

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای هم‌محور ضربدری مجهز به میراگر تسلیمی خمشی

موسی محمودی صاحبی^{۱*}، فرشید خانجانی^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

یکی از سیستم‌های باربر جانبی، قاب‌های مهاربندی شده‌ی ضربدری هستند. در اعضای قاب‌های مهاربندی ضربدری، مفاصل پلاستیک از نوع محوری (فشاری یا کششی) هستند که دارای قابلیت جذب انرژی بالا نیستند. با تبدیل مفاصل محوری به مفاصل خمشی می‌توان عملکرد لرزه‌ای این سیستم‌ها را بهبود بخشید. در این تحقیق، یک نوع جدید از مهاربند ضربدری با نام مهاربند ضربدری مجهز به میراگر تسلیمی خمشی معرفی می‌شود که در آن به جای مفاصل پلاستیک محوری، مفاصل پلاستیک خمشی تشکیل می‌شود. در این مهاربندها مکانیزم خرابی در میراگر متمرکز می‌شود و بعد از خرابی به راحتی قابل تعویض است. هدف این تحقیق، ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای با میراگر خمشی است. برای این منظور چند قاب مهاربندی شده با تعداد طبقات مختلف، که بر اساس آئین‌نامه‌های رایج کشور بارگذاری و طراحی شدند، انتخاب شده و با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی و تاریخچه زمانی غیرخطی، عملکرد لرزه‌ای آن‌ها (ظرفیت‌های سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و ضریب رفتار مورد ارزیابی قرار گرفت. در تحلیل دینامیکی از هفت رکورد شتاب زمان استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد وجود میراگرها، ظرفیت سختی و مقاومت را کاهش می‌دهد ولی به طور قابل ملاحظه‌ای ظرفیت شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که ضریب رفتار سیستم‌های پیشنهادی به طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند.

کلمات کلیدی: ظرفیت شکل‌پذیری، میراگر تسلیمی خمشی، عملکرد لرزه‌ای، ظرفیت مقاومتی، ضریب رفتار، مهاربند ضربدری.

*نویسنده مسئول: موسی محمودی صاحبی

پست الکترونیکی: m.mahmoudi@srutu.edu

DOI: 10.22065/jsce.2017.71596.1034

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.71596.1034>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۱

۱- مقدمه

یافته‌های علمی اواخر دهه ۶۰ میلادی که منجر به درک بهتر پدیده زلزله و رفتار غیرارتجاعی سازه شده، سبب گردیده تا اساس طراحی لرزه‌ای دگرگون شود و مقاومت که تا آن زمان تنها عامل مهم ایستایی سازه به شمار می‌رفت، جای خود را به معیارهای متکی به ظرفیت تغییرشکل غیرارتجاعی سازه بسپارد.

از خاصیت جاری شدن فلزها برای افزایش کارایی سازه در مقابل زلزله استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از میراگرهای تسلیمی خمشی (moment yielding dampers) اشاره کرد. درحقیقت با استفاده از این سیستم، تخریب در نقطه‌ای مشخص از سازه متمرکز شده و موجب بروز خرابی موضعی می‌شود ولی از خرابی کلی سازه جلوگیری می‌کند. اساس میراگرهای تسلیمی بر رفتار غیرارتجاعی استوار است. در این روش از استهلاک انرژی پسماند برای افزایش میرایی سیستم استفاده می‌شود [۱].

معمولا سطح زیر منحنی نیرو-تغییرمکان، معرف مقدار انرژی مستهلک شونده توسط آن سیستم است. در زلزله‌های ضعیف یا متوسط، نیازی به جذب بالای انرژی نیست ولی در برابر زلزله‌های شدید، ضروری است تا سیستم‌ها بتوانند مقدار بالای انرژی ورودی زلزله را با رفتار غیرخطی مناسب جذب نمایند. در میراگرهای تسلیمی، معمولا از خاصیت تغییرشکل غیرارتجاعی فولاد نرمه یا سرب برای جذب بالای انرژی استفاده می‌شود. بدین ترتیب با افزودن قطعه‌ای فلزی به سیستم و انتقال نیروی حساب شده به آن، موجب جاری شدن آن در هنگام زلزله و در نتیجه مستهلک کردن مقدار زیادی از انرژی ورودی به سازه می‌شوند. معمولا در طراحی‌ها سعی می‌شود عمل تخریب به جای سازه بر روی این قطعه رخ دهد تا پس از زلزله نیز قابل جایگزینی باشد [۲].

در شکل ۱-الف، نمای کلی یک نمونه از میراگر تسلیمی خمشی در سیستم مهاربندی هم‌محور ۸، نمایش داده شده است. در محل اتصال مهاربند ۸ به تیر از یک قطعه فولادی استفاده می‌شود که وظیفه جذب انرژی غیرارتجاعی را به عهده دارد. ورق‌های موجود در این قطعه اگر به صورت X شکل باشد به آن XADAS (X-Added Damping And Stiffens) گفته می‌شود (شکل ۱-ب). اگر شکل ورق‌ها به صورت مثلثی باشد به آن TADAS (Triangle Added Damping And Stiffens) اطلاق می‌شود (شکل ۱-ج).

ویتاکر (Whittaker) و همکاران در سال ۱۹۸۹ تحقیقات وسیعی در ارتباط با ADAS انجام دادند. آن‌ها به کمک مدل‌های تحلیلی و آزمایشگاهی، عملکرد لرزه‌ای مهاربندهای مجهز به ADAS را بررسی کردند. در مدل‌های آن‌ها به ترتیب ۴، ۶ و ۷ ورق در قطعه میراگر مورد استفاده قرار گرفت [۳].

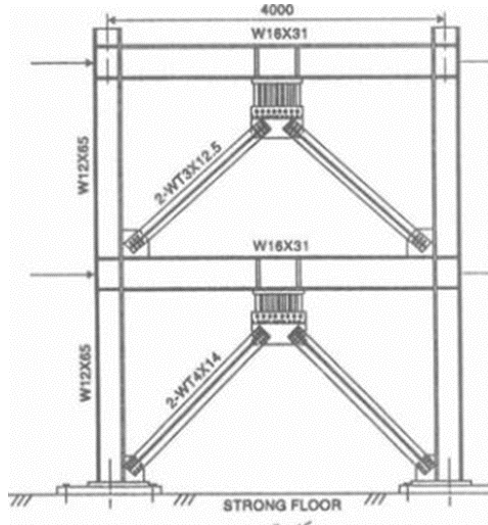
ویتاکر و همکاران بعداً در سال ۱۹۹۱، تاثیر میراگر ADAS را بر روی یک قاب سه طبقه بررسی کردند. این قاب، در یک جهت دارای سیستم قاب خمشی بوده و در جهت دیگر دارای مهاربند ADAS بود. آن‌ها در این مطالعه از سه نوع فولاد برای ورق‌های X شکل استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که وجود مهاربندهای ADAS باعث افزایش سختی و میرایی می‌شود و جذب انرژی را در حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد افزایش می‌دهد [۴]. در سال ۱۹۹۲ نیز تحقیقات کاملی توسط Tsai بر روی این میراگرهای تسلیمی صورت گرفت [۵].

