

## Investigation of the performance of semi-rigid moment steel frames system with passive steel curved dampers

H. Shojaeifar<sup>1</sup>, A. Maleki<sup>2\*</sup>, M. A. Lotfollahi-Yaghin<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Maragheh branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Maragheh branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran.

3- Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

### ABSTRACT

The use of displacement-dependent steel curved dampers as fuse or interchangeable element in the beam-to-column connection region is one of the newest methods for improving the seismic performance of semi-rigid moment steel frames (SRMF). In the present study, performance of low-yield strength steel curved dampers in SRMF has been investigated. These dampers are inactive and install in the beam-to-column connection region. Variable parameters of this study involve the damper width (75, 100 and 125 mm), damper thickness (10, 15, 20, 25 and 30 mm) and the curve damper steel type (SN400YB and LY160). Evaluation of SRMF models were performed using finite element method by ABAQUS software. For validation, a SRMF with steel curve dampers under cyclic loading was modeled that had been experimentally tested and reported in previous experimental research and a good agreement was observed. The results show that the use of low-yield strength steel in curved steel dampers, depending on the damper thickness, can lead to an increase in the ductility parameter and total energy dissipated compared to the steel with higher yield stress. Also, the steel curved damper around the beam-to-column connection zone has caused the plastic hinge to occur in the farther region of the connection.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 02 April 2021

**Revise Date:** 13 July 2021

**Accept Date:** 09 November 2021

**Keywords:** Moment resisting steel frames, Steel curved dampers, Beam-to-column connection, Low-yield strength plates, Finite element analysis.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.279152.2404

\*Corresponding author: Ahmad Maleki.

Email address: A.Maleki@iau-maragheh.ac.ir

## بررسی عملکرد قاب‌های خمشی فولادی نیمه صلب مجهز به میراگرهای غیرفعال منحنی شکل فولادی

حمید شجاعی<sup>۱</sup>، احمد ملکی<sup>۲\*</sup>، محمدعلی لطف‌اللهی یقین<sup>۳</sup>

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

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

۳- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

### چکیده

استفاده از میراگرهای منحنی شکل وابسته به جابجایی بعنوان فیوز یا عضو قابل تعویض در محل اتصال تیر به ستون قاب فولادی، یکی از جدیدترین روش‌ها برای بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی نیمه صلب می‌باشد. در این تحقیق، عملکرد میراگر منحنی شکل فولادی با مقاومت تسلیم پایین در قاب‌های خمشی فولادی نیمه صلب بررسی شده است. این میراگرهای فولادی بصورت غیرفعال بوده و در محل اتصال تیر به ستون قاب نصب می‌شوند. پارامترهای مختلف این تحقیق شامل عرض میراگر (۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ میلی‌متر)، ضخامت میراگر (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر) و نوع فولاد میراگر منحنی (SN400YB و LY160) می‌باشد. ارزیابی مدل‌های قاب‌های خمشی فولادی نیمه صلب با استفاده از روش اجزای محدود توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. برای اعتبارسنجی، یک قاب خمشی فولادی نیمه صلب مجهز به میراگر منحنی فولادی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای مدلسازی شد که بصورت آزمایشگاهی تست و در تحقیقات آزمایشگاهی گذشته گزارش شده بود. مقایسه‌ی نتایج مدلسازی با آزمایشگاهی، تطابق خوبی را نشان دادند. نتایج کلی نشان دادند که استفاده از فولاد با مقاومت حد پایین در میراگر منحنی شکل فولادی با تاکید بر اثر ضخامت میراگر، باعث می‌شود که پارامتر شکل‌پذیری و جذب انرژی کل در مقایسه با فولاد دارای تنش تسلیم بالا افزایش یابد. همچنین با تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه میراگر منحنی شکل فولادی از شکل‌گیری آن در محل اتصال تیر به ستون جلوگیری می‌شود.

