LA-Univ. Hospital GR        | PEER NGA |
|        |                  | 5.93      | NGA_no_1680_UNIHP090.AT2                  |                             |          |
| 25     | Petrolia         | 7.20      | Petrolia_25Apr1992_CE89530P.V2            | Number 89530                | CESMD    |
|        |                  | 6.70      | PetroliaAftershock2_26Apr1992_CE89530P.V2 |                             |          |
| 26     | Petrolia         | 7.20      | Petrolia_25Apr1992_CE89156P.V2            | Number 89156                | CESMD    |
|        |                  | 6.50      | PetroliaAftershock1_26Apr1992_CE89156P.V2 |                             |          |
| 27     | Petrolia         | 7.20      | Petrolia_25Apr1992_CE89509P.V2            | Number 89509                | CESMD    |
|        |                  | 6.50      | PetroliaAftershock1_26Apr1992_CE89509P.V2 |                             |          |
| 28     | Whittier Narrows | 5.99      | NGA_no_615_A-DWN270.AT2                   | Downey                      | PEER NGA |
|        |                  | 5.27      | NGA_no_709_B-DWN270.AT2                   |                             |          |
| 29     | Whittier Narrows | 5.99      | NGA_no_663_A-MTW000.AT2                   | Mt. Wilson                  | PEER NGA |
|        |                  | 5.27      | NGA_no_715_B-MTW000.AT2                   |                             |          |



در ادامه با مقیاس کردن شتاب طیفی پس لرزه تا رسیدن به سطح فروپاشی سازه، تحلیل ادامه داشته و در آخر نتایج آن شرح داده شده است.



شکل ۹- طیف شتاب زلزله (a) لرزه اصلی (b) پس لرزه (c) مقایسه میانگین طیف شتاب زلزله اصلی و پس لرزه

با توجه به شکل (۹)، در لرزه اصلی طیف دامنه شتاب بیش تر و در پس لرزه، طیف دامنه شتاب زلزله کاهش یافته است.

### ۳-۲ منحنی های IDA

یکی از نتایجی که از تحلیل دینامیکی افزایشی به دست می آید، نمودارهای IDA هستند که بیانگر مقادیر شتاب طیفی در مقابل ماکزیمم دررفت طبقات است. این نمودارها تحت آنالیز دینامیکی بر روی قاب مهاربندی مجهز به SMA و همچنین قاب خمشی، تحت زلزله اصلی و پس لرزه پس از تجربه سه سطح دررفت ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴، ناشی از لرزه اصلی به دست آمده است.

### ۳-۲-۱ نتایج منحنی های IDA مربوط به قاب SMA

در شکل (۱۰) منحنی های IDA قاب مهاربندی مجهز به میراگر SMA تحت لرزه اصلی و تجربه سه سطح دررفت پس لرزه ناشی از لرزه اصلی نشان داده شده است. در واقع در گام نخست قاب ها تحت لرزه اصلی تا رسیدن به حد فروپاشی تحت آنالیز دینامیکی افزایشی قرار گرفته اند. در گام بعد قاب تحت لرزه

اصلی تا رسیدن به دررفت ۰/۰۱ مقیاس شده است و سپس رکورد پس لرزه تا رسیدن به حد فروپاشی به آن اعمال شده است. به همین ترتیب درحالت های بعدی نیز یکبار قاب تحت لرزه اصلی تا دررفت ۰/۰۲۵ قرار گرفته و سپس پس لرزه اعمال شده و در آخر نیز قاب تحت لرزه اصلی تا مقدار دررفت ۰/۰۴ قرار گرفته و بعد از آن مجدد تا رسیدن به حد فروپاشی تحت پس لرزه قرار گرفته است تا اثرات پس لرزه تحت مقادیر دررفت های متفاوت بررسی شود. در لرزه اصلی، نمودارهای IDA عموماً از نقاط صفر شروع شده و تا هنگام فروپاشی فرایند را طی کرده است؛ در صورتی که در پس لرزه ها نقاط شروع، متفاوت می باشد. این نتایج با نتایج گودا [۱۱] هم خوانی دارد.

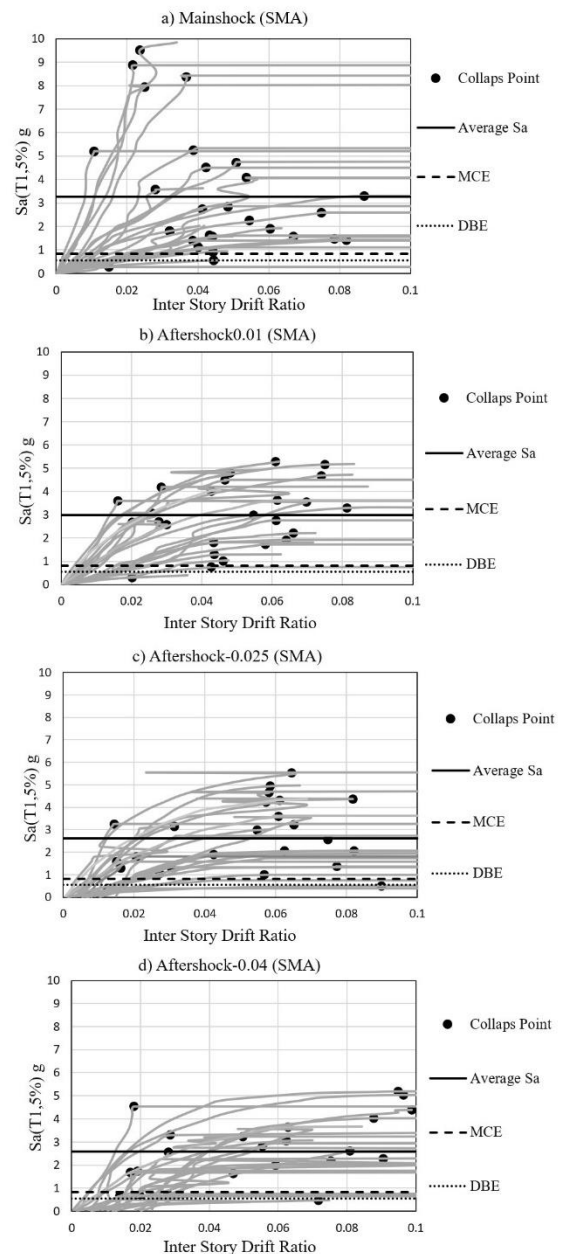
مقدار شتاب طیفی هنگامی که پس لرزه با سطح دررفت ۰/۰۴ رخ داده است، نسبت به حالت لرزه اصلی، ۲۱٪ کاهش داشته است. در نتیجه همان طور که انتظار می رود سازه با تجربه لرزه اصلی و به دنبال آن پس لرزه با سطح دررفت ۰/۰۴ زودتر و در سطح شتاب طیف پایین تر مستعد فروریزش است. همچنین مقدار شتاب طیفی برای لرزه اصلی نسبت به پس لرزه با سطح دررفت ۰/۰۲۵، معادل با ۱۹٪ افزایش و نسبت به پس لرزه با سطح دررفت ۰/۰۱، برابر با ۸٪ افزایش داشته است. زیرا تحت لرزه اصلی با رسیدن به دررفت های اشاره شده، آسیب های احتمالی در سازه ایجاد شده است و در نتیجه پس از اعمال پس لرزه، تقاضای پاسخ در سازه و آسیب ها افزایش پیدا کرده و ظرفیت سازه کاهش می یابد. همچنین با مشاهده نمودارهای مربوط به پس لرزه و نتایج مرتبط با متوسط شتاب طیفی و مقایسه آن ها، همان طور که انتظار می رفت، هرچه لرزه اصلی شتاب طیفی بالاتری تجربه کرده است، تحت پس لرزه با همان شرایط، خسارت و آسیب بیش تری دیده و ظرفیت سازه کم تر شده است. بنابراین متوسط شتاب طیفی پس لرزه با دررفت ۰/۰۱، نسبت به پس لرزه با دررفت ۰/۰۲۵ معادل با ۱۲٪ افزایش دارد و نسبت به پس لرزه با دررفت ۰/۰۴، افزایشی برابر با ۱۴٪ را نشان داده است.



