

Investigating seismic performance of steel frame structures using piston damper with semi-circular plates

Amin Ghannadial^{1*}, Mahdi Eisazadeh²

1- Associate Professor, Civil Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2 -M.Sc. Student, Structural Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

Recently, with the increase in the height of buildings, the need to use systems resistant to lateral forces such as earthquakes and strong winds has become more pronounced, and the lack of attention to them will lead to damage. Among the systems resistant to dynamic loads, the piston-shaped bracing system has an important role in the stability of structures and the control of dynamic responses, such as displacement and acceleration, and by absorbing energy, the structure is protected against various excitations and prevent serious damage to the structure. In this paper, a new piston-shaped system consisting of two outer and inner tubes and several parallel semi-circular plates attached to them is considered, which exhibits good resistance to compression, tensile and buckling, and can be mounted in a variety of concentric, eccentric and other ways, reduce the lateral forces to the structure by dissipating energy. In this paper, the behavior of a steel frame using the piston-shaped bracing system against dynamic loads is investigated and some of its dynamic responses are controlled. Five types of pistons are designed for this purpose, each placed in a one span steel frame. After modeling all five types of braces, the results are compared with each other. The main purpose of this study will be to investigate the efficiency of controlling dynamic responses such as displacement, velocity and acceleration and buckling of the piston-shaped brace to minimize the damage caused by lateral loads applied to the structure.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 January 2020

Revise Date: 10 May 2020

Accept Date: 27 May 2020

Keywords:

Piston-shaped brace
Displacement
Acceleration
Dynamic properties
Cyclic load

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.215525.2048>

*Corresponding author: Amin Ghannadial.
Email address: aghannadial@uma.ac.ir

بررسی عملکرد لرزه ای سازه های قاب فولادی با استفاده از میراگر پیستونی با صفحات نیم دایره ای

امین قنادی اصل^{۱*}، مهدی عیسی زاده^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

اخیرا با افزایش ارتفاع ساختمان‌ها ضرورت استفاده از سیستم‌های مقاوم در برابر نیروهای جانبی نظیر زلزله و تند باد بیشتر احساس می‌شود و عدم توجه به این موضوع، آسیب‌هایی را به دنبال خواهد داشت. در میان سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای دینامیکی می‌توان به سیستم مهاربند پیستونی شکل اشاره کرد که نقش مهمی در پایداری سازه‌ها و کنترل پاسخ‌های دینامیکی از قبیل جابجایی و شتاب، دارند و با جذب انرژی، سازه را در برابر تحریکات مختلف مقاوم کرده و مانع از ایجاد آسیب‌های جدی به سازه می‌شوند. در این مقاله، سیستم مهاربند پیستونی شکل جدیدی که از دو لوله خارجی و داخلی و تعدادی صفحات نیم دایره‌ای موازی متصل به آن‌ها تشکیل شده‌اند در نظر گرفته شده است که در برابر فشار و کشش و کمانش هم، مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهند و به صورت‌های مختلف همگرا، واگرا و غیره می‌توانند نصب شوند و با اتلاف انرژی از میزان نیروهای جانبی وارد بر سازه می‌کاهند. در این مقاله رفتار قاب فولادی با استفاده از سیستم مهاربند پیستونی شکل در برابر بارهای دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است و برخی پاسخ‌های دینامیکی آن کنترل شده است. برای این منظور پنج نوع پیستون طراحی شده است که هر کدام در یک قاب فلزی یک دهنه تعبیه شده‌اند. پس از مدلسازی هر پنج نوع مهاربند، نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. اصلی‌ترین هدف این پژوهش، بررسی کارایی این سیستم جدید در کنترل پاسخ‌های دینامیکی نظیر جابجایی، سرعت و شتاب و کمانش مهاربند پیستونی شکل خواهد بود تا آسیب‌های ناشی از بارهای جانبی که به سازه اعمال می‌شوند حداقل گردند.

کلمات کلیدی: مهاربند پیستونی شکل، جابجایی، شتاب، خصوصیات دینامیکی، بارگذاری چرخه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.215525.2048	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.215525.2048	۱۴۰۰/۰۶/۳۱	۱۴۰۰/۰۶/۰۱	۱۴۰۰/۰۶/۰۱	۱۳۹۹/۰۲/۲۱	۱۳۹۸/۱۰/۲۴
			امین قنادی اصل		*نویسنده مسئول:	
			aghannadiasl@uma.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

