

### چکیده

این مقاله به ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی مجهز به میراگرهای تسلیمی TADAS با تأکید بر پاسخ پسماند جهت بهسازی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی اجرا شده می‌پردازد. برای این منظور، پاسخ سه قاب خمشی فولادی با شکل پذیری ویژه و با تعداد طبقات ۳، ۹ و ۲۰ با و بدون میراگر تحت اثر ۱۱ شتاب‌نگاشت مقیاس شده دور از گسل به روش تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی با در نظر گرفتن آثار زوال سختی و مقاومت و با تأکید بر پاسخ پسماند مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده، جابه‌جایی‌های نسبی بین طبقه‌ای پسماند به‌طور میانگین در سازه کوتاه مرتبه بین ۷۵ تا ۸۰ درصد، در سازه میان مرتبه ۱۵ تا ۸۵ درصد و در سازه بلند مرتبه ۳۰ تا ۸۰ درصد در طبقات مختلف کاهش نشان می‌دهد. به‌علاوه، جابه‌جایی حداکثر در سازه ۳ طبقه به‌طور میانگین حدود ۵۰ درصد و در سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه حدود ۱۰ تا ۴۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. نسبت میانگین جابه‌جایی پسماند به جابه‌جایی حداکثر نیز در هر سه سازه به ترتیب بین ۵۰ تا ۶۵ درصد، ۵۰ تا ۵۵ درصد و ۲۰ تا ۵۰ درصد کاهش داشته است. با افزایش تعداد طبقات، میراگرها تأثیر کمتری در کاهش پاسخ‌ها و بهبود عملکرد سازه‌ها نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که تعبیه میراگر منجر به کاهش آثار مدهای بالاتر در سازه‌های بلند و یکنواختی بیشتر در توزیع تقاضاهای تغییر شکل غیرخطی در ارتفاع می‌شوند. نتایج تحلیل‌ها و مقایسه پاسخ‌ها با حدود عملکردی مبتنی بر جابه‌جایی پسماند در نشریه FEMA P-58، نشان می‌دهد که سازه‌های مجهز به میراگرهای TADAS، تاب‌آوری لرزه‌ای بیشتری نسبت به قاب‌های بدون میراگر دارند.

**واژگان کلیدی:** پاسخ پسماند، لرزه‌ای، میراگرهای فلزی TADAS، تاب‌آوری لرزه‌ای، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای.

## مطالعه پاسخ پسماند قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگرهای تسلیمی TADAS تحت اثر تحریکات لرزه‌ای

عبدالحمید غفوری

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، سنندج، ایران

سالار منیعی (نویسنده مسئول)

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، سنندج، ایران،  
manie@iausdj.ac.ir

### ۱- مقدمه

کنترل و مدیریت انرژی لرزه‌ای ورودی به سازه به‌نحوی که محل و نحوه جذب و اتلاف آن از قبل تعیین شده باشد، از اصول ارزیابی رفتار و طراحی لرزه‌ای سازه‌هاست. در راستای شناخت پاسخ اجزای سازه‌ای و ناسازه‌ای در سازه‌های ساختمانی، پارامترهای متعددی از جمله جابه‌جایی مطلق و نسبی در طبقات، جابه‌جایی مطلق و نسبی بین طبقه‌ای پسماند و ... به‌عنوان پارامترهای تقاضا مورد توجه قرار گرفته است [۱]. هر یک از پارامترهای اشاره شده مزایای خاص خود را داشته و به طراح برای دسترسی به سازه‌ای ایمن و تاب‌آور

دیدگاه‌های طراحی لرزه‌ای سازه‌ها طی چند دهه اخیر دچار تحولات نسبتاً زیادی شده است. گذر از دیدگاه‌هایی مانند طراحی بر اساس مقاومت و شکل‌پذیری، تغییر مکان و مبتنی بر عملکرد و اخیراً طراحی بر اساس تاب‌آوری<sup>۱</sup> نشان از سیر تکاملی طراحی لرزه‌ای سازه‌هاست. طراحی بر اساس تاب‌آوری به دلیل وسعت موضوعات و مسائل تأثیرگذار در آن، فراتر از حوزه مهندسی سازه به آمادگی و پیشگیری در مقابل زلزله می‌نگرد. تلاش برای کنترل خسارت در اجزای سازه‌ای و ناسازه‌ای و پیش‌بینی عملکرد آنها،

بررسی نمودند. شکری [۸] رفتار میراگرهای TADAS را تحت زلزله‌های نزدیک گسل مورد ارزیابی قرار داد. باقری و همکاران [۹] مطالعه‌ای روی نسبت پیشنهادی B/D که توسط محققین قبلی مقدار آن برابر با ۲ توصیه شده بود انجام دادند و جهت بهینه نمودن رفتار و جابه‌جایی‌های سازه مقادیر متغیری را پیشنهاد دادند. شمشیری دارینی و حسینی هاشمی [۱۰] جهت بهبود رفتار میراگرهای TADAS و عملکرد سیستم به صورت دو گانه در زلزله‌های خفیف و قوی، نوع اصلاحی این میراگر را پیشنهاد دادند. محمودی و قاسم‌آبادی [۱۱] ضریب رفتار قاب‌های خمشی ویژه و متوسط فولادی دارای میراگر TADAS را به دست آوردند. غفوری و منیعی [۱۲] خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده نظری و آزمایشگاهی در خصوص میراگرهای تسلیمی ADAS و TADAS طی چهار دهه اخیر را ارائه دادند. شین و سینگ [۱۳] برای طراحی میراگرهای فلزی روش بهینه‌ای بر اساس الگوریتم ژنتیک در طول عمر مفید سازه ارائه دادند.

تا آنجا که بررسی نگارندگان در ادبیات موضوع نشان می‌دهد، تاکنون مطالعه خاصی بر روی پاسخ پسماند سازه‌های فولادی مجهز به میراگرهای فولادی تسلیم شونده (TADAS) انجام نشده است. مطالعه بر روی قاب‌های دو بعدی فولادی خمشی ویژه SAC با تعداد طبقات ۳، ۹ و ۲۰ طبقه و از طریق انجام تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی تاریخچه زمانی تحت اثر ۱۱ رکورد مقیاس شده انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که به طور کلی میراگرهای TADAS منجر به بهبود قابل توجه عملکرد قاب‌های خمشی کوتاه، میان و بلند مرتبه و مشخصاً کاهش جابه‌جایی‌های پسماند مطلق و نسبی بین طبقه‌ای می‌شوند.

## ۲- مدل‌های سازه‌ای - فرضیات تحلیل و طراحی قاب‌ها

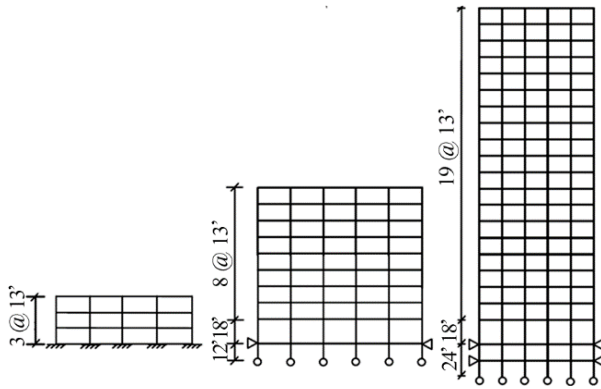
سازه‌های انتخاب شده در این مطالعه، سه قاب فولادی از مجموعه قاب‌های خمشی پروژه SAC [۱۴] با شکل‌پذیری طراحی ویژه (زیاد) و با تعداد طبقات ۳، ۹ و ۲۰ هستند. ابعاد پلان و طول دهانه‌ها و ارتفاع طبقات و همچنین مشخصات هندسی و مقاطع اعضا در شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب) و

کمک شایانی می‌کنند. مرجع [۱] به اهمیت موضوع رفتار پسماند سازه‌ها پرداخته و متناسب با مقدار جابه‌جایی پسماند طبقات، سطح آسیب‌های احتمالی در سازه و توجیه یا عدم توجیه فنی و اقتصادی بهسازی سازه را پس از وقوع زلزله تعیین نموده است؛ بنابراین، شناخت و پیش‌بینی رفتار جابه‌جایی پسماند سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای در طراحی لرزه‌ای برخوردار است.

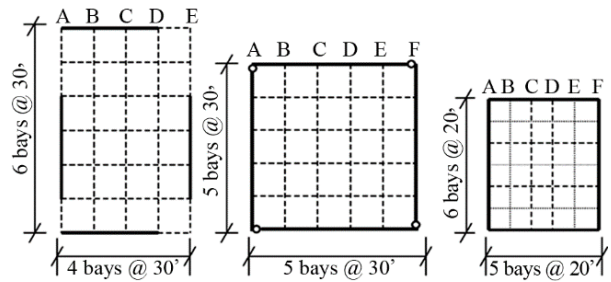
به منظور کاهش خسارت‌های سازه‌ای و ناسازه‌ای، افزایش میزان میرایی سازه با به کارگیری سامانه‌های جذب و اتلاف انرژی با قابلیت تعمیر یا تعویض مورد توجه پژوهشگران بوده است [۲-۳]. در این راستا، میراگرها با متمرکزسازی محل جذب و اتلاف انرژی لرزه‌ای و حفاظت از سیستم باربر ثقیل، همواره به عنوان یکی از انواع سامانه‌های مذکور مطرح بوده‌اند [۳]. میراگرها ظرف کمتر از ۱۵ سال از زمان شروع اولین مطالعات در اوایل دهه ۸۰ میلادی در ایالات متحده، از سطح مطالعات نظری و دانشگاهی به حوزه کاربردی مهندسی راه پیدا کردند [۲]. یکی از انواع رایج آنها، میراگر فلزی تسلیم شونده<sup>۲</sup> TADAS است که از تعدادی ورق فولادی مثلثی شکل تشکیل شده و در اثر تسلیم این ورق‌ها تحت اثر خمش، انرژی قابل توجهی مستهلک خواهد شد. ایده استفاده از ورق‌های مثلث شکل به عنوان جاذب انرژی در سازه نیروگاه‌های هسته‌ای اولین بار توسط کلی و اسکینر در ۱۹۸۰ مطرح شد [۳]. ژیا و هانسون [۴] مطالعاتی روی پارامترهای مهم در طراحی این میراگرها که شامل پارامترهای B/D (نسبت سختی مهاربند به سختی میراگر) و SR (نسبت سختی میراگر و مهاربند به سختی قاب) هستند، انجام دادند. تسای و همکاران [۵] بر روی کاربرد این میراگرها جهت استفاده در سازه‌های ساختمانی مطالعاتی انجام دادند. ایشان روش طراحی سازه‌های مجهز به این سیستم‌ها را همراه با طراحی یک قاب نمونه ۲۰ طبقه فولادی پیشنهاد دادند. رامیرز و همکاران [۶] روش‌های ساده‌ای برای تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل غیرفعال از جمله میراگرهای فولادی ارائه دادند. سجادی و همکاران [۷] رفتار سازه‌های مجهز به میراگرهای ADAS و TADAS را در مقایسه با سازه‌های فلزی مهاربندی شده متعارف

جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) بر اساس مرجع فوق نشان داده شده است. قاب‌های خمشی لرزه‌بر در پلان شکل (۱- الف) با خطوط توپر و قاب‌های باربر ثقیلی با اتصالات ساده به صورت خطوط منقطع مشخص شده است. در این مطالعه، قاب‌های

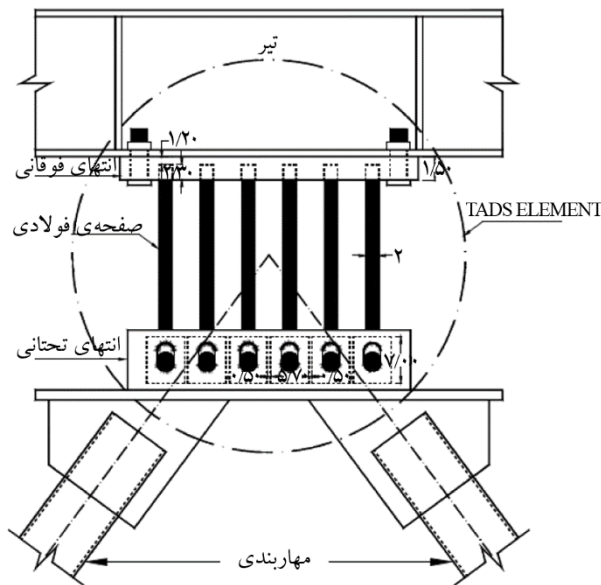
خمشی پیرامونی انتخاب شده‌اند. در شکل (۱- ج) محل و موقعیت میراگرها و در شکل (۱- د) جزئیات اتصال میراگر TADAS نمایش داده شده است. مشخصات میراگرها و روند طراحی آنها در بخش‌های بعد آورده شده است.