## ۳-۲-۲ نتایج منحنی‌های IDA مربوط به قاب خمشی

در شکل (۱۱) منحنی‌های IDA قاب خمشی تحت لرزه اصلی و اعمال پس‌لرزه پس از تجربه سه سطح دررفت ناشی از لرزه اصلی نشان داده شده است. در منحنی IDA در سازه با قاب خمشی، هنگامی که قاب تحت زلزله اصلی قرار دارد، شتاب طیفی تا حدود ۹g پیش رفته است که این مقدار در پس‌لرزه‌ها حدوداً برابر با مقدار ۵g است. مقدار شتاب طیفی در لرزه اصلی نسبت به پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۴ ناشی از لرزه اصلی، معادل با ۱۶٪ افزایش داشته و نسبت به دو پس‌لرزه متناظر با دررفت ۰/۰۲۵ و ۰/۰۱ به ترتیب برابر با ۱۳٪ و ۳٪ افزایش داشته است. از سوی دیگر، با مقایسه مقادیر شتاب طیفی متوسط در سطوح پس‌لرزه، مشاهده شد که پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۱، به دلیل پیش‌رفتن لرزه اصلی تا مقدار دررفت ۰/۰۱ و سپس اعمال پس‌لرزه، نسبت به باقی سطوح دررفت مقیاس شده، افزایش دارد به‌طوری‌که نسبت به پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۲۵ معادل با ۱۰٪ و با دررفت ۰/۰۴، به میزان ۱۴٪ افزایش دارد.

در هر دو قاب مشاهده شده است که قاب تحت پس‌لرزه‌ها، دررفت بیشتری را تجربه می‌کند و نقاط فروریزش، در پس‌لرزه‌ها به‌خصوص در پس‌لرزه با سطح دررفت ۰/۰۴، شتاب طیفی متناظر کم‌تری تجربه کرده است. همچنین در سازه مهاربندی مجهز به SMA نسبت به قاب خمشی، در هر چهار نمودار IDA در لرزه اصلی و پس‌لرزه‌ها، میانگین شتاب طیفی فروریزش در سطح بالاتری قرار گرفته است؛ در نتیجه نسبت به سیستم قاب خمشی ظرفیت فروریزش بالاتری داشته است.



شکل ۱۰- نمودارهای IDA قاب مهاربندی مجهز به SMA:

(a) تحت لرزه اصلی (b) تحت پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۱

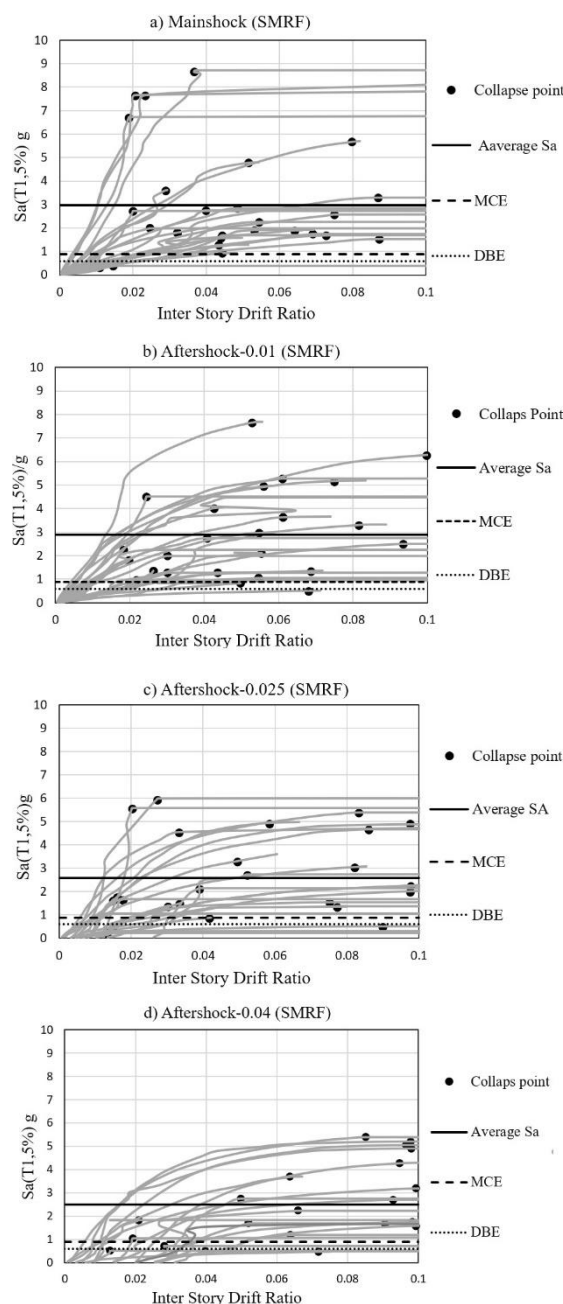
(c) تحت پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۲۵ (d) تحت پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۴

از طرف دیگر با توجه به طیف شتاب رکوردهای مربوط به لرزه اصلی و پس‌لرزه (شکل ۹) همان‌طور که انتظار می‌رفت وقتی سازه تحت لرزه اصلی با شتاب متناظر با دررفت ۰/۰۱ یا ۰/۰۲۵ قرار می‌گیرد چندان دچار آسیب نشده لذا با اعمال پس‌لرزه تا رسیدن به حد فروپاشی نسبت به حالت اعمال لرزه اصلی (تا رسیدن به حد فروپاشی) عملکرد مطلوب‌تری را نشان داده است.

شکندگی که از نتایج تحلیل دینامیکی حاصل می‌شود، تابع لوگ نرمال می‌باشد که بر اساس میانه شدت‌ها رسم شده است. در این پژوهش، در شکل (۱۲) منحنی شکندگی مربوط به قاب خمشی و قاب مهاربندی مجهز به میراگر، تحت لرزه اصلی و پس‌لرزه پس از تجربه دریفت ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴ ناشی از لرزه اصلی رسم شده است. منحنی‌های شکندگی در هر دو قاب تحت پس‌لرزه با در نظر گرفتن دریفت ۰/۰۱ ناشی از لرزه اصلی، در سطح پایین‌تر و احتمال فروریزش کم‌تری اتفاق افتاده است و نسبت به سایر نمودارها در تراز پایین‌تری قرار دارد. علت این امر را می‌توان با توجه به طیف پاسخ شتاب رکوردها این چنین توجیه کرد که عموماً پس‌لرزه‌ها نسبت به لرزه اصلی در سطح شتاب ضعیف‌تری قرار دارند. همچنین تجربه دریفت ۰/۰۱ خسارت چندانی در سازه ایجاد نکرده است. در سناریوهای بعدی یعنی پس‌لرزه با تجربه دریفت ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴ تحت لرزه اصلی، سازه به ترتیب تحت تجمع آسیب و دریفت پسماند بیش‌تری قرار گرفته است و در نتیجه با اعمال پس‌لرزه مستعد آسیب بیش‌تری خواهد بود. بنابراین احتمال فروریزش با افزایش دریفت تحت لرزه اصلی و اعمال پس‌لرزه بیش‌تر شده است. با مقایسه قاب خمشی نسبت به قاب مهاربندی مجهز به میراگر مشاهده شد که اختلاف سطح شتاب طیفی بر حسب درصد بین لرزه اصلی در سطوح شکندگی ۵۰ درصد، ۱۹٪ بیش‌تر است و همچنین در پس‌لرزه با شدت ۰/۰۱، این مقادیر برای احتمال فروریزش ۲۳٪، اختلاف سطح شتاب طیفی در پس‌لرزه با شدت ۰/۰۲۵ برابر با ۲۸٪ و در پس‌لرزه با دریفت ۰/۰۴، معادل با ۳۱٪ شده است.

### ۳-۴ نمودار جابه‌جایی نسبی طبقات

در حین وقوع زلزله، نیروی جانبی به سازه اعمال شده که سبب ایجاد تغییر شکل در سازه می‌شود و بر المان‌های سازه تأثیر منفی می‌گذارد؛ لذا بررسی دریفت طبقات حائز اهمیت است. جهت بررسی دریفت طبقات و میزان خسارت بر سازه، نمودارهای آن رسم شده‌اند. این نمودارها که از نتایج تحلیل IDA به دست آمده است، در سطوح فروریزش ترسیم شده است.