محمودی و عبدی [۶ و ۷] تاثیر میراگر TADAS را بر نیاز لرزه‌ای سازه‌های فولادی با تعداد طبقات ۳، ۵، ۷، ۱۰ و ۱۵ بررسی کردند و ضریب رفتار این سازه‌ها را تعیین نمودند. زوو (Zhou) و هان (Han) عملکرد لرزه‌ای قاب سه طبقه مجهز به ADAS را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که حلقه‌های چرخه‌ای این میراگرها بسیار پایدار است [۸].

در تحقیقی که توسط تهرانی‌زاده انجام شد، تاثیر میراگرهای ADAS بر رفتار اتصالات خورجینی بررسی شد. نتایج حاصله از این تحقیق نیز نشان دهنده بهبود رفتار سازه‌های مورد آزمایش بود، به طوری که وجود این المان‌ها باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها شد [۹].

هریون (Heroin) و همکاران رفتار لرزه‌ای انواع سازه‌ها با اعضای لوله‌ای را بررسی کردند و نمودار چرخه‌ای مهاربند تسلیمی را ترسیم نمودند که حاکی از رفتار بسیار خوب این نوع از مهاربندهاست [۱۰].

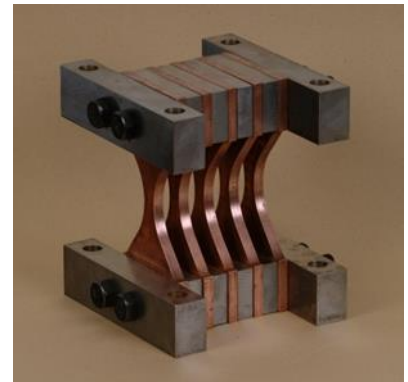
هدف این مقاله معرفی یک سیستم باربر جانبی است که در آن قطعه میراگر تسلیمی مشابه ADAS استفاده می‌شود. این قطعه در مسیر اعضای مهاربندی ضربدری نصب می‌گردد. در این مقاله، عملکرد لرزه‌ای (ظرفیت‌های سختی، مقاومت و شکل‌پذیری و همچنین ضریب رفتار) این سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



الف) نمای کلی میراگر تسلیمی



ج) TADAS



ب) XADAS

شکل ۱: سیستم میراگر ADAS در مهاربند ۸.

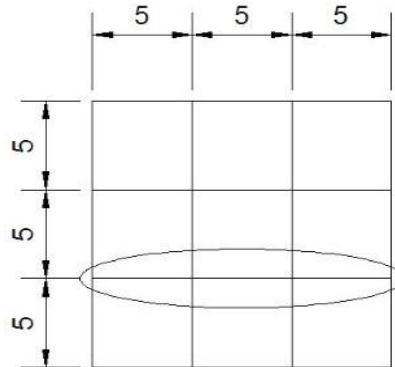
۲- روش تحقیق

برای نیل به اهداف بیان شده، چند قاب دوگانه (قاب خمشی و مهاربند ضربدری) انتخاب گردید و بر اساس ضوابط آیین‌نامه بارگذاری ایران (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش سوم) [۱۱] بارگذاری و بر اساس مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (آیین‌نامه فولاد) [۱۲] و به کمک نرم افزار SAP2000 طراحی شدند. آنگاه عملکرد آن‌ها با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی به کمک نرم‌افزار OpenSeesV2.4.3 [۱۳] مورد ارزیابی قرار گرفت. در ارزیابی عملکرد قاب‌ها، ظرفیت‌های سختی، مقاومت و شکل‌پذیری در دو حالت با و بدون میراگر تسلیمی خمشی تعیین شد. همچنین ضریب رفتار قاب‌های مورد مطالعه در دو حالت فوق تعیین و مقایسه شد. در قسمت‌های بعد، قاب‌های مورد مطالعه، رکوردهای شتاب زمان مورد استفاده، روش‌های تعیین ظرفیت‌های سختی، مقاومت و شکل‌پذیری و همچنین چگونگی محاسبه ضریب رفتار تشریح می‌گردد.

۱-۲ - مدل‌های مورد مطالعه

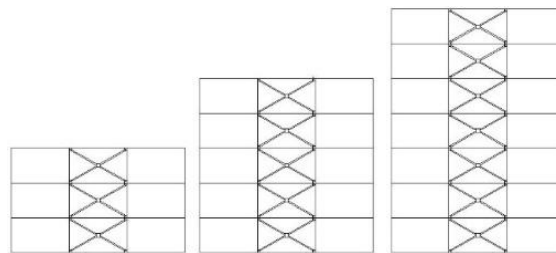
قابهایی که در این تحقیق انتخاب شدند، سه قاب دو گانه مهاربندی ضربدری سه دهانه با تعداد طبقات ۳، ۵ و ۷ هستند که ارتفاع طبقات آن‌ها برابر ۳ متر و طول دهانه آن‌ها برابر ۵ متر است. منطقه مورد نظر با لرزه‌خیزی زیاد فرض شد و خاک منطقه از نوع II در نظر گرفته شد. قاب‌ها با فرض شکل‌پذیری متوسط با کاربری مسکونی طراحی شدند. در مرجع [۷] تاثیر تعداد و طول دهانه بررسی گردید و نتیجه‌گیری شد که این دو عامل تاثیر قابل ملاحظه‌ای ندارند لذا در این تحقیق از بررسی تاثیر آنها صرف‌نظر شد.

در تحلیل‌ها یکی از قاب‌های میانی سازه که دهانه وسط آن دارای مهاربند است انتخاب شد و تحلیل‌های دو بعدی برای آن‌ها انجام شد (شکل ۲). این قاب‌ها یک بار بدون میراگر تسلیمی و بار دیگر با میراگر تسلیمی مورد مطالعه قرار گرفتند.



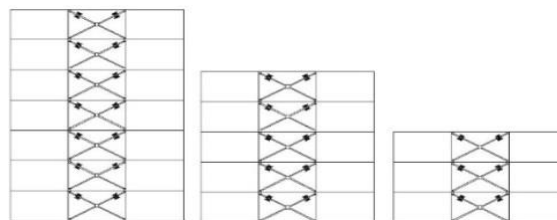
شکل ۲: پلان عمومی ساختمان مورد مطالعه.