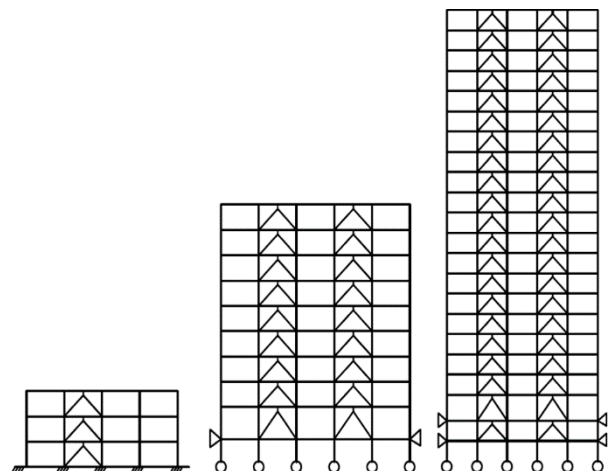
(ب) نمای جانبی قاب انتخاب شده



(الف) پلان طبقات



(د) جزئیات اتصال میراگر TADAS



(ج) محل میراگرها

شکل (۱): مشخصات هندسی سازه‌های انتخاب شده از پروژه SAC و محل تعبیه میراگر.

جدول (۱): مقاطع تیر و ستون‌ها و ورق‌های مضاعف قاب ۳ طبقه [۱۴].

تیر	ضخامت ورق مضاعف (mm)		ستون		طبقه
	ستون میانی	ستون کناری	میانی	کناری	
W30X116	۰	۰	W14X311	W14X257	۱
W30X116	۰	۰	W14X311	W14X257	۲
W24X62	۰	۰	W14X311	W14X257	۳

جدول (۲): مقاطع تیر و ستون‌ها و ورق‌های مضاعف قاب ۹ طبقه [۱۴].

تیر	ضخامت ورق مضاعف (mm)		ستون		طبقه
	ستون میانی	ستون کناری	میانی	کناری	
W30X150	۰	۰	W14X500	W14X370	۱-۱
W30X150	۰	۰	W14X500	W14X370	۱
W30X150	۰	۰	W14X500, 14X455	W14X370, W14X370	۲
W33X141	۰	۰	W14X455	W14X370	۳
W33X141	۰	۰	W14X455, 14X370	W14X370, W14X283	۴
W33X141	۰	۰	W14X370	W14X283	۵
W33X130	۱۲	۰	W14X370, 14X283	W14X283, W14X257	۶
W27X102	۰	۰	W14X283	W14X257	۷
W27X94	۱۲	۰	W14X283, 14X257	W14X257, W14X233	۸
W24X62	۰	۰	W14X257	W14X233	۹

توضیح: مقاطع ستون‌های میانی مقاطع بال پهن استاندارد و تیرها به صورت مقاطع استاندارد I شکل می‌باشد.

جدول (۳): مقاطع تیر و ستون‌ها و ورق‌های مضاعف قاب ۹ طبقه [۱۴].

تیر	ضخامت ورق مضاعف (mm)		ستون		طبقه
	ستون میانی	ستون کناری	میانی	کناری	
W14X22	۰	۰	W24X335	15X15X2.00	۲-
W30X99	۰	۰	W24X335	15X15X2.00	۱-
W30X99	۰	۰	W24X335	15X15X2.00	۱
W30X99	۰	۰	W24X335, W24X335	15X15X2.00, 15X15X1.25	۲
W30X99	۰	۰	W24X335	15X15X1.25	۳
W30X99	۰	۰	W24X335	15X15X1.25	۴
W30X108	۰	۰	W24X335, W24X279	15X15X1.25, 15X15X1.00	۵
W30X108	۱۲	۰	W24X279	15X15X1.00	۶
W30X108	۰	۰	W24X279	15X15X1.00	۷
W30X108	۰	۰	W24X279, W24X279	15X15X1.00, 15X15X1.00	۸
W30X108	۰	۰	W24X279	15X15X1.00	۹
W30X108	۰	۰	W24X279	15X15X1.00	۱۰
W30X108	۰	۰	W24X279, W24X229	15X15X1.00, 15X15X1.00	۱۱
W30X99	۰	۰	W24X229	15X15X1.00	۱۲
W30X99	۰	۰	W24X229	15X15X1.00	۱۳
W30X99	۱۶	۰	W24X229, W24X162	15X15X1.00, 15X15X0.75	۱۴
W30X99	۱۶	۰	W24X162	15X15X0.75	۱۵
W30X99	۱۶	۰	W24X162	15X15X0.75	۱۶
W27X84	۱۶	۰	W24X162, W24X117	15X15X0.75, 15X15X0.75	۱۷
W27X84	۱۶	۰	W24X117	15X15X0.75	۱۸
W24X62	۰	۰	W24X117, W24X94	15X15X0.75, 15X15X0.50	۱۹
W21X50	۱۲	۰	W24X94	15X15X0.50	۲۰

توضیح: مقاطع ستون‌های کناری قوطی، ستون‌های میانی بال پهن استاندارد و تیرها به صورت مقاطع استاندارد I شکل می‌باشد.

درصد میرایی سازه  $\approx 2\%$  میرایی بحرانی آنها در نظر گرفته شده است. در طراحی قاب‌ها، عموماً الزامات جابه‌جایی حاکم بوده و در نتیجه مقاطع از نظر مقاومتی قوی‌تر از حد نیاز و نسبت تنش در آنها پایین می‌باشد.

### ۳- طرح میراگرهای TADAS

فرضیات اصلی در بارگذاری، تحلیل و طراحی قاب‌های مجهز به میراگرها مشابه قاب‌های اصلی SAC است. در قاب‌های مجهز به میراگر، برای اعضای مهاربندهای شورون و نیز ورق‌های میراگر، از فولاد A36 استفاده شده است. روش پیشنهادی طراحی میراگرهای تسلیمی یک روش نسبتاً سراسر است بوده و جزئیات آن در مراجع [۵، ۶، ۱۶] به تفصیل شرح داده شده است. به‌طور کلی روند طراحی این سیستم‌ها به شرح زیر است:

- ابعاد و اندازه ورق‌های میراگر تخمین زده می‌شوند.
- سختی جانبی الاستیک ( $K_d$ )، مقاومت تسلیم ( $P_y$ )، مقاومت پلاستیک ( $P_p$ )، جابه‌جایی تسلیم ( $\Delta y$ ) ورق‌ها از روابط پیشنهاد شده در مراجع [۵] و [۶] محاسبه می‌شوند. همچنین بر مبنای مقاطع اولیه، سختی قاب خمشی و سختی افقی مهاربندها در هر طبقه نیز محاسبه می‌شوند.
- مشخصات و تعداد ورق‌ها و مقاطع مهاربندها به نحوی تعیین می‌شوند که حداقل‌های تعیین شده برای دو کمیت  $B/D$  (نسبت سختی افقی مهاربند به سختی ورق‌های میراگر) و  $SR$  (نسبت مجموع سختی میراگر و مهاربند به سختی قاب) تأمین شود. این دو کمیت جزء مهم‌ترین مراحل طراحی سیستم‌های مجهز به میراگرهای تسلیمی هستند. به دلیل وابستگی روابط محاسباتی این دو کمیت، این مرحله عملاً به‌صورت آزمون و خطا خواهد بود.
- در مرحله آخر، مطابق یکی از روش‌ها و روابط پیشنهادی آیین‌نامه ASCE 7-10 [۱۶]، برش پایه، جابه‌جایی، شکل‌پذیری، میرایی مؤثر و سایر پارامترهای لازم برای طراحی این سیستم‌ها محاسبه می‌شوند.

قاب‌های SAC پس از رخداد زلزله نورث‌ریج (۱۹۹۴) مورد بازبینی و طراحی مجدد قرار گرفتند که در مدل‌های انتخابی از مقاطع اصلاح شده استفاده گردیده است. مدل‌های سازه‌ای اصلاح شده در گزارش مذکور با نام «مدل M2» است که در آن طول اعضا به‌صورت خالص برحسب دهنه محاسبه شده و ورق‌های مضاعف در محل اتصال تیر و ستون در نظر گرفته شده‌اند. محل‌های وصله ستون‌ها حدود  $1/8$  متر بالاتر از تراز طبقه قرار دارد که در مدل‌های سازه‌ای این مطالعه نیز اعمال شده است. در قاب خمشی ۳ طبقه در یکی از دهنه‌های کناری تیرها دارای اتصال مفصلی و مابقی اتصالات به‌صورت صلب است. در قاب ۹ طبقه و ۲۰ طبقه تمامی اتصالات صلب هستند. در قاب ۹ طبقه، یک طبقه زیرزمین با مهار جانبی و در قاب ۲۰ طبقه دو طبقه زیرزمین مهار شده وجود دارد. در بارگذاری ثقلی، بارها به‌صورت زیر برای همه قاب‌ها در نظر گرفته شده است:

- بار مرده طبقات معادل  $4/6 \text{ kN/m}^2$ .
- بار مرده بام معادل  $3/97 \text{ kN/m}^2$  با احتساب بار خرپشته.
- بار زنده کاهش یافته مؤثر در طبقات و بام معادل  $0/96 \text{ kN/m}^2$ .
- بارگذاری لرزه‌ای و طراحی قاب‌ها بر اساس آیین‌نامه UBC 94 [۱۵] انجام شده است. برای سازگاری مراحل تحلیل و طراحی، محل احداث پروژه مشابه گزارش مرجع [۱۴] شهر لس‌آنجلس است که نوع خاک آن مطابق طبقه‌بندی ASCE 7-10 [۱۵] از نوع خاک تیپ D (Stiff Soil - نهشته سخت) است. لرزه‌خیزی محل پروژه Zone 4 و کاربری ساختمان اداری است. در طراحی قاب‌ها جهت رعایت ضابطه تیر ضعیف - ستون قوی فولاد مورد استفاده برای ستون‌ها A50 با تنش جاری شدن  $F_y=50 \text{ ksi}$  (معادل  $344738 \text{ kN/m}^2$ ) و تیرها از فولاد A36 با تنش جاری شدن  $F_y=36 \text{ ksi}$  (معادل  $248211 \text{ kN/m}^2$ ) انتخاب شده است. اثرات ناحیه اتصال<sup>۳</sup> متناسب با ارتفاع تیر و ستون منظور شده و از اثرات میانقاب‌ها صرف‌نظر شده است. همچنین اثرات  $P-\Delta$  با توجه به اهمیت آن در قاب‌های خمشی لحاظ شده است. دیافراگم طبقات به‌صورت صلب به‌گروه‌ها اعمال شده است.

جدول (۶): مشخصات ورق‌های TADAS و مهاربندهای شورون در قاب ۲۰ طبقه.

طبقه	ارتفاع ورق h(m)	پهنای ورق b(m)	ضخامت ورق t(m)	تعداد ورق	مقطع مهاربند
۲۰	۰/۳۵۱	۰/۳۵	۰/۰۵	۱۲	HSS5×5×0.125
۱۹	۰/۴۱۹	۰/۳۵	۰/۰۵	۱۰	HSS6×6×0.188
۱۸	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۱۸	HSS4×4×0.500
۱۷	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۰	HSS6×6×0.375
۱۶	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۲	HSS6×6×0.375
۱۵	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۴	HSS5×5×0.500
۱۴	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۴	HSS6×6×0.500
۱۳	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۶	HSS7×7×0.500
۱۲	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۶	HSS7×7×0.500
۱۱	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۶	HSS8×8×0.500
۱۰	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۸	HSS8×8×0.500
۹	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۳۰	HSS8×8×0.500
۸	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۳۰	HSS8×8×0.500
۷	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۳۲	HSS8×8×0.500
۶	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۳۲	HSS8×8×0.500
۵	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۳۲	HSS10×10×0.500
۴	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۳۲	HSS10×10×0.500
۳	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۴۲	HSS12×12×0.500
۲	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۴۲	HSS12×12×0.500
۱	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۳۲	HSS16×16×0.625

در این مطالعه، مقدار هر دو کمیت B/D و SR مطابق توصیه‌های پژوهشگران مختلف از جمله ژیا و هانسون [۴] و تسای و همکاران [۵] حداقل برابر ۲ در نظر گرفته شده است ( $B/D \geq 2$ ,  $SR \geq 2$ ). در مواردی که مقدار این دو کمیت باهم برابر نیستند، جهت جلوگیری از کماتش مهاربندها با تأکید بر رعایت  $B/D=2$  مقدار SR تعیین شده است. تعداد ورق‌ها و مقاطع پروفیل مهاربندهای شورون چنان تعیین شده‌اند که مقادیر حداقل B/D و SR تأمین شوند.

بر اساس روند بیان شده، مشخصات ورق‌های میراگر و مهاربندها در جدول‌های (۴)، (۵) و (۶) برای هر سه سازه نشان داده شده است.

جدول (۴): مشخصات ورق‌های TADAS و مهاربندهای شورون در قاب ۳ طبقه.

طبقه	ارتفاع ورق h(m)	پهنای ورق b(m)	ضخامت ورق t(m)	تعداد ورق	مقطع مهاربند
۳	۰/۳۵۱	۰/۳۵	۰/۰۵	۱۰	HSS14×14×0.500
۲	۰/۳۵۱	۰/۳۵	۰/۰۵	۱۰	HSS14×14×0.500
۱	۰/۳۵۱	۰/۳۵	۰/۰۵	۱۲	HSS14×14×0.625

توضیح: HSS مقاطع قوطی شکل توخالی بر اساس استاندارد آمریکا هستند.