اخیرا به منظور توسعه مفهوم اتلاف انرژی به عنوان یک تکنولوژی کاربردی جهت مقابله با زلزله تحقیقات زیادی صورت گرفته است. طراحی ساختمان‌ها در برابر بارهای دینامیکی بر این اساس است که سازه بتواند با شکل پذیری خود انرژی زلزله را جذب و مستهلک نماید. برای کنترل ارتعاش وارد شده به سازه و پاسخ آن، به جای مقاوم سازی سازه به عنوان تنها راه، سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی نصب می‌شوند تا همراه با سازه و بصورت یک مجموعه در برابر زلزله و باد مقاومت کنند. متداول‌ترین روش کنترل تغییر مکان‌های جانبی در سازه‌های فولادی مهاربندها می‌باشند، که به اشکال گوناگونی اجرا می‌شوند. پیشرفت‌های ایجاد شده در علم معماری و درخواست‌های نوین معماران به لحاظ تامین احتیاجات و خواسته‌های مورد نیازشان از مهندسين سازه، موجب شده است تا نوع جدیدی از سیستم قاب مهاربندی شده که به تازگی استفاده از آن به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر زلزله رو به افزایش می‌باشد، ابداع شود. ژو و همکاران^۱ یک مهاربند لوله‌ای دو جداره داخلی مقاوم در برابر کمناش (BRB)^۲ برای قاب‌های فولادی در مناطق لرزه‌ای کم و متوسط پیشنهاد کردند [۱]. برای بررسی بیشتر، تست مقیاس کامل برای تولید مجدد رفتار چرخه‌ای لوله دوتایی فولادی BRB پیشنهادی را در سازه انجام دادند. عملکرد سازه‌ای BRB پیشنهادی تحت خستگی سیکل بسیار کم (ELCF)^۳، از جمله مقاومت، ظرفیت تغییر شکل، پاسخ هیستریتیک و حالت شکست، مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های تجربی و عددی نشان دادند که مهاربند پیشنهادی می‌تواند به یک منحنی هیستریتیک ثابت و اشباع شده برسد. پارسانا کومار و ویشنا^۴ یک سیستم مهاربندی در طرح ساختمان نامتقارن T شکل ۳۰ طبقه با در نظر گرفتن اثر باد و زلزله ارائه دادند [۲]. در این تحقیق، مقایسه‌ای برای پنج نوع مختلف از سیستم مهاربند از قبیل مهاربندهای متصل در یک طبقه، مهاربندهای متصل بین دو طبقه، مهاربندهای متصل بین سه طبقه و مهاربندهای متصل بین چهار طبقه و مهاربندهای متصل بین پنج طبقه انجام دادند و نتایج را با قاب ساده و مهاربندی شده فولادی مقایسه کردند و با در نظر گرفتن قابلیت شکل پذیری، کنترل جابجایی نسبی و تاثیرات پیچشی نتایج تحلیلی به این نتیجه رسیدند که فراهم کردن سختی بیشتر منجر به کنترل جابجایی نسبی، کاهش ماهیت شکل پذیری و افزایش تاثیر پیچشی می‌شود. ماریو دانیئلو و همکاران^۵ در مورد تاثیر سختی تیر بر پاسخ لرزه‌ای مهاربندها تحقیق کردند [۳]. واکنش لرزه‌ای اعمال شده بر روی مهاربند فولادی شورون به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر رفتار خمشی مهاربند متوقف شد. با این حال، علاوه بر مقاومت، سختی خمشی تیر به منظور تضمین شکل‌گیری چنین مکانیزم شکست، نقش کلیدی داشت. در واقع، سازه‌ها با استفاده از تیرهای مقاوم و تغییر شکل پذیر با عملکرد ضعیف لرزه‌ای مشخص شدند، که نشان دهنده غلظت شدید آسیب در مهاربند تحت فشار بود، در حالی که آن‌هایی که در کشش رفتار می‌کردند رفتار الاستیک داشتند. در این پژوهش به منظور بررسی این جنبه، یک مطالعه پارامتری عددی جامع ارائه کردند که به طور خاص، تاثیر سختی خمشی تیر بر مهاربندهای هم مرکز شورون در نسبت بین سختی خمشی تیر و صلبیت عمودی مهاربند، طول تیر، ارتفاع طبقه و انعطاف پذیری مهاربند بررسی می‌شود. معادلات تحلیلی بر اساس داده‌های عددی به عنوان هدف طراحی به منظور انتخاب سختی تیر بهینه مطابق با ضریب انعطاف پذیری مورد نیاز مهاربند و نسبت جابجایی نسبی بین طبقات پیشنهاد شده است. پانچال و پورهید^۶ به مطالعه تجربی در مورد کنترل پاسخ دینامیکی یک مدل ساختمان با استفاده از دو نوع مهاربند همگرا و واگرا پرداختند [۴]. در این بررسی یک مدل ساختمان را با استفاده از صفحات آلومینیومی و فنرهای خطی با سختی متوسط ساخته و مهاربندی کردند. پاسخ شتاب یک مدل ساختمان کنترل نشده (مدل بدون مهاربند) با استفاده از شتاب سنج و سیستم اکتساب داده (DAQ)^۷ و پاسخ جابجایی را از طریق انتگرال گیری عددی از پاسخ شتاب بدست آوردند. مشاهده گردید که دوره زمانی طبیعی و نسبت میرایی مدل ساختمان کنترل شده، در مقایسه با سیستم کنترل نشده ناشی از افزودن سختی، افزایش یافته و پاسخ جابجایی و شتاب به طور مناسب برای سیستم کنترل شده و در مقایسه با سیستم کنترل نشده کاهش می‌یابد. یانگ و همکاران^۸ از یک

¹ F. Xu et al

² Buckling restrained brace

³ Extremely low cycle fatigue

⁴ M. Parsanna kumar and Raja madhukar vishnu

⁵ Mario d'aniello et al

⁶ Dhara panchal and Sharad purhit

⁷ Data acquisition system

⁸ J. N. Yang et al

سیستم با سختی متغیر (AVS)⁹ برای کنترل پاسخ ساختمان‌ها در معرض تحریکات لرزه‌ای استفاده کردند [۵]. علاوه بر کنترل کننده‌های بازخورد در حالت کامل، کنترل کننده‌های بازخورد بازده خروجی عمومی و همچنین کنترل کننده‌های بازخورد خروجی ساده‌ای که تنها از سنسورهای تعبیه شده استفاده می‌کنند، ارایه کرده‌اند. اصل کنترل سختی متغیر وابسته بر اساس مفهوم ائتلاف انرژی هیسترتیک تفسیر می‌شود. در این تحقیق نتایج شبیه سازی نشان دادند که سیستم‌های سختی متغیر فعال، با استفاده از باز و بسته کردن دستگاه‌ها، در کاهش جابجایی نسبی طبقات ساختمان‌ها موثر هستند. با این حال، شتاب زمین ساختمان ممکن است، بسته به طراحی سازه و شدت زلزله به طور قابل توجهی افزایش یابد. اسکینر و همکاران¹⁰ چند نوع ابزار فولادی ساده را به عنوان وسایل مستهلک کننده انرژی معرفی و مورد آزمایش قرار دادند [۶]. از جمله این ابزارها، ورق‌های باریک U شکل بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ورق‌های فولادی می‌توانند جابجایی‌های بسیار زیادی را در حوضه غیرالاستیک تحمل نموده و از طریق تغییر شکل‌های پلاستیک فولاد نرمه باعث استهلاک انرژی شوند. اوانر سکر و همکاران¹¹ یک مهاربند سه قطعه فولادی که توسط مطالعات عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته بود را توسعه دادند [۷]. هدف این پژوهش، توسعه یک عضو مهاربندی بود که پاسخ چرخه‌ای متقارن و پایدار تحت بار چرخه‌ای را نشان دهد. این مفهوم با گسترش یک کمانش الاستیک متعارف از یک ستون با مقاطع متغیر برای گنجاندن تغییر شکل پس کمانش در نظر گرفته شده بود و با استفاده از شبیه سازی‌های عددی مورد بررسی قرار گرفت و به طور تجربی با گروهی از نمونه‌های تهیه شده از مقیاس کوچک مهاربند تحت بارهای چرخه‌ای آزمایش شد. نتایج نشان داد که مهاربندهای سه قطعه آزمایش شده، قادر به نشان دادن واکنش هیسترتیک پایدار و متقارن و نیز پراکنده کردن مقدار زیادی انرژی در مقایسه با مهاربندهای سنتی کمانشی هستند.