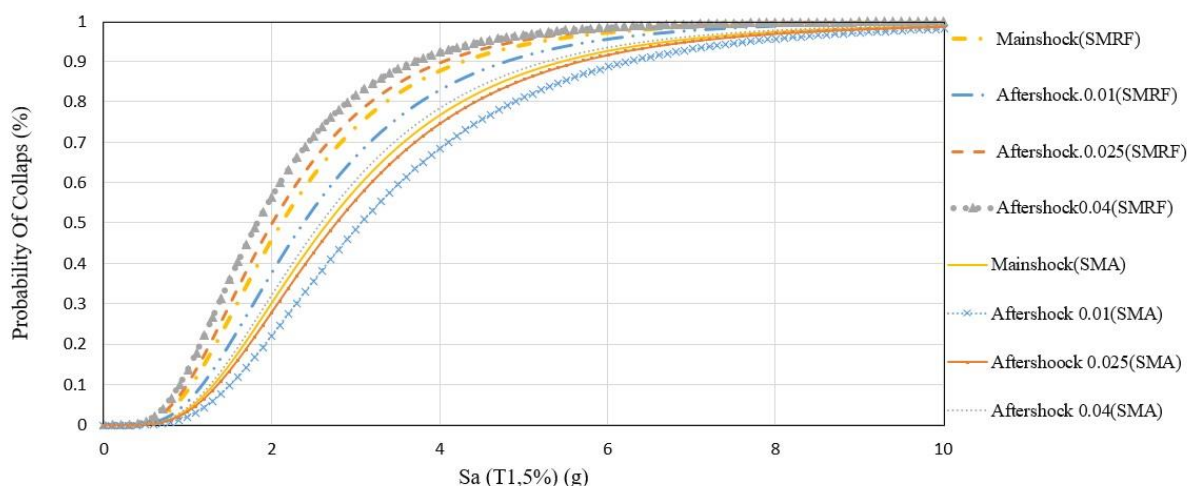
شکل ۱۱- نمودارهای IDA قاب خمشی :

(a) تحت لرزه اصلی (b) تحت پس‌لرزه با دریفت ۰/۰۱

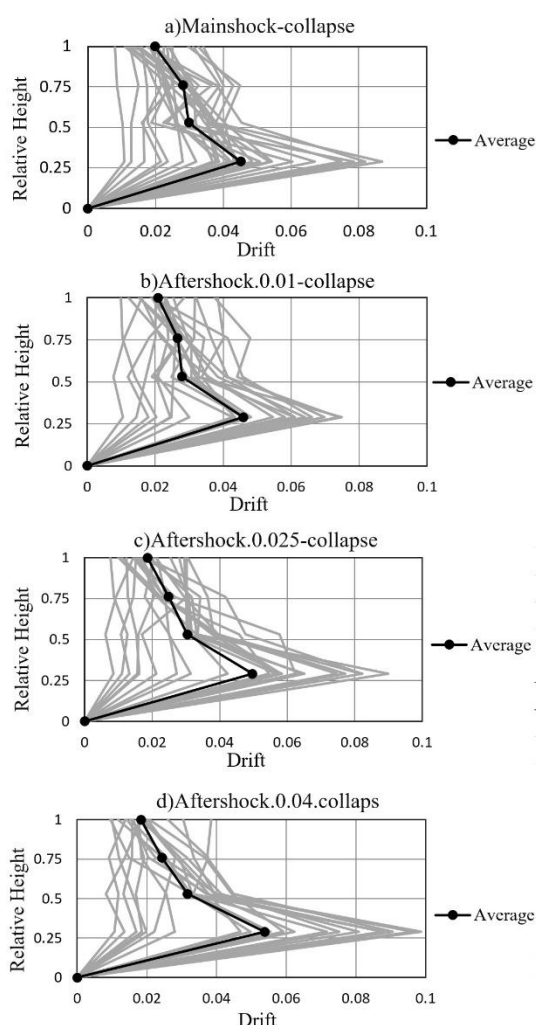
(c) تحت پس‌لرزه با دریفت ۰/۰۲۵ (d) تحت پس‌لرزه با دریفت ۰/۰۴

### ۳-۳ منحنی شکندگی قاب‌ها

جهت مشاهده احتمال فروریزش در هر قاب تحت لرزه اصلی و پس‌لرزه، منحنی‌های شکندگی آن‌ها رسم شده است. منحنی



شکل ۱۲- مقایسه منحنی شکنندگی در دو قاب مهاربندی مجهز به میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی و قاب خمشی تحت لرزه اصلی و پس‌لرزه با سطوح درخت ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴



شکل ۱۳- نمودار درخت طبقات برای قاب مهاربندی مجهز به میراگر:

- (a) تحت لرزه اصلی (b) تحت پس‌لرزه با درخت ۰/۰۱  
(c) تحت پس‌لرزه با درخت ۰/۰۲۵ (d) تحت پس‌لرزه با درخت ۰/۰۴

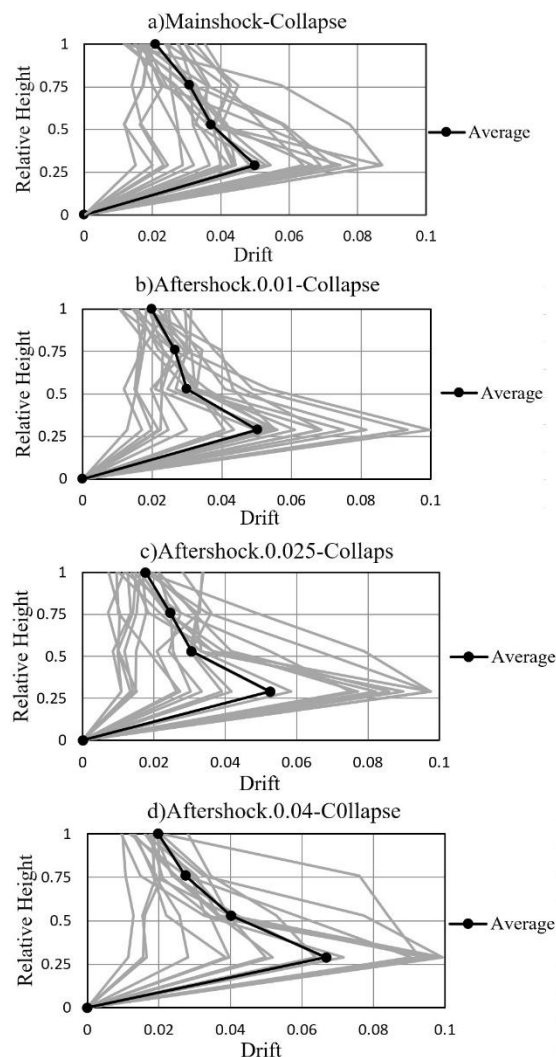
محور افقی نمودارها، بیانگر درخت طبقات و محور قائم نشان‌دهنده ارتفاع نسبی طبقات است. در هر نمودار، مجموعه‌ای از پاسخ درخت رکوردهای زلزله در هر چهار طبقه، نشان داده شده است که میانگین آن‌ها نیز با خط پررنگ‌تر قابل مشاهده است.

### ۳-۴-۱ نتایج نمودار جابه‌جایی نسبی طبقات قاب SMA

در شکل (۱۳) منحنی‌های جابه‌جایی نسبی طبقات قاب مهاربندی مجهز به میراگر SMA تحت لرزه اصلی و تجربه سه سطح درخت پس‌لرزه ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴ ناشی از لرزه اصلی نشان داده شده است. در بیش‌تر رکوردها، طبقه اول بیش‌ترین مقدار درخت را داشته و سبب تجمع آسیب در این طبقه شده است. همچنین با توجه به نتایج، قاب مهاربندی مجهز به میراگر، تحت پس‌لرزه پس از تجربه درخت ۰/۰۴ ناشی از لرزه اصلی، درخت بیش‌تری را تجربه کرده است زیرا در سازه تحت لرزه اصلی، با رسیدن به درخت ۰/۰۴، خساراتی ایجاد شده و پس از اعمال پس‌لرزه، تقاضای درخت بیش‌تر شده است. جهت مقایسه مقدار درخت در لرزه اصلی نسبت به پس‌لرزه‌ها، با مشاهده نمودارها، چنین دریافت شد که میانگین درخت در طبقه اول در سطح فروریزش در حالت لرزه اصلی به پس‌لرزه با درخت ۰/۰۱، معادل با ۰/۲، کاهش داشته است.

