

## Improving the nonlinear behavior of diagonal CBF braces using a damper in arc shape

mohsen yousefi<sup>1\*</sup>, Yahya Nasira<sup>2</sup>, Ali Ghamari<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Department of Civil Eng, Sharif University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Eng, Zanzan branch, IAU, Zanzan, Iran.

3- PhD student of Civil Engineering, Zanzan, Azad University

### ABSTRACT

The energy absorber device improves the seismic behavior of structures against seismic loads. Despite the proper performance of the dampers against seismic loads, they impose additional costs on the structure. Therefore, in this paper, a new damper is introduced which, in addition to improving the seismic behavior, imposes a small cost on the structure. To evaluate the performance of the proposed damper, 15 numerical samples were simulated by Abacus software. under cyclic loading. The study of cyclic behavior was performed on a steel frame of one story-one bay and the sensitivity of cyclic behavior was studied based on the parameters of thickness, length and dimension to the thickness of the brace and slenderness of brace. The thicknesses of the damper are, respectively, 12, 21 and 30 mm, the length of the damper is 400, 500 and 600 mm, the geometry of the damper is arc and the thickness of the brace is 12, 21 and 30 mm. Numerical simulation was performed. The results of this study showed that this type of damper has a good performance in energy dissipation imposed on the structure. Although the proposed damper improves the energy absorption of the structure, it will also reduce the stiffness.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 23 February 2021

**Revise Date:** 01 October 2021

**Accept Date:** 01 November 2021

**Keywords:** *Steel dampers, energy dissipation, shear yield, structural control, CBF bracing.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.269901.2347

\*Corresponding author: Yahya Nasira  
Email address: ghaytool@mailfa.org

## بهبود رفتار غیرخطی مهاربند همگرا تک قطری با استفاده از یک میراگر جدید کمائی شکل

محسن یوسفی<sup>۱</sup>، یحیی نصیرا<sup>۲</sup>، علی قمری<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

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

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد دره شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، دره شهر، ایران

### چکیده

استفاده از میراگرها به عنوان جاذب انرژی باعث بهبود رفتار لرزه ای سازه ها در برابر بارهای لرزه ای می شوند. از جمله مؤثرترین جاذب های انرژی، میراگرهای فلزی جاری شونده می باشند. علی رغم عملکرد مطلوب این میراگرها در برابر بارهای لرزه ای، هزینه های اضافی را به سازه تحمیل می کنند. لذا در این مقاله یک میراگر جدید معرفی شده است که علاوه بر بهبود رفتار لرزه ای، هزینه ناچیزی به سازه تحمیل می کند. برای بررسی عملکرد چرخه ای میراگر پیشنهادی، ۱۵ نمونه عددی در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شد. مطالعه رفتار چرخه ای شامل بررسی تاثیر هندسه میراگر بر رفتار کلی سیستم و همچنین تاثیر هندسه مهاربند بر رفتار میراگر است. بدین منظور، میراگر با ضخامت های ۱۲، ۲۱ و ۳۰ میلی متر، و همچنین طول های ۴۰۰ mm و ۵۰۰ mm و ۶۰۰ mm، و ضریب لاغری ۰.۵۹ و ۰.۶۵ در نظر گرفته شده است. با تغییر پارامتر طول میراگر از ۶۰۰ mm به ۵۰۰ mm و ۴۰۰ mm، هر یک از پارامترهای سختی، مقاومت نهایی و انرژی در حالتی که میراگر عملکرد فیوزی داشته است، حداکثر به میزان ۱۴۴، ۴۶ و ۱۴۹ درصد افزایش داشته اند. همچنین با تغییر پارامتر ضخامت میراگر از ۱۲ mm به ۲۱ mm و ۳۰ mm، هر یک از پارامترهای سختی، مقاومت نهایی و انرژی در حالتی که میراگر عملکرد فیوزی داشته است، حداکثر به میزان ۱۴۷، ۵۲ و ۱۶۰ درصد افزایش داشته اند. با تغییر پارامتر ضریب لاغری مهاربند از ۵۹ به ۶۲ و ۶۵، هر یک از پارامترهای سختی، مقاومت نهایی و انرژی در حالتی که میراگر عملکرد فیوزی داشته است، حداکثر به میزان ۵، ۷ و ۹ درصد افزایش داشته اند.

کلمات کلیدی: میراگر فولادی، استهلاک انرژی، تسلیم برشی، کنترل سازه، مهاربند همگرا.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
<a href="https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.269901.2347">https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.269901.2347</a>	۱۴۰۱/۳/۳۱	۱۴۰۰/۸/۱۰	۱۴۰۰/۸/۱۰	۱۴۰۰/۷/۰۹	۱۳۹۹/۱۲/۰۵
			*نویسنده مسئول: علی قمری aghamari@alumni.iust.ac.ir		
			پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

استهلاک انرژی یکی از مهمترین پارامترهای طراحی لرزه ای است که می تواند با ایجاد خسارات محدود در سازه رفتار مناسبی را فراهم سازد. این آسیب ها می تواند در تمام اعضای مقاوم در برابر لرزه سازه ایجاد شود. مدیریت آنها دشوار است و احتمالاً پس از یک زلزله شدید، اعضا یا اتصالات آسیب دیده زیادی در کل سازه وجود دارد. از طرف دیگر، استهلاک انرژی می تواند توسط عناصر شکل پذیر خاص، به عنوان فیوز یا میراگر تأمین شود. در دهه های اخیر، علاوه بر جداسازهای لرزه ای (به عنوان مثال یاتاقان های الاستومری و یاتاقان لاستیکی سرب)، چندین نوع سیستم اتلاف انرژی برای تأمین شکل پذیری یا افزایش انرژی اتلاف شده در سازه ها ساخته شده است، از جمله سیستم های کنترل جابجایی (میراگر بازده فلزی، دستگاه اصطکاکی)، سیستم های کنترل سرعت (میراگرهای چسبناک و ویسکوالاستیک)، سیستم های کنترل حرکت (تنظیم شده میراگرهای جرمی و مایع). در دهه های اخیر، انواع مختلفی از میراگر بازده فلزی معرفی شده است و در همه آنها، فولاد به یکی از چهار حالت محوری، برشی، پیچشی یا خمش تبدیل شده است. مزایای اصلی میراگرهای فلزی توانایی آنها در افزایش شکل پذیری سیستم ها و در نتیجه تمرکز خسارات ناشی از زلزله در میراگر به جای عناصر سازه است. با تعویض میراگرها، به عنوان فیوز، سیستم ساختاری به راحتی ترمیم می شود. دستگاه های میرایی صفحه ای شامل چند صفحه فولادی است که در موقعیت های مختلف در مهاربندها نصب می شوند. اولین پژوهش در زمینه استفاده از میراگرهای فلزی به وسیله کلی و اسکینر در اوایل دهه ۱۹۷۰ ارائه شد و با پژوهش های متنوع و گسترده دیگر پژوهشگران ادامه یافت [۱]. این وسایل به عنوان مستهلک کننده انرژی در سازه ها تعبیه شده و با تحمل تغییر شکل های خمیری، بخش قابل توجهی از انرژی ورودی به سازه را تلف می کنند. هدف اصلی از استفاده این وسایل وقوع خرابی ها روی قطعاتی از پیش تعیین شده و قابل تعویض و در پایان سالم ماندن سازه اصلی است. تاکنون میراگرهای فلزی متنوعی با سازوکارهای متفاوت جاری شدن پیشنهاد و بررسی شده است. به صورت کلی این نوع از میراگرها را می توان از نظر چگونگی جاری شدن به چهار گروه خمشی، محوری، برشی و پیچشی تقسیم بندی کرد. از معروف ترین میراگرهایی که انرژی ورودی به سازه را با بهره گیری از تغییر شکل های خمشی مستهلک می کنند می توان به میراگرهای ADAS و TADAS اشاره کرد. گرای و همکاران در سال ۲۰۱۰ پژوهشی در زمینه میراگرهای فلزی تسلیم شونده در قابهای مهاربندی انجام دادند [۲]. در مطالعه آنها یک اتصال دهنده فولادی ریخته گری جدید ارائه شده است که به عنوان عنصر اتلاف کننده انرژی در یک قاب مهاربند متحدالمرکز عمل می کند. انرژی لرزه ای از طریق استهلاک خمشی الاستیک در اتصال دهنده ها نقش اصلی در طراحی دارند. سپس مواد فولادی ریخته گری مورد استفاده برای نمونه اولیه دستگاه مورد بررسی لرزه ای قرار گرفت و در نهایت نتایج آزمون آزمایشگاهی رفتار قابل قبولی ارائه داد. آقای تسای و همکاران [۳] در سال ۱۹۹۳ در ژورنال طیف زلزله مقاله ای تحت عنوان طراحی صفحه مثلثی فلزی جاذب انرژی برای مقاوم سازی منتشر کردند که در طی آن صفحات مثلثی شکلی را که برای شکل پذیر کردن مهاربند شون از آن استفاده شده، معرفی کردند. اجزا معرفی شده که TADAS نامیده می شود که از تعدادی صفحه فولادی مثلثی شکل تشکیل شده است که از قسمت قاعده بر روی یک صفحه فولادی که بر روی آن شیارهایی جهت قرار گرفتن صفحات فولادی در داخل آنها ایجاد شده، قرار گرفته و جوش شده اند و از قسمت راس درون پروفیل ناودانی شکلی قرار گرفته و توسط بولتهای خاصی در محل خود بسته می شود. میراگرهای TADAS با هندسه های متعددی مورد آزمایش قرار گرفتند که ضخامت و ارتفاع نمونه ها با هم متفاوت بود. نتایج بدست آمده از آزمایشات و آنالیزها بر روی این میراگرها گویای این مطلب می باشند که سختی الاستیک و مقاومت نهایی سیستم TADAS را با دقت می توان پیش بینی کرد. ظرفیت دورانی سیستم TADAS جوش شده بیش از ۰/۲۵ رادیان می باشد. پاسخ لرزه ای قاب دارای سیستم TADAS بخوبی می تواند کنترل شود و به وسیله آنالیز غیر خطی سازه اصلی، بادقت می توان پیش بینی کرد. اغلب میراگرهای فولادی استفاده شده جهت مقاوم سازی لرزه ای از نوع x و یا مثلثی و از جنس فولاد بوده اند، تا میرایی و سختی منطبق با مهاربند موردنظر برای نصب را افزایش دهند. استهلاک انرژی در این میراگرها بسیار خوب است با این وجود مشکلاتی در این دو نوع میراگر فولادی مقاوم در برابر زلزله وجود دارد و تسلیم به صورت یکنواخت در مقطع عرضی فلزی پخش می شود. نمونه ای از میراگر تسلیمی رایج مثلثی که مورد بررسی عددی غفاری و همکاران و در پژوهشی دیگر مورد بررسی محمدی و همکاران قرار گرفت [۴-۵]. مدل x شکل رفتار بسیار منظمی در طی بارهای تناوبی دارد. این میراگرها در فرم هم محور بر روی پاشنه بادبند قرار می گیرند و به تیر بالا متصل می شوند. دستگاه دیگر، میراگر استهلاکی متشکل از یک لوله سربی کوتاه که برای تغییر شکل در برش بارگذاری شده است و توسط تیلور و همکاران [۶] در سال ۱۹۹۵ ساخته شده است. سیستم های مهاربندی فولادی استهلاکی ساخته شده از میله های فلزی گرد برای ساختار مهاربندی در نیوزیلند توسعه