در شکل ۳ نمای قاب‌های مهاربندی با ارتفاع سه، پنج و هفت طبقه نشان داده شده است. در ادامه تحقیق، این قاب‌ها با عنوان X Brace مشخص می‌شوند. این قاب‌ها با اتصالات گیردار تیر به ستون همراه با مهاربند ضربدری معمولی در نظر گرفته شدند.



شکل ۳: نمای قاب‌های با مهاربندی ضربدری.

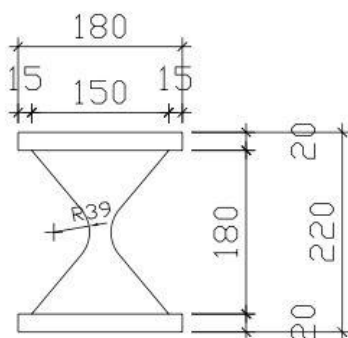
در شکل ۴ نمای قاب‌های مهاربندی شده همراه با میراگر تسلیمی نشان داده شده است. این قاب‌ها با علامت XBWYD مشخص می‌شوند. این قاب‌ها دقیقاً مثل قاب‌های نوع اول بوده و فقط تفاوت آن‌ها در میراگرهای تسلیمی است. میراگرهای تسلیمی در هر دو عضو مهاربندی تعبیه شده است.



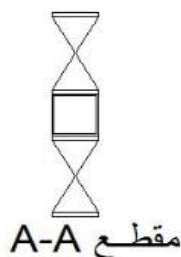
شکل ۴: نمای قاب‌های XBWYD.

۲-۲- طراحی المان‌های میراگر تسلیمی

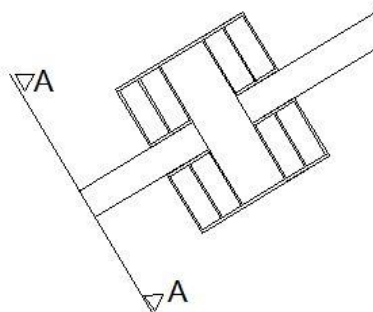
هر صفحه میراگر ADAS با سه پارامتر طول و عرض و ارتفاع مشخص می‌شود. در طراحی این صفحات (میراگر) فرض شده است که ابتدا المان‌های میراگر تسلیم شوند بعد تیرها و ستون‌های مربوط به قاب وارد محدوده تسلیم شوند. بنابراین صفحات برای ۸۵ درصد ظرفیت کششی در اعضای مهاربندی طراحی می‌شوند. بدین ترتیب در بارگذاری‌های لرزه‌ای همیشه صفحات زودتر به محدوده تسلیم وارد می‌شوند و اعضای مهاربندی هیچ وقت تسلیم نمی‌شوند. پس از المان‌های میراگر، تیرها و ستون‌ها تسلیم می‌شوند. در این تحقیق از صفحات X شکل برای المان‌های میراگر استفاده شده است (شکل ۵) که در آن، ارتفاع قطعه برابر ۲۲۰ میلی‌تر و عرض برابر ۱۸۰ میلی‌تر می‌باشد. ضخامت ورق‌ها در قطعه برابر ۲۰ میلی‌تر و شعاع خم در قسمت میانی برابر ۳۹ میلی‌تر است. این فرض برای اجرای مناسب‌تر است. شکل ۶ نمای اتصال صفحات به اعضا را نشان می‌دهد. ورق‌های X شکل در دو انتها به صفحات اتصال گیردار وصل می‌شوند.



شکل ۵: مشخصات فیزیکی المان میراگر (ابعاد به میلیمتر).



ب- مقطع



الف- نمای کلی

شکل ۶: نحوه قرارگیری المان‌های تسلیمی. الف-نمای کلی، ب-مقطع.

با توجه به اینکه برای مدلسازی رفتار مصالح در نرم‌افزار OpenSees نیاز به اطلاعات مکانیکی قطعه است، در این تحقیق از مشخصات قطعه‌ای که زوو (zhou) و همکاران در مرجع [۸] برای بررسی مهاربند XADAS بکار گرفته بودند استفاده شد. مشخصات ابعادی این قطعه در شکل ۵ و مشخصات مکانیکی آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

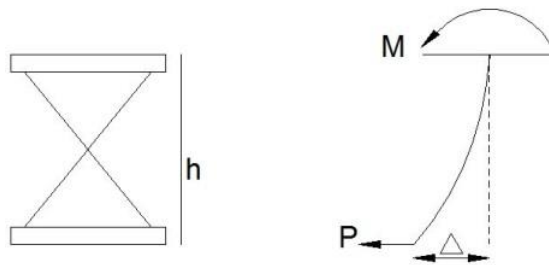
جدول ۱: مشخصات مکانیکی قطعه حاصل از آزمایش

سختی ارتجاعی (KN/mm)	نیروی تسلیم (KN)	تغییر مکان تسلیم (mm)	سختی غیرارتجاعی (KN/mm)
۱۲۴/۴	۱۷۹/۲	۱/۴۴	۳/۵۱

از آنجائیکه در اعضای مهاربندی، مقدار نیروی فشاری یا کششی در سرتاسر عضو ثابت است لذا تفاوتی ندارد که محل المان میراگر کجا باشد اما از نظر اجرایی بهتر است محل نصب میراگر در یک چهارم ابتدائی طول مهاربند در نظر گرفته شود (رابطه ۱).

$$X = 0.25 \times L \quad (1)$$

که در آن X محل نصب میراگر از شروع عضو مهاربند و L طول کل عضو مهاربند است. در شکل ۷ نحوه عملکرد خمشی المان‌های میراگر نشان داده شده است.



شکل ۷: نحوه عملکرد خمشی المان‌های تسلیمی

در شکل ۷ مقدار نیروی P و لنگر خمشی M_y^{PL} از روابط ۲ و ۳ به دست می‌آید.

$$P = 0.85 \times A_{sb} \times F_y \quad (2)$$

$$M_y^{PL} = P \times Z \quad (3)$$

در روابط ۲ و ۳، P برابر با ۸۵ درصد ظرفیت کششی عضو مهاربندی است. A_{sb} سطح مقطع عضو مهاربندی است و F_y تنش تسلیم فولاد است. همچنین لنگر پلاستیک صفحات تسلیم است و Z اساس مقطع مینیمم صفحات است. برای محاسبه تعداد المان‌های صفحه‌ای میراگر بر اساس پیشنهاد زوو [zhou] (۸) عمل شد. بر این اساس تعداد المان‌ها با استفاده از روابط ۴ و ۵ تعیین شد.

$$Z = \frac{bt^2}{4} \quad (4)$$

$$n \leq \frac{P}{M_y^{PL}} \quad (5)$$

در جدول ۲ تعداد المان‌ها با توجه به ابعاد اعضای مهاربندی تعیین شده است.