جدول (۵): مشخصات ورق‌های TADAS و مهاربندهای شورون در قاب ۹ طبقه.

طبقه	ارتفاع ورق h(m)	پهنای ورق b(m)	ضخامت ورق t(m)	تعداد ورق	مقطع مهاربند
۹	۰/۳۵۱	۰/۳۵	۰/۰۵	۶	HSS6×6×0.375
۸	۰/۴۱۹	۰/۳۵	۰/۰۵	۱۰	HSS6×6×0.375
۷	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۱۸	HSS7×7×0.375
۶	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۴	HSS7×7×0.500
۵	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۶	HSS8×8×0.500
۴	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۶	HSS8×8×0.500
۳	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۳۰	HSS9×9×0.500
۲	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۳۰	HSS9×9×0.500
۱	۰/۴۷۶	۰/۳۵	۰/۰۵	۲۸	HSS9×9×0.625

## ۴- روش‌های تحلیل

در این مقاله از دو روش تحلیل بار افزون<sup>۴</sup> و تاریخچه زمانی غیرخطی برای ارزیابی رفتار سازه‌ها استفاده شده است. هدف از انجام تحلیل بار افزون، ارزیابی سطح عملکرد و تعیین منحنی‌های ظرفیت سازه‌ها و ارزیابی تأثیر میراگرها بر آنها بوده است. در مقابل، هدف از تحلیل تاریخچه زمانی تعیین میزان و مقدار جابه‌جایی‌های پسماند و سایر پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها، ارزیابی نتایج تحلیل‌های بار افزون و تأثیر میراگرها بر پاسخ دینامیکی سازه‌ها می‌باشد. انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی از نقطه‌نظر ارزیابی اثر مدهای بالا در رفتار غیرخطی سیستم بسیار حائز اهمیت است. تحلیل‌های تاریخچه زمانی بر اساس الزامات نشریه ۳۶۰ [۱۷]، ویرایش چهارم استاندارد

در رابطه فوق  $T_e$  زمان تناوب مؤثر سازه،  $C_0$  ضریب اصلاح برای ارتباط تغییر مکان طیفی سیستم یک درجه آزادی به تغییر مکان بام سیستم چند درجه آزادی،  $C_1$  ضریب تصحیح برای اعمال تغییر مکان غیر ارتجاعی سیستم،  $C_2$  ضریب تصحیح برای اثرات کاهش سختی و مقاومت اعضای سازه‌ای بر تغییر مکان‌های ناشی از زوال چرخه‌ای،  $S_a$  شتاب طیفی به ازای زمان تناوب اصلی مؤثر سازه می‌باشد.

۲۸۰۰ [۱۸] و آیین‌نامه ASCE7-10 [۱۵] انجام شده است.

برای انجام تحلیل بار افزون مقدار تغییر مکان هدف برای هر کدام از قاب‌ها مطابق نشریه ۳۶۰ برای الگوی بار جانبی نوع اول (شکل مد اول سازه) از رابطه (۱) انجام شده است. جهت اختصار از ارائه محاسبات مقادیر پارامترهای مربوط به تغییر مکان هدف خودداری شده است و خلاصه آنها در جداول (۷) و (۸) نشان داده شده است.

$$C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (1)$$

جدول (۷): تغییر مکان هدف و پارامترهای آن بر اساس توزیع بار نوع اول برای قاب‌های SAC.

نوع قاب	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$S_a$	$T_e$	$\delta_t$ (m)
طبقه ۳	۱/۲	۱	۱	۰/۵۲۲	۱/۱۲	۰/۲۰
طبقه ۹	۱/۳	۱	۱	۰/۲۵۴	۲/۳۰	۰/۴۳
طبقه ۲۰	۱/۳	۱	۱	۰/۱۳۵	۴/۳۳	۰/۸۲

#### ۵- شتاب‌نگاشت‌های انتخابی و روش مقیاس آنها

برای انجام تحلیل‌های غیرخطی تاریخچه زمانی، ۱۱ شتاب‌نگاشت دور از گسل برای مدل‌های سازه‌ای انتخاب شده است. استفاده از ۱۱ رکورد در مرجع [۱] برای پایداری پارامترهای آماری پاسخ‌ها توصیه شده است. ۱۱ شتاب‌نگاشت از مجموعه شتاب‌نگاشت‌های پیشنهاد شده در نشریه FEMA P695 [۱۸] برای حوزه دور از گسل انتخاب شده که خلاصه مشخصات آنها در جدول (۹) نشان داده شده است. نوع خاک شتاب‌نگاشت‌ها بر اساس طبقه‌بندی ASCE خاک نوع C (very dense soil and soft rock) و نوع D (stiff soil) (خاک متراکم یا سنگ نرم و خاک سخت) در نظر گرفته شده است.

جدول (۸): تغییر مکان هدف و پارامترهای آن بر اساس توزیع بار نوع اول برای قاب‌های TADAS.

نوع قاب	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$S_a$	$T_e$	$\delta_t$ (m)
طبقه ۳	۱/۲	۱/۱۲	۱	۱	۰/۵۸	۰/۱۱
طبقه ۹	۱/۳	۱	۱	۰/۳۸۲	۱/۵۳	۰/۲۹
طبقه ۲۰	۱/۳	۱	۱	۰/۱۸۸	۳/۱۲	۰/۵۹

جدول (۹): مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخابی از مرجع [۱۸].

ردیف	نام شتاب‌نگاشت	PGA(g)	سال وقوع	شماره	نام ایستگاه
۱	سان‌فرناندو	۰/۲۲۵	۱۹۷۱	۶۸	هالیوود استور
۲	فریولی ایتالیا-۰۱	۰/۳۵۷	۱۹۷۶	۱۲۵	تولمزو
۳	امپریال ولی-۰۶	۰/۳۵۰	۱۹۷۹	۱۶۹	دلنا
۴	سوپر استیشن هیلز-۰۲	۰/۴۷۵	۱۹۸۷	۷۲۵	پوی رود
۵	لوماپرتا	۰/۵۵۹	۱۹۸۹	۷۶۷	گیلروی آرای
۶	لندرز	۰/۴۱۷	۱۹۹۲	۸۴۸	کول واتر
۷	نورتریج-۰۱	۰/۴۸۸	۱۹۹۴	۹۵۳	بورلی هیلز
۸	کوبه زاین	۰/۴۸۳	۱۹۹۵	۱۱۱۱	نیشی آکاشی
۹	کوجیلی ترکیه	۰/۲۱۰	۱۹۹۹	۱۱۴۸	آرسلیک
۱۰	کوجیلی ترکیه	۰/۳۶۴	۱۹۹۹	۱۱۵۸	دوزج
۱۱	دوزج ترکیه	۰/۸۰۶	۱۹۹۹	۱۶۰۲	بولو

استاندارد ۲۸۰۰ ( $0.2 T_1, 1.5T_1$ ) و برای قاب‌های مجهز به میراگر مطابق ASCE 7-10 ( $0.5T_{ID}, 1.25T_{IM}$ ) در نظر گرفته شده است. منظور از  $T_{ID}$ ،  $T_1$ ،  $T_{IM}$  به ترتیب زمان تناوب مد اصلی سیستم (زمان تناوب تجربی مطابق روند هم‌پایه‌سازی استاندارد ۲۸۰۰)، زمان تناوب مؤثر مد اصلی سازه تحت زلزله طرح و زمان تناوب مؤثر مد اصلی سازه در بیشترین جابه‌جایی تحت حداکثر زلزله محتمل (MCE) است. لازم به ذکر است که مطابق استاندارد ۲۸۰۰ برای هم‌پایه‌سازی می‌توان زمان تناوب تجربی را در  $1/25$  نیز ضرب نمود. مقادیر  $T_{ID}$  و  $T_{IM}$  از روابط زیر مطابق روابط ASCE 7-10 برای سازه‌های مجهز به میراگر محاسبه می‌شوند:

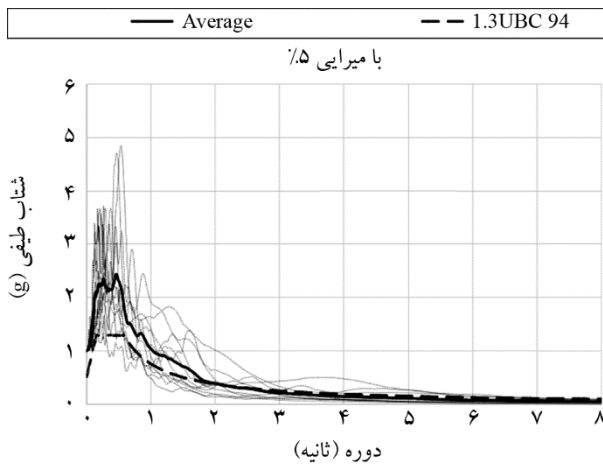
$$T_{1D} = T_1 \sqrt{\mu_D} \quad (2)$$

$$T_{1M} = T_1 \sqrt{\mu_M} \quad (3)$$

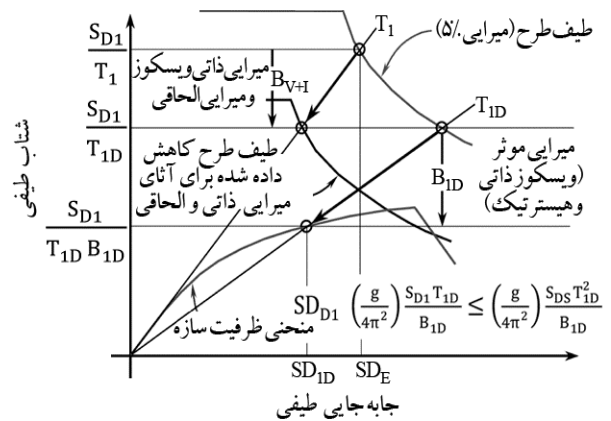
در روابط فوق،  $\mu_D$  و  $\mu_M$  به ترتیب شکل‌پذیری تقاضای سیستم لرزه بر تحت اثر زلزله‌های طرح و حداکثر زلزله محتمل است. مقادیر زمان‌های تناوب، مقادیر میرایی مؤثر، شکل‌پذیری‌های تقاضای تمامی سازه‌ها و نیز ضرایب هم‌پایه‌سازی برای مجموعه شتاب‌نگاشت‌ها برای هر دو نوع سازه مجهز و غیر مجهز به میراگرهای TADAS در جداول (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. در شکل (۳-الف) طیف شتاب تمامی رکوردها و میانگین آنها همراه با  $1/3$  برابر طیف طرح UBC 94 (که مبنای طراحی قاب‌ها در پروژه SAC بوده است) برای میرایی ۵ درصد نشان داده شده است. در شکل (۳-ب)، میانگین طیف شتاب تمامی رکوردهای اصلی و رکوردهای مقیاس شده به  $1g$  (مطابق مرحله اول هم‌پایه‌سازی رکوردها در استاندارد ۲۸۰۰)، طیف طرح UBC،  $1/3$  طیف طرح UBC و طیف میانگین مقیاس شده رکوردها برای سازه ۹ طبقه بدون میراگر در محدوده پریودی  $(0.32, 2.40) = (0.2 T_1, 1.5T_1)$  و با فرض میرایی ۵ درصد به‌عنوان نمونه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که طیف میانگین مقیاس شده در محدوده پریودی فوق‌الذکر همواره بالاتر از  $1/3$  برابر طیف طرح قرار گرفته است.