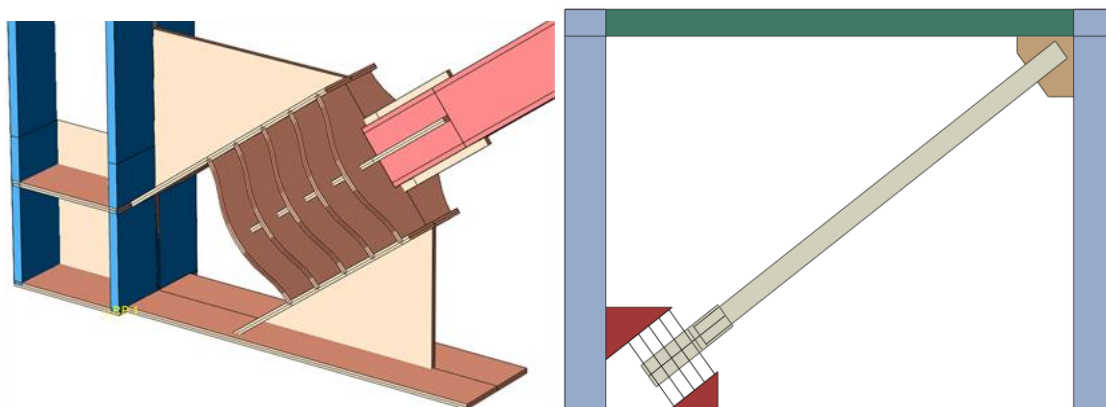
یافته است. در این دستگاه انرژی با تغییر شکل غیرکشش قاب فولادی مستطیلی در جهت مورب مهاربند کشیده می‌شود. مالکی و محجوبی [۷] در سال ۲۰۱۴ پژوهشی در زمینه میراگر لوله‌ای توپر انجام دادند. در این مطالعه یک دستگاه کنترل غیرفعال جدید برای محافظت از سازه‌ها در برابر زلزله معرفی شده است. این دستگاه از دو لوله جوش داده شده تشکیل شده است که دارای دو لوله کوچکتر در داخل خود هستند و فضاهای بین لوله‌ها با فلزاتی مانند سرب یا روی پر شده است. این دستگاه در برش بارگذاری می‌شود و از پلاستیک شدن لوله‌های خارجی، لوله‌های داخلی و فلزات پر شده و اصطکاک بین فلزات به عنوان مکانیسم جذب انرژی بهره می‌برد. آزمایشات چرخه‌ای نیمه استاتیک در شش نمونه انجام می‌شود که همگی نمودار هیستریزس پایدار و میرایی زیاد را نشان دادند. یک مدل اجزای محدود در برابر نتایج آزمون ساخته و کالیبره شده است. از این مدل برای یافتن اندازه‌های مطلوب لوله‌های مورد نیاز برای پاسخ بهتر هیستریزس استفاده می‌شود. برای پیش‌بینی عملکرد لرزه‌ای برای پارامترهای اصلی میراگر معادلاتی ارائه شده است. لی و همکاران در سال ۲۰۱۵ پژوهشی در زمینه میراگرهای نواری فولادی غیر یکنواخت تحت بارهای چرخه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند [۸]. در این مطالعه عملکرد چرخه‌ای میراگرهای نواری فولادی غیر یکنواخت را توصیف می‌کند. اشکال پیشنهادی عبارتند از: الف) نواری به شکل دمبل، ب) نوار مخروطی و ج) نواری به شکل ساعت شنی. هر یک از این اشکال نواری برای کاهش تمرکز تنش هنگام قرار گرفتن در معرض بارهای چرخه‌ای طراحی شده است. به منظور ارزیابی عملکرد میراگرها، شش نمونه از نظر چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفتند. آسیب تجمعی ناشی از حرکت هیستریزس به طور موثر در کل ارتفاع نوارها توزیع شد و ریزساختارهای SEM از سطوح شکستگی نشان دهنده یک حالت خرابی شکل‌پذیری معمولی است. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که میراگرهای نواری پیشنهادی عملکرد لرزه‌ای عالی را در مقایسه با میراگرهای شکاف منشوری معمولی نشان می‌دهند. علاوه بر این، تأیید شد که می‌توان با استفاده از معادلات طراحی ارائه شده در مطالعه، عملکرد سازه‌ای را به درستی تخمین زد. ساهو و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی رفتار چرخه‌ای برشی و خمشی میراگرهای فلزی پرداختند [۹]. پتانسیل اتلاف انرژی یک میراگر فلزی تا حد زیادی به پاسخ هیستریزس حاصل از تغییر شکل غیرالاستیک صفحات تحت بارگذاری محوری یا خمشی یا برشی بستگی دارد. در این مطالعه، یک دستگاه اتلاف انرژی غیرفعال متشکل از یک سری صفحات فولادی که قادر به عملکرد در هر دو حالت خمش و برش هستند، به طور آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای بررسی شده است. دو صفحه انتهایی با پیکربندی x تحت عملکرد خمشی بررسی شد، در حالی که یک صفحه وب مستطیل شکل دستگاه اجازه دارد انرژی را از طریق استهلاک برشی اتلاف کند. سه دستگاه میرایی بازده برشی و خمشی با تغییر اندازه هر دو صفحه خمشی و برشی مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای اصلی بررسی شده ظرفیت بار، تنش پسماند، اتلاف انرژی، میرایی ویسکوز معادل و شکل‌پذیری است. تجزیه و تحلیل عناصر محدود برای پیش‌بینی مقاومت نهایی و پاسخ هیستریزس نمونه آزمایش انجام شده است. نتایج پیش‌بینی شده به طور منطقی با نتایج آزمون مطابقت دارد. سرانجام، یک روش طراحی برای متناسب کردن صفحات خمشی و برشی میراگرهای پیشنهادی برای تخمین بار جانبی ارائه شده است. علاوه بر این دست پژوهش‌ها، برخی پژوهشگران نیز سعی کرده‌اند تا هندسه بهینه‌ای برای بازشوه‌های این میراگرها پیشنهاد نمایند که از بین آنها می‌توان مطالعات قبریایی و همکارانش [۱۰] را نام برد. از مزایای این میراگرها به افزایش شکل‌پذیری و میرایی و کاهش تغییر مکان سازه، تمرکز خسارت در میراگرها طی استهلاک انرژی در آن‌ها و باقی ماندن سایر اعضای سازه غالباً در محدوده خطی، اطمینان بالا از کارکرد درست میراگر به دلیل وجود رویه کنترل کیفیت ساخت نسبت به اجزا و قطعات معمول سازه، چرخه پسماند پایدار بدون افت در سختی و مقاومت طی بارگذاری چرخه‌ای، عدم نیاز به نگهداری و بازدید، سهولت تعویض دستگاه میراگر پس از خسارت ناشی از زلزله، درجات نامعینی بالا به علت تعداد ورق‌ها در هر میراگر اشاره شده است. مجاور در تغییر شکل‌های بزرگ گزارش شد. به منظور بهبود عملکرد میراگر TADAS و جلوگیری از برخورد ورق‌ها در تغییر شکل‌های بزرگ پیشنهاد کردند که بدون نیاز به افزایش فاصله ورق‌ها، از یک میله غلتکی (پین) که مستقیماً به انتهای ورق جوش می‌شود، استفاده شود. مالکی و همکاران [۱۱] به مطالعه درباره عملکرد میراگرهای ترکیبی منحنی و میراگرهای مثلثی افزاینده میرایی و سختی TADAS در قاب خمشی فولادی با استفاده از روش اجزاء محدود و به کمک نرم افزار ABAQUS پرداختند. پارامترهای مورد بررسی به ترتیب شامل عرض دمپر منحنی (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر)، ضخامت دمپر TADAS (۵ و ۱۰ میلی‌متر) و تعداد میراگرهای TADAS (۲، ۴ و ۶) می‌باشند. نتایج حاصل نشان داد میراگرهای ترکیبی منحنی و TADAS انرژی ورودی لرزه‌ای را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهند و از خرابی سازه جلوگیری می‌کنند. عملکرد این دمپرها به گونه‌ای می‌باشد که با تغییر شکل‌های ویژه منجر به استهلاک و جذب انرژی مقدار زیادی انرژی ورودی زلزله به سازه می‌شوند. هاشمی و همکاران در تحقیقی [۱۲] به بررسی توسعه منحنی شکنندگی لرزه‌ای قاب‌های دارای مهاربند کمانش‌تاب مجهز به مصالح هوشمند تحت توالی زلزله اصلی و پس لرزه، پرداختند. در این تحقیق، رفتار لرزه‌ای قاب‌های مجهز به مهاربند کمانش‌تاب و تأثیر

اضافه کردن آلیاژ حافظه‌دار شکلی مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور سه قاب دوعبده با تعداد طبقات ۳، ۶ و ۹ در نرم افزار OpenSees در نظر گرفته شد. عملکرد قاب‌های دارای مهاربندهای کمانش تاب در دو حالت با و بدون آلیاژهای حافظه‌دار شکلی با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی مورد بررسی قرار گرفته شد. برای توسعه‌ی منحنی‌های شکنندگی از ۷ شتاب‌نگاشت تکان قوی شامل زلزله‌ی اصلی و پس‌لرزه‌های متوالی استفاده شده است. با تعریف سه سطح عملکردی استفاده بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه‌ی فروریزش (CP) و بر اساس حداکثر تغییرشکل نسبی میان طبقه‌ای و حداکثر برش پایه، مقادیر توابع احتمال فرا گذشت از سطوح عملکردی محاسبه شده‌اند. از مقایسه‌ی منحنی‌های شکنندگی مشخص شد که قاب دارای آلیاژ حافظه‌دار شکلی اغلب دارای محدوده‌ی عملکردی IO و LS می‌باشد و احتمال رخداد سطح عملکردی آستانه‌ی فروریزش ۳۸ درصد و در حالت بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی دارای محدوده‌ی عملکردی CP و با احتمال ۶۵ درصد خواهد بود. با استفاده از آلیاژ حافظه‌دار شکلی در این قاب‌ها می‌توان هزینه‌ی بازیابی سیستم خسارت‌دیده‌ی ساختمانی را کاهش داده و سیستم برگشت‌پذیرتری داشت. روش‌های کنترل غیرفعال با کاهش نیاز لرزه‌ای و افزایش شکل پذیری، میزان آسیب پذیری سازه‌ها را در برابر زلزله کاهش می‌دهند. پورامینیان و همکاران در تحقیقی [۱۳] به ارزیابی احتمالاتی ظرفیت فروریزش لرزه‌ای قاب‌های مهاربند ی کمانش تاب مجهز به آلیاژهای حافظه‌دار شکلی پرداختند. در این تحقیق، ابتدا ۲ قاب با تعداد طبقات ۶ و ۱۲ دارای مهاربندهای کمانش تاب در نرم‌افزار ETABS بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ای به صورت سه‌بعدی طراحی و سپس قاب کناری آن‌ها در نرم‌افزار OpenSees به صورت دوعبده در دو حالت با و بدون آلیاژ حافظه‌دار شکلی مدل‌سازی شده‌اند و در نهایت نقش آلیاژهای حافظه‌دار شکلی در آن با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایشی (IDA) تحت ۷ زوج شتاب‌نگاشت دور از گسل پیشنهادی دستورالعمل FEMA P695 بررسی شده‌اند. غروی و همکاران [14] به بررسی یک میراگر فولادی متصل شونده به مهاربندهای همگرا شورون پرداختند. این محققان نشان دادند که استفاده از میراگر پیشنهاد شده، علاوه بر جلوگیری از کمانش مهاربند، جذب انرژی سیستم به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

هر چند استفاده از میراگرهای فولادی باعث بهبود رفتار لرزه‌ای سازه می‌شود اما باعث افزایش هزینه‌های ساخت نیز می‌گردد. علاوه بر این از میراگرها دارای پیچیدگی‌ها ساخت و اجرا هستند. لذا در این مقاله، یک میراگر فولادی پیشنهاد شده است که از سادگی ساخت و اجرا برخوردار است. همچنین، هزینه اندکی ناشی از ساخت میراگر به سازه تحمیل می‌کند که جنبه‌های اقتصادی استفاده از میراگر پیشنهادی را توجیه می‌کند.