کلمات کلیدی: قاب‌های خمشی فولادی، میراگرهای منحنی شکل فولادی، اتصال تیر به ستون، ورق‌های با مقاومت حد پایین، تحلیل اجزای محدود.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۴۰۰/۰۱/۱۳	۱۴۰۰/۰۴/۲۲	۱۴۰۰/۰۸/۱۸	۱۴۰۰/۰۸/۱۸	۱۴۰۱/۰۴/۰۱	10.22065/JSCE.2021.279152.2404
*نویسنده مسئول:					احمد ملکی
پست الکترونیکی:					A.Maleki@iau-maragheh.ac.ir

## ۱- مقدمه

به طور معمول قاب‌های صلب و نیمه صلب فولادی برای ساخت و ساز در مناطق زلزله‌خیز استفاده می‌گردد. این سازه‌ها زمانی که تحت اثر بار جانبی قرار می‌گیرند، اگر اتصالات تیر به ستون دقیق باشد می‌توانند شکل‌پذیری زیادی را تجربه کنند [۱-۵]. در چنین سازه‌هایی بعلاوه انعطاف‌پذیری بالای سازه و در نتیجه تمرکز تنش در محل اتصالات جوشی تیر به ستون، محدودیت‌هایی به وجود می‌آید [۶]. قاب‌های صلب مقاومت بالایی در برابر بارهای جانبی وارده همچون زلزله دارند. با این حال، در طراحی این نوع قاب‌ها نگرانی‌هایی بعلاوه تعداد گسیختگی‌های مرتبط با شکست جوش‌های اتصالات تیر به ستون تحت اثر زلزله‌های بزرگ وجود دارد. تمرکز تنش‌های بزرگ در جوش‌ها، پارامترهای گسیختگی شکننده در اتصالات را فراهم می‌کند در نتیجه مقاومت به شدت کاهش یافته و عملکرد سازه از بین می‌رود [۷]. بر مبنای تحقیقات اخیر معقول است که همه‌ی اتصالات بصورت نیمه صلب فرض شوند. در حقیقت، فرض اینکه اتصال کاملاً صلب یا بطور ایده‌آل مفصلی باشد منجر به ساده‌سازی زیاد تجزیه و تحلیل سازه می‌شود. در همه‌ی موارد می‌توان صلبیت اتصال را به طور متوسط مابین حالت صلب و مفصلی در نظر گرفت. اتصالات نیمه صلب متشکل از اعضا، اتصالات و هم‌بندهای پیچیده‌ای هستند که منجر به پیچیدگی اندرکنش مابین آن‌ها می‌شود مخصوصاً زمانی که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دارند [۸]. قاب‌های نیمه صلب معمولاً توسط اتصالات نیمه صلب مابین تیر-ستون ساخته می‌شوند. ساخت اینگونه قاب، ظرفیت شکل‌پذیری کافی در هنگام اعمال بارهای چرخه‌ای از خود نشان می‌دهد. پس از زلزله نورت‌تریج بسیاری از اصلاحات برای ساختن و مقاوم سازی قاب‌های خمشی فولادی پیشنهاد شد. که می‌توان به روش‌های زیر اشاره کرد [۹]: ۱- دستیابی به شکل‌پذیری بالا از طریق کنترل روش‌ها و مصالح جوشکاری. ۲- خارج شدن از شرایط مهار سه محوره با نرم‌تر کردن نواحی اطراف جوش‌ها با استفاده از حذف بخش‌هایی از تیر یا ستون و کاهش درجه‌ی مهارشدگی. ۳- تامین جزئیات جدید برای اتصالات شکل‌پذیر، با هدف تمرکز کرنش‌های غیرارتجاعی سازه در تیرها، به جای ستون‌ها و اجزای اتصال (ارضای اصل ستون قوی-تیر ضعیف). ۴- تضعیف بال تیرها در محل‌های خاصی که امکان ایجاد کرنش‌های غیرارتجاعی را در نواحی دورتر از محل اتصال تیر به ستون فراهم می‌کند. ۵- مقاوم کردن و تقویت عناصر اتصال تا جایی که باعث انتقال کرنش‌های غیرارتجاعی از اتصال به سمت تیر شود.