جدول ۲: تعداد المان‌های بدست آمده در مهاربند‌های قاب‌ها

n	A_{sb} (cm ²)	مقطع مهاربندها
۱۲	۵۶	BOX100*100*14.2
۱۰	۴۵	BOX90*90*12.5
۸	۳۲	BOX80*80*10
۱۴	۶۰	BOX120*120*12.5

۳-۲- شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده

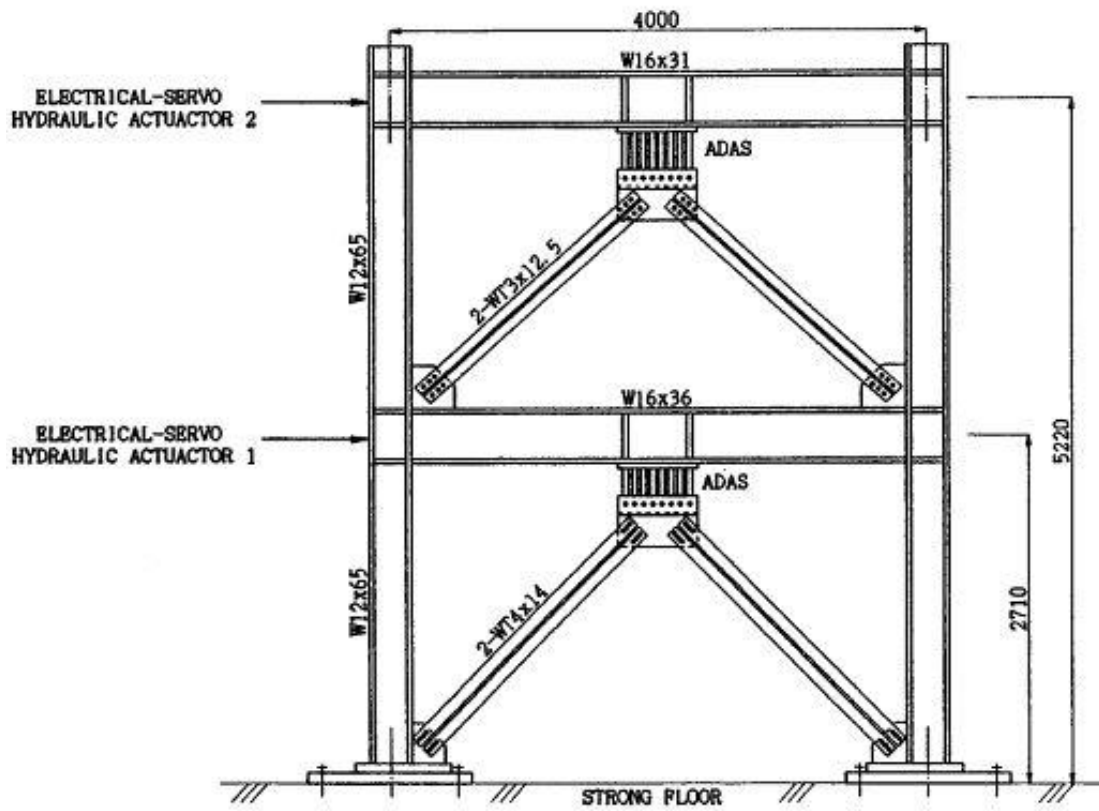
برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه‌زمانی از هفت شتاب‌نگاشت استفاده شد. مشخصات این شتاب‌نگاشت‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. تمامی شتاب‌نگاشت‌ها قبل از استفاده به مقیاس درآمدند. برای مقیاس در آوردن رکوردها، از ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ [۱۱] استفاده شد. بر اساس ضوابط استاندارد ۲۸۰۰، طیف شتاب‌نگاشت مورد نظر برای مقدار ماکزیمم g و با فرض نسبت میرایی پنج درصد رسم می‌گردد و با طیف استاندارد مقایسه می‌شود. هر شتاب‌نگاشت چنان اصلاح می‌شود که برای هر پریود در محدوده 0.2 الی $1/5$ برابر T مقدار متوسط طیف مربوط به تمامی شتاب‌نگاشت‌ها از مقدار نظیر در طیف استاندارد کم‌تر نشود. در پایان تحلیل‌ها، میانگین نتایج حاصل از تحلیل با هفت رکورد مد نظر قرار می‌گیرد.

جدول ۳: مشخصات شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده

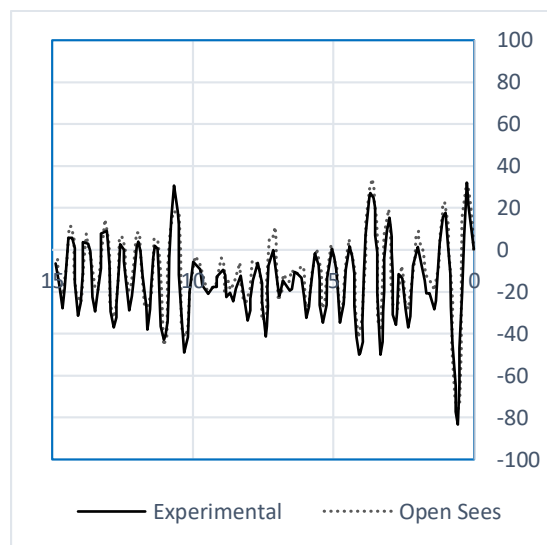
نام زلزله	تاریخ وقوع	ایستگاه ثبت رکورد	فاصله تا گسل (km)	زمان موثر (ثانیه)	بزرگی (R)	PGA (g)
Chi-Chi,	1999/09/20	TCU095	43.44	89.98	7.6	0.378
Northridge	1994/01/17	24538 Santa Monica City	27.6	39.94	6.7	0.370
Tabas	1978/09/16	Dayhook	17.0	23.78	7.4	0.328
Mexico	1980/06/09	6604 Cerro Prieto	34.8	24.42	6.2	0.621
San Fernando	1971/02/09	128 Lake Hughes #12	20.3	36.57	6.6	0.366

۴-۲- کنترل با استفاده از نتایج آزمایشگاه

برای کنترل نتایج حاصل از نرم‌افزار مورد استفاده در این تحقیق از نتایج مطالعه آزمایشگاهی (یک قاب دو طبقه مجهز به میراگر فولادی جاری شونده) توسط Tsai [۵] استفاده شد. در شکل (۸)، مدل آزمایشگاهی نمونه مورد بررسی نشان داده شده است. سازه در نرم‌افزار OpenSees مدل شده و جابجایی سقف دوم حاصل از تحلیل نرم افزاری با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه شده است. شکل (۹) همخوانی بسیار خوب نتایج جابجایی طبقه دوم حاصل از آزمایش و تحلیل را برای نمونه مورد بررسی نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی، زمان و محور قائم جابجایی را بر حسب سانتی متر نشان می‌دهد.