نیک هوش و کافی در خصوص میراگرهای تسلیمی فولادی شکافدار، اثر شکل و الگوی هندسی جدید پره‌ها بر روی رفتار این نوع میراگرها را مورد بررسی قرار دادند [۸]. در این بررسی یک نمونه مرجع بدون شکاف (توپر) به همراه ۹ نمونه با یک ردیف پره یا شکاف، با سه الگوی هندسی و شکل مختلف پره مشتمل بر حالت ساده یا مقطع ثابت، باریک شونده خطی و باریک شونده سهمی با شکاف بیضوی در سه ارتفاع متفاوت مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار گرفتند. آن‌ها نمونه‌های ذکر شده را در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دادند و با مشخص کردن منحنی‌های هیستریزس نیرو- تغییر مکان، پارامترهای تعیین کننده رفتاری میراگرهای مذکور در این مطالعه را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج مطالعه نشان داد که بطور کلی میراگر با پره‌های ساده دارای ضعیف ترین عملکرد و میراگر با شکاف بیضوی دارای بهترین عملکرد می‌باشد. کهنه پوشی و سالم عملکرد میراگر شکافدار فولادی (SSD)¹² در اتصالات تیر به ستون فولادی به روش المان محدود مورد بررسی قرار دادند [۹]. این میراگر از یک ورق فولادی که بر روی آن تعدادی شکاف با انتهای دایره‌ای شکل ایجاد شده، ساخته شده بود. در این مقاله به منظور شناخت رفتار این میراگر، عملکرد آن را در یک اتصال تیر به ستون فولادی مورد بررسی قرار دادند و پس از مدل سازی دو نوع جدید از این میراگر به روش المان محدود، منحنی هیستریزس مدل‌ها و کرنش‌های پلاستیک با هم مقایسه کردند. بر اساس نتایج، میراگر شکافدار فولادی می‌تواند تعداد زیادی از چرخه بارگذاری را تحمل کند. قنادی اصل و همکاران به بررسی تاثیر خروج از مرکزیت بر رفتار قاب مهاربندی شده همگرا شامل خروج از مرکزیت داخل و خارج صفحه ورق اتصال به روش اجزای محدود پرداخته‌اند تا مشخص کنند که عدم رعایت ضوابط آیین‌نامه‌ای تا چه میزان در عملکرد سازه خلل وارد می‌کند [۱۰]. به این منظور، یازده مدل را برای تعیین حاشیه اطمینان برای عدم رعایت قوانین آیین‌نامه در قاب‌های دارای خروج از مرکزیت با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که تاثیر خروج از مرکزیت داخل صفحه به مراتب نامطلوب‌تر از خروج از مرکزیت خارج صفحه بوده و حاشیه اطمینان کمی برای عدم رعایت قوانین آیین‌نامه وجود دارد.

۲- صحت سنجی و معرفی مدل‌های مورد مطالعه

در سال‌های اخیر روش اجزاء محدود با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی در اعضای مختلف گسترش یافته است. روش اجزای محدود غیرخطی قابلیت کاربرد در محیط‌های پیوسته غیر همسانگرد یا محیط‌های گسسته را دارا می‌باشد. محدوده کاربرد این روش از یک محیط

⁹ Active variable stiffness

¹⁰ Skinner et al

¹¹ Onur seker et al

¹² Slit steel damper

الاستیک خطی آغاز می‌شود و تا آستانه فروریزی کامل ادامه می‌یابد. رفتار سازه‌های فولادی حتی در برابر بارهای متوسط و نه چندان شدید نیز یک رفتار غیرخطی است. بنابراین آنالیز غیرخطی به عنوان بهترین و کامل‌ترین روش برای سازه‌های فولادی شمرده می‌شود. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS به مدلسازی اتصال مهاربند پیستونی به محل تلاقی تیر و ستون با استفاده از ورق پرداخته شده است. برای صحت سنجی مدل اجزای محدود با مدل آزمایشگاهی از نرم‌افزار ABAQUS برای مدل سازی میراگر استفاده شده و نوع فولاد مصرفی میراگر در جدول ۱ آورده شده است. همچنین برای صحت سنجی مدل اجزای محدود با نتایج آزمایشگاهی مطابق مطالعات جراح و همکاران [۱۱] از الگوی بارگذاری شکل ۱ استفاده شده است. این الگوی بارگذاری از سه چرخه تکراری ۰/۵، ۱، ۳ و ۵ میلی‌متر تشکیل شده و به دنبال آن پنج چرخه در محدوده ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر تعریف شده و از تحلیل شبه استاتیک برای انجام صحت سنجی استفاده شده است. در این صحت سنجی از یک ورق پیستونی کامل فولادی متصل بین سیلندر و همچنین از المان C3D8R برای مدل‌سازی عددی استفاده شده است. پس از اعمال الگوی بارگذاری بر نمونه عددی، میراگر تا لحظه گسیختگی پیستون پیش رفته و منحنی بار-جابجایی مدل عددی به همراه مدل آزمایشگاهی در شکل ۲ رسم شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود مطابقت مناسبی میان نتایج مدل عددی با آزمایشگاهی حتی در جابجایی‌های بزرگ وجود دارد. با توجه به نمودار، مدل اجزای محدود می‌تواند رفتار گسیختگی نمونه آزمایشگاهی را با دقت قابل قبولی در محدوده عملی پیش‌بینی کند.

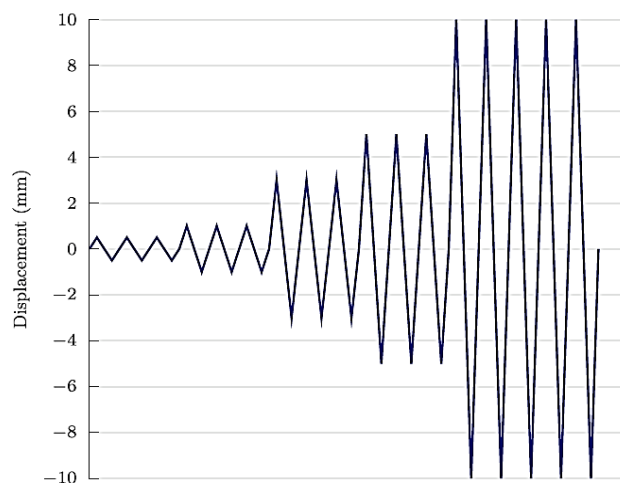
شکل هندسی برای تیر، ستون و مهاربند مورد مطالعه مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده و مشخصات مصالح قاب مطابق مطالعات داوران و هویدا [۱۲] در نظر گرفته شده است. منحنی تنش کرنش مهندسی بدست آمده از آزمون کشش نمونه فولاد مصرفی در میراگر، در شکل ۴ رسم شده است. شکل هندسی یکی از نمونه‌های پیستونی (P-175-150) در شکل ۵ و خصوصیات دینامیکی آن در جدول ۱ و ابعاد هندسی این میراگر در جدول ۲ ارائه شده است. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که یکی از پیستون‌های نیم دایره‌ای در ۱۷۵ میلی‌متری از سیلندر و دیگری در ۱۵۰ میلی‌متری از پیستون اول واقع شده است. ابعاد هندسی و خصوصیات مصالح نمونه‌های دیگر مشابه نمونه موجود در جدول ۱ بوده و فقط فاصله ورق‌های موجود در سیلندر تغییر می‌کند. میراگر پیستونی با پیستون‌های نیم دایره‌ای از ترکیب سیلندر و شفت فولادی و دو ورق نیم دایره‌ای که بعنوان پیستون در این میراگر عمل می‌کنند، تشکیل شده است و اتصال بین اجزا بصورت جوش می‌باشد ولی در مدل اجزای محدود از مدل‌سازی جوش صرف نظر شده است. پیستون‌های موجود در این میراگر به هنگام اعمال بارگذاری مانند تیر دو سر گیردار عمل کرده و مفاصل پلاستیک در قسمت‌های داخلی و خارجی قطر پیستون بوجود می‌آیند و مانع از ایجاد آسیب زیاد در اتصالات و حتی ورق‌های اتصال مهاربند به قاب می‌شوند. پس از مدل‌سازی ۵ نمونه از قاب مجهز به سیستم مهاربند پیستونی به هر یک از نمونه‌ها مطابق شکل ۶، الگوی بارگذاری ATC-24 بصورت هیستریزس اعمال شده و در نهایت جابجایی، سرعت و شتاب پیستون بدست آمده و با یکدیگر مقایسه شده است. نامگذاری قاب‌های مهاربندی شده پیستونی بر اساس فاصله ورق‌های پیستونی در داخل سیلندر صورت گرفته است. بعنوان مثال P-250-0 معرف این است که ورق‌های نیم دایره‌ای در ۲۵۰ میلی‌متری سیلندر (وسط سیلندر) به یکدیگر متصل هستند (شکل ۷). همچنین تمامی المان‌ها از نوع C3D8R بوده و اندازه مش تقریبی پس از انجام آنالیز حساسیت مش بندی در محدوده ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر، برای تمامی مدل‌ها مقدار ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. اندازه مش باید بگونه‌ای باشد که سرعت پردازش تحلیل مقرون به صرفه و دقت نتایج بالا باشد و میزان خطاهای تحلیل حداقل شود تا باعث توقف تحلیل نگردد.