در مقابل در سال‌های اخیر، برای کاهش حداکثر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها، پل‌ها و سایر سازه‌های عمرانی، ابزارهای مختلف استهلاک انرژی بر روی آن‌ها بکار گرفته شده است [۱۰-۱۳]. ارائه‌ی مکانیزم‌های مطمئن برای استهلاک انرژی زمین لرزه‌های مخرب بعنوان کلیدی برای ایمنی سازه‌ها در برابر زمین لرزه‌های قوی می‌باشد. استفاده از این ابزارها موجب می‌گردد تغییرشکل‌های غیرالاستیک، نیروها را در اعضا محدود کنند تا امکان طراحی مناسب ابعاد فراهم شود؛ و استهلاک انرژی همستریس برای سیستم تامین گردد [۱۴]. ایده‌ی طراحی یک چنین مکانیزمی به عنوان عضو قربانی برای اتلاف انرژی زلزله بطوریکه دیگر اجزای اصلی سالم بمانند به عنوان ایده‌ی فیوز ساختمان معرفی شده است. بطوریکه ایده‌ی فیوز شکل‌پذیر سازه‌ی اولین بار توسط Roeder and Popov [۱۵] برای قاب‌های فولادی مهاربندی شده‌ی خارج از مرکز ارائه شده است. در مقابل روش‌های طراحی لرزه‌ای پیشین که بیشتر انرژی وارده توسط زلزله را از طریق تغییرشکل غیرالاستیک مناطق خاص سازه‌ها اتلاف می‌کردند (معمولاً دو انتهای تیر و دو انتهای ستون در قاب‌های فولادی خمشی)، در سیستم کنترل غیرفعال این انرژی به ابزارهای خاصی به نام میراگرهای لرزه‌ای سوق داده می‌شود. تعدادی از سیستم‌های استفاده شده برای استهلاک انرژی عبارتند از: میراگرهای اصطکاکی، میراگرهای فولادی، میراگرهای ویسکوالاستیک و میراگرهای ویسکوز مایع. این سیستم‌های استهلاک انرژی غیرفعال، انرژی لرزه‌ای را جذب کرده و عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها را از طریق اصلاح مشخصه‌های دینامیکی سازه بهبود می‌بخشند [۱۶].

مطالعات مختلفی در رابطه با استفاده از میراگر در سازه‌های فولادی انجام شده است. بنوانت در مقاله‌ای یک نوع میراگر لرزه‌ای مهاربندی شکل برای مقاومت سازه در برابر بارهای جانبی طراحی کردند. میراگر را بصورت لوله در لوله توسط سطح مقطع‌های توخالی فولادی مونتاژ کرده بودند. مقطع توخالی بیرونی میراگر از یک سری نوارهایی با وجود شکاف‌های منظم ساخته شده بود که به مقطع توخالی درونی جوش شده بودند. بطوریکه در هنگام قرارگیری تحت اثر جابجایی در جهت محورشان، نوارها انرژی را از طریق تسلیم‌شدگی برشی یا خمشی مستهلک کنند. از ویژگی‌های این نوع میراگر مقاومت کمانشی مناسب، کم هزینه بود و تعویض‌پذیری راحت بعد از زلزله می‌باشد.

در این تحقیق، میراگر پیشنهاد شده بصورت آزمایشگاهی تحت بارهای چرخه‌ای قرار گرفته و با میراگرهای مشابه معمول مقایسه شد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که میراگر پیشنهادی دارای مشخصه‌های هیسترتیک پایداری است و ظرفیت استهلاک انرژی آن مناسب می‌باشد [۱۷].