## ۲- معرفی میراگر پیشنهادی

در این مقاله یک میراگر فولادی برای بهبود رفتار لرزه‌ای مهاربند همگرا پیشنهادی می‌شود که هندسه آن در شکل (۱) نمایش داده شده است. میراگر پیشنهادی از ورق‌های بیضی شکل تشکیل می‌شود که دو انتهای آن به وسیله یک ورق احاطه می‌شود. همچنین ورق عمود بر صفحه میراگر در وسط آن نصب می‌شود که باعث انتقال نیرو از مهاربند به میراگر می‌شود. با توجه به اینکه انتظار می‌رود تحت بارهای رفت و برگشتی، در میراگر مفصل پلاستیک تشکیل شود و سایر اجزا در ناحیه الاستیک باقی بمانند، لذا خسارت سازه‌ای به میراگر محدود می‌شود. از آنجایی که میراگر پیشنهادی تحت اثر بارهای ثقلی نیست، لذا پس از زلزله براحتی می‌توان میراگر را تعویض نمود بدون آنکه خللی در بهره‌برداری سازه ایجاد شود.



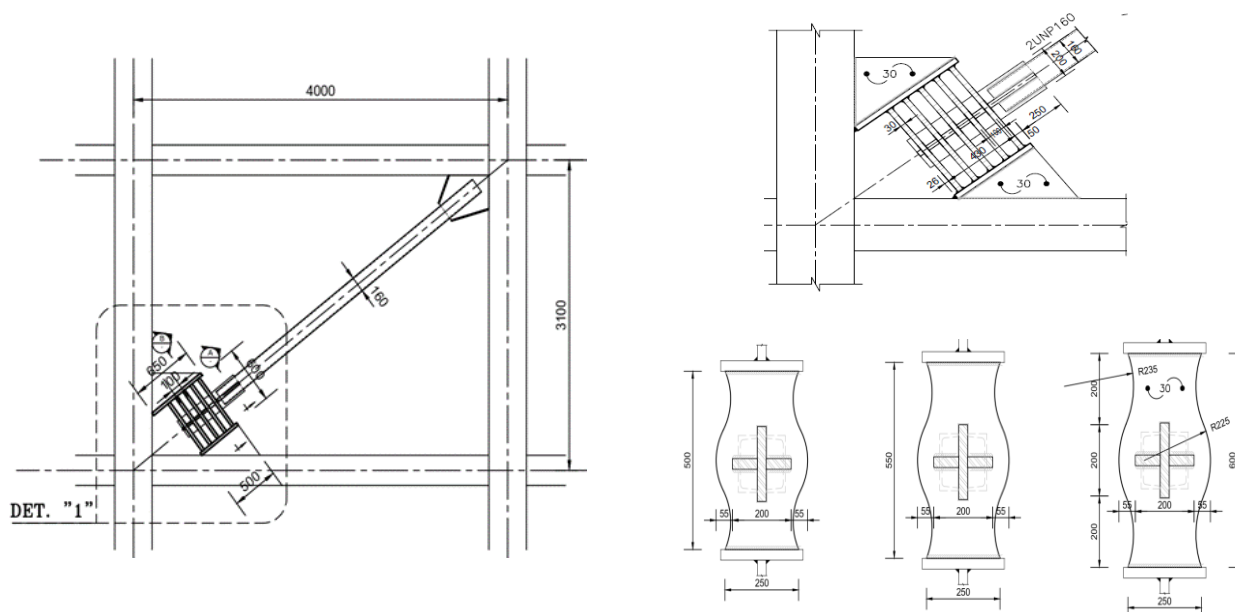
شکل ۱: نمایش شماتیک میراگر پیشنهادی

## ۳- مطالعه عددی

## ۳-۱ مدل های عددی

به منظور بررسی میراگر پیشنهادی، ۱۵ مدل شبیه سازی شده است که لیست آن ها در جدول ۱ با مشخصات آورده شده است. برای هر مدل یک اسم طراحی شده است تا در حالت مقایسه نتایج پارامتر متغیر قابل تشخیص باشد. اسم انتخاب شده برای هر میراگر دربرگیرنده مشخصات میراگر است. بخش سوم اسم میراگر نشان دهنده طول، بخش چهارم نشان دهنده ضخامت میراگر و آخرین بخش از اسم هر میراگر نشان دهنده ضریب لاغری است.

در شکل (۴) مشخصات هندسی مدل های عددی نمایش داده شده است. در تمام مدل های عددی، قاب با دهانه ۴ متر و ارتفاع سه متر در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد بررسی در این مدل ها شامل ضخامت میراگر، طول میراگر و نسبت بعد به ضخامت مقطع مهاربند می باشد. هندسه میراگرهای ارزیابی شده بصورت کمانی، ضخامت میراگرها ۱۲، ۲۱ و ۳۰ میلیمتر، طول میراگرها ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ میلیمتر و ضریب لاغری ۵۹، ۶۲ و ۶۵ انتخاب شده است.



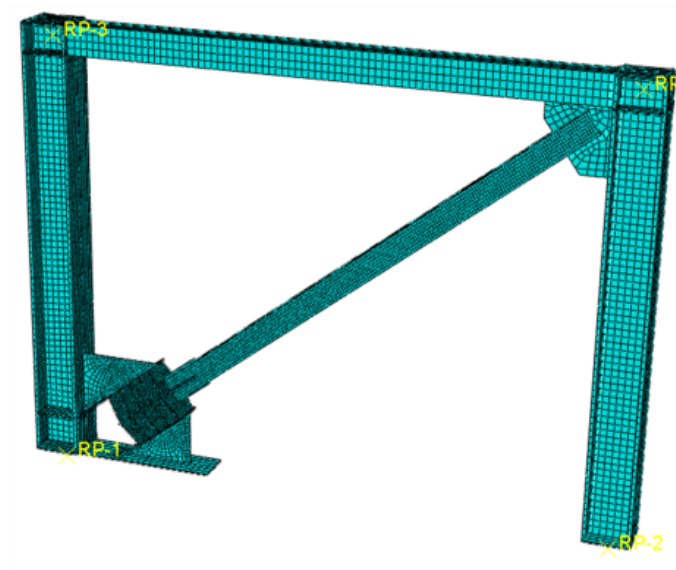
شکل ۲: مشخصات مدل های عددی

جدول ۱: مشخصات مدل‌های اجزا محدود میراگر کمّانی شکل

شماره	نام مدل	طول میراگر	ضخامت میراگر	ضریب لاغری مهاربند
1	D1	600	12	59
2	D2	500	12	59
3	D3	400	12	59
4	D4	600	21	59
5	D5	500	21	59
6	D6	400	21	59
7	D7	600	30	59
8	D8	500	30	59
9	D9	400	30	59
10	D10	600	21	62
11	D11	500	21	62
12	D12	400	21	62
13	D13	600	21	65
14	D14	500	21	65
15	D15	400	21	65

## ۳-۲ مدل سازی اجزا محدود

برای مدل سازی مدل های عددی از نرم افزار ABAQUS ورژن ۲۰۱۶ استفاده شد. در این نرم افزار از اجزا S4R (اجزا پوسته دارای ۴ گره و انتگرال گیری کاهش یافته) استفاده شده است. پس از مدل سازی اجزا سازه ای، مدل شبکه بندی شده که در شکل (۳) نمایش داده شده است. در شبکه مدل اجزا محدود، ابعاد شبکه تیر و ستون برابر ۴۰ میلیمتر و برای مهاربند و میراگر ۲۰ میلیمتر انتخاب شد. برای ایجاد تکیه مفصلی پای ستون ها، درجات آزادی انتقالی در هر سه جهت مقید گردید. همچنین با توجه به اینکه فرض می شود تیر طبقه در سقف مدفون خواهد شد لذا حرکت خارج از صفحه تیر طبقه مقید شد.

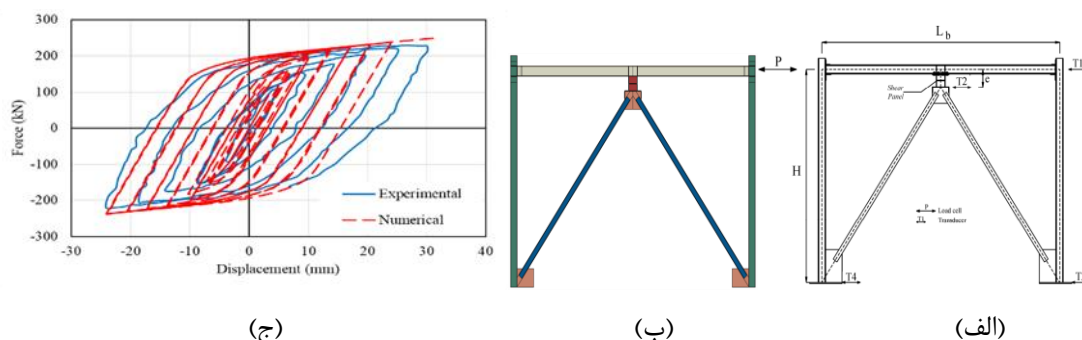


شکل ۳: قاب شبکه بندی شده دارای میراگر کمّانی شکل

## ۳-۳ صحت سنجی نتایج اجزا محدود

برای اطمینان از صحت نتایج مدل سازی اجزای محدود، نمودار هیستریزیس دو نمونه آزمایشگاهی برگرفته از مراجع [۱۵] و [۱۶] با نتایج اجزا محدود مقایسه می شود. نمودار هیستریزیس نمونه آزمایشگاهی زهرایی با نمودار هیستریزیس گرفته شده از نرم افزار با هم مقایسه شد [۱۴]. در این پژوهش تیر پیوند قائم در قاب یک دهانه و یک طبقه تحت بار چرخه ای مورد تست قرار گرفت. تیر پیوند قائم یکی از موثرترین و در عین حال ساده ترین روش های کنترل غیر فعال برای کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله است. پانل برشی به صورت قائم بین گره دو مهار بند شورون و بال تیر کف نصب می شود و با جاری شدن برشی جان آن، انرژی زلزله مستهلک می شود و سایر عناصر سازه