جدول ۱: خصوصیات دینامیکی مصالح میراگر پیستونی

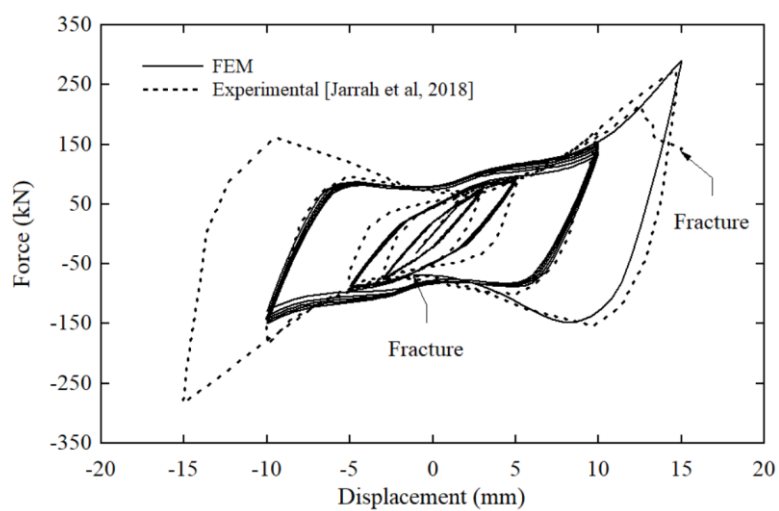
نوع فولاد	تنش تسلیم (MP)	تنش نهایی (MP)	کرنش در لحظه خرابی (%)	مدول الاستیسیته (GP)	ضریب پواسون
ST-1	305	473	35	203	0.3

جدول ۲: ابعاد هندسی اجزای سازنده میراگر بر حسب میلی متر

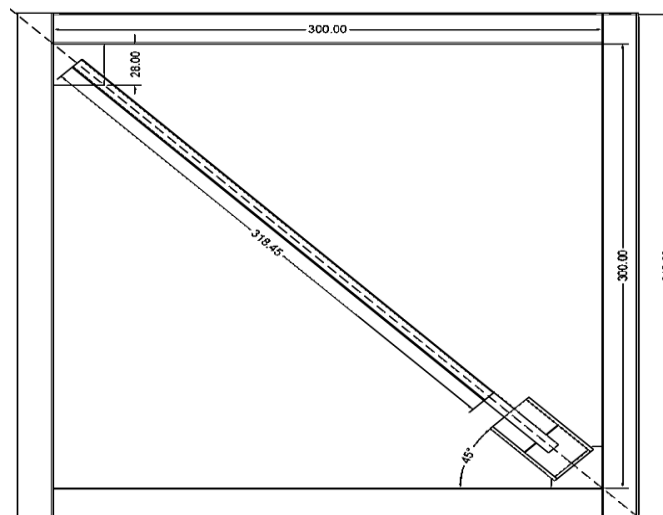
نوع مصالح	ضخامت پیستون نیم دایره‌ای	تعداد پیستون نیم دایره‌ای	قطر شفت	ضخامت دیواره سیلندر	قطر سیلندر
ST-1	6	2	78	20	260



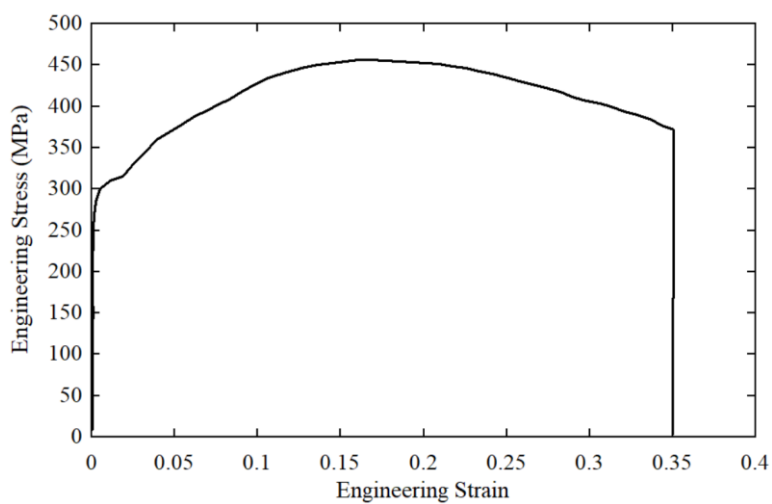
شکل ۱: الگوی بارگذاری برای صحت سنجی نمونه عددی با نمونه آزمایشگاهی



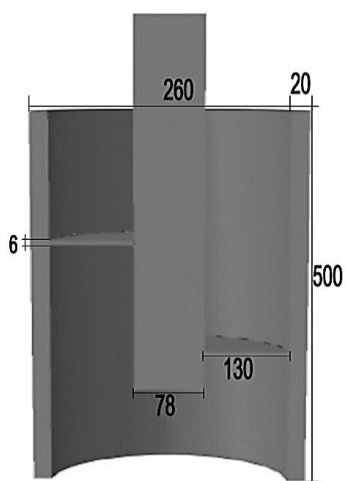
شکل ۲: مقایسه منحنی بار-جابجایی مدل عددی با نمونه آزمایشگاهی



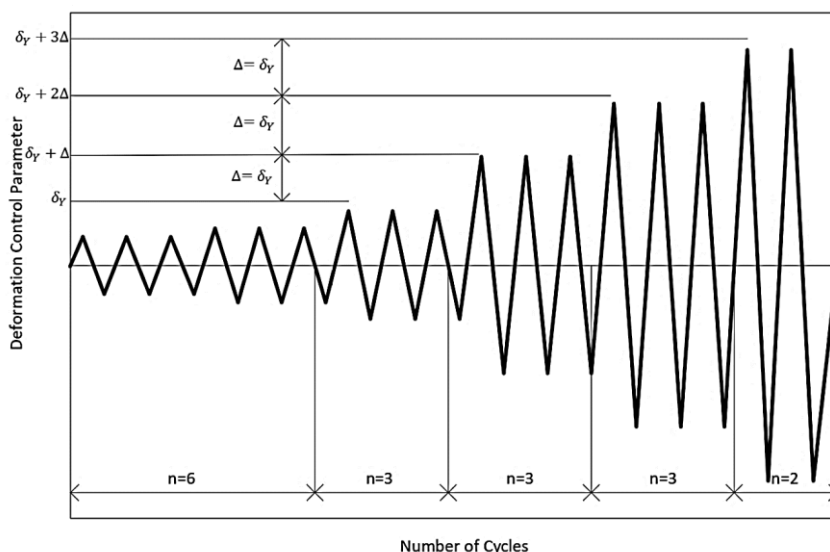
شکل ۳: مدل هندسی تیر، ستون، مهاربند و ورق اتصال.