یکی از مراحل مهم در تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی که تأثیر بسیار زیادی بر پاسخ‌های سازه دارد، روش هم‌پایه‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها است. در مطالعه حاضر، جهت هم‌پایه نمودن شتاب‌نگاشت‌ها برای قاب‌های SAC از ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ [۱۹] و برای قاب‌های مجهز به سیستم TADAS از روش آیین‌نامه ASCE 7-10 [۱۵] استفاده شده است. با توجه به اینکه طراحی قاب‌های فولادی SAC بر اساس آیین‌نامه UBC 94 [۱۶] انجام شده است، جهت به دست آوردن ضریب هم‌پایگی باید طیف میانگین شتاب‌نگاشت‌ها با طیف طراحی آیین‌نامه مذکور مقایسه شود. در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ [۱۹] در مراحل هم‌پایه‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها، باید طیف طرح را  $1/3$  (با امکان کاهش ۱۰ درصد) افزایش داد. استاندارد ۲۸۰۰ فاقد ضوابط هم‌پایه‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها برای انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی بر روی سازه‌های مجهز به میراگر است؛ بنابراین، در این مطالعه برای ارزیابی پاسخ دینامیکی سازه‌های مجهز به میراگر از ضوابط آیین‌نامه ASCE 7-10 [۱۵] استفاده شده است. در آیین‌نامه ASCE 7-10 و دستورالعمل NEHRP 2003 [۲۰] برای هم‌پایه‌سازی شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل‌های دینامیکی سیستم‌های مجهز به میراگر، می‌توان طیف طراحی را متناسب با میزان میرایی مؤثر سازه با استفاده از ضرایب  $B_{V+I}$  و ذاتی، ویسکوز و هیسترتیک است که در سیستم میراگرهای تسلیمی به دلیل وابستگی پاسخ به جابه‌جایی، میزان میرایی ویسکوز برای آنها صفر است. در فرایند هم‌پایه‌سازی، استاندارد ۲۸۰۰ از زمان تناوب تجربی و آیین‌نامه ASCE 7-10 از زمان تناوب تحلیلی استفاده می‌کنند. با توجه به وابستگی روابط محاسبه میرایی هیسترتیک به زمان تناوب سازه، در صورت استفاده از زمان تناوب تجربی داده شده در آیین‌نامه، میزان میرایی هیسترتیک سازه‌ها در روش ۲۸۰۰ کمتر از روش ASCE به دست می‌آید. در این مقاله از روند استاندارد ۲۸۰۰ استفاده شده است. محدوده پریودی هم‌پایه‌سازی برای قاب‌ها مطابق

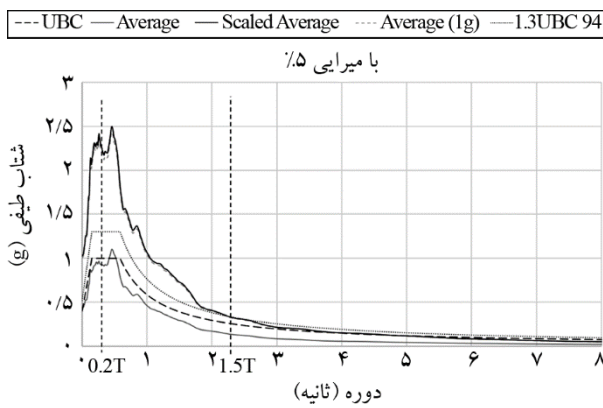




شکل (۳-الف): طیف شتاب میانگین شتاب‌نگاشت‌ها و طیف طراحی افزایش یافته جهت هم‌پایه نمودن شتاب‌نگاشت‌ها برای قاب‌های SAC بر اساس روش استاندارد ۲۸۰۰.



شکل (۲): کاهش طیف طراحی به علت میرایی مؤثر در سیستم‌های میرایی (NEHRP 2003) [۲۰].



شکل (۳-ب): طیف شتاب میانگین شتاب‌نگاشت‌ها، طیف میانگین مقیاس شده به  $g$ ، طیف میانگین مقیاس شده نهایی، طیف طراحی و طیف طراحی افزایش یافته جهت هم‌پایه نمودن شتاب‌نگاشت‌ها برای قاب ۹ طبقه SAC بر اساس روش استاندارد ۲۸۰۰ (محدودی پربودی نشان داده شده برای هم‌پایه‌سازی بازه  $(0.30, 2.26) = (0.2 T_1, 1.5 T_1)$  است.

جدول (۱۰): میرایی مؤثر، ضرایب هم‌پایه‌سازی رکوردها، ضرایب کاهش طیف طرح و شکل‌پذیری‌های تقاضا.

قاب	میرایی مؤثر (درصد)		ضریب هم‌پایگی		$\mu_M$	$\mu_D$	$B_{1D}$
	TADAS	SAC	TADAS	SAC			
۳ طبقه	۰/۰۶۶	۰/۰۲	۰/۷۸۹۳	۰/۷۶۰۵	۱/۰۶۱۵	۱/۰۷۵	۱/۰۳۸
۹ طبقه	۰/۱۱۹	۰/۰۲	۱/۰۲۵۲	۰/۹۲۵۴	۲/۲۶	۱/۴۷	۱/۲۵۶
۲۰ طبقه	۰/۰۶۸	۰/۰۲	۱/۲۸۱۵	۱/۱۸	۱/۸	۱/۱۸۳	۱/۱

جدول (۱۱): زمان تناوب تحلیلی مد اصلی سازه‌ها.

قاب	زمان تناوب تحلیلی قاب خمشی (ثانیه)	زمان تناوب قاب خمشی بر اساس گزارش SAC (ثانیه)	درصد اختلاف زمان تناوب گزارش SAC و مدل‌های تحلیلی این مطالعه	زمان تناوب تجربی قاب خمشی (ثانیه)	زمان تناوب تحلیلی قاب‌های مجهز به میراگر
۳ طبقه	۱/۰۹	۱/۰۱	۷/۹	۰/۶۴	۰/۵۸
۹ طبقه	۲/۳۰	۲/۲۴	۲/۷	۱/۵۰۶	۱/۵۱
۲۰ طبقه	۴/۰۷	۳/۷۴	۸/۸	۲/۶۹۴	۳/۱۶

## ۶- مدل سازی غیرخطی

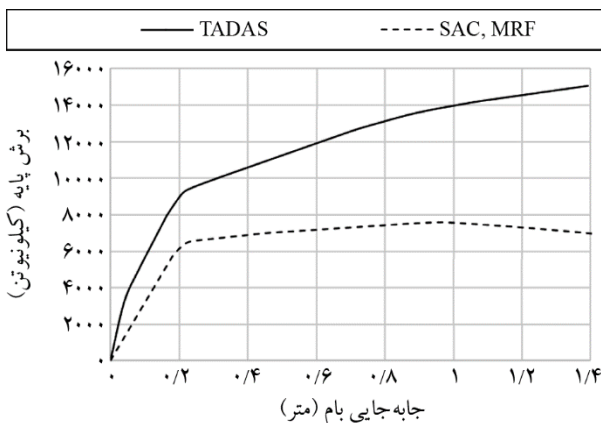
غیرخطی به روش مبتنی بر تغییرات جذب انرژی مصالح در هر سیکل رفتاری با توجه به ماهیت زوال مصالح و مطابق توصیه‌های مرجع [۲۵] برای سازه‌های فولادی در نظر گرفته شده است. بر این اساس، میزان زوال سختی در هر سیکل غیرخطی ۵۰ درصد و میزان زوال مقاومت بین چرخه‌ای ۲۰ درصد لحاظ شده است.

گرچه اساساً رفتار پسماند سازه‌ها با استفاده از تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی ارزیابی می‌شوند، برای شناخت بیشتر رفتار سازه‌ها، علاوه بر تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی (بار افزون) نیز بر روی تمامی مدل‌ها انجام شده است. برای این منظور، مشخصات مفاصل پلاستیک مطابق نشریه ۳۶۰ و نقطه کنترل در مدل‌ها تراز بام در نظر گرفته شده است [۱۷]. به علاوه، الگوی بار جانبی مطابق مد اول مدل‌های سازه‌ای است. در بخش بعد، نتایج تحلیل‌ها آورده خواهد شد.

## ۷- نتایج

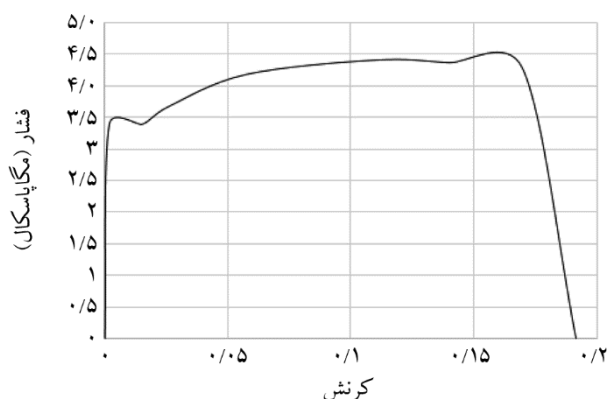
### ۷-۱- نتایج تحلیل بار افزون

منحنی‌های ظرفیت سازه‌های با و بدون میراگر TADAS به صورت جابه‌جایی بام در مقابل برش پایه در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) برای هر سه قاب نشان داده شده است. بررسی نتایج تحلیل بار افزون در بخش ۸ مقاله آورده شده است.



شکل (۵): منحنی پوش قاب ۳ طبقه SAC, MRF و TADAS.

در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی از روش پلاستیسیته گسترده (روش Fiber) برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی اجزای قاب‌ها شامل تیرها و ستون‌ها استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی میراگرهای TADAS از المان Link به طول صفر (مدل پانل زون) استفاده شده است. مدل‌سازی غیرخطی سازه‌ها در نرم‌افزار SAP2000 (نسخه ۱۹) [۲۱] انجام شده است. در مدل‌های غیرخطی، رفتار تنش-کرنش مصالح فولاد مشابه شکل (۴) (که برای نمونه مربوط به فولاد A36 است) لحاظ شده است. در تمامی انواع فولاد مصرفی (A36 و A50)، سخت‌شوندگی کرنشی ۳ درصد پس از تسلیم اولیه در نظر گرفته شده است. رفتار هیستریتیک اجزای Link در نرم‌افزار SAP2000 از نوع مدل رفتاری Plastic (Wen) مطابق توصیه‌های مرجع [۲۲] انتخاب شده است. مدل میرایی در همه مدل‌ها از نوع رایلی متناسب با جرم و سختی است.



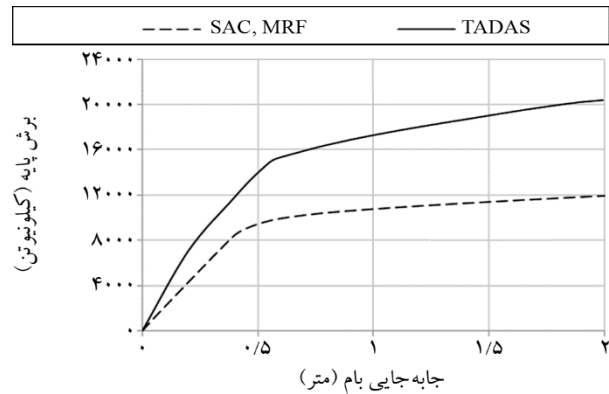
شکل (۴): نمودار تنش-کرنش مصالح فولاد (A36) در مدل‌های پلاستیسیته گسترده (فایبر).

موضوع زوال سختی و مقاومت در ارزیابی رفتار پسماند سازه‌ها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است [۲۳]. اساساً مطالعات گذشته نشان داده است که زوال سختی و مقاومت تحت اثر بارهای چرخه‌ای، به شدت بر پاسخ غیرخطی و به‌طور ویژه بر پاسخ پسماند تأثیر دارد [۲۳-۲۴]. به همین دلیل، در این مطالعه نیز آثار مذکور در تمامی مدل‌های

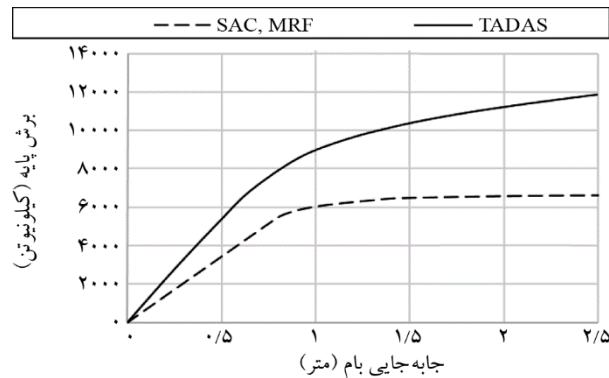
و حداکثر طبقات، جابه‌جایی پسماند، نسبت جابه‌جایی پسماند به حداکثر و پاسخ هیستریتیک سازه است. با توجه به اینکه تعداد شتاب‌نگاشت‌ها بیش از هفت عدد می‌باشد، بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ می‌توان مقدار متوسط بیشینه بازتاب‌های به‌دست آمده را به‌عنوان بازتاب نهایی تلقی کرده و مبنای مقایسه قرار داد [۱۸]. لذا در این مقاله از میانگین نتایج پاسخ‌های سازه استفاده شده است.

#### ۲-۱- تاریخچه زمانی جابه‌جایی سازه‌ها و میراگرها

در شکل‌های (۸) تا (۱۰) تاریخچه زمانی پاسخ هر سه سازه در طبقات آخر و میانی تحت چند شتاب‌نگاشت برای نمونه نشان داده شده است. همچنین جهت بررسی رفتار میراگرها تحت شتاب‌نگاشت‌های اعمالی، به‌عنوان نمونه تاریخچه زمانی جابه‌جایی میراگر در قاب ۳ طبقه در طبقات اول و سوم تحت اثر زلزله نورث‌ریج در شکل (۱۱)، در قاب ۹ طبقه در طبقات اول و چهارم تحت اثر زلزله کوچیلی ترکیه در شکل (۱۲) و در قاب ۲۰ طبقه تحت اثر زلزله امپریال ولی در طبقات دوم و زلزله سان‌فرناندو در طبقه یازدهم در شکل (۱۳) نمایش داده شده است. بروز رفتار پسماند در پاسخ‌های ترسیم شده کاملاً مشهود است. لازم به توضیح است برای مشخص تر شدن جابه‌جایی پسماند سازه‌ها پس از قطع رکورد زلزله، با اضافه کردن چندین ثانیه با شتاب صفر به انتهای فایل رکورد، عملاً شرایط ارتعاش آزاد میرا به مدل‌ها اعمال شده و در نتیجه پاسخ پسماند در پایان تاریخچه پاسخ با وضوح بیشتری قابل مشاهده است.