همچنین متوسط درخت در لرزه اصلی نسبت به پس‌لرزه با درخت ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴، معادل با ۰/۸ و ۰/۱۵ کاهش داشته است. بنابراین پس‌لرزه پس از تجربه درخت ۰/۰۴، نسبت به سایر زلزله‌ها درخت بیش‌تری را نشان داده و سبب آسیب بیش‌تر شده است.

۳-۲ نتایج نمودار جابه‌جایی نسبی طبقات قاب خمشی  
نتایج نمودار جابه‌جایی نسبی طبقات در شکل (۱۴) ارائه شده است.



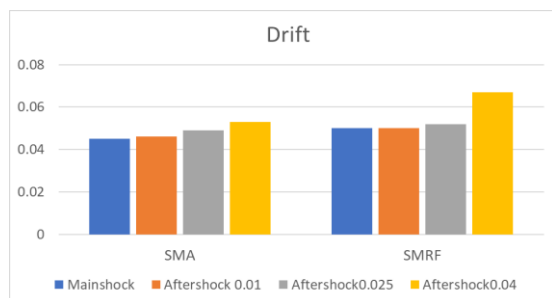
شکل ۱۴- نمودار دررفت طبقات برای قاب خمشی:

(a) تحت لرزه اصلی (b) تحت پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۱  
(c) تحت پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۲۵ (d) تحت پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۴

همان‌طور که در شکل (۱۴) مشهود است، در این سازه نیز همانند سازه مهاربندی مجهز به میراگر، در بیش‌تر رکوردها حداکثر مقدار دررفت در طبقه اول ایجاد شده که سبب تجمع آسیب در این طبقه شده است. از طرفی قاب خمشی تحت پس‌لرزه پس از تجربه دررفت ۰/۰۴ ناشی از لرزه اصلی، دررفت بیش‌تری را تجربه کرده است که در نتیجه امتداد یافتن دررفت در لرزه اصلی تا مقدار ۰/۰۴ است و سبب ایجاد خسارات شده است. مقدار دررفت نسبی در لرزه اصلی نسبت به حالت پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۱، صفر و برابر است. در صورتی که در پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴ به ترتیب به میزان ۴٪ و ۲۵٪ کاهش دارد. همچنین با مقایسه میانگین دررفت

در قاب خمشی و قاب مهاربندی مجهز به میراگر، چنین دریافت شد که دررفت در سطح فروریزش، در قاب خمشی نسبت به قاب مهاربندی مجهز به میراگر در لرزه اصلی، ۱۰٪ و در حالت پس‌لرزه با دررفت ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴ به ترتیب برابر با ۸٪ و ۶٪ و ۲۱٪ افزایش داشته است.

همچنین جهت مقایسه بهتر مقادیر دررفت در هر دو قاب خمشی و مهاربندی مجهز به میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی، در حالت لرزه اصلی و پس‌لرزه پس از تجربه دررفت ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴، نمودارهای میله‌ای متوسط دررفت طبقه اول در هر حالت در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در قاب مهاربندی، وجود میراگر باعث کاهش دررفت شده است. ضمناً در هر دو قاب، مقادیر متوسط دررفت در پس‌لرزه پس از تجربه دررفت ۰/۰۴ ناشی از لرزه اصلی، نسبت به لرزه اصلی و سطوح دررفت دیگر، بیش‌تر شده است.



شکل ۱۵- نمودار میله‌ای متوسط دررفت طبقه اول برای قاب خمشی و قاب مهاربندی مجهز به میراگر SMA

### ۳-۵ نمودار شتاب طبقات

نمودارهای شتاب طبقات جهت بررسی تأثیر لرزه‌ای بر اجزای غیرسازه‌ای رسم گردیده‌اند.

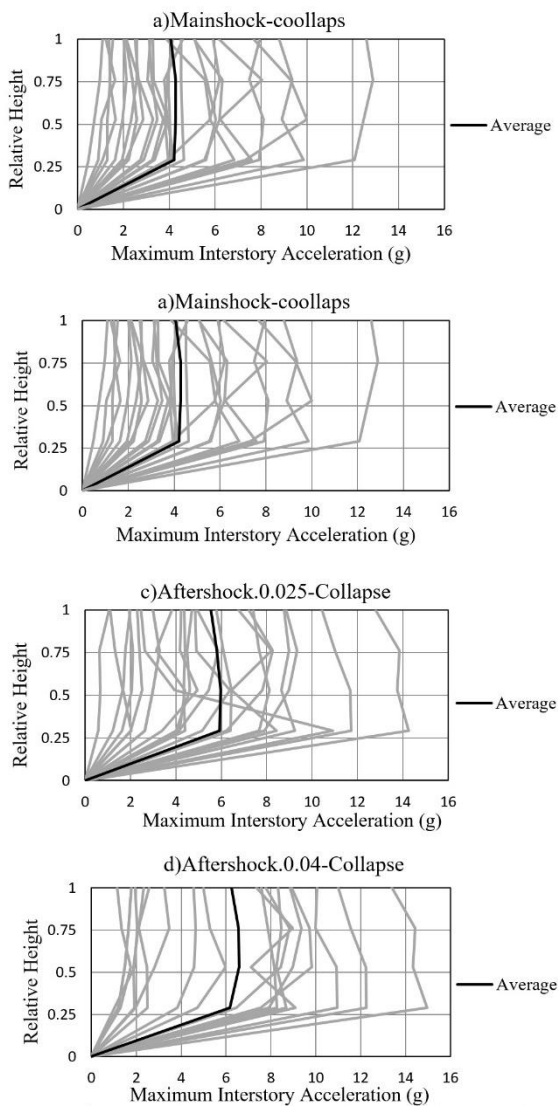
### ۳-۵-۱ نتایج نمودار شتاب طبقات قاب SMA

نتایج شتاب طبقات در قاب مهاربندی مجهز به میراگر و پس‌لرزه پس از تجربه حدود دررفت ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴ ناشی از لرزه اصلی در شکل (۱۶) ارائه شده است.

مقدار در پس‌لرزه پس از تجربه دررفت  $0.025$  و  $0.04$  ناشی از لرزه اصلی، به ترتیب برابر با  $26\%$  و  $35\%$  اضافه شده است. همچنین شتاب نسبی در پس‌لرزه پس از تجربه دررفت  $0.04$  نسبت به پس‌لرزه پس از تجربه دررفت  $0.025$  و  $0.01$  ناشی از لرزه اصلی به ترتیب به میزان  $4\%$  و  $12\%$  افزایش داشته است.

### ۳-۵-۲ نتایج نمودار شتاب طبقات قاب خمشی

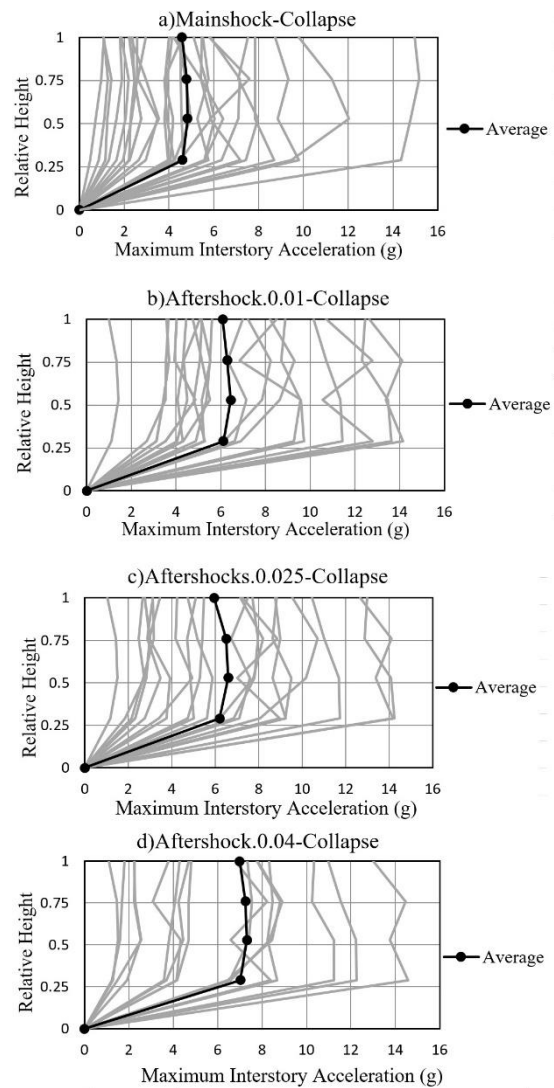
نتایج شتاب طبقات در قاب خمشی و پس‌لرزه پس از تجربه حدود دررفت  $0.01$ ،  $0.025$  و  $0.04$  ناشی از لرزه اصلی در شکل (۱۷) نشان داده شده است.