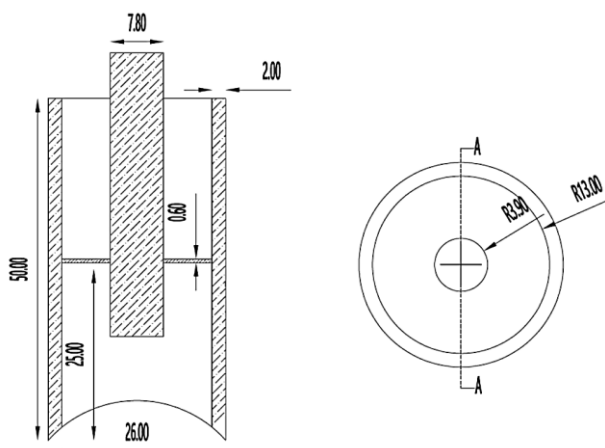
شکل ۴: منحنی تنش-کرنش مهندسی فولاد مدل عددی



شکل ۵: مدل هندسی پیستون (بر حسب میلی متر).



شکل ۶: الگوی بارگذاری ATC-24.



شکل ۷: نمونه‌ای از نحوه قرارگیری ورق‌های اتصال پیستون.

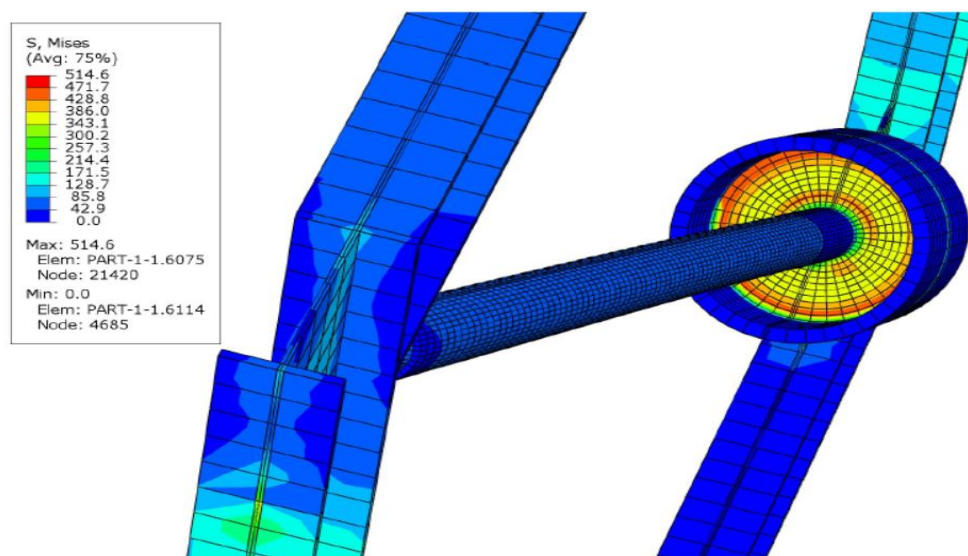
۳- نتایج عددی مدل‌های مورد مطالعه

در این تحقیق به بررسی تاثیر فاصله ورق‌های نیم دایره‌ای موجود در داخل پیستون نسبت به هم بر رفتار قاب مهاربندی شده در ۵ مدل (شامل مدل‌ها با افزایش فاصله ورق‌ها از هم) به روش اجزای محدود پرداخته شده است تا مشخص شود که تا چه میزان، در عملکرد سازه تفاوت ایجاد می‌کند. مدل P-250-0 (قاب مهاربندی شده پیستونی که فاصله ورق‌های پیستون از هم صفر می‌باشد) بعنوان مدل اولیه مورد تحلیل شبه استاتیکی غیرخطی تحت تاثیر الگوی بارگذاری ATC-24 (شکل ۶) تحلیل چرخه‌ای انجام گردید. همچنین تمامی نمونه‌ها تا میزان تسلیم کامل ورق پیستون پیش رفته‌اند و پارامترهای آسیبی مطابق تحقیقات جراح و همکاران در نظر گرفته شده‌اند [۱۱]. با رسیدن به مقادیر پارامترهای آسیبی، سیستم تا آستانه‌ی گسیختگی کامل پیستون‌های داخل سیلندر پیش می‌رود. بدست آوردن معیار آسیب به عواملی چون اندازه المان و خصوصیات دینامیکی مصالحی که در سازه استفاده شده است بستگی دارد. نتایج بدست آمده برای تمامی مدل‌ها از نقطه نظر تنش فون میزس ورق اتصال، حداکثر جابجایی، سرعت و شتاب ورق پیستون، و حداکثر بار نهایی قابل تحمل توسط قاب در جدول ۳ ارائه شده است. در شکل ۸ توزیع تنش در قسمت‌های مختلف قاب نمایش داده شده است. بیشترین مقدار تنش در قسمت داخلی و خارجی ورق پیستون برای تمامی مدل‌ها، تا میزان تنش نهایی ورق می‌باشد و با افزایش فاصله ورق‌ها از یکدیگر، تنش در ورق

اتصال نمونه‌ها روند کاهشی نشان می‌دهد بطوری که بیشترین مقدار تنش در ورق اتصال مربوط به نمونه P-250-0 بوده و این مقدار با افزایش فاصله پیستون‌ها از یکدیگر به میزان حداکثر ۱۲٪ کاهش یافته است.

جدول ۳: مقادیر تنش ورق اتصال، جابجایی، سرعت و شتاب نمونه‌ها

نمونه	حداکثر تنش در ورق اتصال (N/mm ²)	حداکثر جابجایی ورق پیستون (mm)	حداکثر سرعت ورق پیستون (mm/S)	حداکثر شتاب ورق پیستون (mm/S ²)	جابجایی اولیه پیستون (mm)
P-250-0	277.4	7.7	5.1	5.0	1.260
P-225-50	254.3	10.3	6.1	5.6	1.270
P-200-100	247.3	11.5	7.0	6.4	1.276
P-175-150	245.0	11.8	7.0	6.3	1.280
P-150-200	244.3	12.0	6.9	8.1	1.284