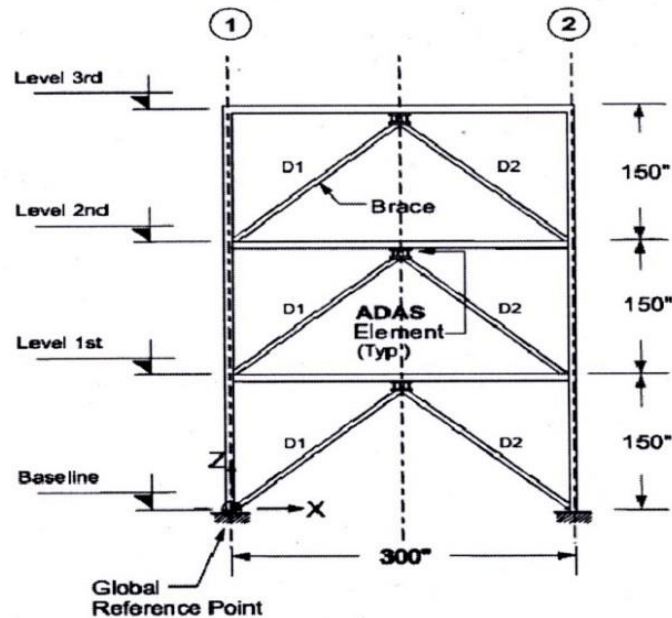
شکل ۸: مدل آزمایشگاهی قاب دو طبقه مجهز به میراگر فولادی جاری شونده (TADAS).



شکل ۹: مقایسه تغییر مکانهای حاصل از آزمایش و تحلیل برای سازه دو طبقه.

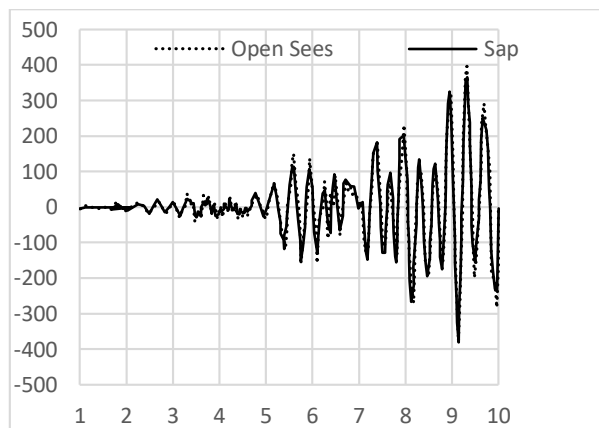
۲-۵- کنترل با استفاده از نرم افزار SAP2000

به منظور کنترل مدل سازی های انجام شده با نرم افزار OpenSees، مقایسه ای بین نتایج حاصل از آن و نتایج حاصل از نرم افزار SAP2000 به عمل آمد. در راهنمای نرم افزار SAP2000 مثالی از قاب مهاربندی سه طبقه ADAS مدل سازی شده است که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

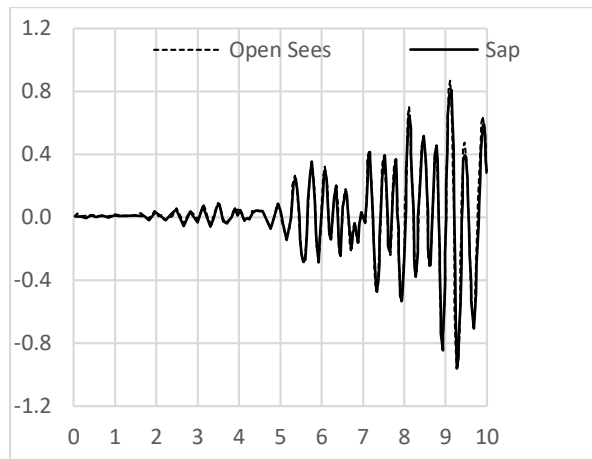


شکل ۱۰: مدل تحلیلی قاب مجهز به المان های ADAS در نرم افزار SAP2000.

این قاب، به کمک هر دو نرم افزار تحت اثر شتاب نگاشت ال سنتر و قرار گرفت و پس از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، تغییر مکان بام و برش پایه آن برای حداکثر زمان ده ثانیه و با گام های $0/01$ ثانیه به دست آمد. نتایج به دست آمده، همخوانی بسیار خوبی را بین نتایج حاصل از نرم افزارهای SAP2000 و OpenSees نشان می دهند. در شکل های (۱۱) و (۱۲) به ترتیب، برش پایه و تغییر مکان بام در نرم افزارهای SAP2000 و OpenSees به ترتیب برابر $0/99$ و $0/98$ سانتی متر می باشد که نشان دهنده همخوانی بسیار مناسب نتایج است.



شکل ۱۱: برش پایه حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی در قاب نمونه ۳ طبقه با استفاده از نرم افزارهای SAP و OpenSees.



شکل ۱۲: مقایسه تغییرمکانهای بام حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی در قاب نمونه ۳ طبقه بر اساس دو نرم افزار.

۲-۶- تحلیل‌های مورد استفاده در این تحقیق

در این تحقیق از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. در هر دو تحلیل، عملکرد ایمنی جانبی (LS) برای اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای در نظر گرفته شد. طبق تعریف، سطح عملکرد ایمنی جانبی به سطح عملکردی اطلاق می‌شود که پیش بینی شود در اثر وقوع زلزله به کسی آسیب نمی‌رسد اما رفتار سازه به گونه‌ای است که ممکن است دیگر قابل استفاده نباشد [۱۱]. در تحلیل استاتیکی غیرخطی از توزیع مثلثی برای الگوی بارگذاری ارتفاعی استفاده شده است.

در این تحقیق برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی فولاد از دستور ساخت مصالح فولادی Giuffre-Menegotto-Pinto با سخت شوندهگی ایزوتروپیک استفاده شد. برای مدلسازی مقطع کلی اعضا، از مقطع Fiber و برای مدلسازی اعضای مورب، تیر و ستونها از المان با ۵ نقطه انتگرال گیری در طول المان استفاده گردید. مقطع Fiber، یک شکل هندسی عمومی دارد که از نواحی با اشکال ساده‌تر و منظم‌تر مانند نواحی مستطیلی، دایروی و مثلثی تشکیل شده است.