شکل ۱۷- نمودار شتاب طبقات برای قاب خمشی

(a) تحت لرزه اصلی (b) تحت پس‌لرزه با دررفت  $0.01$   
(c) تحت پس‌لرزه با دررفت  $0.025$  (d) تحت پس‌لرزه با دررفت  $0.04$

با توجه به شکل‌های ارائه‌شده، در سازه مربوط به قاب خمشی نیز همانند سازه مهاربندی مجهز به میراگر، شتاب در تمام طبقات



شکل ۱۶- نمودار شتاب طبقات برای قاب مهاربندی مجهز به میراگر آلیاژ حافظه‌دار شکلی:

(a) تحت لرزه اصلی (b) تحت پس‌لرزه با دررفت  $0.01$   
(c) تحت پس‌لرزه با دررفت  $0.025$  (d) تحت پس‌لرزه با دررفت  $0.04$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شتاب در تمام طبقات تقریباً یکسان است و تحت زلزله، اجزای غیرسازه‌ای در تمام طبقات، آسیب تقریباً یکسانی را دریافت کرده‌اند. با توجه به نتایج، در قاب مهاربندی مجهز به میراگر، پس‌لرزه در دررفت  $0.04$  ناشی از لرزه اصلی، شتاب بیش‌تری را تجربه کرده است. هر چه از شدت لرزه اصلی کم شده و به سمت دررفت  $0.01$  پیش رفته، از شدت شتاب نیز کم شده است.

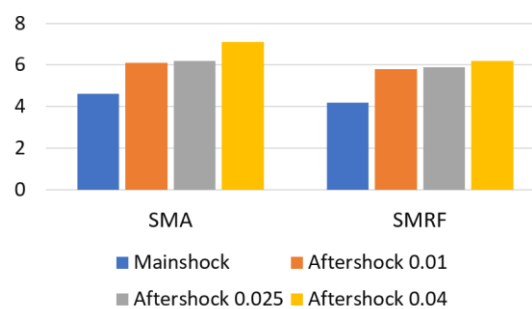
لرزه اصلی کم‌ترین شتاب را ایجاد کرده است که به دلیل تجمع خسارت، افزایش تقاضا تحت دو زلزله متوالی بیش‌تر شده است. پس‌لرزه پس از تجربه دررفت  $0.01$  ناشی از لرزه اصلی نسبت به لرزه اصلی در سطح فروریزش،  $25\%$  افزایش داشته است. این

تقریباً یکسان است. در قاب خمشی جهت مقایسه مقادیر متوسط شتاب در لرزه اصلی نسبت به پس لرزه‌ها مشاهده شده است که پس لرزه پس از تجربه دررفت  $0.01$  نسبت به لرزه اصلی در سطح فروریزش،  $28\%$  افزایش داشته است. این مقدار در پس لرزه پس از تجربه دررفت  $0.025$  و  $0.04$  به ترتیب برابر با  $29\%$  و  $32\%$  افزوده شده است.

با مقایسه میانگین شتاب دو قاب خمشی و قاب مهاربندی مجهز به میراگر، در سطح فروریزش، مشاهده شد که متوسط شتاب در لرزه اصلی، در قاب خمشی  $9\%$  و در حالت پس لرزه با دررفت  $0.01$ ،  $0.025$  و  $0.04$  به ترتیب برابر با  $4\%$ ،  $4\%$  و  $13\%$  کاهش یافته است. زیرا شتاب تابع سختی سازه است و سازه مهاربندی مجهز به میراگر سختی بالاتری دارد؛ بنابراین مقادیر شتاب در آن، کمی افزایش یافته است.

جهت نمایش بهتر این امر، مقادیر متوسط ماکزیمم شتاب طبقه اول در دو قاب مهاربندی مجهز به میراگر آلایژ حافظه‌دار شکلی و قاب خمشی در شکل (۱۸) در قالب نمودار میله‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، قاب مهاربندی مجهز به میراگر با توجه به ماهیت خود، مقادیر شتاب بیش‌تری را تجربه کرده است و از طرفی به‌طور کلی هرچه سطح دررفت پس لرزه ناشی از لرزه اصلی بیش‌تر شده است، مقدار متوسط شتاب نیز افزایش یافته است.

Maximum Interstory Acceleration



شکل ۱۸- نمودار میله‌ای شتاب طبقات برای قاب خمشی و قاب مهاربندی مجهز به میراگر SMA

### ۳-۶ نمودار تغییر مکان پسماند طبقات

برای دریافت مقدار آسیب وارد شده و جبران خسارات، توجه به تغییر مکان باقی‌مانده در سازه حائز اهمیت است؛ بنابراین دررفت پسماند یک شاخص خسارت بسیار مهم برای امکان بازسازی اقتصادی سازه است. بدین منظور تغییر مکان پسماند یکی از پاسخ‌هایی است که از تحلیل دینامیکی غیرخطی مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، مطابق با FEMA P-58 [۲۲] برای دررفت

پسماند، چهار سطح خسارت تحت عناوین DS1، DS2، DS3 و DS4 تعریف شده است. این چهار سطح خسارت، از شروع آسیب تا سطح فروپاشی تغییر می‌کند. اولین سطح خسارت که DS1 می‌باشد، مقادیری تا دررفت‌های پسماند کم‌تر از  $0.02$  را شامل می‌شود. در این سطح خسارت، برای پایداری ساختمان، نیاز به بازبینی مجدد سازه‌ای وجود ندارد اما با این حال ممکن است برخی از اجزای غیرسازه‌ای و مکانیکی نظیر درها نیاز به ترمیم داشته باشند. سطح بعدی که مربوط به سطح خسارت DS2 است، مقادیر دررفت پسماند تا کم‌تر از  $0.05$  را نشان می‌دهد. در این سطح لازم است که بازبینی مجدد قاب سازه انجام شود و نیز تعمیرات سازه‌ای مربوطه جهت حفظ محدوده جابه‌جایی مجاز برای اجزای غیرسازه‌ای و مکانیکی در پایداری سازه لازم است. سطح سوم که با سطح خسارت DS3 معرفی شده است، مقادیر دررفت پسماند کم‌تر از  $0.1$  را شامل می‌شود. در این سطح بازبینی مجدد سازه‌ای جهت بازگرداندن ایمنی برای پایداری جانبی مورد نیاز است؛ باین‌حال، بازبینی مجدد مورد نیاز سازه ممکن است از نظر اقتصادی و عملی امکان‌پذیر نباشد و در ادامه آخرین سطح خسارت که مربوط به سطح خسارت DS4 است، در این پژوهش اعدادی تا مقدار  $0.04$  را دربرمی‌گیرد. در این سطح خسارت، دررفت پسماند به اندازه‌ای بزرگ است که سازه در خطر فروپاشی ناشی از پس لرزه‌های زلزله قرار دارد، در واقع این نقطه ممکن است برابر با فروپاشی با عدم قطعیت بیش‌تر، در نظر گرفته شود.

### ۳-۶-۱ نتایج نمودار تغییر مکان پسماند قاب SMA

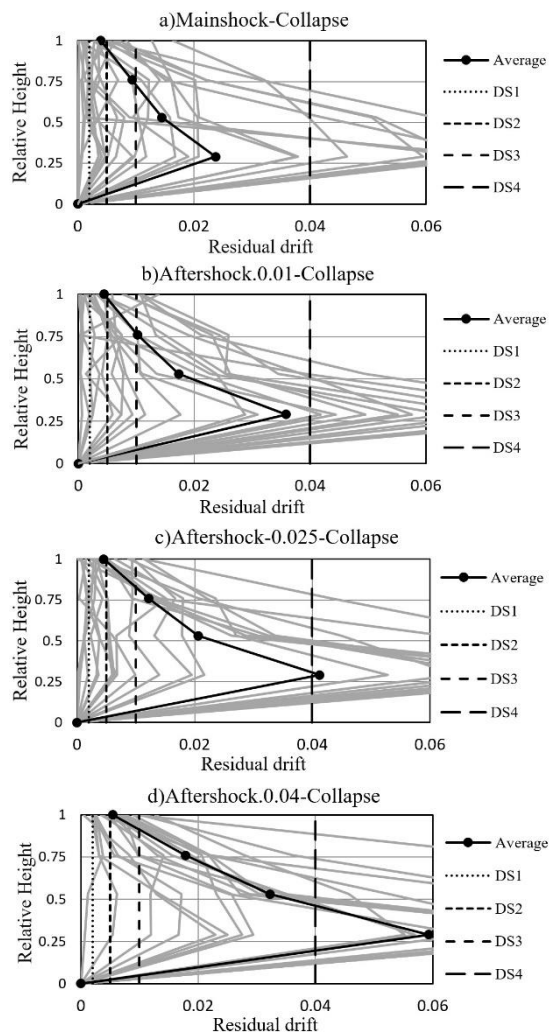
نتایج دررفت پسماند در شکل (۱۹) ارائه شده است. در قاب مهاربندی مجهز به میراگر، مقادیر دررفت پسماند تحت پس لرزه شدید با شدت  $0.04$  نسبت به لرزه اصلی بیش‌تر شده است و این یعنی سازه هنگامی که پس لرزه را تجربه کرده است، دچار جابه‌جایی ماندگار و در نتیجه خرابی گسترده‌تر شده است.