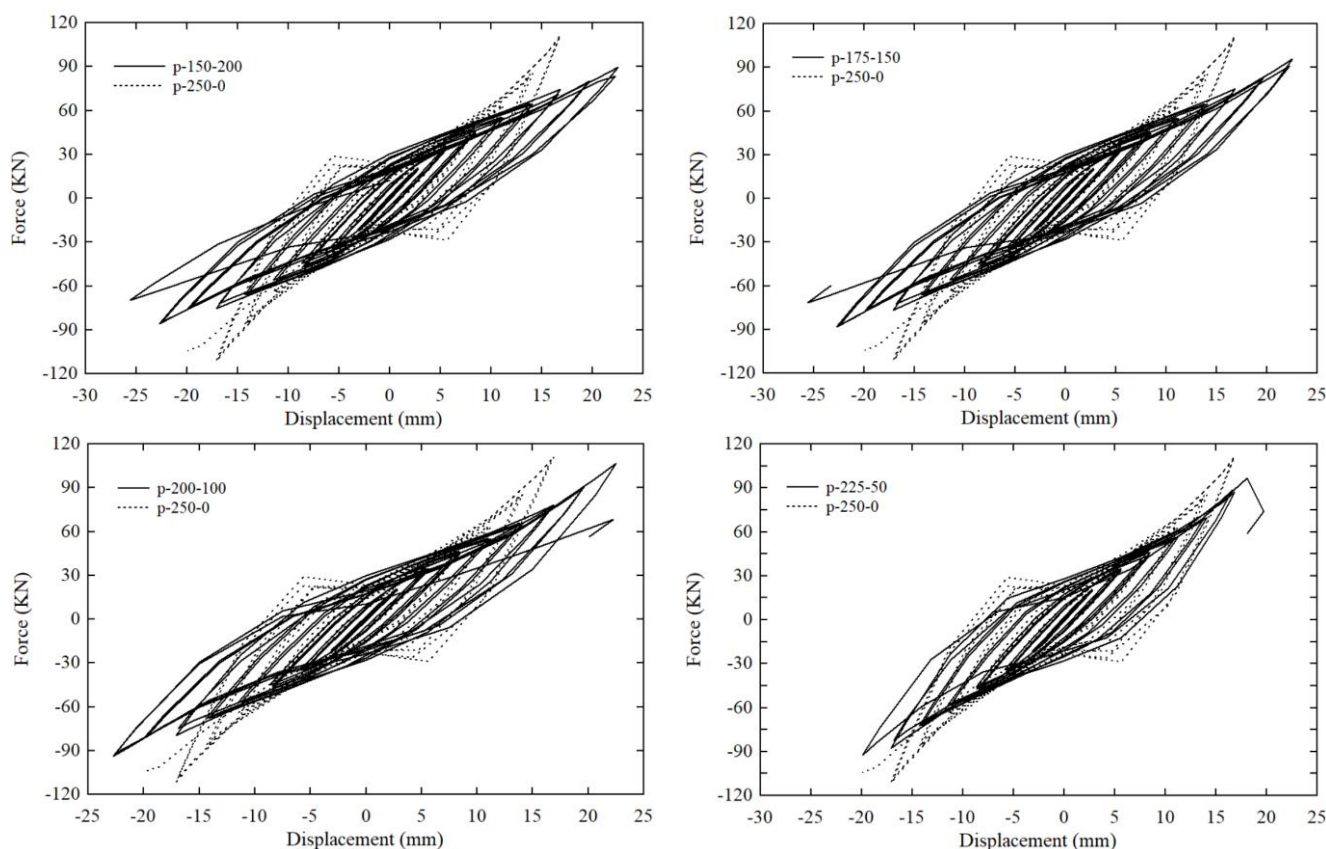
شکل ۸: توزیع تنش در قسمت‌های مختلف قاب مهاربندی شده.

با توجه به نتایج بدست آمده، با افزایش فاصله ورق‌ها از یکدیگر جابجایی ورق پیستون نسبت به حالت اول (P-250-0) حدود ۵ میلی‌متر افزایش یافته و همچنین مقدار سرعت به میزان ۲۸٪ و میزان شتاب نیز به مقدار ۳۸٪ افزایش پیدا کرده است. در شکل ۹ منحنی هیستریزس مدل‌ها نسبت به مدل اولیه مقایسه شده است و با توجه به نمودارهای هیستریزس ظرفیت نهایی برای تمامی مدل‌ها قابل توصیف است. بیشترین مقدار بار نهایی متعلق به نمونه P-250-0 بوده و با توجه به نمودارها افزایش فاصله پیستون‌ها نشان از کاهش بار نهایی را دارد. کمترین مقدار بار نهایی نیز مربوط به نمونه P-150-200 می‌باشد که به میزان ۱۹٪ مقدار بار نهایی سازه در مقایسه با نمونه اول کاهش یافته است. همچنین با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که مدل P-250-0 در مقایسه با مدل‌های دیگر سیکل بارگذاری کمتری را پیموده است و سریعتر از سایر مدل‌ها به حالت گسیختگی کامل پیستون رسیده است. در جدول ۴ مقادیر شکل‌پذیری، حداکثر بار نهایی قاب، سختی اولیه و جابجایی و نیروی تسلیم قاب و پیستون آورده شده است. که μ ، K_0 ، δ_y و P_y به ترتیب معرف شکل‌پذیری،

سختی اولیه، جابجایی تسلیم و نیروی تسلیم می‌باشند. با توجه به مقادیر جدول ۴ میزان شکل‌پذیری با افزایش فاصله ورق پیستون از مقدار ۶/۱ به ۹/۳ رسیده و نشان از افزایش ۳۴٪ دارد. همچنین سختی اولیه قاب نیز با افزایش فاصله پیستون‌ها تا میزان ۵٪ کاهش پیدا کرده است و رابطه عکس شکل‌پذیری با سختی را ارضا می‌کند. هرچه ضریب شکل‌پذیری یک سازه بیشتر باشد، میزان جذب انرژی نیز بالاتر بوده و در نتیجه مقدار ضریب رفتار بزرگتر خواهد بود.

جدول ۴: مقادیر سختی، شکل‌پذیری و بار نهایی نمونه‌ها

نمونه	μ پیستون	حداکثر بار نهایی قاب (KN)	K_0 (KN/mm) قاب	δ_y (mm) قاب	P_y (KN) قاب
P-250-0	6.1	111.250	75.0	2.85	21.39
P-225-50	8.1	96.955	71.2	2.85	2.0.31
P-200-100	9.0	106.915	71.2	2.85	20.32
P-175-150	9.2	95.593	71.1	2.85	20.28
P-150-200	9.3	89.714	71.0	2.85	20.22

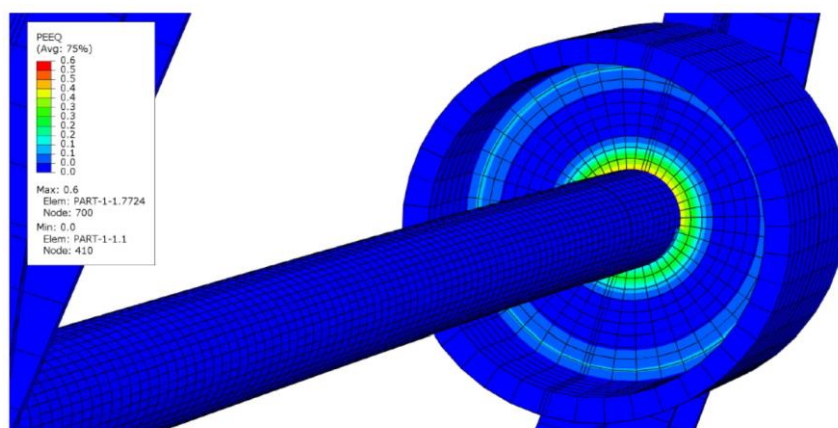


شکل ۹: نمودار منحنی هیستریزس مدل‌های مختلف مورد مطالعه.