الاستیک باقی می ماند. قطعات نیمرخ های IPE و IPB می توانند به عنوان پانل برشی در قاب مهاربندی شورون مورد استفاده قرار گیرند که در شکل (۴) نشان داده شده است. پانل برشی به سهولت قابل تعویض است و می تواند به عنوان عضوی یک بار مصرف در نظر گرفته شود؛ بنابراین میتوان تنها با تعویض قطعه پانل برشی دوباره از سازه استفاده کرد که بیانگر به صرفه بودن استفاده از این قطعات برای بهسازی ساختمان های موجود در برابر زلزله است. همان طور که از شکل (ج) پیداست نمودار به دست آمده از نرم افزار با نمودار آزمایشگاهی مطابقت بسیار خوبی دارد. باید توجه داشت میزان اندک اختلاف دیده شده در نتیجه، به علت تفاوت شرایط در محیط آزمایشگاهی و مدل عددی در نرم افزار می باشد. در نهایت نتایج مقایسه شده در دو نمونه با هم همخوانی داشته و می توان به صحت نتایج ارائه شده اطمینان حاصل کرد. ابعاد مدل و مشخصات مصالح نمونه آزمایشگاهی و همچنین پروتکل بارگذاری در جداول (۲) و (۳) و شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۴- مدل صحت سنجی، الف) هندسه قاب صحت سنجی در آباکوس، ب) هندسه قاب صحت سنجی در آزمایشگاه، ج) مقایسه نمودار هیستریزس عددی و آزمایشگاه

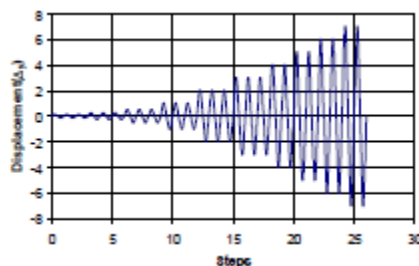
جدول ۲: مشخصات قابهای فولادی مورد آزمایش [15]

مشخصات تیر پیوند قائم				مشخصات قاب					نام نمونه	شماره نمونه	
فاصله سخت کننده (cm)	ضخامت سخت کننده (mm)	طول تیر پیوند (cm)	مقطع تیر پیوند قائم	طول مهاربند (cm)	مقطع مهاربند	طول تیر (cm)	مقطع تیر	ارتفاع ستون (cm)			
۱۰	۱۰	۲۰	IPE160	۳۴۵	2UNP80	۴۲۰	IPB140	۳۰۰	IPB120	SPS1	۱
۱۰	۱۰	۲۰	IPE140	۳۴۵	2UNP80	۴۲۰	IPB140	۳۰۰	IPB120	SPS2	۲
--	--	۲۰	IPE140	۳۴۵	2UNP100	۴۲۰	IPB140	۳۰۰	IPB120	SPS3	۳
۱۰	۱۰	۳۰	IPE140	۳۳۷	2UNP80	۴۲۰	IPE180	۳۰۰	2IPE140	SPS4	۴
۱۰	۱۰	۳۰	IPE160	۳۳۷	2UNP100	۴۲۰	CPE180	۳۰۰	2IPE140	SPS5	۵

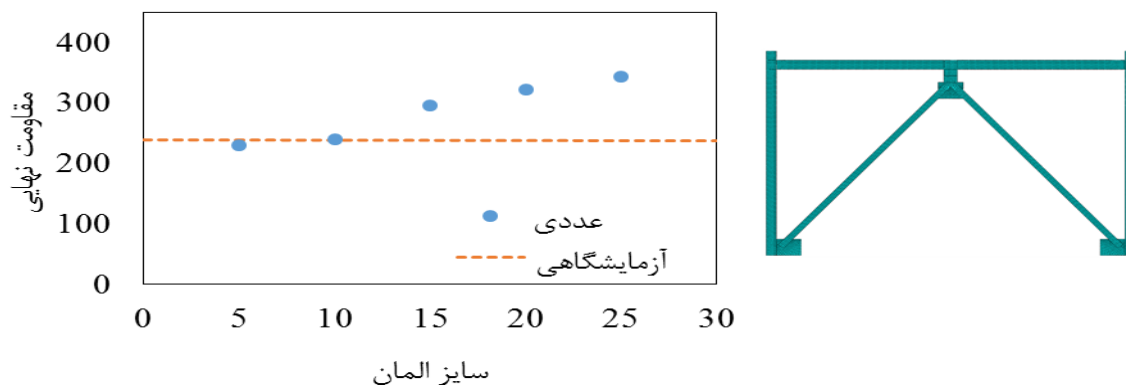
جدول ۳: مشخصات مصالح فولادی نمونه های مورد آزمایش

نام نمونه	$F_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )
SPS 1	۴۲۰۰	۲۸۰۰
SPS 2	۴۸۲۲	۳۳۷۲
SPS 3	۵۰۷۹	۳۶۱۰
SPS 4	۵۱۷۵	۳۶۴۱
SPS 5	۵۱۲۸	۳۵۸۰



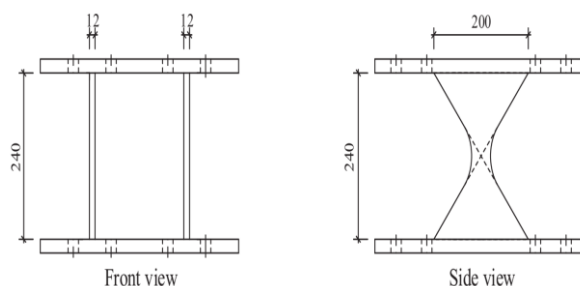


شکل ۵: منحنی تغییر مکان اعمال شده به قاب ها

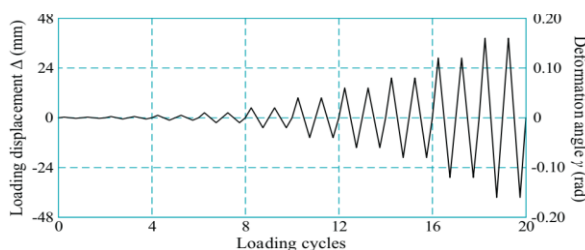


شکل ۶- آنالیز حساسیت

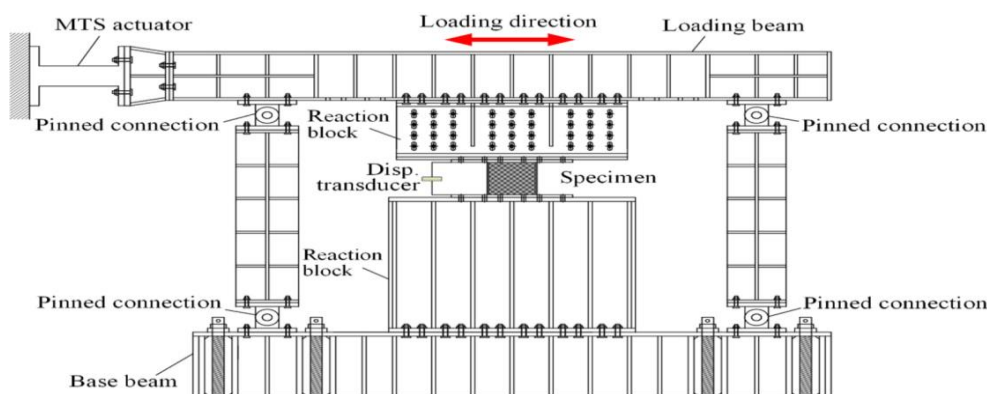
در تحقیق آزمایشگاهی لی و همکاران در سال ۲۰۱۹، میراگرهای برشی، خمشی و ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. برای صحت سنجی از نتایج نمونه آزمایشگاهی میراگر XADAS که بصورت نمودار هیستریزس گزارش شده بود استفاده گردید. ابعاد و موقعیت میراگر XADAS در شکل (۷) نشان داده شده است. جنس مصالح فولادی مصرفی در این دمپر از نوع SY 37 بود که مدول الاستیسیته آن ۲۰۱ گیگاپاسکال، تنش تسلیم آن ۱۵۳ مگاپاسکال، تنش نهایی آن ۲۸۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون آن ۰/۳ گزارش شده بود. بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ها بصورت چرخه ای اعمال گردید که در شکل (۸) و سیستم مورد آزمایش و شرایط مرزی این میراگر در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۷- ابعاد میراگر XADAS در مطالعه آزمایشگاهی لی و همکاران [16]

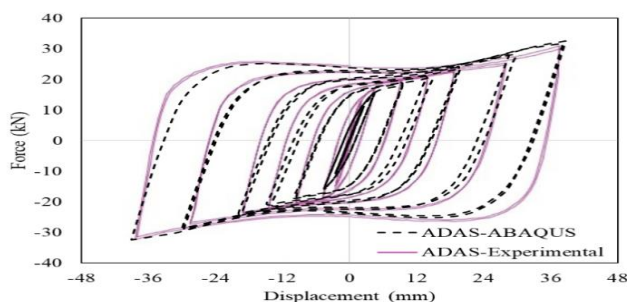


شکل ۸- پروتکل بارگذاری اعمال شده به میراگر XADA بر اساس مطالعه آزمایشگاهی لی و همکاران



شکل ۹- موقعیت نمونه آزمایشگاهی و شرایط مرزی و محل اعمال بار چرخه‌ای [16]

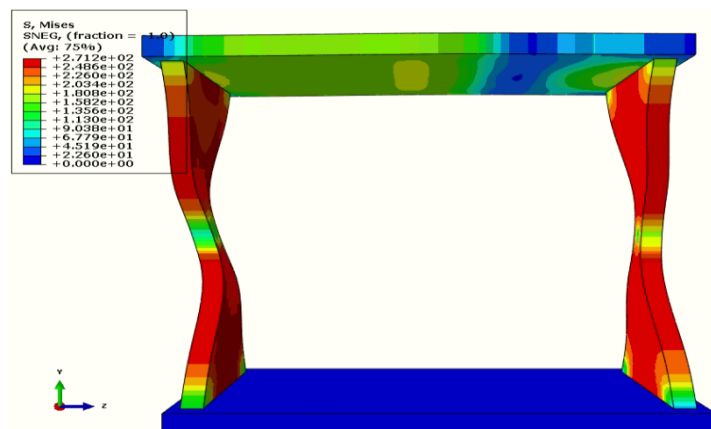
همانطوریکه در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود دو منحنی به طور کامل بر هم انطباق نداشته و مقداری اختلاف بین آنها وجود دارد. با توجه به رفتاری که نمونه شبیه سازی از خودش نشان داده و رفتار نمونه در آزمایشگاه، می‌توان این اختلاف را به عملی که روی قطعات در آزمایشگاه انجام می‌دهند (از قبیل سوراخکاری، جوشکاری، خروج از مرکزیت و نقص اعضا و ...)، نسبت داد. در ادامه در جدول (۴) میزان اختلاف نسبی بین مدل آزمایشگاهی و عددی آورده شده است که میزان اختلاف بین نتایج نیروی جانبی حداکثر  $2/48$  درصد و میزان اختلاف بین انرژی مستهلک شده توسط میراگر  $3/49$  درصد حاصل شده است. میزان اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی در حد قابل قبولی است و می‌توان از نتایج عددی این نرم افزار در مطالعه میراگر XADAS استفاده نمود. در شکل (۱۰) هندسه تغییر شکل یافته در نمونه عددی و مدل صحت سنجی آورده شده است که هندسه تغییر شکل یافته در ورق‌های X شکل یکسان و رفتار غیرخطی هندسی یکسانی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده شده است.