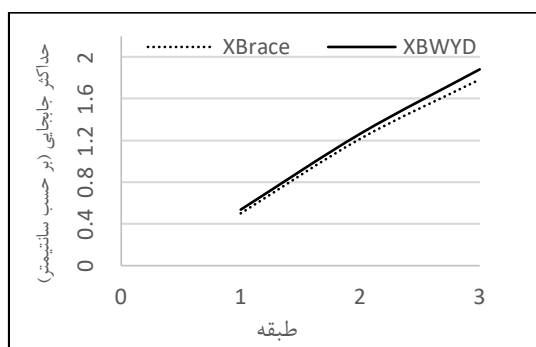
۳- ارزیابی ظرفیت سختی

برای جلوگیری از آسیب و یا تخریب اجزای غیرسازه‌ای لازم است تا سازه‌ها یک حداقل سختی برای کاهش تغییرمکان جانبی داشته باشند. سختی عامل محدود کننده تغییرمکان جانبی سازه است و عملکرد اجزای غیرسازه‌ای را تبیین می‌کند. هر چه سختی بیشتر باشد تغییرمکان جانبی طبقات کمتر خواهد بود. از آنجائیکه تعیین سختی سازه‌ها در مراحل غیرخطی کار مشکلی است لذا تغییرمکان جانبی طبقات (مطلق یا نسبی) تعیین می‌شوند و بر اساس آن‌ها، سختی قاب‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این تحقیق برای محاسبه تغییرمکان‌های جانبی از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی تحت هفت رکورد شتاب زمان استفاده شد و از مقدار میانگین تحلیل‌ها برای مقایسه بهره گرفته شد. در جدول ۴ میانگین حداکثر جابجایی مطلق طبقات برای قاب‌های ۳ طبقه در دو حالت با میراگر (XBWYD) و بدون میراگر (Xbrace) مقایسه شده است.

جدول ۴: میانگین حداکثر جابجایی مطلق طبقات برای قاب سه طبقه

طبقه	حداکثر جابجایی (بر حسب سانتیمتر)		میزان افزایش (%)
	XBWYD	XBrace	
۱	۰/۵۳	۰/۵۰	۶/۳۳
۲	۱/۲۶	۱/۲۱	۳/۶۱
۳	۱/۸۷	۱/۷۸	۵/۱۷

در شکل ۱۳ همین مقادیر مقایسه شده است. همانطور که از جدول ۴ و شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، وجود میراگر باعث شده است که سختی قاب کاهش یابد. این کاهش حدوداً ۵ درصد است.

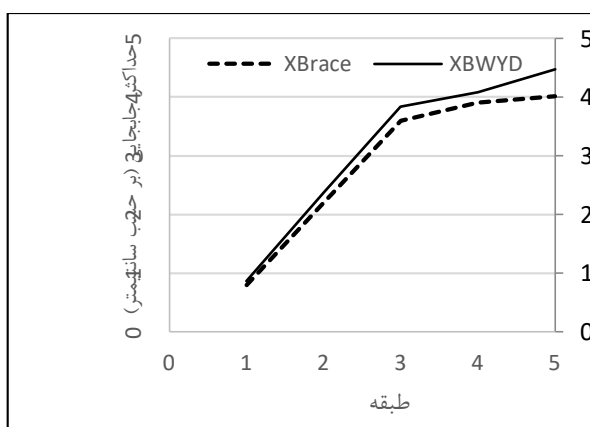


شکل ۱۳: مقایسه حداکثر جابجایی طبقات قاب سه طبقه

در جدول ۵ و شکل ۱۴ مقادیر مربوط به قاب پنج طبقه ارائه شده است. در این حالت نیز وجود میراگر باعث کاهش سختی می‌شود که این کاهش قدری بیشتر از قاب سه طبقه است.

جدول ۵: میانگین حداکثر جابجایی طبقات قاب پنج طبقه

طبقه	حداکثر جابجایی (بر حسب سانتیمتر)	
	XBWYD	XBrace
۱	۰/۸۶	۰/۷۹۵
۲	۲/۳۷	۲/۱۹
۳	۳/۸۳	۳/۵۹
۴	۴/۰۷	۳/۹۰
۵	۴/۴۷	۴/۰۱

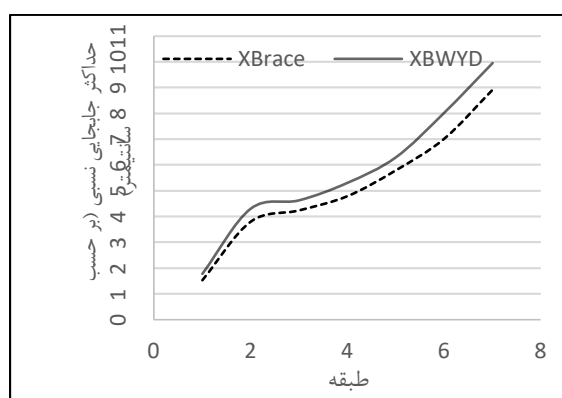


شکل ۱۴: مقایسه حداکثر جابجایی طبقات قاب پنج طبقه.

در جدول ۶ و شکل ۱۵ تغییر مکان‌های قاب‌های هفت طبقه در دو حالت با و بدون میراگر مقایسه شده است. در این حالت کاهش سختی قاب مربوط به میراگر تسلیمی بیشتر از موارد دیگر است. با توجه به نتایج قاب‌های سه، پنج و هفت طبقه می‌توان نتیجه گرفت با افزایش تعداد طبقات، تاثیر میراگر بر کاهش سختی قاب‌ها بیشتر می‌شود.

جدول ۶: میانگین حداکثر جابجایی طبقات قاب هفت طبقه

طبقه	حداکثر جابجایی (بر حسب سانتیمتر)	
	XBWYD	XBrace
۱	۱/۳۸	۱/۲۳
۲	۴/۲۴	۳/۸۰
۳	۴/۶۲	۴/۲۴
۴	۵/۳۰	۴/۷۹
۵	۶/۲۹	۵/۷۹
۶	۷/۷۴	۷/۰۱
۷	۹/۷۴	۸/۹۱



شکل ۱۵: مقایسه حداکثر جابجایی طبقات قاب هفت طبقه.

افزایش جابجایی به معنی کاهش سختی سیستم است. از آنجائیکه سیستم‌های مهاربندی دارای ظرفیت سختی خوبی هستند، کاهش سختی مشکل خاصی بوجود نخواهد آورد.

۴- ارزیابی ظرفیت مقاومت

مقاومت عامل کنترل آسیب در اجزای سازه ای است. مقاومت، قابلیت تحمل هر یک از اعضای سازه ای در برابر تلاش ایجاد شده است. برای تعیین ظرفیت مقاومتی کل سازه از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شد. برای ظرفیت مقاومت، حداکثر برش پایه در قاب، در اثر تحلیل تاریخچه زمانی مد نظر قرار گرفت. در جدول ۷ ظرفیت مقاومتی قاب‌ها در دو حالت با و بدون میراگر مقایسه شد.