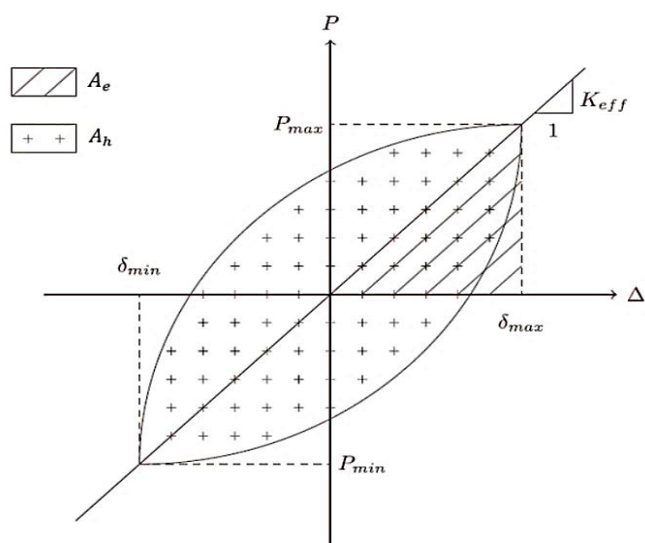
در شکل ۱۰ توزیع کرنش پلاستیک مدل P-250-0 نشان داده شده است و طبق انتظار بیشترین کرنش پلاستیک فقط در نواحی داخلی و خارجی ورق پیستون گسترش پیدا کرده و نشان از عملکرد مطلوب این سیستم دارد، یعنی در نواحی اتصالات و ورق اتصال مهاربند به قاب و حتی در خود مهاربند نیز کرنش پلاستیک رخ نداده است و آسیبی را در این نواحی نشان نمی‌دهد. همچنین وقوع کرنش-

های پلاستیک در پیستون متصل به سیلندر سبب افزایش استهلاک انرژی و میرایی معادل شده‌اند. با توجه به شکل ۱۰ حداکثر مقدار کرنش پلاستیک معادل برابر ۰/۶ می‌باشد. برای مدلسازی ریاضی میرایی یک سیستم معمولاً از نسبت میرایی ویسکوز معادل مطابق با مولفه‌های نشان داده شده در شکل ۱۱ استفاده می‌گردد. محاسبه این میرایی پس از ترسیم منحنی‌های پسماند یک سیستم تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق رابطه‌ای که در [۱۳] موجود است قابل محاسبه است. A_e و A_h و ξ_{eq} بترتیب معرف استهلاک انرژی در یک چرخه بارگذاری و میزان انرژی ذخیره شده در یک سامانه الاستیک خطی و نسبت میرایی ویسکوز هستند و مقادیر آن‌ها در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به مقادیر جدول ۵ افزایش فاصله پیستون‌ها از یکدیگر باعث افزایش میزان استهلاک انرژی تا ۳۸٪ و همچنین باعث افزایش ۱ درصدی نسبت میرایی شده است. میرایی ذاتی قاب‌های خمشی و مهاربند شده فولادی در حالت عادی به عواملی زیادی چون اصطکاک بین سطوح و شل بودن اتصالات و عوامل دیگر بستگی دارد و در محدوده ۳ الی ۵ درصد می‌باشد، با توجه به جدول ۵ میزان میرایی نمونه‌ها بیشتر از ۳۰٪ می‌باشد و عملکرد مطلوب سیستم را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۲ نمودار پوش و در شکل ۱۳ سختی موثر برای نمونه‌های مورد مطالعه در قاب مدل شده، رسم شده است. برای محاسبه سختی موثر از رابطه موجود در [۱۱] استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۲ که ظرفیت باربری نهایی نمونه‌ها را بر حسب جابجایی نشان می‌دهد می‌توان دریافت که بیشترین مقدار ظرفیت باربری متعلق به نمونه P-250-0 می‌باشد اما لحظه گسیختگی نمونه زودتر از سایر نمونه‌ها رخ داده است یعنی نمونه‌های دیگر در مقایسه با نمونه P-250-0 عملکرد مطلوبی دارند و جابجایی بیشتری را تحمل کرده‌اند. در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که در جابجایی‌های کمتر میزان سختی موثر نمونه P-250-0 نسبت به نمونه‌های دیگر بیشتر است و با افزایش جابجایی میزان سختی موثر نمونه‌ها کاهش پیدا کرده است. میزان کاهش سختی موثر نمونه P-250-0 با افزایش جابجایی نسبت به نمونه‌های دیگر کمتر است، یعنی نمونه اول شکل پذیری کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر دارد و آن هم بدلیل فاصله بین پیستون‌ها و نیم دایره‌ای بودن پیستون‌ها می‌باشد. بیشترین مقدار کاهش سختی موثر مربوط به مدل P-150-200 می‌باشد.



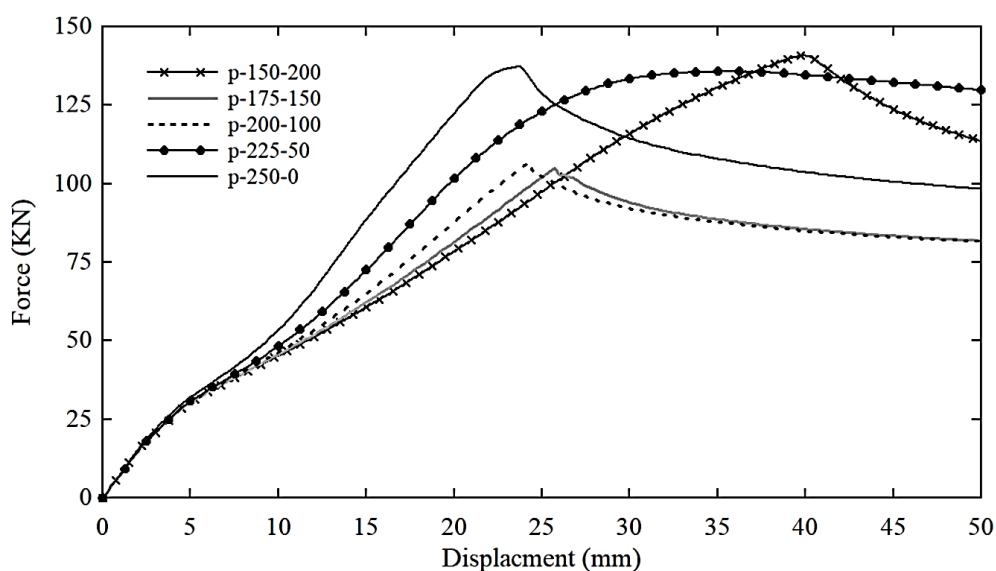
شکل ۱۰: توزیع کرنش پلاستیک معادل مدل P-250-0.