کانگ و تاگاوای یک نوع جدید از سیستم کنترل ارتعاش بر مبنای مکانیزم الاکلنگی (بالا و پایین رفتن) با میراگرهای ویسکوز مایع معرفی کردند. سیستم کنترل ارتعاش پیشنهادی شامل سه بخش: الاکلنگ، مهاربند و میراگرهای ویسکوز مایع بود. در این سیستم نیروهای کششی فقط در اعضای مهاربندی رخ می‌داد، در نتیجه مساله کماتش مهاربند قابل صرف‌نظر بود. در این تحقیق، آنالیز پاسخ لرزه‌ای بر روی قاب‌های خمشی فولادی با تعداد طبقات مختلف با و بدون میراگرها انجام شد. مقایسه‌ی نتایج تحلیل‌ها نشان داد که سیستم استهلاک انرژی معرفی شده قابلیت بالایی در بهبود پاسخ سازه دارد [۱۸].

پیدرفیتا و همکاران در مقاله‌ای یک نوع جدید از BRB را بعنوان یک دستگاه مستهلک کننده‌ی انرژی جدید برای مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر زلزله معرفی کردند. در این نوع BRB هسته‌ی فولادی تسلیم‌ونده بصورت مدولی ساخته شده است. مقایسه‌ی انجام شده بین نتایج آزمایشگاهی BRB جدید و معمول تحت اثر بار چرخه‌ای بیانگر این واقعیت بود که در هر دو سیستم مقدار استهلاک انرژی تقریباً یکسان می‌باشد [۱۹].

هسو و لی تاثیر مکانیزم کنترل‌کننده‌ی کماتش بر رفتار چرخه‌ای قاب فولادی دارای مهاربند زانویی را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. به طوری که در این تحقیق برای بررسی عددی موضوع مورد بحث، صحت‌سنجی مدل توسط نتایج آزمایش‌های این مقاله انجام گرفته است. در این تحقیق ۷ مجموعه قاب فولادی برای آزمایش ساخته شده است که شامل یک قاب خمشی صلب و ۱۰ قاب مقاوم خمشی مهاربندی شده با بادبند زانویی بود. عملکرد هر یک از قاب‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای ارزیابی شد. چنانچه نتایج نشان دادند قاب مجهز به مهاربند زانویی عملکرد خیلی خوبی در هر دو جهت درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای داشته است [۶].

در نهایت به یکی از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده توسط هسو و حلیم اشاره می‌شود که اخیراً ارائه شده و مرتبط با موضوع همین تحقیق می‌باشد. در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، نوع جدیدی از میراگرهای منحنی شکل فولادی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی ارائه شده است. میراگرها در مابین منطقه‌ی تیر و ستون قرار دارند. رفتار میراگرها وابسته به طول و زاویه‌ی بین دو انتهای آن‌ها می‌باشد. به منظور ارزیابی تاثیر میراگرهای منحنی شکل بر رفتار سازه یک سری آزمایش بارگذاری چرخه‌ای بر روی قاب‌های فولادی خمشی با زوایای قرارگیری مختلف میراگرها انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که مقاومت قاب با کوچکتر شدن زاویه‌ی میراگر افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که به طور قابل توجهی مقاومت، سختی و استهلاک انرژی قاب‌های خمشی فولادی با وجود میراگرها بهبود می‌یابد [۲۰].

به عبارت دیگر، نتایج مطالعات قبلی نشان دادند که استفاده از فولاد با مقاومت حد پایین در اتصال تیر به ستون می‌تواند منجر به افزایش جذب انرژی سازه شود [۲۱]. با توجه به مطالب ارائه شده در بالا، عملکرد میراگرهای منحنی با مقاومت حد پایین در قاب‌های خمشی نیمه صلب بررسی شده است. از طرفی، این تحقیق در نظر دارد تا عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی نیمه صلب را در محل اتصال تیر به ستون توسط میراگر منحنی شکل فولادی بهبود بخشد و از این نظر ارزیابی هندسی و مشخصات مکانیکی این میراگر مهمترین هدف این مطالعه بود. عملکرد غالب این میراگر این است که انرژی انتقالی به سازه منجر به تسلیم شدن میراگر شود، به طوریکه تمام حجم فولاد میراگرها قبل از المان‌های سازه‌ی موجود تسلیم شوند و اتلاف انرژی فوق‌العاده‌ای حاصل گردد.