در تمام موارد، طبقه اول نسبت به سایر طبقات دررفت پسماند بیش‌تری را تجربه کرده است. دررفت پسماند در پس لرزه پس از تجربه دررفت  $0.04$ ، نسبت به لرزه اصلی در سطح فروریزش،  $56\%$  افزایش داشته و اختلاف درصد بین لرزه اصلی و پس لرزه‌ها تحت دررفت  $0.01$ ،  $0.025$  و  $0.04$ ، به ترتیب  $39\%$  و  $48\%$  شده است. همچنین دررفت پسماند در پس لرزه پس از تجربه دررفت  $0.04$  نسبت به پس لرزه متناظر با دررفت‌های  $0.01$  و  $0.025$  برابر با  $27\%$  و  $14\%$  افزایش دارد. سطوح خسارت در لرزه اصلی در متوسط دررفت پسماند در سطح فروریزش، از سطح ۳ بیش‌تر است و در سطح ۴ قرار دارد. یعنی هنگام لرزه اصلی در سطح فروریزش، سازه در خطر فروپاشی است.

زلزله آثار خرابی و دررفت پسماند از خود بر جای نگذاشته است پس سطوح خسارات نیز کم تر گزارش شده است.

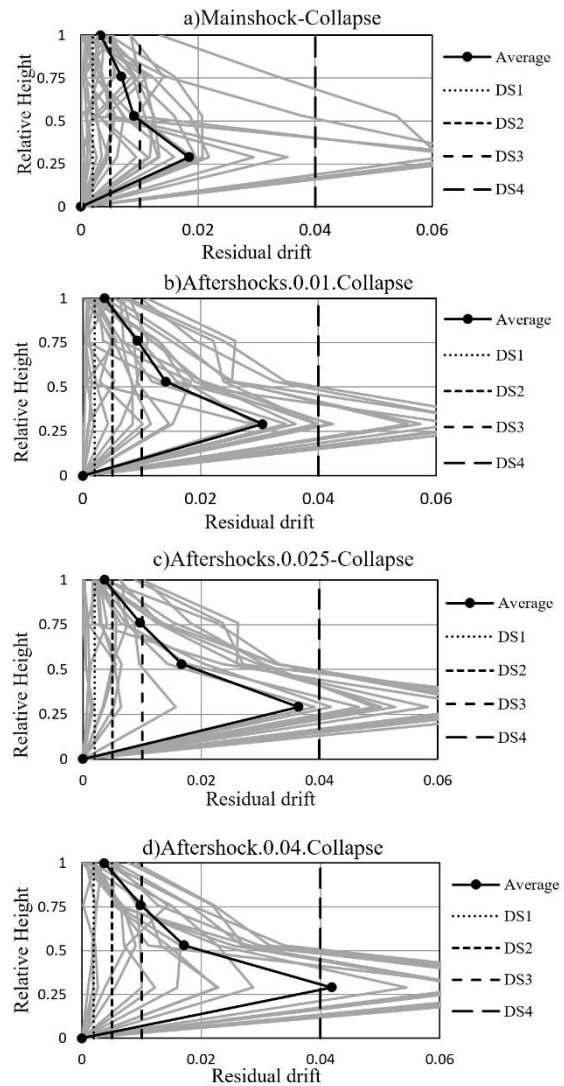
### ۳-۶-۲ نتایج نمودار تغییر مکان پسماند قاب خمشی

نتایج دررفت پسماند مرتبط با قاب خمشی در شکل (۲۰) ارائه شده است. در این سازه نیز همانند سازه مهاربندی مجهز به میراگر، در بیش تر رکوردها بیش ترین مقدار دررفت در طبقه اول ایجاد شده که سبب تجمع آسیب در این طبقه شده است.



شکل ۲۰- نمودار دررفت پسماند طبقات برای قاب خمشی

شکل ۲۰- نمودار دررفت پسماند طبقات برای قاب خمشی  
(a) تحت لرزه اصلی (b) تحت پس لرزه با دررفت ۰/۰۱  
(c) تحت پس لرزه با دررفت ۰/۰۲۵ (d) تحت پس لرزه با دررفت ۰/۰۴  
همان طور که مشاهده شده است، سازه تحت پس لرزه پس از تجربه دررفت ۰/۰۴ ناشی از لرزه اصلی، دررفت بیش تری را تجربه کرده است که در نتیجه امتداد یافتن دررفت در لرزه اصلی تا مقدار ۰/۰۴ است و سبب ایجاد تقاضای خسارات تا ۶۰٪ بیش تر از لرزه اصلی شده است. همچنین لرزه اصلی نسبت به سطوح دیگر دررفت پس لرزه مانند ۰/۰۱ و ۰/۰۲۵ حدود ۳۳٪ و



شکل ۱۹- نمودار دررفت پسماند طبقات برای قاب مهاربندی

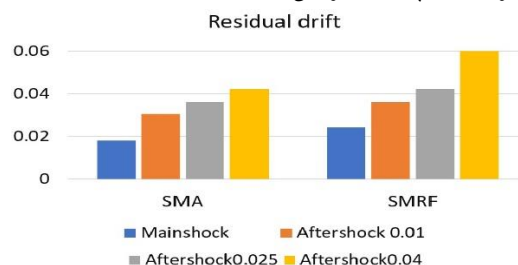
مجهز به میراگر SMA

(a) تحت لرزه اصلی (b) تحت پس لرزه با دررفت ۰/۰۱  
(c) تحت پس لرزه با دررفت ۰/۰۲۵ (d) تحت پس لرزه با دررفت ۰/۰۴

با توجه به آن که متوسط دررفت پسماند در پس لرزه با دررفت ۰/۰۱ در حدود ۰/۰۳ به دست آمده است، بنابراین از سطح ۳ خسارت عبور کرده است. پس سازه در معرض فروپاشی است. با ارزیابی متوسط دررفت پسماند در پس لرزه با دررفت ۰/۰۲۵ سطوح خسارت چنین برداشت شد که سطح فروریزش در سطح خسارت ۴ قرار دارد و سازه در خطر فروپاشی است. بنابراین همه سطوح زلزله ها، پس لرزه با سطح دررفت ۰/۰۴ بیش ترین سطح خسارات را دارد و سپس پس لرزه با دررفت ۰/۰۲۵ و ۰/۰۱، دارای سطوح خسارات بالایی هستند. از آنجا که در لرزه اصلی،

۰/۴۲، دریفت پسماند کمتری را تجربه کرده است و پس‌لرزه با دریفت ۰/۰۴ نسبت به دو پس‌لرزه دیگر پس از تجربه دریفت ۰/۰۱ و ۰/۰۲۵ مقادیر دریفت پسماند بیش‌تری معادل با ۳۰٪ و ۴۰٪ تجربه کرده است. حالات خسارت، در متوسط دریفت پسماند در زلزله اصلی بدون پس‌لرزه و پس‌لرزه پس از تجربه دریفت ۰/۰۱، در سطح ۴ یعنی فروریزش قرار دارد. همچنین در پس‌لرزه پس از تجربه دریفت ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴، در سطح فروریزش، با توجه به متوسط دریفت پسماند، حالت خسارت از سطح ۴ نیز بیش‌تر است و سازه در حال فروپاشی است با این وجود مقادیر دریفت پسماند به دلیل تجمع آسیب و دریفت پسماند، در پس‌لرزه پس از تجربه دریفت ۰/۰۴ بسیار بیش‌تر است.