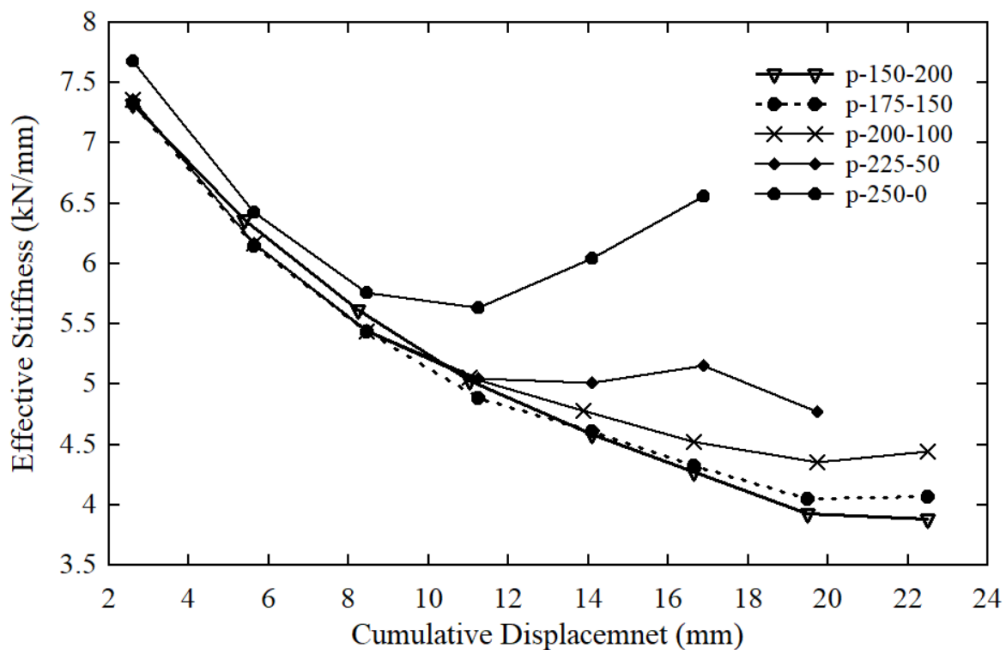
شکل ۱۱: نمودار هیستریزیس نیرو-تغییر مکان برای محاسبه انرژی جذب شده و استهلاک انرژی نمونه‌ها.

جدول ۵: مقادیر میزان استهلاک انرژی و میرایی برای مدل‌های مورد مطالعه

نمونه	A_h	A_e	$\xi_{eq} (\%)$
P-250-0	190	47	32.08
P-225-50	191	49	30.68
P-200-100	289	75	30.65
P-175-150	309	74	33.18
P-150-200	305	71	33.80



شکل ۱۲: نمودار پوش تغییر مکان و نیرو برای نمونه‌های مورد مطالعه.



شکل ۱۳: نمودار سختی موثر برای مدل‌های مورد مطالعه.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر استفاده از ورق‌های نیم دایره‌ای پیستونی و افزایش فاصله آن‌ها از یکدیگر بر رفتار قاب مهاربندی شده همگرا با استفاده از روش اجزای محدود پرداخته شده تا مشخص گردد که: چه تفاوتی در عملکرد سازه ایجاد می‌کند. با بررسی نتایج بدست آمده مشخص شد که:

- ۱- با افزایش فاصله ورق‌های نیم دایره‌ای پیستونی میزان ظرفیت باربری کاهش پیدا کرده و بیشترین ظرفیت باربری متعلق به P-250-0 می‌باشد.
- ۲- این افزایش فاصله، شکل‌پذیری پیستون را افزایش داده و با بیشتر شدن میزان شکل‌پذیری سختی کاهش یافته و باعث استهلاک انرژی بیشتری شده است.
- ۳- افزایش فاصله ورق‌ها باعث کاهش تنش وارده به ورق اتصال به دلیل افزایش طول بازو شده است. همچنین با بیشتر شدن فاصله پیستون‌ها مقادیر جابجایی، سرعت و شتاب پیستون نیز افزایش پیدا خواهد کرد.
- ۴- استفاده از میراگر با پیستون نیم دایره‌ای باعث شده است که میراگر جابجایی بیشتری را در مقایسه با پیستون کامل تحمل کند و آستانه گسیختگی پیستون در جابجایی‌های بزرگتر رخ دهد و سازه چرخه بارگذاری بیشتری را طی کند.

مراجع

- [1] Xu, F., Chen, J., Shu, K., and Su, M. (2018). Cyclic behaviour of double-tube buckling-restrained braces for boiler steel plant structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 150, 556–569.
- [2] Prasanna Kumar, M., and Vishnu, R. M. (2017). A comparative study on effect of lateral loading on steel braced reinforced concrete structure of unsymmetrical building plan. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(8), 609-616.
- [3] D'Aniello, M., Costanzo, S., and Landolfo, R. (2015). The influence of beam stiffness on seismic response of chevron concentric bracings. *Journal of Constructional Steel Research*, 112, 305–324.

- [4] Panchal, D., and Purohit, S. (2013). Dynamic response control of a building model using bracings. *Procedia Engineering*, 51, 266–273.
- [5] Yang, J., Wu, J., and Li, Z. (1996). Control of seismic-excited buildings using active variable stiffness systems. *Engineering Structures*, 18(8), 589–596.
- [6] Skinner, R.I., Kelly, J.M. and Heine, A.J. (1974). Hysteretic dampers for earthquake resistant Structures. *Earthquake Engineering and structural Dynamics*, Vol. 3, No. 3, 287-296.
- [7] Seker, O., Akbas, B., Seker, P. T., Faytarouni, M., Shen, J., and Mahamid, M. (2017). Three-segment steel brace for seismic design of concentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, 211–227.
- [۸] نیک هوش، کیانوش، کافی، محمد علی. (۱۳۹۸). مطالعه آزمایشگاهی تاثیر هندسه پره در میراگرهای تسلیمی شکافدار فولادی بر رفتار لرزه‌ای آن‌ها و معرفی الگوی بهینه تحت بارگذاری چرخه‌ای. نشریه مهندسی سازه و ساخت.
- [۹] کهنه‌پوشی، امید، سالم، افراسیاب. (۱۳۹۷). بررسی رفتار سازه‌ای میراگر شکافدار در اتصال تیر به ستون فولادی. نشریه مهندسی سازه و ساخت.
- [۱۰] قنادی اصل، امین، اسرافیلی، حسین، رحمن شکرگزار، حامد. (۱۳۹۷). عملکرد لرزه‌ای قاب‌های مهاربندی شده همگرا با خروج از مرکزیت ورق اتصال بادبند. نشریه مهندسی سازه و ساخت.
- [12] Jarrah, M., Khezzzadeh, H., Mofid, M., Jafari, K. (2019). Experimental and numerical evaluation of piston metallic damper (PMD). *Journal of Constructional Steel Research*, 154, 99–109.
- [11] Davaran, A., and Hoveidae, N. (2009). Effect of mid-connection detail on the behavior of x-bracing systems. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4), 985–990.
- [13] Cheraghi, A., and Zahrai, S. M. (2016). Energy Dissipation Improvement in CBFs Using Perforated Gusset Plates. *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(3), 339-349.