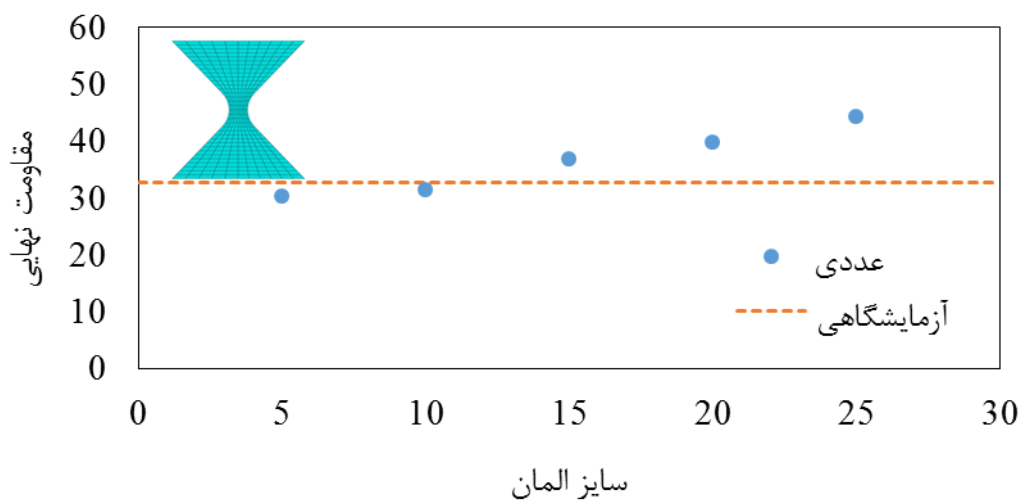
شکل ۱۰- منحنی هیستریزس نمونه آزمایشگاهی لی و همکاران و نمونه عددی XADAS

جدول ۴- میزان اختلاف نسبی بین مدل آزمایشگاهی و عددی XADAS

نمونه	انرژی (kN.mm)	مقاومت نهایی (kN)
ADAS-ABAQUS	4200.00	31.50
ADAS-Experimental	4095.75	32.60
Error(%)	2.48	-3.49



شکل ۱۱-هندسه تغییر شکل یافته در نمونه عددی و مدل صحت سنجی [16]

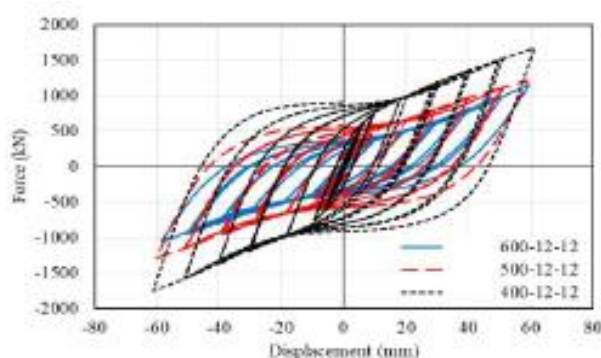


شکل ۱۲-آنالیز حساسیت

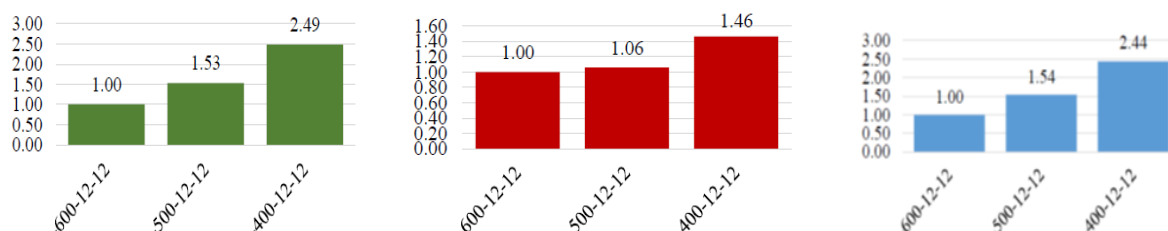
## ۴- بحث و بررسی نتایج

## ۴-۱ بررسی تاثیر پارامتر ضخامت میراگر

در این بخش نتایج نمودار هیستریزیس بر اساس تغییر پارامتر ضخامت میراگر ترسیم و مقایسه شده است. در شکل (۱۳) نمودار مربوط به هندسه کمانی ترسیم شده است و نتایج نمودار هیستریزیس مربوط به این مدل از قاب با میراگر به ضخامت ۱۲ میلیمتر، مهاربند به ضریب لاغری ۵۹ و برای سه طول مهاربند ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ میلیمتر ارائه شده است. پارامترهای محاسبه شده شامل سختی (کیلونیوتن بر میلیمتر)، مقاومت (کیلونیوتن)، انرژی (کیلونیوتن در میلیمتر) می باشند که مهمترین خروجی های نمودار هیستریزیس است. برای محاسبه پارامتر سختی از شیب نمودار هیستریزیس در قسمتی از نمودار که حلقه ها دارای رفتار خطی هستند استفاده شده است و از تقسیم نیرو به جابجایی در مرحله خطی پارامتر سختی حاصل شده است. برای محاسبه پارامتر مقاومت از ماکزیمم نیروی حاصل شده در تمامی حلقه های نمودار هیستریزیس استفاده شده و برای محاسبه پارامتر انرژی از مجموع سطوح زیر نمودار حلقه ها که نشان دهنده انرژی مستهلک شده می باشد، استفاده شده است. پس از محاسبه هر یک از پارامترهای میزان حساسیت رفتار چرخه ای مهاربند به پارامتر طول میراگر با ثابت نگه داشتن بقیه پارامترها ارزیابی گردید. برای تعیین میزان حساسیت پارامترها به پارامتر طول میراگر در هر گروه سه تایی از نمودارها، پارامترهای مربوط به یک نمونه بعنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده است و پارامترهای دو نمونه دیگر بر پارامتر نمونه شاهد تقسیم شده است. با این کار تغییرات در هر یک از پارامترهای سختی، مقاومت و انرژی در نمونه شاهد یک و میزان این تغییرات در دو نمونه دیگر نسبت به آن تعیین شده است. پس در هر گروه سه تایی از مدل ها، مدلی که مقدار تغییرات سختی، تغییرات مقاومت و تغییرات انرژی در آن عدد یک است نمونه شاهد می باشد. بعنوان مثال در گروه میراگرها با هندسه کمانی با نام های D1، D2 و D3 نمونه D1 به عنوان نمونه پایه انتخاب شده است که میزان تغییرات در آن یک است. در دو نمونه دیگر این گروه یعنی D2 و D3 میزان تغییرات سختی به ترتیب ۱/۵۴ و ۲/۴۴ حاصل شده است که نشان دهنده افزایش ۵۴ و ۱۴۴ درصدی سختی با کاهش ۱۶/۶۶ و ۳۳/۳۳ درصدی طول میراگر است. تغییرات مقاومت در این دو نمونه نیز به ترتیب ۶ و ۴۶ درصد و تغییرات مربوط به پارامتر انرژی مستهلک شده نیز به ترتیب ۵۳ و ۱۴۹ درصد حاصل شده است. در ادامه برای ملموس بودن تغییرات پارامترها، در شکل (۱۲) نمودار میله ای تغییرات نسبی پارامترها ترسیم شده است محور قائم نمودار میله ای بیانگر تغییرات مقاومت، جذب انرژی و سختی می باشد و این روند محاسبه برای تمامی نمونه ها تا انتهای کار یکسان است.

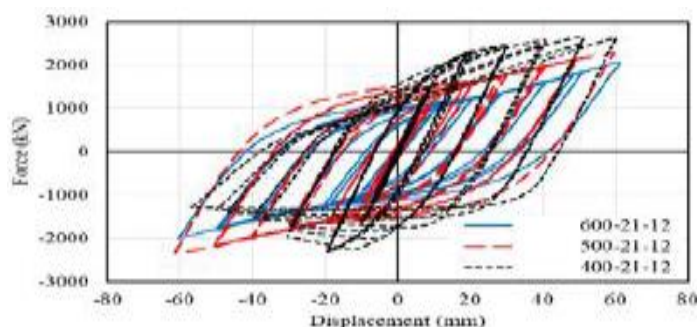


شکل ۱۳: منحنی هیستریزیس مدل های D1, D2, D3



شکل ۱۴: مقایسه قاب با میراگر به ضخامت ۱۲ میلیمتر از لحاظ سختی، مقاومت و جذب انرژی

در این بخش نتایج نمودار هیستریزیس بر اساس تغییر پارامتر ضخامت میراگر ترسیم و مقایسه شده است. در شکل (۱۵) نمودار هندسه کمائی ترسیم شده است. در هر یک از نمودارها نتایج نمودار هیستریزیس مربوط به سه مدل از قاب با میراگر به ضخامت ۲۱ میلی‌متر، بادبند به ضریب لاغری ۵۹ و برای سه طول میراگر ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر ارائه شده است. برای ضخامت میراگر ۲۱ میلی‌متر در گروه میراگرها با هندسه کمائی با نام‌های D4، D5 و D6 نمونه D4 به عنوان نمونه پایه انتخاب شده است که میزان تغییرات در آن یک است. در دو نمونه دیگر این گروه D5 و D6 میزان تغییرات سختی به ترتیب ۱/۲۶ و ۱/۶۴ حاصل شده است که نشان دهنده افزایش ۲۶ و ۶۴ درصدی سختی با کاهش ۱۶/۶۶ و ۳۳/۳۳ درصدی طول میراگر است. تغییرات مقاومت در این دو نمونه نیز به ترتیب ۱۰ و ۲۸ درصد و تغییرات پارامتر انرژی مستهلک شده نیز به ترتیب ۳۴ و ۴۶ درصد حاصل شده است. در ادامه تغییرات پارامترهای قاب به ضخامت میراگر ۲۱ میلی‌متر در شکل (۱۶) بصورت نمودار میله‌ای ترسیم شده است. اما نکته قابل توجه در نمودارهای هیستریزیس این بخش، خارج شدن رفتار نمودار هیستریزیس از حالت تقارن در کشش و فشار در قاب D6 می‌باشد. در نمونه‌های دیگر این گروه رفتار نمودار هیستریزیس در کشش و فشار یکسان است که این حالت نشان دهنده تسلیم شدن میراگر فولادی و عملکرد خوب ابعاد این میراگر نسبت به ابعاد مهاربند است. زیرا در کشش و فشار سختی مهاربند از سختی مجموع صفحات فولادی میراگر بیشتر است و سبب استهلاک انرژی بیشتر می‌شود. اما در نمونه نام برده شده به دلیل افزایش سختی صفحات فولادی نسبت به سختی مهاربند، سبب کاهش ناگهانی نیرو چرخه‌ای در قسمت فشاری نمودار هیستریزیس شده است، که این پدیده به دلیل رخ دادن کمانش در بار فشاری و از چرخه خارج شده مهاربند است. در نتیجه باید در استفاده از ابعاد مناسب و نسبت سختی‌ها دقت لازم را به کار گرفت تا میراگر فولادی عملکرد صحیحی از خود به نمایش گذارد.