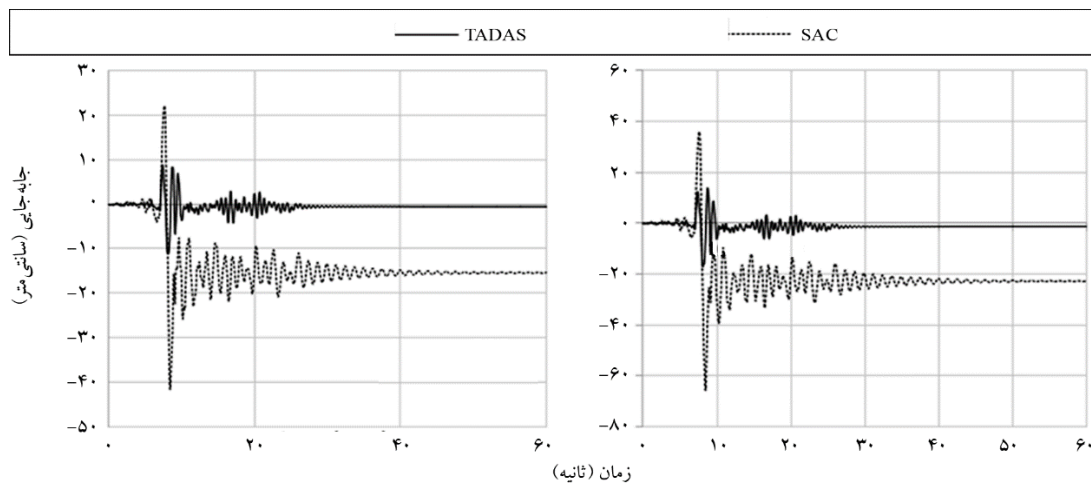
شکل (۶): منحنی پوش قاب ۹ طبقه SAC, MRF و TADAS.



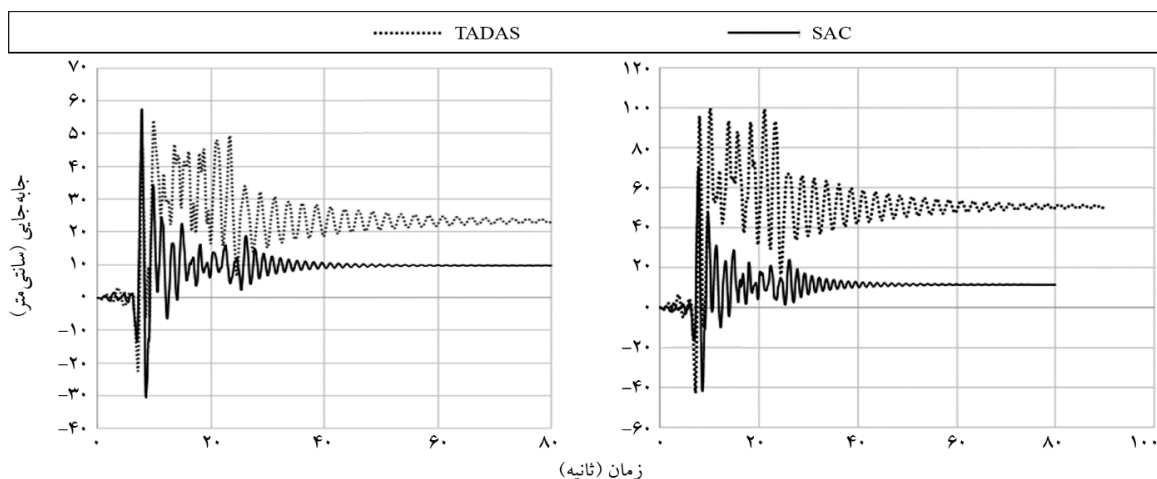
شکل (۷): منحنی پوش قاب ۲۰ طبقه SAC, MRF و TADAS.

#### ۲-۲- نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

خروجی‌ها و نتایج تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی سازه‌ها تحت ۱۱ شتاب‌نگاشت مقیاس شده، شامل میزان جابه‌جایی نسبی



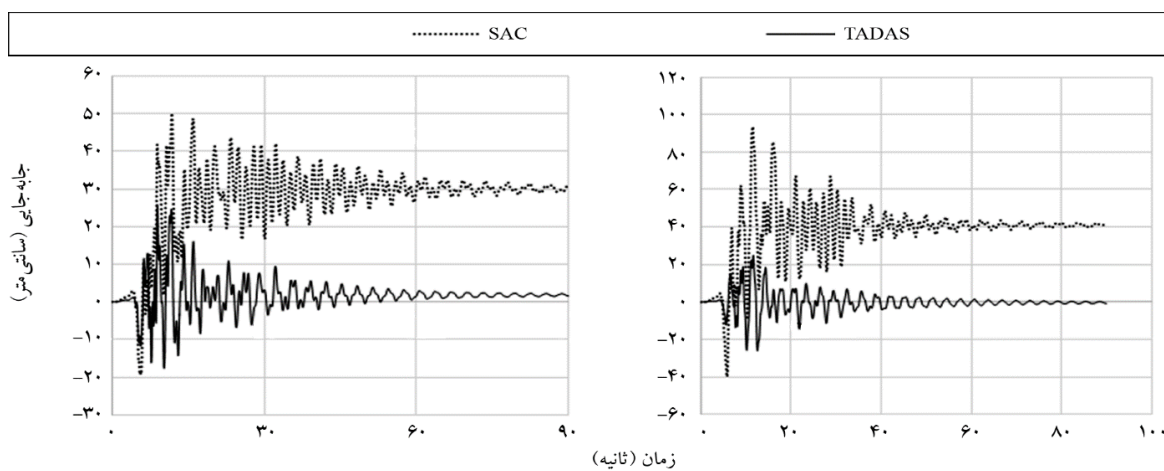
شکل (۸): مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی.



(ب) طبقه آخر قاب ۹ طبقه SAC و TADAS تحت رکورد کوچیلی ترکیه

(الف) طبقه چهارم

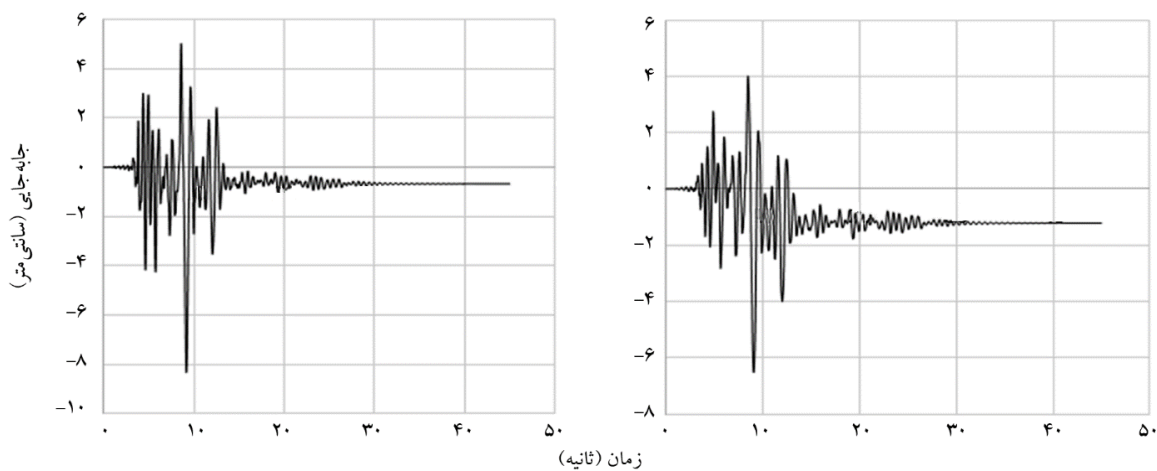
شکل (۹): مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی.



(ب) طبقه آخر قاب ۲۰ طبقه SAC و TADAS تحت رکورد کوبه ژاپن

(الف) طبقه دهم

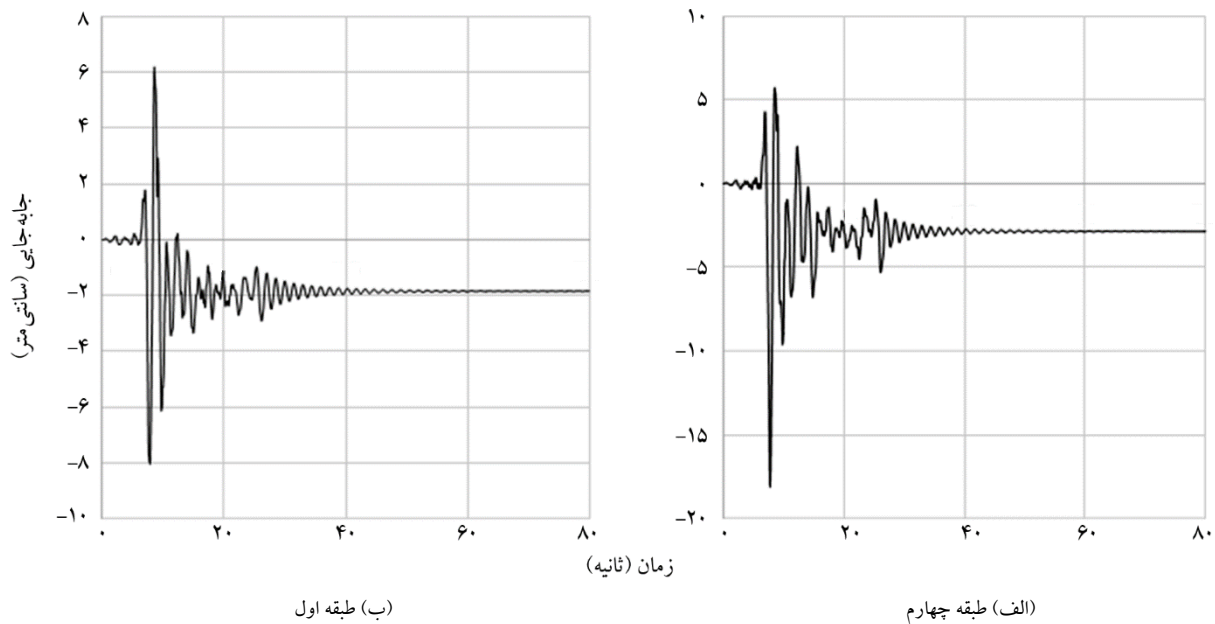
شکل (۱۰): مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی.



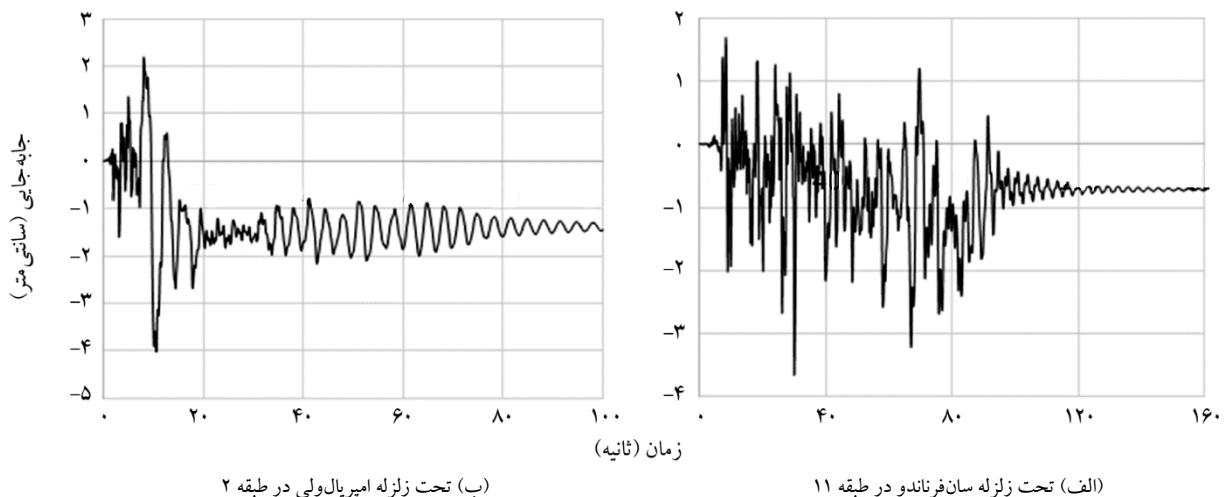
(ب) طبقه اول

(الف) طبقه سوم

شکل (۱۱): تاریخچه زمانی میراگرها در قاب ۳ طبقه تحت زلزله نورث ریج.



شکل (۱۲): تاریخچه زمانی میراگر TADAS در قاب ۹ طبقه تحت زلزله کوچیلی ترکیه.