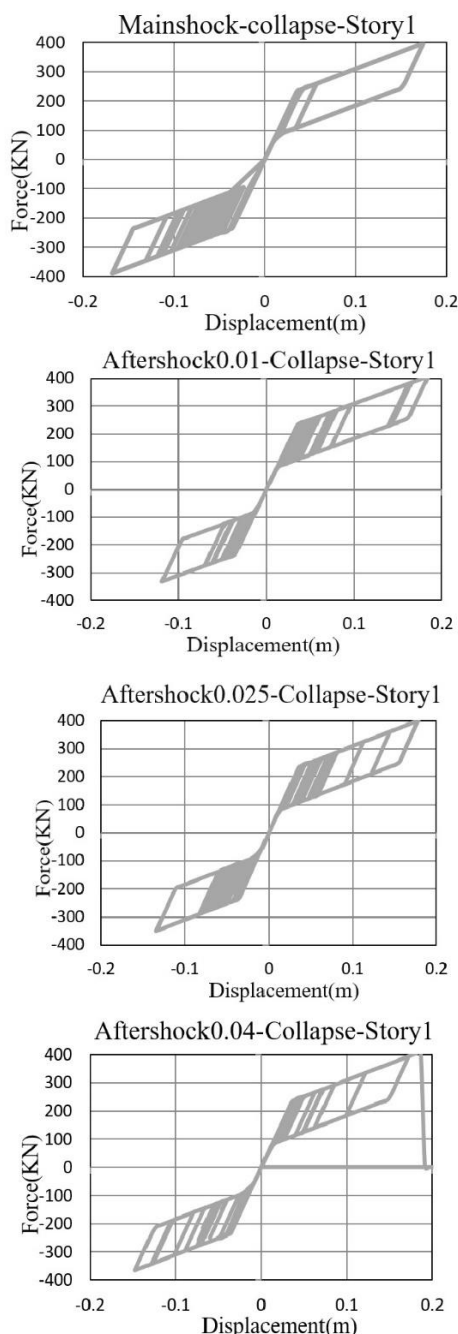
با مقایسه قاب خمشی و مهاربندی مجهز به میراگر، مشاهده شده است که در هر دو قاب، مقادیر دریفت پسماند تحت پس‌لرزه پس از تجربه دریفت ۰/۰۴ ناشی از لرزه اصلی نسبت به حالت اعمال لرزه اصلی بیش‌تر شده است و این امر در واقع به دلیل آسیب سازه و تجمع خسارت در هنگام وقوع لرزه اصلی است، یعنی با افزایش شدت لرزه اصلی، سازه‌ها دریفت و دریفت پسماند بیش‌تری را تجربه می‌کنند و در نتیجه پس از اعمال پس‌لرزه خرابی گسترده‌تر خواهد شد. در همه موارد، طبقه اول نسبت به سایر طبقات دریفت پسماند بیش‌تری را تجربه کرده است. از سوی دیگر، با مقایسه میانگین دریفت پسماند در دو قاب خمشی و قاب مهاربندی مجهز به میراگر، در سطح فروریزش، مشاهده شد که متوسط دریفت پسماند در قاب خمشی نسبت به قاب مهاربندی در هنگام لرزه اصلی، ۲۳٪ افزایش داشته و در حالت پس‌لرزه پس از تجربه دریفت ۰/۰۱، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴ به ترتیب برابر با ۱۵٪، ۱۴٪ و ۳۰٪ زیاد شده است. جهت درک بهتر و امکان مقایسه دقیق‌تر نتایج این پارامتر لرزه‌ای در دو سازه، مقادیر متوسط دریفت پسماند طبقه اول دو قاب در قالب یک نمودار میله‌ای، در شکل (۲۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشهود است، قاب مهاربندی مجهز به میراگر، در لرزه اصلی و پس‌لرزه‌ها، در کاهش تقاضای دریفت پسماند عملکرد بهتری داشته است و سبب کاهش خسارت شده است. همچنین در پس‌لرزه با افزایش سطح دریفت ناشی از لرزه اصلی، مقادیر دریفت پسماند افزایش یافته است.



شکل ۲۱- نمودار میله‌ای متوسط دریفت پسماند طبقه اول برای قاب خمشی و قاب مهاربندی مجهز به میراگر SMA

### ۳- نمودار نیرو-تغییر مکان مهاربند مجهز به میراگر

نمودارهای هیستریزیس مهاربند در قالب منحنی‌های نیرو-تغییر مکان، برای نمونه و بررسی موردی یک رکورد ارائه شده است. این نمودارها تحت رکورد ۲۹ در حالت فروریزش در طبقه اول در شکل (۲۲) نشان داده شده است.



شکل ۲۲- نمودار نیرو-تغییر مکان مهاربند مجهز به آلیاژ

حافظه‌دار شکلی

همان‌طور که در شکل (۲۲) مشاهده شد، نمودارها به دلیل خاصیت آلیاژهای حافظه‌دار شکلی به صورت پرچم‌شکل با حلقه‌های تکرار شونده هستند. حلقه‌ها به صورت تکرار شونده در

رفت و برگشت هستند و دریفت پسماند ایجاد شده کم می باشد. با توجه به منحنی های نشان داده شده، مشاهده می شود که در پس لرزه پس از تجربه دریفت  $0/04$  ناشی از لرزه اصلی، کرنش ماکزیم ایجاد شده، سبب افت مقاومت و در نهایت خرابی شده است. این منحنی ها مانند منحنی هیستریزس مرتبط با مهاربند، اثر پینچینگ را ندارند اما با این حال جذب انرژی در این سیستم پایین است. بنابراین تا حد قابل انتظار در کنترل عملکرد تحت پس لرزه مؤثر نیستند، پس نیاز به یک سیستم ترکیبی در کنار این نوع از آلیاژ جهت استهلاک انرژی حس می شود. کاربرد زلزله و پس لرزه مصنوعی، گاهی نتایج را غیر واقعی نشان می دهد و پس لرزه های واقعی درک درست تری از عملکرد لرزه ای خواهند داشت.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر پس لرزه های واقعی بر روی قاب ها و مقایسه بهتر عملکرد میراگر بر سازه، یک مطالعه عددی بر روی دو قاب چهار طبقه مهاربندی با مهاربند از نوع قطری که یک میراگر آلیاژ حافظه دار شکلی بر روی آن قرار دارد و همچنین قاب بدون مهاربند از نوع قاب خمشی صورت گرفته است. پس از انتخاب قاب مورد نظر، صحت سنجی کابل آلیاژ حافظه دار شکلی انجام شده است و در مراحل بعدی با انجام تحلیل مودال، پیوندهای قاب ها محاسبه و با انجام آنالیز بار افزون، منحنی های ظرفیت قاب ها رسم گردید. در ادامه، جهت بررسی پاسخ های تحلیل دینامیکی، ۲۹ رکورد تحت لرزه اصلی و سپس تحت پس لرزه پس از تجربه دریفت های  $0/01$ ،  $0/025$  و  $0/04$  ناشی از لرزه اصلی انجام شد و پاسخ های آن به دست آمد. به طوری که:

- با ایجاد پس لرزه و تجربه دریفت آن تا  $0/04$  ناشی از لرزه اصلی، نسبت به سازه تحت لرزه اصلی، در هر دو قاب مهاربندی مجهز به میراگر آلیاژ حافظه دار شکلی و قاب خمشی، به دلیل تجمع دریفت پسماند و آسیب، ظرفیت فرو ریزش سازه ها کم تر شده و نشان دهنده خسارت بیش تر و زود هنگام تر به سازه ها تحت پس لرزه است. همچنین با مقایسه دو سازه قاب خمشی و قاب مهاربندی مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی، مشاهده شد که قاب مهاربندی مجهز به میراگر، ظرفیت فرو ریزش بیش تری دارد.

- در منحنی شکنندگی احتمال فرو ریزش در پس لرزه پس از تجربه دریفت  $0/04$  به دلیل کاهش ظرفیت سازه و تجمع خسارت و افزایش دریفت پسماند، در هر دو قاب خمشی و مهاربندی مجهز به میراگر آلیاژ حافظه دار شکلی، بیش تر از دیگر زلزله ها است. از طرفی احتمال فرو ریزش سازه با قاب خمشی،

نسبت به سازه مهاربندی با میراگر آلیاژ حافظه دار شکلی، بیش تر است.