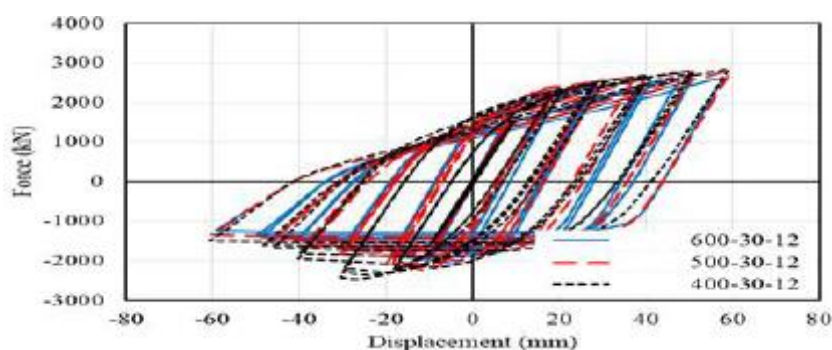
شکل ۱۵: منحنی هیستریزیس مدل های D4, D5, D6



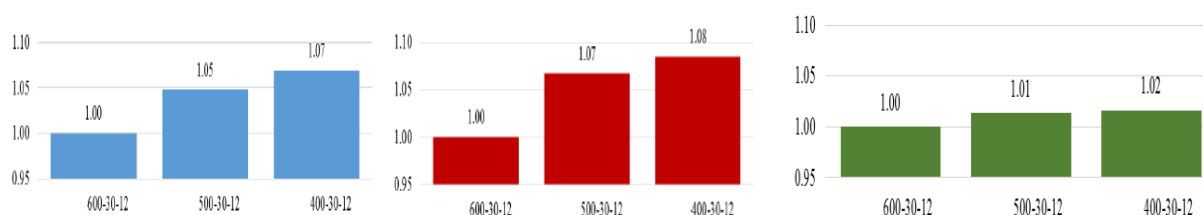
شکل ۱۶: مقایسه قاب با میراگر به ضخامت ۲۱ میلی‌متر از لحاظ سختی، مقاومت و جذب انرژی

در این بخش نتایج نمودار هیستریزیس بر اساس تغییر پارامتر ضخامت میراگر (۳۰ میلی‌متر) ترسیم و مقایسه شده است. در شکل (۱۵) نمودار مربوط به هندسه کمائی ترسیم و در هر یک از نمودارها، نتایج نمودار هیستریزیس مربوط به این مدل از قاب با میراگر به ضخامت ۳۰ میلی‌متر، بادبند به ضریب لاغری ۵۹ و برای سه طول میراگر ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر ارائه شده است. در ادامه تغییرات پارامترهای قاب به ضخامت میراگر ۲۱ میلی‌متر در شکل (۱۶) بصورت نمودار میله‌ای ترسیم شده است. برای ضخامت میراگر ۳۰ میلی‌متر در گروه میراگرها با هندسه کمائی با نام‌های D7، D8 و D9 نمونه D7 بعنوان نمونه پایه انتخاب شده است که میزان تغییرات در آن یک است. در دو نمونه دیگر این گروه D8 و D9 میزان تغییرات سختی به ترتیب ۱/۰۵ و ۱/۰۷ حاصل شده است که نشان دهنده افزایش ۵ و ۷ درصدی

سختی با کاهش ۱۶/۶۶ و ۳۳/۳۳ درصدی طول میراگر است. تغییرات مقاومت در این دو نمونه نیز به ترتیب ۷ و ۸ درصد و تغییرات پارامتر انرژی مستهلک شده نیز به ترتیب ۱ و ۲ درصد حاصل شده است. همچنین در هندسه کمائی مقدار تغییرات پارامترها زیر ۱۰ درصد است که نسبت به نتایج حاصل شده در دو گروه قبلی کاهش زیادی داشته است. با توجه به نمودارهای هیستریزس حاصل شده و مشاهده نامتقارنی در ۳ نمونه این مورد بررسی در این بخش، می‌توان دریافت که میراگرهای فولادی در رفتار چرخه‌ای عملکرد خود را از دست داده‌اند و کنترل کننده رفتار قاب، اعضای مهاربندی است. این نامتقارنی در نمودار هیستریزس به دلیل افزایش سختی صفحات میراگر فولادی نسبت به سختی مهاربند است که سبب رخ دادن کماتش در مهاربند در بار فشاری و از چرخه خارج شدن آن است.



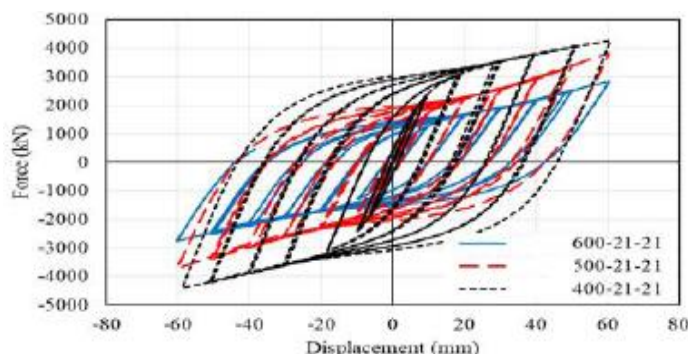
شکل ۱۷: منحنی هیستریزس مدل های D7, D8, D9



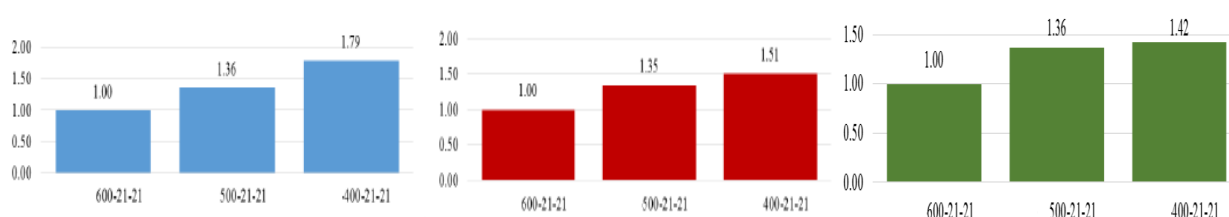
شکل ۱۸: مقایسه قاب با میراگر به ضخامت ۳۰ میلی‌متر از لحاظ سختی، مقاومت و جذب انرژی

#### ۲-۴- بررسی تاثیر پارامتر ضریب لاغری مهاربند بر رفتار سیستم

در این بخش نتایج نمودار هیستریزس بر اساس تغییر پارامتر ضریب لاغری مهاربند (از ۵۹ به ۶۲) ترسیم و مقایسه شده است. در شکل (۱۷) نمودار مربوط به هندسه کمائی ترسیم و در هر یک از نمودارها، نتایج نمودار هیستریزس مربوط به سه مدل از قاب با میراگر به ضخامت ۲۱ میلی‌متر، باندند به ضریب لاغری ۶۲ و برای سه طول میراگر ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ میلی‌متر ارائه شده است. همچنین تغییرات پارامترهای قاب در شکل (۱۸) بصورت نمودار میله‌ای، مقایسه شده است. برای ضخامت میراگر ۲۱ میلی‌متر در گروه میراگرها با هندسه کمائی با نام‌های D10, D11, D12 و D10 بعنوان نمونه پایه انتخاب شده است که میزان تغییرات در آن یک است. در دو نمونه دیگر این گروه D11 و D12. میزان تغییرات سختی به ترتیب ۱/۳۶ و ۱/۷۹ حاصل شده است که نشان دهنده افزایش ۳۶ و ۷۹ درصدی سختی با کاهش ۱۶/۶۶ و ۳۳/۳۳ درصدی طول میراگر است. تغییرات مقاومت در این دو نمونه نیز به ترتیب ۳۵ و ۵۱ درصد و تغییرات پارامتر انرژی مستهلک شده نیز به ترتیب ۳۶ و ۴۲ درصد حاصل شده است. در این بخش رفتار نمودارهای هیستریزس در ۳ نمونه مورد بررسی متقارن و کنترل کننده رفتار قاب، اعضای میراگر فولادی است.

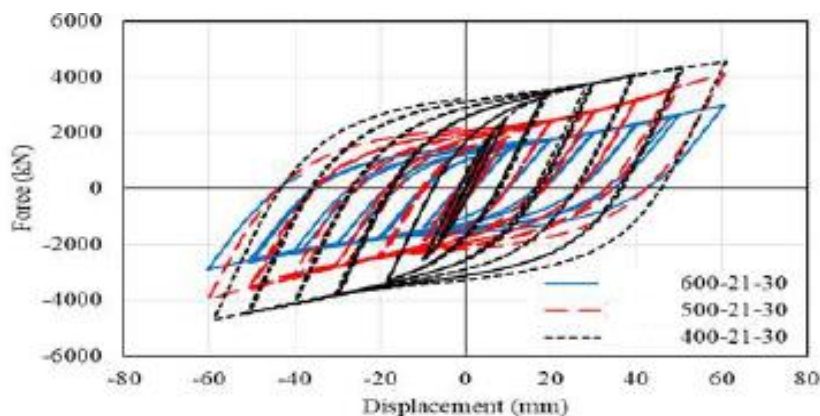


شکل ۱۹: منحنی هیستریزس مدل های D10, D11, D12

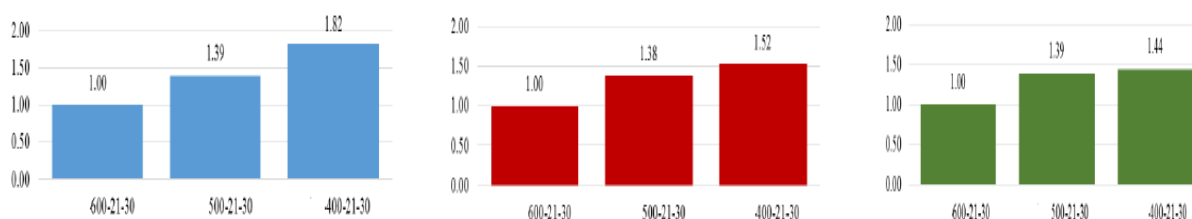


شکل ۲۰: مقایسه قاب به ضخامت میراگر ۲۱ میلیمتر و مهاربند به ضریب لاغری ۶۲ از لحاظ سختی، مقاومت و جذب انرژی

در این بخش نتایج نمودار هیستریزس بر اساس تغییر پارامتر ضریب لاغری مهاربند (از ۶۲ به ۶۵) ترسیم و مقایسه شده است. در شکل (۲۱) نمودار هندسه کمائی ترسیم و در هر یک از نمودارها نتایج نمودار هیستریزس مربوط به سه مدل از قاب با میراگر به ضخامت ۲۱ میلیمتر، مهاربند به ضریب لاغری ۶۵ و برای سه طول میراگر ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ میلیمتر ارائه شده است. همچنین تغییرات شاخص‌های قاب در شکل (۲۲) بصورت نمودار میله‌ای ترسیم شده است. برای ضریب لاغری مهاربند ۶۵ و میراگر ۲۱ میلیمتر در گروه میراگرها با هندسه کمائی با نام‌های D13، D14 و D15 نمونه پایه انتخاب شده است که میزان تغییرات در آن یک است. در دو نمونه دیگر این گروه D14 و D15 میزان تغییرات سختی به ترتیب ۱/۳۹ و ۱/۸۲ حاصل شده است که نشان دهنده افزایش ۳۹ و ۸۲ درصدی سختی با کاهش ۱۶/۶۶ و ۳۳/۳۳ درصدی طول میراگر است. تغییرات مقاومت در این دو نمونه نیز به ترتیب ۳۸ و ۵۲ درصد و تغییرات پارامتر انرژی مستهلک شده نیز به ترتیب ۳۹ و ۴۴ درصد حاصل شده است. همچنین در هندسه کمائی بیشترین مقدار تغییرات پارامترهای سختی، مقاومت و انرژی ۸۲، ۵۲ و ۴۴ درصد است. در این بخش رفتار نمودارهای هیستریزس در نمونه مورد بررسی متقارن و کنترل کننده رفتار قاب، اعضای میراگر فولادی است زیرا با افزایش ضخامت مهاربند، سختی این عضو افزایش یافته و مهاربند فولادی که دارای سختی کمتری است باعث استهلاک انرژی در این حالت می‌گردد.