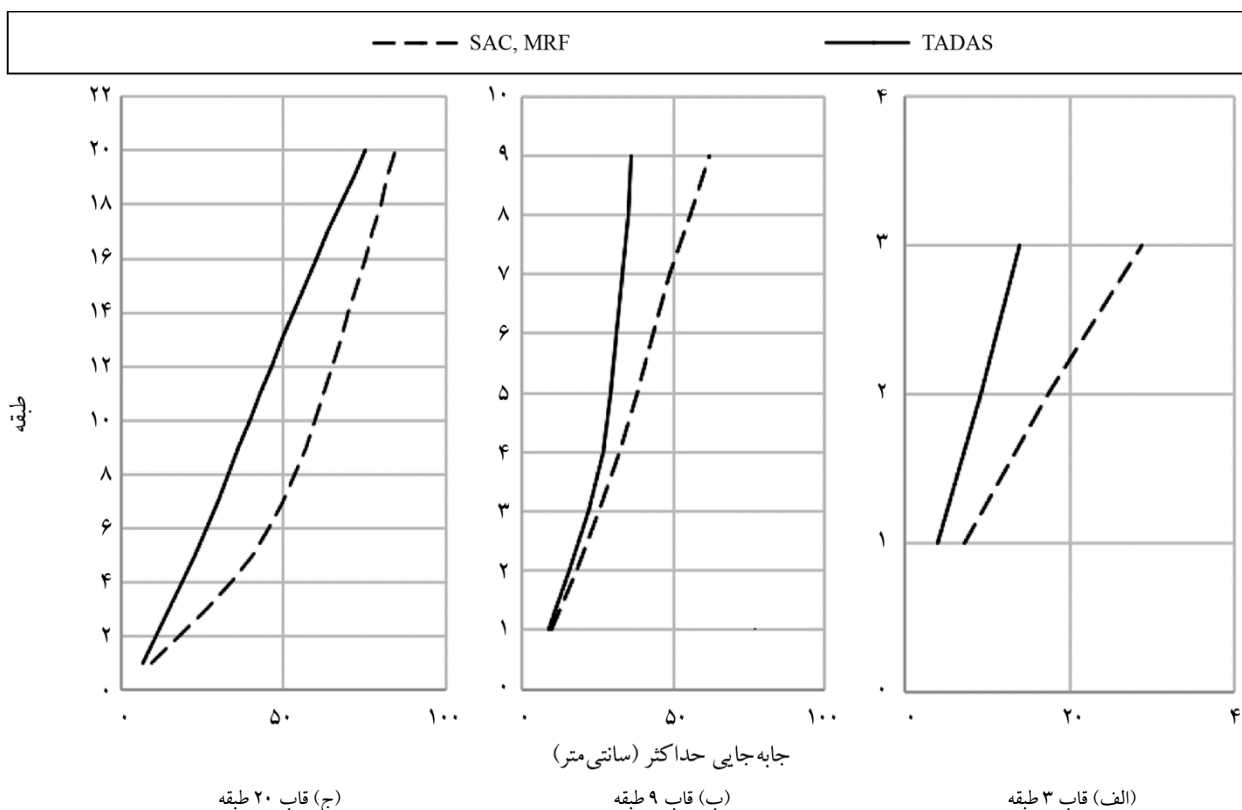
شکل (۱۳): تاریخچه زمانی میراگر TADAS در قاب ۲۰ طبقه.

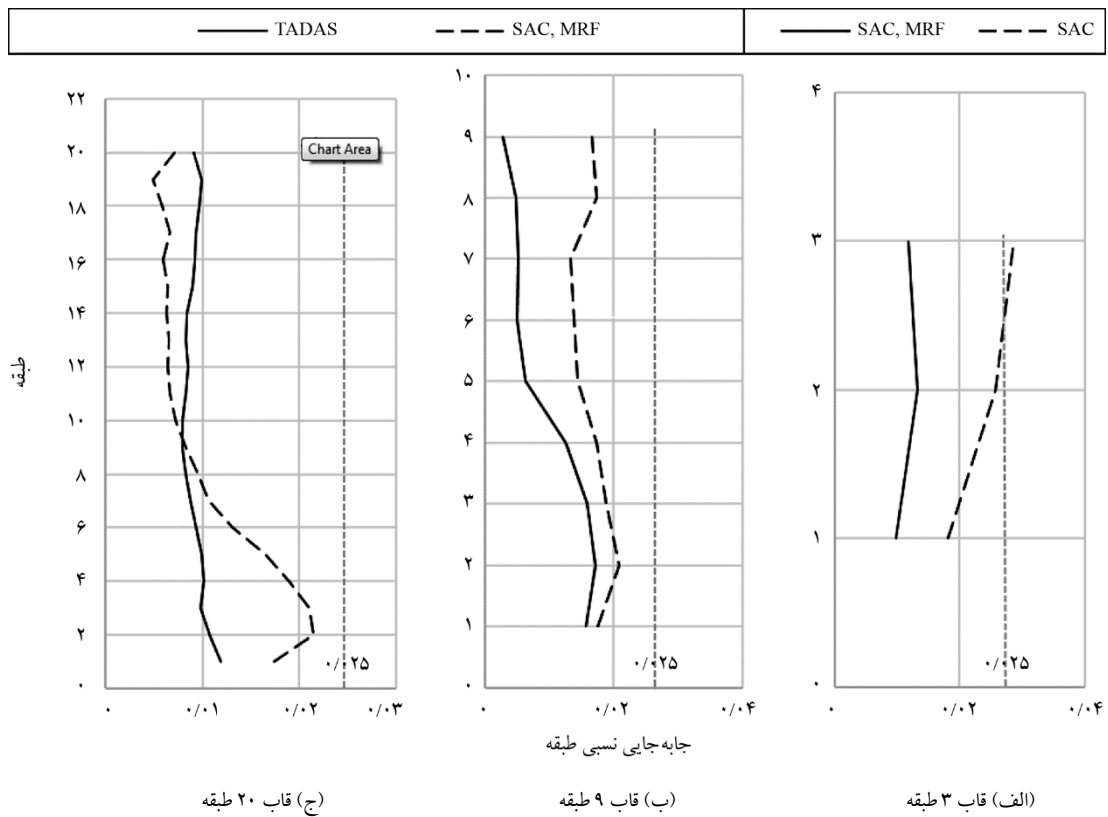
در شکل (۱۸) نشان داده شده است. جهت مقایسه دقیق‌تر، نتایج کمی میانگین حداکثر جابه‌جایی پسماند هردو سیستم سازه‌ای در جدول (۱۳) نشان داده شده است. در شکل (۱۶)، سطوح خرابی سازه مطابق حدود مشخص شده در مرجع [۱] بر اساس میزان جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند که در جدول (۱۲) آمده است، با خط‌چین نمایش داده شده است (نمایش فقط دو سطح  $DS_1$  و  $DS_2$  کفایت می‌کند). بحث در مورد نتایج در بخش شماره (۸) مقاله آورده شده است.

**۲-۲-۷- پاسخ میانگین جابه‌جایی قاب‌های SAC و TADAS**  
نتایج انواع پاسخ میانگین جابه‌جایی جانبی سازه‌ها تحت اثر ۱۱ رکورد انتخابی برای تمامی سازه‌های با و بدون میراگر در این بخش آورده شده است. میانگین حداکثر جابه‌جایی طبقات<sup>۵</sup> در شکل (۱۴)، میانگین جابه‌جایی نسبی حداکثر طبقات<sup>۶</sup> در شکل (۱۵)، میانگین حداکثر جابه‌جایی نسبی پسماند بین طبقه‌ای<sup>۷</sup> در شکل (۱۶)، میانگین حداکثر جابه‌جایی پسماند<sup>۸</sup> در شکل (۱۷) و نسبت جابه‌جایی پسماند به جابه‌جایی حداکثر

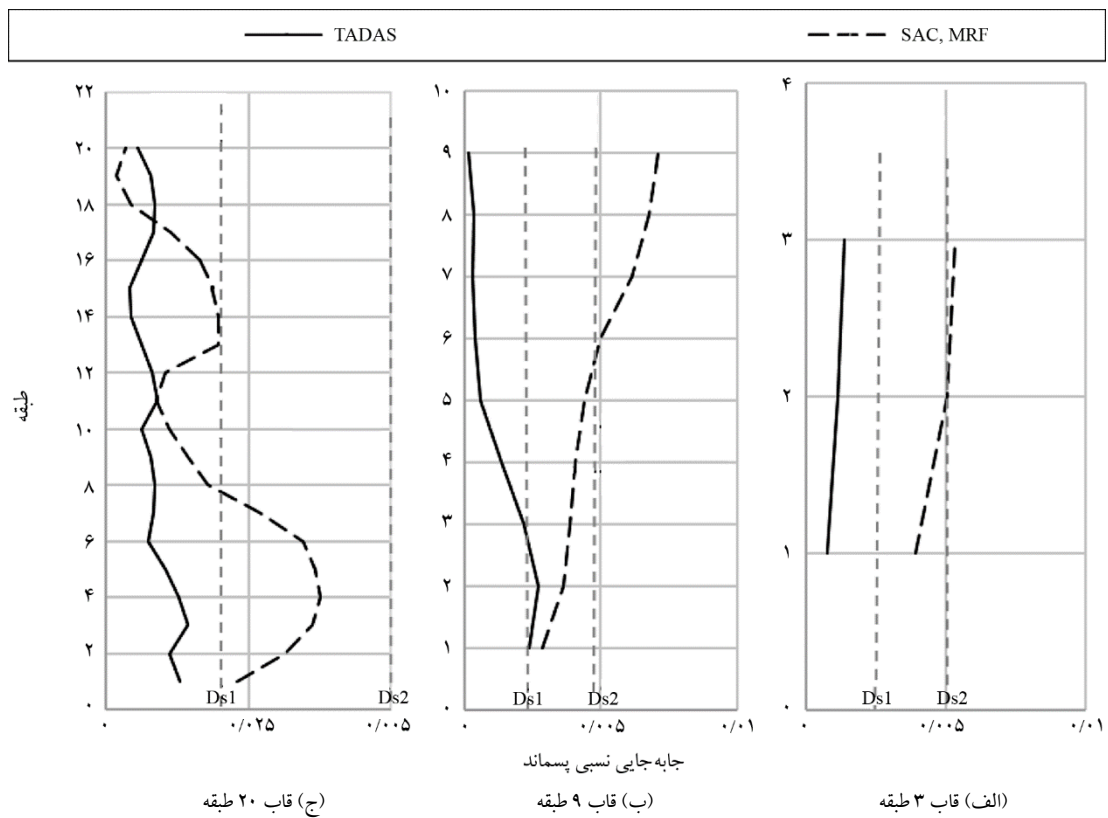
**جدول (۱۲): حالات خرابی سازه متناسب با میزان جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند (بر اساس مرجع [۱]).**

سطح خرابی	تعریف	حد جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای
DS <sub>1</sub>	شاقولی کردن اجزای سازه به‌منظور تأمین پایداری آن نیاز نیست؛ با این وصف ممکن است تعمیرهای جزئی و تنظیم مجدد محل قرارگیری اجزای ناسازه‌ای و تجهیزات مکانیکی حساس به شاقولی بودن نیاز باشد.	۰/۲ درصد
DS <sub>2</sub>	شاقولی کردن قاب سازه‌ای و انجام برخی تعمیرات سازه‌ای برای محدود کردن جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای به مقادیر مجاز جهت عملکرد مناسب اجزای ناسازه و مکانیکی و همچنین برای کاهش ناپایداری سازه‌ای (کاهش احتمال فروریزش) نیاز است.	۰/۵ درصد
DS <sub>3</sub>	شاقولی کردن قابل توجهی برای تأمین پایداری جانبی سازه نیاز است. با این وصف این عملیات و نیز عملیات تعمیر اجزای سازه ممکن است غیراقتصادی و یا حتی از نظر اجرایی غیرممکن باشد.	۱ درصد
DS <sub>4</sub>	جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند به قدری زیاد است که سازه در معرض خطر فروریزش کامل ناشی از وقوع پس‌لرزه‌ها قرار دارد (این حالت معادل فروریزش است، اما با عدم قطعیت بیشتر).	$\frac{V_{design}}{W} > 0.5$ / ۴٪ (برای سیستم‌های با شکل‌پذیری زیاد)