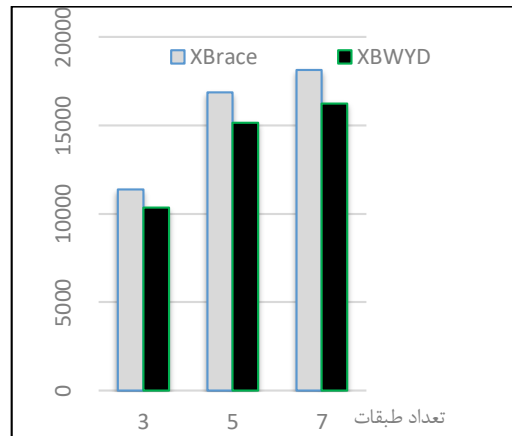
جدول ۷: ظرفیت مقاومتی قاب‌ها (برش پایه در قاب‌ها بر حسب کیلوگرم)

تعداد طبقات	Xbrace	XBWYD	میزان کاهش (%)
۳	۱۱۳۹۱	۱۰۳۵۴	۹/۱۰
۵	۱۶۸۷۴	۱۵۱۴۳	۱۰/۲۶
۷	۱۸۱۴۲	۱۶۲۴۲	۱۰/۴۷

با توجه به مقادیر جدول می‌توان ادعا کرد، وجود میراگر باعث کاهش ظرفیت مقاومتی می‌شود. این موضوع کاملاً بدیهی است زیرا مهاربند یکپارچه (در حالت بدون میراگر) به یک عضو وصله شده (دارای میراگر) تبدیل شد و همین موضوع مقاومت آن را کاهش داد. ولی با

توجه به اینکه آنچه برای سازه مهم است ظرفیت جذب انرژی است و از ترکیب مقاومت و شکل پذیری حاصل می‌گردد. لذا علی‌رغم کاهش ظرفیت مقاومتی و با توجه به افزایش قابل ملاحظه ظرفیت شکل‌پذیری در نهایت افزایش ظرفیت جذب انرژی اتفاق می‌افتد.

در شکل ۱۶ مقادیر جدول ۷ به صورت نموداری نشان داده است. از شکل ۱۶ و جدول ۷ می‌توان دریافت که با افزایش طبقات نرخ میزان کاهش مقاومت بیشتر می‌شود.



شکل ۱۶: ظرفیت مقاومتی قاب‌ها.

۵- ارزیابی ظرفیت شکل‌پذیری

شکل‌پذیری عامل کنترل عملکرد سازه از قبیل بهره‌برداری بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش است. برای تعیین ظرفیت شکل‌پذیری قاب‌ها نمی‌توان از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده کرد زیرا این تحلیل فقط نیاز شکل‌پذیری را به دست می‌آورد. لذا در این تحقیق برای به دست آوردن ظرفیت شکل‌پذیری از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شد. برای تعیین ظرفیت شکل‌پذیری، تحلیل استاتیکی غیرخطی آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا اولین نقطه در سازه به عملکرد ایمنی جانی (LS) برسد. تغییر مکان بام نظیر این نقطه به عنوان Δ_{max} در نظر گرفته می‌شود و به کمک رابطه ۶ مقدار ظرفیت شکل‌پذیری (μ) محاسبه می‌گردد.

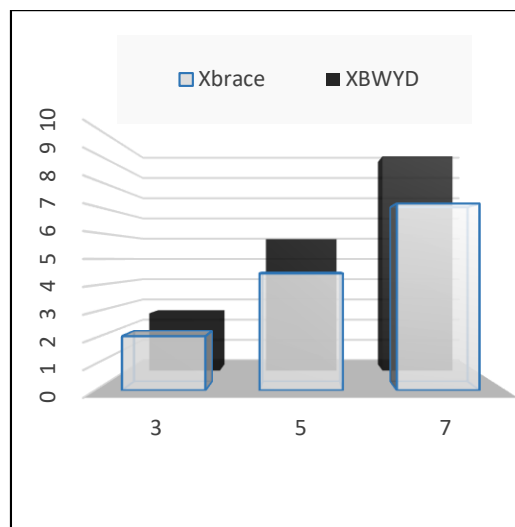
$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (6)$$

که در آن تغییر مکان بام نظیر تسلیم کلی سازه است. در جدول ۸ مقادیر ظرفیت شکل‌پذیری قاب‌ها ارائه شده است.

جدول ۸: مقادیر ظرفیت شکل‌پذیری قاب‌ها (cm)

میزان افزایش (درصد)	جابجایی تسلیم Δ_y	جابجایی حداکثر Δ_{max}	شکل‌پذیری μ	نوع قاب	طبقه
۲۴/۱۵	۰/۸۶	۱/۴۲	۲/۰۶	Xbrace	۳
	۰/۷۳	۱/۸۷	۲/۵۷	XBWYD	
۳۲/۲۱	۰/۹۰	۴/۰۱	۴/۵۴	Xbrace	۵
	۰/۷۶	۴/۲۸	۵/۸۸	XBWYD	
۳۵/۰۴	۱/۲۵	۸/۹۱	۷/۱۰	Xbrace	۷
	۱/۰۲	۹/۷۴	۹/۵۸	XBWYD	

در شکل ۱۷ مقایسه ظرفیت‌های شکل‌پذیری به صورت نموداری ارائه شده است. همانگونه که از جدول ۸ و شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، استفاده از میراگر سبب افزایش قابل ملاحظه در ظرفیت شکل‌پذیری می‌شود. این مطلب برای قاب‌های بلندتر بیشتر محسوس است.



شکل ۱۷: مقایسه ضریب شکل پذیری قاب‌ها.

۶- ضریب رفتار

بر اساس اهداف طراحی لرزه‌ای، سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید وارد محدوده غیرارتجاعی می‌شوند و بخش اعظمی از انرژی ورودی زلزله را در مرحله غیرارتجاعی جذب می‌کنند. برای تعیین نیازهای لرزه‌ای در برابر زلزله‌های شدید، انجام تحلیل غیرخطی ضروری است [۱۴]. از آنجائیکه انجام تحلیل غیرخطی برای اکثر مهندسیین کار مشکلی است، آیین‌نامه‌ها با معرفی ضریبی به نام ضریب رفتار به مهندسیین اجازه می‌دهند به کمک آن، صرفاً از تحلیل خطی استفاده نمایند. به کمک ضریب رفتار مقاومت مورد نیاز سازه‌ها به دست می‌آید. هر چه مقدار ضریب رفتار به واقعیت نزدیک‌تر باشد مقاومت مورد نیاز سازه دقیق‌تر به دست می‌آید. در بسیاری از مراجع، ضریب رفتار حالت نهائی (R_u) از رابطه ۷ تعیین می‌شود [۱۴ الی ۱۷].

$$R_u = R_\mu \times R_s \quad (7)$$

که در آن R_μ ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری و R_s ضریب مقاومت افزون سازه می‌باشد. روابط زیادی برای محاسبه R_μ توسط محققین پیشنهاد شد. در این تحقیق از روابط ۸ و ۹ برای تعیین R_μ استفاده شده است [۱۸]. هر چه ظرفیت شکل‌پذیری سازه بیشتر باشد مقدار R_μ بزرگتر خواهد بود.