شکل ۲۱: منحنی هیستریزس مدل های D13, D14, D15

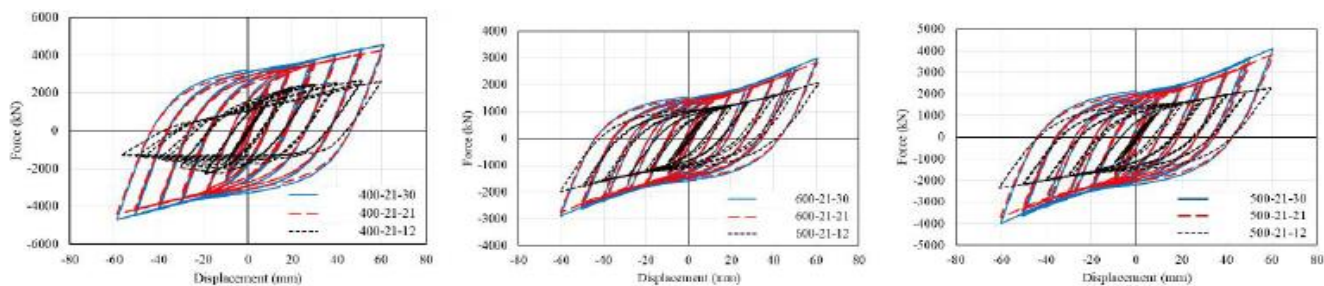


شکل ۲۲: مقایسه قاب به ضخامت میراگر ۲۱ میلیمتر و مهاربند به ضریب لاغری ۶۵ از لحاظ سختی، مقاومت و جذب انرژی

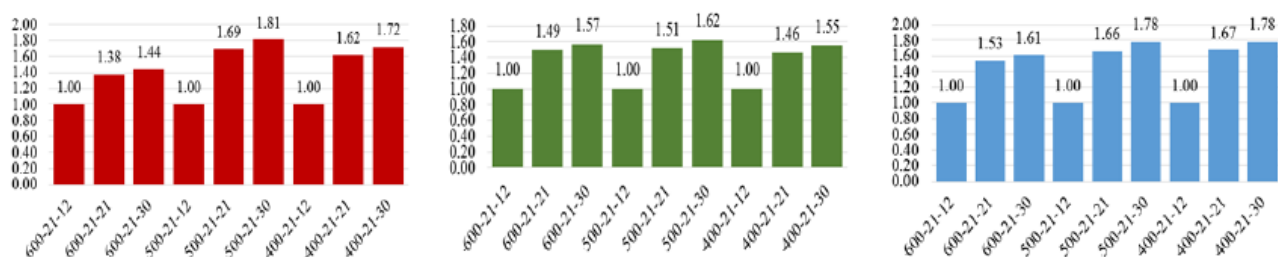
#### ۳-۴ تاثیر پارامتر نسبت بعد به ضریب لاغری مهاربند

در این بخش نتایج نمودار هیستریزس بر اساس تغییر پارامتر نسبت بعد به ضریب لاغری مهاربند ترسیم و مقایسه شده است. برای این بررسی به دلیل وابستگی نسبت بعد به ضریب لاغری مهاربند، فقط تغییرات در ضریب لاغری مهاربند انجام شده است. در شکل (۲۳) سه نمودار ترسیم شده است که هر نمودار مربوط به طول مهاربند ۶۰۰، ۵۰۰ و ۴۰۰ میلیمتر می باشد. در هر یک از نمودارها، نتایج نمودار هیستریزس مربوط به سه مدل از قاب با میراگر به ضخامت ۲۱ میلیمتر، مهاربند به ضریب لاغری ۵۹، ۶۲ و ۶۵ و برای هندسه کمانی ارائه شده است. همچنین تغییرات پارامترهای قاب در شکل (۲۴) بصورت نمودار میله ای ترسیم شده است. برای ضریب لاغری مهاربند ۶۲ و میراگر ۱۲ میلیمتر در گروه میراگر کمانی با طول ۴۰۰ میلیمتر با نام های D15، D12 و D6 نمونه پایه انتخاب شده است که میزان تغییرات در آن یک است. در دو نمونه دیگر این گروه D15 و D12 میزان تغییرات سختی به ترتیب ۱/۶۷ و ۱/۷۸ حاصل شده است که نشان دهنده افزایش ۶۷ و ۷۸ درصدی سختی با تغییر ضریب لاغری مهاربند با طول میراگر ۴۰۰ میلیمتر است. تغییرات مقاومت در این دو نمونه نیز به ترتیب ۶۲ و ۷۲ درصد و تغییرات پارامتر انرژی مستهلک شده نیز به ترتیب ۴۶ و ۵۵ درصد حاصل شده است. همچنین در دو طول ۵۰۰ و ۶۰۰ میلیمتر بیشترین مقدار تغییرات پارامترهای سختی، مقاومت و انرژی ۷۸، ۸۱ و ۶۲ درصد است. در این بخش رفتار نمودارهای هیستریزس در ۳ نمونه مورد بررسی دارای طول میراگر ۶۰۰ و ۵۰۰ و ۴۰۰ میلیمتر متقارن و کنترل کننده رفتار قاب، اعضای میراگر فولادی است و فقط در نمونه D6 کنترل کننده رفتار چرخه ای مهاربند است. نتایج نمودارها نشان می دهد در حالتی که مهاربند با تغییر ضریب لاغری، تغییر فشردگی می دهد، نسبت سختی بیشتر و تاثیر و اختلاف نمودارها قابل توجه تر می گردد که از نتایج تغییرات نسبی پارامترهای این اختلاف ملموس است.





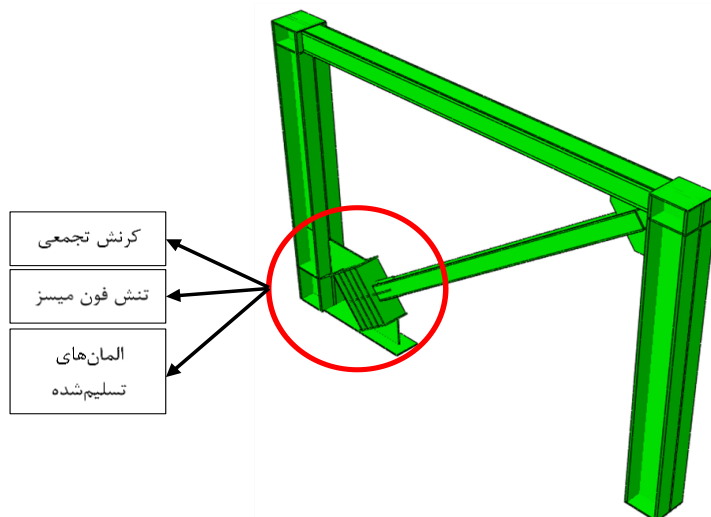
شکل ۲۳: منحنی هیستریزس مدل های D6, D12, D15



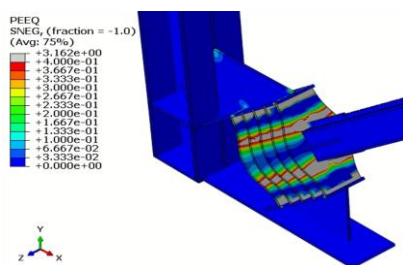
شکل ۲۴: مقایسه قاب به ضخامت میراگر ۲۱ میلیمتر و مهاربند به ضریب لاغری ۵۹، ۶۲ و ۶۵ از لحاظ سختی، مقاومت و جذب انرژی

#### ۴-۴ بررسی توزیع تنش ها، کرنش های اصلی و نحوه تسلیم میراگرها

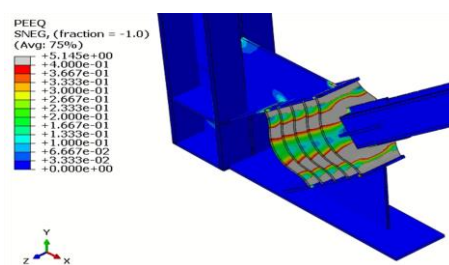
در این قسمت به بررسی نتایج توزیع تنش ها، کرنش های اصلی و نحوه تسلیم میراگرها بر اساس خروجی های کرنش تجمعی (PEEQ)، تنش ون مایسز (S Mises) و اجزای تسلیم شده (AC Yeild) پرداخته شده است. یکی از پارامترهای نشان دهنده تسلیم شدگی فعال در اجزا در نرم افزار آباکوس خروجی AC Yeild است. این پارامترهای اجزا تسلیم شده مهاربند در حالت کششی و فشاری که مقدار آن ها بین ۰ و ۱ است. مقدار صفر نشان دهنده عدم تسلیم اجزا و مقدار ۱ تسلیم شدگی کامل اجزا را بیان می کند. این نتایج برای میراگر ضخامت ۱۲ میلیمتر و طول های ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ میلیمتر و هندسه کمانی و در موقعیتی که در شکل (۲۵) نشان داده شده، ارائه شده است. در شکل ۲۶، توزیع کانتور گرافیکی کرنش تجمعی در انتهای بارگذاری برای هندسه کمانی و در شکل ۲۷، توزیع کانتور گرافیکی تنش ون میسز در انتهای بارگذاری برای هندسه کمانی و در شکل ۲۸، توزیع کانتور گرافیکی اجزا تسلیم شده در انتهای بارگذاری برای هندسه میراگر کمانی نشان داده شده است. نتایج کرنش تجمعی، تنش ون میسز و اجزا تسلیم شده نشان می دهد با افزایش طول میراگر پیوستگی تنش بیشتر و از تمرکز تنش جلوگیری می گردد.