- با توجه به نتایج دریفت طبقات چنین دریافت شد که در سازه مجهز به میراگر در کنترل مقدار دریفت نسبت به سازه قاب خمشی عملکرد بهتری داشته است. از طرفی، در هر دو سازه قاب خمشی و مهاربندی مجهز به میراگر، پس لرزه نسبت به سازه اصلی، مقدار دریفت بیش تری را تجربه کرده است و هر چه سطح دریفت تجربه شده ناشی از لرزه اصلی بیش تر شده، مقدار دریفت نیز افزایش یافته است.

- نتایج حداکثر شتاب طبقات نشان داد که شتاب طبقات در قاب مهاربندی مجهز به آلیاژ حافظه دار شکلی نسبت به قاب خمشی مقدار بیش تری دارد زیرا شتاب وابسته به جرم و سختی است و سازه دارای میراگر آلیاژ حافظه دار شکلی نسبت به سازه قاب خمشی دارای سختی بیش تری است. از طرفی هر دو قاب تحت پس لرزه نسبت به لرزه اصلی، شدت بیش تری را تجربه کرده اند. همچنین تقریباً شتاب در هر چهار طبقه در هر دو سازه پاسخ یکسانی دارد؛ بنابراین اجزای غیر سازه ای در هر چهار طبقه تقریباً آسیب برابری دارند و در طبقات بالاتر کمی بیش تر است. با توجه به نقش شتاب در آسیب به اجزای غیر سازه ای، در نظر گرفتن تمهیدات ویژه در سیستم های مهاربندی شامل میراگر SMA اهمیت می یابد.

- با بررسی دریفت پسماند، مشاهده شد که سازه مجهز به میراگر در مقایسه با سازه با قاب خمشی، دریفت پسماند کم تری را تجربه کرده و این به دلیل خاصیت منحصربه فرد این نوع آلیاژ در بازگرداندن تغییر شکل ها به حالت اولیه است. از طرفی در هر دو قاب خمشی و مهاربندی مجهز به میراگر، پس لرزه متناظر با دریفت  $0/04$  ناشی از لرزه اصلی، نسبت به پس لرزه های با تجربه دریفت کم تر، تأثیر بیش تری بر باقی گذاشتن دریفت از خود نشان داده است. همچنین مشاهده شد که با توجه به سطوح خسارت که در FEMA P-58 ذکر شده است، در همه زلزله ها، در سطح فرو ریزش، میزان خسارت معادل با سطح ۴ و بیش تر شده است که نشان دهنده فرو ریزش سازه است.

- در سازه با قاب مهاربندی مجهز به میراگر از جنس آلیاژ حافظه دار شکلی، با بررسی منحنی هیستریزس مهاربند های طبقه اول مشاهده شد که نمودارها به صورت حلقه های تکرار شونده رفت و برگشتی هستند که دریفت پسماند ناچیزی باقی می گذارند. همچنین آلیاژ های حافظه دار شکلی در استهلاک انرژی، عملکرد ضعیفی دارند و به کارگیری یک سیستم ترکیبی در کنار آلیاژ حافظه دار شکلی توصیه می شود.

- بر اساس نتایج، به‌طور کلی قاب مهاربندی مجهز به میراگر از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی در مقایسه با قاب خمشی، در هنگام رخداد زلزله و پس‌لرزه‌های متناظر با آن، در کنترل دررفت و دررفت پسماند عملکرد بهتری دارد و خسارات کم‌تری را به دنبال دارد و همچنین در سطح دررفت بالاتری ناشی از لرزه اصلی تحت پس‌لرزه، مؤثرتر بوده است.

- [14] Qu, J., and Pan Ch. (2022), "Incremental Dynamic Analysis Considering Main Aftershock of Structures Based on the Correlation of Maximum and Residual Inter-Story Drift Ratios", *Applied Sciences*, Vol. 12, N. 2042.
- [15] OpenSees, Open system for earthquake engineering simulation—home page. 2014. <http://opensees.berkeley.edu/>
- [16] Shi, F., Ozbulut, O., and Zhou, Y. (2019), "Influence of Shape Memory Alloy Brace Design Parameters on Seismic Performance of Self-Centering Steel Frame Buildings" *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 27, e2462.
- [17] Seo, J., Kim, Y., and Hu, J. (2015), "Pilot Study for Investigating the Cyclic Behavior of Slit Damper Systems with Recentering Shape Memory Alloy (SMA) Bending Bars Used for Seismic Restrainers", *Applied Sciences*, Vol. 5, N. 187.
- [18] Ozbulut, O., and Hurlbaas, S. (2011), "Seismic Protection of Bridge Structures Using Shape Memory Alloy-Based Isolation Systems Against Near-Field Earthquakes", *Structures Congress* pp. 2066 – 2077,
- [19] Shi, F., Ozbulut, O., and Saygili, G. (2018), "Probabilistic Seismic Performance Evaluation of SMA-Braced", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 16, pp. 5937–5962.
- [20] Ibarra, LF., Medina, RA., and Krawinkler, H. (2005), "Hysteretic Models that Incorporate Strength and Stiffnessdeterioration", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.34, pp. 1489-1511.
- [21] Han, R., Li, Y., and Lindt, John. (2014), "Assessment of Seismic Performance of Buildings with Incorporation of Aftershocks", *Performance of Constructed Facilities*, Vol. 29, Issue 3.
- [22] FEMA, (2001), *Development of Next Generation Performance-Based Seismic Design Procedures for New and Existing Buildings*, FEMA P58.
- [1] Ozbulut, O., Daghash, S., and Sherif, M. (2016), "Shape Memory Alloy Cables for Structural Applications", *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 4.
- [2] Asgarian, B., and Moradi, S. (2011), "Seismic Response of Steel Braced Frames with Shape Memory Alloy Braces", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, pp. 65-74.
- [3] Dimitris, C., and Lagoudas, D. (2008), "Shape Memory Alloys" Publisher Springer.
- [4] Gur, S., Xie, Y., and DesRoches, R. (2019), "Seismic Fragility Analyses of Steel Building Frames Installed with Superelastic Shape Memory Alloy Dampers: Comparison with Yielding Dampers", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 30, Issue. 18-19, pp. 2670 – 2687.
- [5] Zhang, Zh., Bi, K., Hao, H., Sheng, P., Feng, L., and Xiao, D. (2020), "Development of a Novel Deformation-Amplified Shape Memory Alloy-Friction Damper for Mitigation of Seismic Effects on Building", *Engineering Structures*, Vol. 216, article id. pages 110751.
- [6] Kezia, V. Ann. (2019), "Performance of Steel Braced Frame Reinforced with Shape Memory Alloy Wires", M.S. Thesis, University of Calgary, Calgary, Canada.
- [7] Fikri, R., and Ingham, J. (2022), "Seismic Response and Aftershock Fragility Curves for Non-ductile Mid-rise Buildings Comprised of Reinforced Concrete Frame with Masonry Infill", *Structures*, Vol. 45, pp. 1688-1700.
- [8] Salami, MR., kashani, MM., and Goda, K. (2019), "Influence of Advanced Structural Modeling Technique, Mainshock-Aftershock Sequences, and Ground Motion Types on Seismic Fragility of Low-rise RC Structures", *Structures*, Vol. 117, pp. 263-279.
- [9] Garcia, JR. (2019), "Collapse and Demolition Aftershock Assessment of Post-Mainshock Steel Framed Building", *Earthquake Risk and Engineering*.
- [10] Massumi, A., Sadeghi, K., Karimzade, O., and Ghoghji, O. (2023), "Effect of Aftershock Characteristics on the Fragility Curve of Post-Mainshock RC Frames", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 178, 10845.
- [11] Goda, K. (2014), "Record Selection for Aftershock Incremental Dynamic Analysis", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 44, pp. 1157-1162.
- [12] Noureldin, M., Adane, M., and Kim, J. (2021) "Seismic Fragility of Structures with Energy Dissipation Devices for Mainshock-Aftershock Events", *Earthquakes and Structures*, Vol. 21, N. 3, pp. 219-230.
- [13] Abraik, E. (2020), "Seismic Performance of Shape Memory Alloy Reinforced Concrete Moment Frames Under Sequential Seismic Hazard", *Structures*, Vol. 26, pp. 311-326.