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_c} + 1 \quad (T < T_c) \quad (8)$$

$$R_\mu = \mu \quad (T \geq T_c) \quad (9)$$

که در آن T زمان تناوب سازه و μ ظرفیت شکل‌پذیری سازه است. همچنین T_c ضریب وابسته به خاک است که از استاندارد ۲۸۰۰ به دست می‌آید.

ضریب R_s به کمک رابطه ۱۰ تعیین می‌شود.

$$R_s = \frac{C_y}{C_s} \quad (10)$$

که در آن C_y و C_s به ترتیب برابر ضریب برش پایه نظیر تسلیم کلی سازه و نظیر اولین تسلیم در سازه هستند.

بر اساس توضیحات ارائه شده، ضریب رفتار قاب‌های انتخابی در دو حالت با و بدون میراگر تعیین شد و برای محاسبه ضریب رفتار از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شد. نتایج مربوط به تعیین ضریب رفتار در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹: ضرایب رفتار مدل‌ها

R_{μ}		R_{δ}		R_{μ}		تعداد طبقات
Xbrace	XBWYD	Xbrace	XBWYD	Xbrace	XBWYD	
۶/۰۴	۹/۷۸	۳/۵۳	۴/۹۴	۱/۷۱	۱/۹۸	۳
۵/۶۴	۹/۳۷	۳/۴۶	۴/۸۸	۱/۶۳	۱/۹۲	۵
۵/۴۶	۸/۸۷	۳/۳۹	۴/۸۲	۱/۶۱	۱/۸۴	۷

همانگونه که از مقادیر این جدول مشهود است، ضریب رفتار قاب‌های دارای میراگر به مراتب بیشتر از قاب‌های بدون میراگر است.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی مجهز به میراگرهای تسلیمی خمشی با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی ارزیابی شده است. در ارزیابی عملکرد، ظرفیت‌های سختی، مقاومت و شکل‌پذیری و همچنین ضریب رفتار ملاک عمل قرار گرفت. بر اساس اطلاعات بدست آمده نتایج زیر حاصل شد:

- الف- میراگر تسلیمی سبب می‌شود سختی قاب‌ها حدوداً ۵ درصد کاهش یابد. این موضوع به دلیل ایجاد انفصال در عضو مهاربندی و وجود صفحات تسلیمی است. با توجه به ظرفیت بالای سختی جانبی در مهاربندها این کاهش اندک، مشکلی ایجاد نمی‌کند.
- ب- استفاده از میراگر تسلیمی باعث می‌شود ظرفیت مقاومت جانبی قاب‌ها حدوداً ده درصد کاهش یابد.
- ج- ظرفیت شکل‌پذیری قاب‌های دارای میراگر تسلیمی به مراتب بیشتر از قاب‌های بدون میراگر است. این افزایش تقریباً برابر سی درصد می‌باشد.

د- استفاده از میراگر تسلیمی خمشی در مهاربندهای ضربدری، ظرفیت جذب انرژی را افزایش می‌دهد.

د- ضریب رفتار قاب‌های خمشی در صورتی که با میراگرهای تسلیمی مجهز شوند افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. این افزایش در بعضی از حالات تا شصت درصد نیز می‌باشد. علت این امر افزایش ظرفیت شکل‌پذیری و در نتیجه افزایش ضریب رفتار ناشی از شکل‌پذیری است. ضریب رفتار سیستم پیشنهادی معادل سیستم‌های مهاربندی برون محور است.

مراجع

- [1] ناطقی الهی ف.، ۱۳۷۸، میراگرهای انرژی در مقاوم‌سازی لرزه‌ای ساختمان‌ها، انتشارات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، چاپ اول.
- [2] سلیمانپور ر.، یحیایی، م. و برقی، م.، ۱۳۸۵، مقاوم‌سازی ساختمان‌های فلزی موجود با میراگرهای ADAS، مجله فنی و مهندسی مدرس، شماره ۲۵ پاییز ۱۳۸۵.
- [3] Whittaker, A S., Bertero, V.V., Alonso, J. and Thompson C.L., 1989, Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- [4] Whittaker A.S., Bertero V.V., Thompson C.L. and Alonso L.J., 1991, Seismic Testing of Steel Plate Energy Dissipation Devices, Earthquake Spectra, Vol.7, No. 4, pp. 563-604.
- [5] Tsai K.C.; Hong C.O.; Su Y.F.; "Experimental Study of Steel Triangular Plate Energy Absorbing device for Seismic-Resistant Structures"; Report No. CEER/R81- 08; Center for Earthquake Engineering Research; National Taiwan University; 1992.
- [6] محمودی صاحبی م.، عبدی م.ق.، ۱۳۹۰، تأثیر میراگرهای تسلیمی ADAS بر نیازهای لرزه‌ای سازه‌ها، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.
- [7] Mahmoudi M., Abdi M.GH., Evaluating response modification factors of TADAS frames, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 71, 2012, Pages: 162-170.
- [8] Zhou C.X.W., Han J.G.T., 2012, Study on the seismic performance of X-added damping and stiffness energy dissipation device, 15WCEE, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.

- [9] Tehranizadeh M., 2000, Behavior of Friction Damping on Semi-Rigid Khoorjinee Steel Framing Connection, 12WCEE, 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand.
- [10] Herion S., et al., 2010, Castings in tubular structures – the state of the art, Structures and Buildings 163 Issue SB6.
- [11] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، کمیته بازننگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش ۳.
- [12] وزارت مسکن و شهرسازی، معاونت نظام مهندسی و اجرای ساختمان مقررات ملی ساختمان ایران، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، ۱۳۹۲.
- [13] Silvia, M., Frank, Mc., Michael, H.S., Fenves, L., July 2006, OpenSees Command Language Manual, University of California.
- [14] صاحبی م.، ۱۳۸۸، فلسفه طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد، انتشارات دانشگاه شهید رجایی، چاپ سوم.
- [15] صاحبی م.، زارع م.، ضریب رفتار سازه‌ها از تعریف تا تعیین، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۱، شماره ۱، سال ۱۳۹۰.
- [16] Uang, C.M., Establishing R (or R_w) and Cd factor for building seismic provision, Journal of Structural Engineering, 1991, 117(1), 19-28.
- [17] صاحبی م.، ارزیابی اولیه قاب‌های خمشی بتن مسلح با هدف‌های طراحی بر اساس عملکرد، مجله فن‌آوری و آموزش، سال اول، جلد اول، شماره ۳، بهار ۱۳۸۶.
- [18] Fajfar, P., 2005, Structural Analysis in Earthquake Engineering, A Breakthrough of Simplified Non-Linear Methods, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Paper Reference 843.