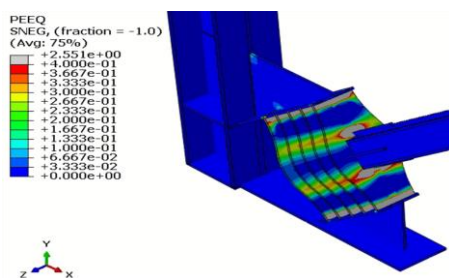
شکل ۲۵: هندسه کلی قاب دارای میراگر تسلیم شونده فولادی



۵۰۰ میلیمتر

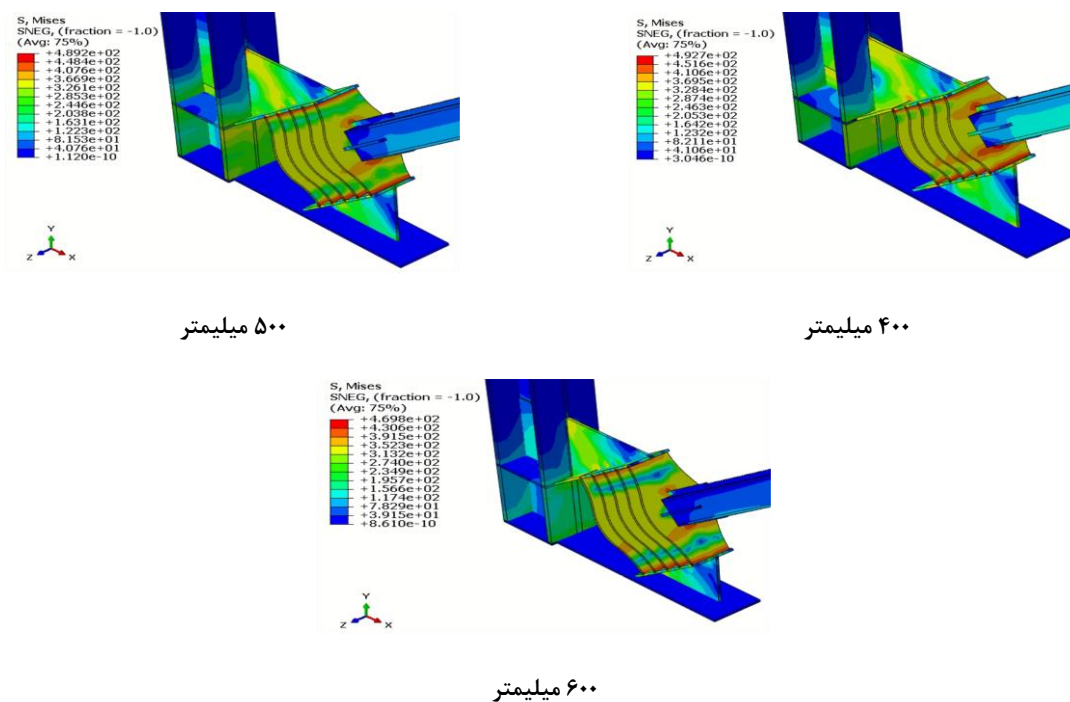


۴۰۰ میلیمتر

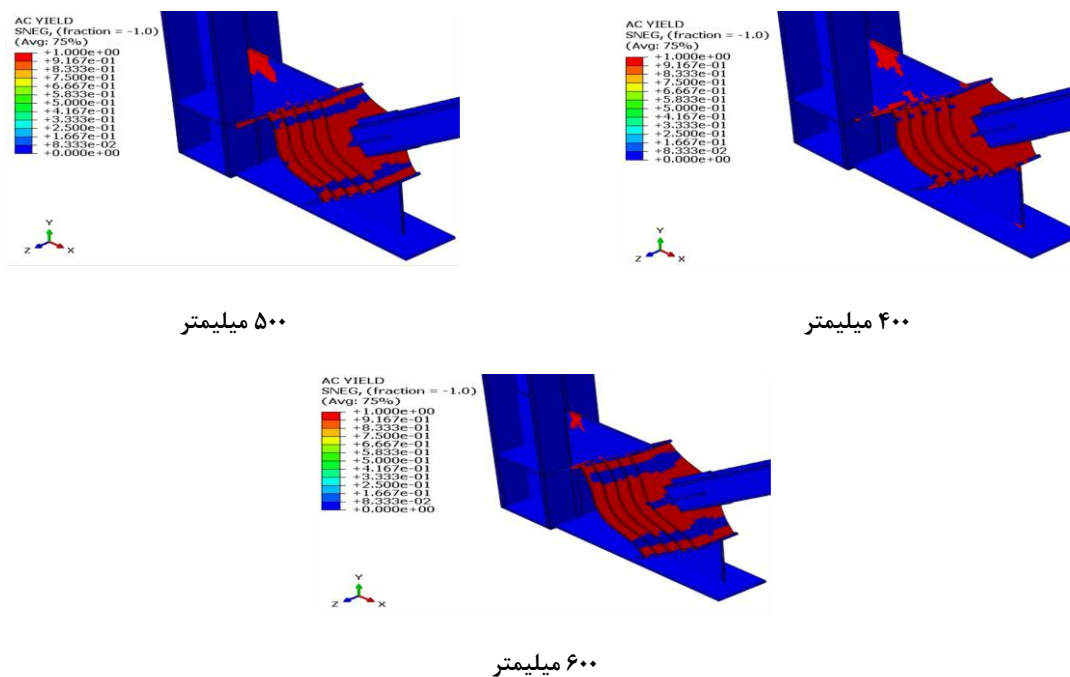


۶۰۰ میلیمتر

شکل ۲۶: توزیع کانتور گرافیکی کرنش تجمعی در انتهای بارگذاری برای هندسه میراگر کمائی شکل



شکل ۲۷: توزیع کانتور گرافیکی تنش فون میسز در انتهای بارگذاری برای هندسه میراگر کماتی شکل



شکل ۲۸: توزیع کانتور گرافیکی اجزا تسلیم شده در انتهای بارگذاری برای هندسه میراگر کماتی شکل

## ۵- نتیجه گیری

پس از مطالعه مقالات و تحقیقات انجام شده در زمینه بادبندها و میراگرها، نیاز به مطالعه عددی بر روی مهاربندها و بهبود رفتار آنها در بارگذاری چرخه‌ای محسوس بود. به همین دلیل در ادامه پژوهش‌های پیشین در زمینه مهاربندها و میراگرها، در این مطالعه نوع جدیدی از میراگرهای کم‌انرژی شکل با قرار گیری در محل اجزا قطری مهاربند ارائه شد. برای بررسی صحت نتایج عددی در گام اول رفتار چرخه‌ای یک قاب فولادی دارای میراگر که در آزمایشگاه تست شده بود، مورد صحت سنجی قرار داده شد. در این مطالعه ۱۵ مدل عددی را تحت بار چرخه‌ای شبیه‌سازی قرار گرفته است. نتایج هر یک از این مدل‌ها در قالب نمودارهای هیستریزس و مقادیر هر یک از پارامترهای سختی اولیه، مقاومت خمشی نهایی و انرژی مستهلک شده نسبت به نمونه‌های شاهد (D1, D4, D7, D11) که مشخصات آنها در جدول (۱) بیان شده است بصورت کامل ارائه گردید. با توجه به خروجی‌های حاصل شده از این مطالعه عددی می‌توان نتایج را به صورت زیر ارائه کرد:

۱. با تغییر پارامتر طول میراگر از ۶۰۰ به ۵۰۰ و ۴۰۰ میلیمتر، هر یک از پارامترهای سختی، مقاومت نهایی و انرژی در حالتی که میراگر عملکرد فیوژی داشته است، حداکثر به میزان ۱۴۴، ۴۶ و ۱۴۹ درصد افزایش داشته‌اند.
۲. با تغییر پارامتر ضخامت میراگر از ۱۲ به ۲۱ و ۳۰ میلیمتر، هر یک از پارامترهای سختی، مقاومت نهایی و انرژی در حالتی که میراگر عملکرد فیوژی داشته است، حداکثر به میزان ۱۴۷، ۵۲ و ۱۶۰ درصد افزایش داشته‌اند.
۳. با تغییر پارامتر ضریب لاغری مهاربند از ۵۹ به ۶۲ و ۶۵، هر یک از پارامترهای سختی، مقاومت نهایی و انرژی در حالتی که میراگر عملکرد فیوژی داشته است، حداکثر به میزان ۵، ۷ و ۹ درصد افزایش داشته‌اند.
۵. بیشترین تمرکز تنش و کرنش در محل اتصال ورق‌های فولادی میراگر کم‌انرژی شکل بوده است که با افزایش طول میراگر از شدت آن کاسته می‌شود.
۶. نتایج این مطالعه نشان داد که این نوع میراگر عملکرد مطلوبی در استهلاک انرژی تحمیل شده به سازه را دارد. هر چند میراگر پیشنهادی باعث بهبود جذب انرژی سازه می‌شود اما کاهش سختی را نیز در پی خواهد داشت.

## مراجع

- [1] Kelly, J.M., Skinner, R.I., Heine, A.J. (1972). Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures. Bulletin of New Zealand Society for Earthquake Engineering, 5(3),63-88.
- [2] Gray, M.G., Christopoulos, C., Packer, J.A. (2010). Cast steel yielding fuse for concentrically braced frames. In Proceedings of the 9th US national and 10th Canadian conference on earthquake engineering, Canada
- [3] Tsai, K.C., Chen, H.W., Hong, C.P., Su, Y.F. (1993). Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic resistance construction Earthquake Spectra.
- [4] Ghaffary, A., Mohammadi, R. (2018). Framework for virtual hybrid simulation of TADAS frames using opensees and Abaqus. Journal of Vibration and Control, 11(24), 2165-2179.
- [5] Mohammadi, R., Karami, R., Nasri, A., Ghaffary, A. (2017). TADAS dampers in very large deformations." International Journal of Steel Structures, 7(15),515-524
- [6] Taylor, D.P., Constantinou, M.C. (1995). Testing procedures for high-output dampers used in building and bridge structures to dissipate seismic energy Shock Vibration, 2(5),373-381.
- [7] Maleki, S., Mahjoubi, S. (2014). Infilled-pipe damper. Journal of Constructional Steel Research, 9(8), 45-58.
- [8] Lee, C., H, J.u., Y, K., Min, J.K., Lho, S.H., Kim, S.D. (2015). Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings. Engineering Structures, 8(9),192-204.
- [9] Sahoo, D.R., Singhal, T., Taraihia, S.S., Saini, A. (2015). Cyclic behavior of shear-and-flexural yielding metallic dampers. Journal of Constructional Steel Research, (11)4, 247-257.

- [10]Ghabraie, K., Chan, R., Huangb, X., Xie, Y.M.(2010). Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy *Engineering Structures*, (3)2, 2258-2267
- [11]Maleki, S., Mahjoubi, S.,(2014). Infilled-pipe damper. *Journal of Constructional Steel Research*, 9(8),45-58.
- [12]Hashemi, S.V., Pouraminian, M., Sadeghi, A.A. (2020). Seismic Fragility Curve Development of Frames with BRB's Equipped with Smart Materials subjected to Mainshock-Aftershock Ground Motion. *Journal of Structural and Construction Engineering*,doi;10.22065/JSCE.2021.235080.2169
- [13]Pouraminian, M., Hashemi, S.V., Sadeghi, A.A., Pourbakhshian,S.(2020). Probabilistic Assessment the Seismic Collapse Capacity of Buckling-Restrained Braced Frames Equipped with Shape Memory Alloys, *Journal of Structural and Construction Engineering*,doi;10.22065/JSCE.2020.236804.2174
- [14] Garivani, S., Aghakouchak, A.A. & Shahbeyk, S. Numerical and experimental study of comb-teeth metallic yielding dampers. *Int J Steel Struct* **16**, 177–196 (2016). <https://doi.org/10.1007/s13296-016-3014-z>
- [15] Zahrai, M.(2015). Cyclic testing of chevron braced steel frames with IPE shear panels. *Steel and Composite Structures*, 5(9), 1167-1184
- [16] Li HN, Li G. Experimental study of structure with dual function metallic dampers. *Engineering Structures*. 2007;2(9):1917–1928