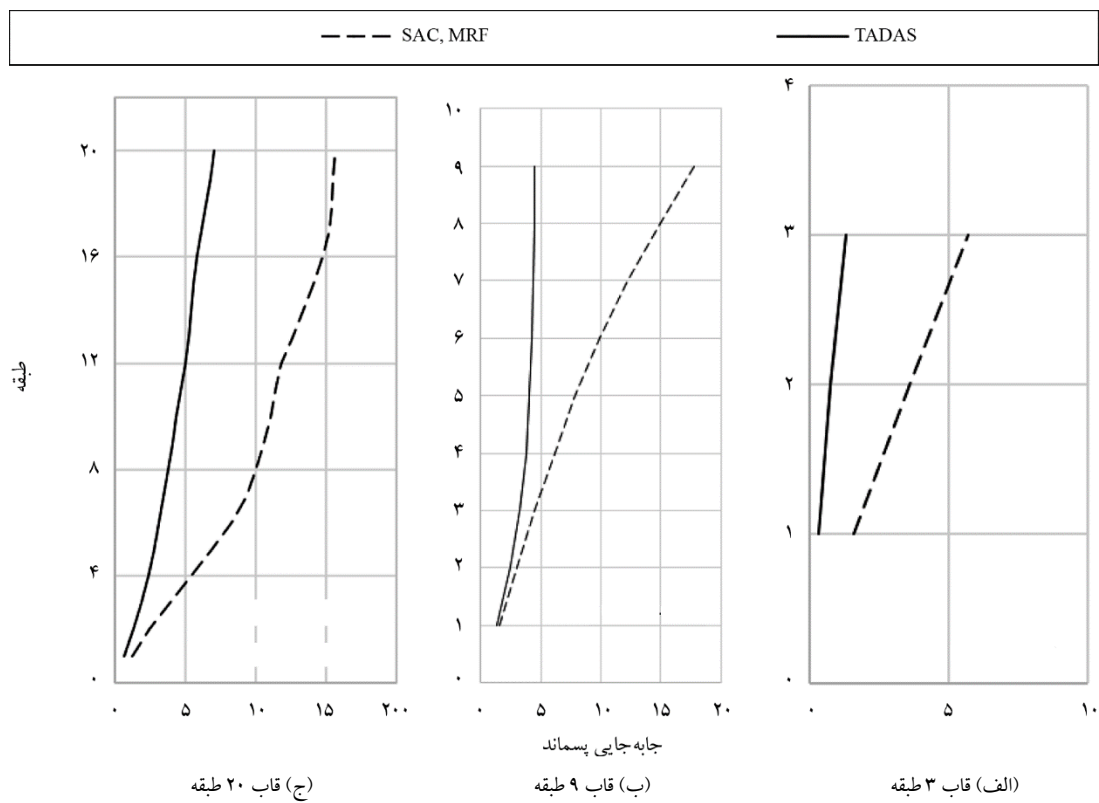
 \*  $V_{design}$  برش پایه طرح و  $W$  وزن لرزه‌ای سازه است.

**شکل (۱۴): میانگین حداکثر جابه‌جایی طبقات.**



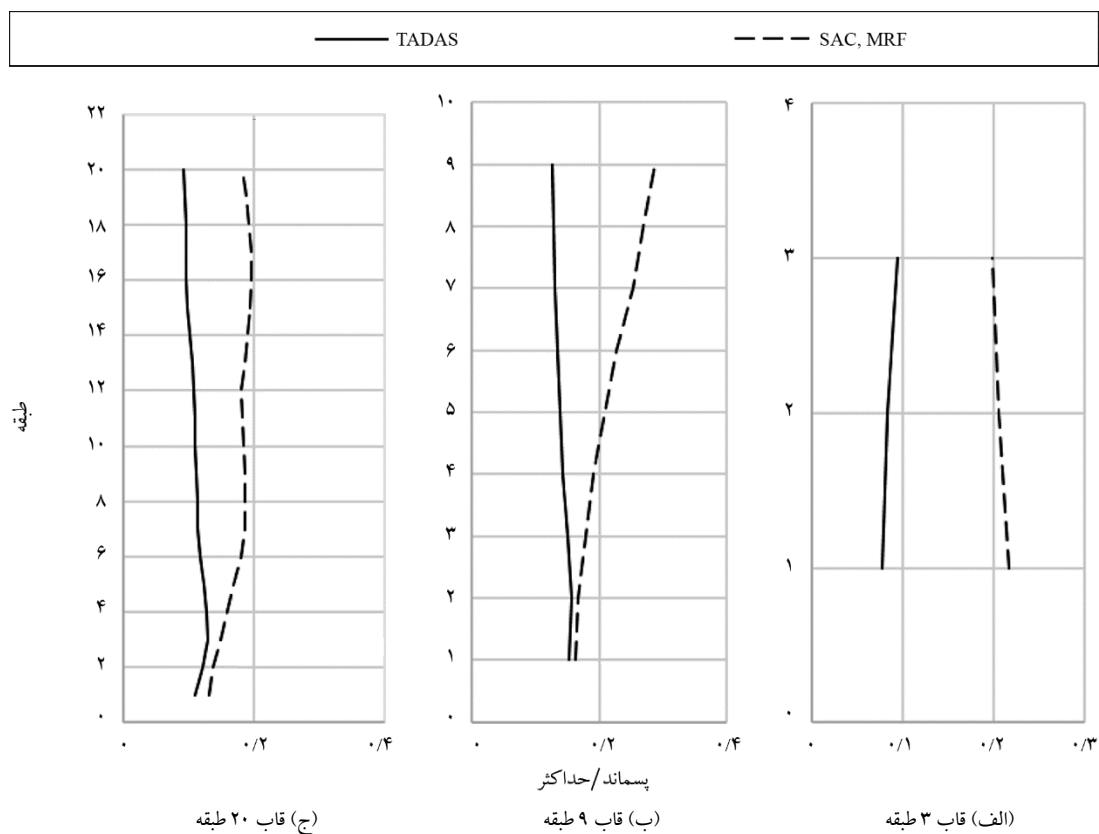
شکل (۱۵): میانگین حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات.



شکل (۱۶): میانگین حداکثر جابه‌جایی نسبی پسماند بین طبقه‌ای.



شکل (۱۷): میانگین حداکثر جابه‌جایی پسماند.



شکل (۱۸): میانگین نسبت جابه‌جایی پسماند به جابه‌جایی حداکثر طبقات.



جدول (۱۳): مقایسه میانگین حداکثر جابه‌جایی پسماند قاب‌های خمشی SAC و قاب‌های دارای میراگر TADAS.

میانگین حداکثر جابه‌جایی پسماند قاب ۳ طبقه (cm)			
درصد کاهش	TADAS	SAC, MRF	طبقه
۷۶/۹۹	۱/۳۱	۵/۶۹	۳
۷۸/۶۶	۰/۷۶	۳/۵۷	۲
۸۰/۴۷	۰/۳۱	۱/۵۶	۱

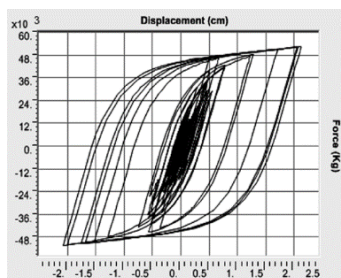
میانگین حداکثر جابه‌جایی پسماند قاب ۲۰ طبقه (cm)			
درصد کاهش	TADAS	SAC, MRF	طبقه
۵۴/۸۲	۷/۰۵۱	۱۵/۶۱	۲۰
۵۵/۸۴	۶/۸۳	۱۵/۴۷	۱۹
۵۷/۶۳	۶/۵۲	۱۵/۴۰	۱۸
۵۹/۳۷	۶/۱۹	۱۵/۲۲	۱۷
۶۰/۳۳	۵/۸۶	۱۴/۷۷	۱۶
۶۰/۲۳	۵/۶۱	۱۴/۱۱	۱۵
۵۹/۲۴	۵/۴۵	۱۳/۳۷	۱۴
۵۸/۱۱	۵/۲۸	۱۲/۵۹	۱۳
۵۷/۴۳	۵/۰۲	۱۱/۸۱	۱۲
۵۸/۶۹	۴/۷۱	۱۱/۴۰	۱۱
۶۰/۶۱	۴/۳۵	۱۱/۰۵	۱۰
۶۱/۳۳	۴/۱۱	۱۰/۶۱	۹
۶۲/۲۶	۳/۷۹	۱۰/۰۴	۸
۶۳/۰۲	۳/۴۴	۹/۳۳	۷
۶۲/۲۱	۳/۱۲	۸/۲۶	۶
۵۸/۹۶	۲/۸۳	۶/۸۹	۵
۵۵/۶۴	۲/۴۱	۵/۴۳	۴
۵۱/۷۷	۱/۹۰	۳/۹۴	۳
۴۶/۹۶	۱/۳۳	۲/۵۱	۲
۴۳/۰۱	۰/۷۲	۱/۲۶	۱

میانگین حداکثر جابه‌جایی پسماند قاب ۹ طبقه (cm)			
درصد کاهش	TADAS	SAC, MRF	طبقه
۷۴/۵۵	۴/۵۳	۱۷/۸۲	۹
۷۰/۱۴	۴/۴۸	۱۴/۹۹	۸
۶۴/۷۹	۴/۳۳	۱۲/۳۱	۷
۵۷/۳۳	۴/۲۱	۹/۸۷	۶
۴۸/۶۰	۴/۰۵	۷/۸۸	۵
۳۸/۹۵	۳/۸۱	۶/۱۴	۴
۲۷/۷۳	۳/۲۷	۴/۵۳	۳
۱۹/۹۳	۲/۴۰	۳/۰۰	۲
۱۵/۸۴	۱/۳۱	۱/۵۶	۱

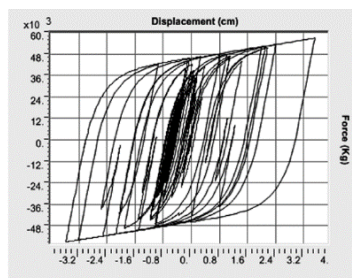
### ۷-۲-۳- پاسخ هیستریتیک میراگرها

دلیل اثر بوشینگر همراه است. همچنین به دلیل مرکزگرا نبودن پاسخ هیستریتیک، انتظار می‌رود پاسخ پسماند در سیستم به وجود آید که نمودارهای نتایج پاسخ جابه‌جایی در بخش‌های قبل مؤید این موضوع است. بحث در مورد این نمودارها در بخش (۸) آورده شده است.

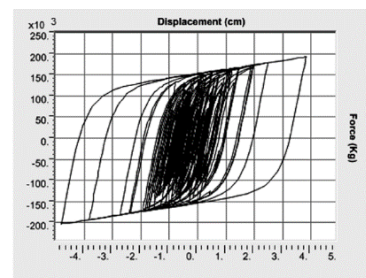
جهت ارزیابی رفتار غیرخطی میراگرها، منحنی هیستریتیک آنها به صورت رابطه نیرو-تغییر مکان افقی در شکل (۱۹) برای هر سه قاب تحت اثر زلزله‌های انتخابی نشان داده شده است. پاسخ میراگرها اساساً بدون زوال مقاومت و صرفاً با زوال سختی به



(ج) قاب ۲۰ طبقه تحت زلزله کوبه ژاپن در طبقه آخر



(ب) قاب ۹ طبقه تحت زلزله سان‌فرناندو در طبقه اول



(الف) در قاب ۳ طبقه تحت زلزله امپریال ولی در طبقه سوم

شکل (۱۹): نمودار هیستریتیک میراگر TADAS.

## ۸- بحث و بررسی

در این بخش نتایج ارائه شده در این مقاله مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. ارزیابی منحنی‌های بارافزون اطلاعات مناسبی در خصوص تغییر رفتار سیستم سازه را به علت استفاده از میراگر در اختیار قرار می‌دهد. مقایسه منحنی‌های پوش در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) به وضوح نشان می‌دهد که قاب مجهز به TADAS مقاومت و سختی بیشتری نسبت به سیستم قاب خمشی دارد. موضوعی که در مطالعات قبلی نیز تأیید شده است. به علاوه، قاب مجهز به میراگر دارای یک رفتار سخت‌شونده و بدون زوال قابل توجه است که از نقطه نظر کاهش جابه‌جایی‌های پسماند نکته مثبتی است. ارزیابی دقیق‌تر تحلیل بارافزون توسط نگارندگان نشان می‌دهد که در سیستم مجهز به TADAS، به دلیل افزایش ظرفیت سازه، تغییر مکان هدف عملاً کاهش می‌یابد. همچنین ارزیابی نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که سطح عملکرد قاب‌های بدون میراگر که در گزارش SAC (مرجع [۱۴]) «ایمنی جانی» تعیین شده است، به علت تعبیه میراگر به سطح قابلیت استفاده بی‌وقفه ارتقا پیدا کرده است. به عبارت دیگر تاب‌آوری لرزه‌ای سیستم بهبود یافته است. همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، در مراحل طراحی سیستم مجهز به میراگر TADAS، نسبت سختی عضو مهاربند به میراگر برابر  $B/D=2$  انتخاب شده است. نتایج تحلیل بارافزون نشان می‌دهد که اعضای مهاربندی در قاب مجهز به میراگر حتی تا چندین برابر تغییر مکان هدف رفتار ارتجاعی دارند. موضوعی که از نقطه نظر کاهش خسارات، هزینه و زمان مورد نیاز برای تعمیر سازه پس از رخداد زلزله شدید بسیار اهمیت دارد.

نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی تحت اثر ۱۱ رکورد انتخابی و مقیاس شده، اطلاعات بسیار مهمی در رابطه با رفتار سیستم در اختیار قرار می‌دهد. با توجه به شکل‌های (۸) تا (۱۰) در قاب‌های مجهز به میراگر TADAS، غیرخطی شدن پاسخ کاهش چشمگیری در مقایسه با قاب‌های خمشی داشته که این موضوع خود منجر به کاهش قابل توجه جابه‌جایی‌های حداکثر گذرا و

پسماند سیستم شده است. به علاوه، تعبیه میراگر بر پاسخ سازه تأثیراتی به همراه دارد. در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳)، پاسخ تاریخچه زمانی تغییر شکل میراگر در چندین حالت انتخابی حاکی از غیرخطی شدن قابل توجه میراگرها و ایفای نقش آنها به عنوان «فیوزهای جاذب انرژی» است.

شکل (۱۴) نشان می‌دهد که میانگین حداکثر جابه‌جایی طبقات در قاب مجهز به میراگر، در سازه ۳ طبقه به میزان ۵۰ درصد، در سازه ۹ طبقه به میزان ۱۰ تا ۴۰ درصد و در قاب ۲۰ طبقه به میزان ۱۰ تا ۴۵ درصد کاهش یافته است. به علاوه، مطابق شکل (۱۵)، میانگین جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه ۳ طبقه در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد و در سازه ۹ طبقه در حدود ۱۰ تا ۷۵ درصد کاهش یافته است. در سازه ۲۰ طبقه تا طبقه نهم، میانگین جابه‌جایی نسبی طبقات کاهش یافته و در سایر طبقات نسبت به قاب SAC افزایش یافته است. این موضوع احتمالاً به دلیل تغییر در توزیع نیروهای جانبی در حوزه غیرخطی، اثر مدها و تغییر در گشتاور طبقات رخ داده است. نکته بسیار جالب توجه در مورد سازه ۲۰ طبقه، افزایش یکنواخت توزیع جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای در قاب مجهز به میراگر در مقایسه با قاب خمشی است. این موضوع مستقیماً به کاهش اثر مدهای بالاتر در قاب مجهز مرتبط بوده و نکته بسیار مثبتی است. عملاً، سیستم میراگر به عنوان یک سیستم «فیلتر اثر مدهای بالا» در سازه‌های بلند عمل کرده است.

در شکل شماره (۱۶)، میانگین حداکثر جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند در قاب ۳ طبقه مجهز به TADAS به میزان ۷۵ تا ۸۰ درصد و در قاب ۹ طبقه مجهز به TADAS به میزان ۱۵ تا ۹۵ درصد نسبت به قاب خمشی نشان می‌دهد. در قاب ۲۰ طبقه از طبقه اول تا طبقه هفدهم میانگین حداکثر جابه‌جایی نسبی پسماند بین طبقه‌ای کاهش، اما در سه طبقه آخر در مقایسه با قاب SAC اندکی افزایش یافته است. به طور کلی، تغییرات میانگین حداکثر جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند در ارتفاع سازه در سیستم‌های مجهز به TADAS یکنواخت‌تر از قاب‌های

## ۹- نتیجه گیری

در این مقاله پاسخ پسماند قاب‌های خمشی فولادی کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه مجهز به میراگرهای تسلیمی TADAS در مقایسه با سازه‌های غیرمجهز مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، هر سه قاب تحت اثر تحلیل‌های غیرخطی بار افزون و تاریخیچه زمانی غیرخطی با در نظر گرفتن ۱۱ شتاب‌نگاشت دور از گسل قرار گرفته و رفتار غیرخطی آنها با تأکید بر پاسخ پسماند مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از بهبود قابل توجه رفتار پسماند و حتی گذرای قاب‌های مجهز در مقایسه با قاب‌های خمشی است. به طور مشخص، جابه‌جایی‌های نسبی بین طبقه‌ای پسماند به طور میانگین در سازه کوتاه مرتبه بین ۷۵ تا ۸۰ درصد، در سازه میان مرتبه ۱۵ تا ۸۵ درصد و در سازه بلند مرتبه ۳۰ تا ۸۰ درصد در طبقات مختلف کاهش نشان می‌دهد. به علاوه، جابه‌جایی حداکثر گذرا در سازه ۳ طبقه به طور میانگین حدود ۵۰ درصد و در سازه‌های ۹ و ۲۰ طبقه حدود ۱۰ تا ۴۰ درصد کاهش نشان می‌دهد. نسبت میانگین جابه‌جایی پسماند به جابه‌جایی حداکثر گذرا نیز در هر سه سازه به ترتیب بین ۵۰ تا ۶۵ درصد، ۵۰ تا ۵۵ درصد و ۲۰ تا ۵۰ درصد کاهش داشته است. با افزایش تعداد طبقات، میراگرها تأثیر کمتری در کاهش پاسخ‌ها و بهبود عملکرد سازه‌ها نشان می‌دهند. به علاوه، تعبیه میراگرها منجر به یکنواختی بیشتر در توزیع تقاضاهای جابه‌جایی در طبقات شده است. مقایسه جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند سازه‌ها با حدود از پیش تعریف شده در نشریه FEMA P-58 حاکی از ارتقاء سطح عملکرد سازه‌ها بر مبنای میزان جابه‌جایی پسماند به علت تعبیه میراگر در سازه است. به طور مشخص، سازه‌های دارای میراگر نیاز به تعمیر و شاقولی کردن مجدد اجزای سازه (غیر از میراگر) تحت اثر زلزله طرح ندارند. این مطالعه نشان می‌دهد که سازه‌های مجهز به میراگرهای TADAS، تاب‌آوری بیشتری از دیدگاه رفتار پسماند نسبت به قاب‌های بدون میراگر دارند.

## مراجع

1. FEMA (2012) *Seismic Performance Assessment of Buildings: FEMA P-58*. Federal Emergency

خمشی است. در نمودارهای شکل (۱۶)، حدود عملکرد سازه‌ای بر مبنای میزان جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای با توجه به مرجع [۱] و جدول (۱۰) نشان داده شده است. به طور مشخص، تعبیه میراگر در قاب خمشی منجر به بهبود سطح عملکرد لرزه‌ای بر مبنای معیار جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای پسماند شده و عملاً سطح عملکرد از  $DS_2$  به  $DS_1$  ارتقا یافته است. جالب است که در سازه ۹ طبقه، سازه قاب خمشی حتی از حد  $DS_2$  عبور کرده و ممکن است تعمیر آن غیرعملی یا غیراقتصادی باشد.

با توجه به نمودار میانگین حداکثر جابه‌جایی پسماند به دست آمده برای هر دو سیستم سازه‌ای قاب خمشی و قاب مجهز به TADAS در شکل (۱۷)، مشاهده می‌شود در قاب ۳ طبقه میانگین حداکثر جابه‌جایی پسماند به میزان ۷۵ تا ۸۰ درصد، در قاب ۹ طبقه ۱۵ تا ۷۵ درصد و در قاب ۲۰ طبقه به میزان ۴۵ تا ۶۰ درصد کاهش یافته است. این نمودار نیز یکنواختی بیشتری در سیستم دارای میراگر نسبت به قاب خمشی نشان می‌دهد.

کمیت دیگری که معمولاً در ارزیابی‌های رفتار پسماند سازه‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد، نسبت میانگین جابه‌جایی حداکثر پسماند طبقات به میانگین جابه‌جایی حداکثر گذرای طبقات تحت اثر رکوردهای انتخابی است. این نسبت برای انواع سازه‌ها در شکل (۱۸) نمایش داده شده است. مطابق این شکل، نسبت مذکور در قاب ۳ طبقه به میزان ۵۰ تا ۶۵ درصد، در قاب ۹ طبقه به مقدار ۵ تا ۶۰ درصد و در قاب ۲۰ طبقه حدود ۲۰ تا ۵۰ درصد کاهش یافته است.

شکل مناسب نمودار پاسخ هیسترتیک میراگرها در شکل (۲۰)، مؤید رفتار مناسب و پایدار آنها در جذب انرژی ورودی تحریک است. ارزیابی مدل‌های غیرخطی از دیدگاه انرژی نیز توسط نگارندگان انجام شده است. این ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که در قاب ۳ طبقه حدود ۸۰ درصد، در قاب ۹ طبقه حدود ۷۰ درصد و در سازه ۲۰ طبقه تقریباً ۶۵ درصد انرژی کل ورودی به سازه تحت اثر رکوردهای اعمالی از طریق پاسخ هیسترتیک میراگرها جذب می‌شود.

- (2011) *Use of Dual Systems in Tadas Dampers to Improve Seismic Behavior of Buildings in Different Levels*, *Procedia Engineering*, 14, 2788–2795.
11. Mahmoudi, M., Ghasem Abdi, M. (2014) The effect of ductility on response modification factors of TADAS frames. *Research in Civil and Environmental Engineering*, 2(03), 80-95.
  12. Gafouri, A. H. and Manie, S., (2016) *A Review on Researches and Studies Conducted on ADAS and TADAS dampers*. 2nd International Conference on Urban Development based on New Technologies. 8-10 March 2016, Sanandaj, Iran.
  13. Shin, H. and Singh, M.P. (2017) Minimum life-cycle cost-based optimal design of yielding metallic devices for seismic loads. *Engineering Structures*, **144**, Page 174-184.
  14. Gupta, A. and Krawinkler, H. (1999) *Seismic Demands for Performance Evaluation of Steel Moment Resisting Frame Structures*. Department of Civil and Environmental Engineering Stanford University Report No. 132.
  15. ASCE (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE Standard ASCE/SEI 7-05.
  16. UBC (1994) *Structural Engineering Design Provision. Uniform Building Code*. Vol. 2, International Conference of Building Officials.
  17. Office of Deputy for Strategic Supervision (2014) *Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings No. 360* (First Revision), Department of Technical Affairs.
  18. FEMA (2009) *Quantification of Building Seismic Performance Factors: FEMA P695*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
  19. *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Building, Standard No. 2800*, 4<sup>th</sup> Edition, Road Housing and Urban Development Research Center, BHRC-PN S-253.
  20. Building Seismic Safety Council (BSSC) (2004) *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*. 2003 Ed., Rep. Nos. FEMA-450/1 and FEMA-450/2, Management Agency, Washington, DC.
  2. Whittaker, A.S. and Constantinou, M.C. (2005) *Building Structures with Damping Systems: From Research to Design Practice*. Conference Paper, April 2005.
  3. Soong, T.T. and Dargush, G.F. (1997) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. John Wiley & Sons, N.Y.
  4. Xia, C. and Hanson, R.D. (1992) Influence of ADAS element parameters on building seismic response. *J. Struct. Eng.*, **118**(7), 1903–1918.
  5. Tsai, K.C., Chenge, H.W., Hong, C.P. and Su, Y.F. (1993) *Design of Steel Triangular Plates Energy Absorbers for Seismic Resistant Construction*. *Earthquake Spectra*, **9**(3), 505-528.
  6. Ramirez, O.M., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Whittaker, A., Johnson, M., Gomez, J.D., and Chrysostomou, C.Z. (2001) *Development and Evaluation of Simplified Procedures of Analysis and Design for Structures with Passive Energy Dissipation Systems*. Technical Rep. No. MCEER-00–0010, Revision, 1, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Univ. of Buffalo, State Univ. of New York, Buffalo, N.Y.
  7. Sajjadi Alehashem, M., Keyhani, A. and Pourmohammad, H. (2008) Behavior and Performance of Structures Equipped With ADAS & TADAS Dampers. Comparison with Conventional Structures. *The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008, Beijing, China.
  8. Shokri, M.A. (2009). *Response Assessment of Steel Building Frames equipped with Metal Dampers under Near-fault Earthquake*, M.S. Thesis, Sistan-Baloochestan University.
  9. Bagheri, S., Hadidi, A., and Alilou, A. (2011) Heightwise Distribution Of Stiffness Ratio For Optimum Seismic Design Of Steel Frames With Metallic-Yielding Dampers. *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, *Procedia Engineering*, 14, 2891–2898.
  10. Shamschiri Dareini, H. and Hosseini Hashemi, B.

Prepared by the Building Seismic Safety Council (BSSC) for the Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, D.C.

21. CSI (2011) CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge, Berkeley, California, USA.
22. CSI Software Verification, ETABS, EXAMPLE 10, Berkeley, California, USA.
23. Garcia, J.R. and Miranda, E. (2006) Evaluation of Residual Drift Demands in Regular Multi-Story Frames for Performance-Based Seismic Assessment. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.
24. Ibarra, L.F., Medina, R.A. and Krawinkler, H. (2005) Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(12), 1489-1511.
25. Bojórquez, E., and Rivera, J.L. (2008) Effects of degrading models for ductility and dissipated hysteretic energy in uniform annual failure rate spectra. *The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008, Beijing, China.

#### واژه‌نامه

Resiliency	۱- تاب‌آوری
Added Damping and Stiffness	۲- میراگر فلزی تسلیم شونده
Panel Zone	۳- ناحیه اتصال
Pushover	۴- بار افزون
Peak Displacement	۵- حداکثر جابه‌جایی
Maximum Story Drift	۶- جابه‌جایی نسبی حداکثر طبقات
Residual Story Drift	۷- جابه‌جایی پسماند بین طبقه‌ای
Residual Displacement	۸- جابه‌جایی پسماند