## ۲- مدل سازی اجزای محدود

به منظور ارزیابی عملکرد میراگرهای غیرفعال منحنی به کارگرفته شده در اتصال تیر به ستون، مدل‌های عددی در نرم‌افزار ABAQUS (۲۰۱۲) [۲۲] شبیه سازی شده است. روش اجزایمحدود به منظور شبیه سازی عددی سیستم قاب خمشی فولادی نیمه صلب با میراگرهای منحنی فولادی استفاده شده است. مدل‌های غیرخطی روش اجزای محدود برای پیش‌بینی رفتار چرخه‌ای قاب خمشی فولادی نیمه صلب مجهز به میراگرهای منحنی فولادی توسعه یافته است. در زیربخش‌های بعدی جزئیات مدل‌های اجزای محدود شامل

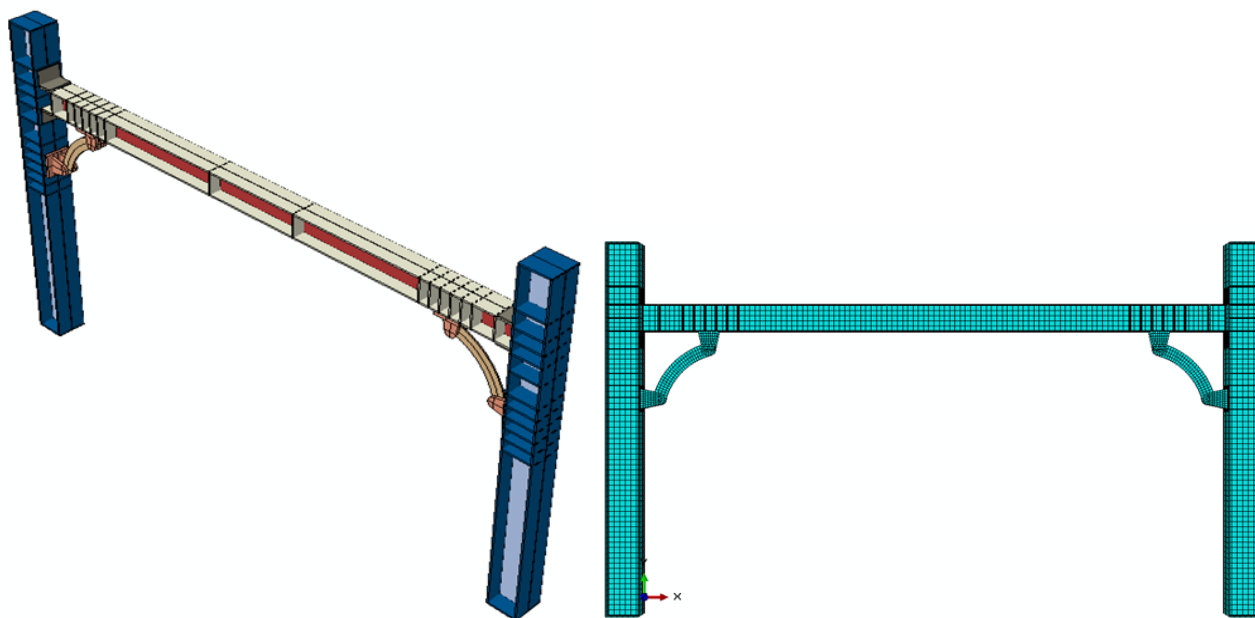
مشخصات مصالح، بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی، ناکاملی اولیه و جزئیات مش‌بندی و همچنین روش به کار برده شده برای تحلیل ارائه شده است.

## ۲-۱- مدل‌ها و مشخصات مصالح

در مدل‌سازی اجزای محدود، مصالح فولادی برای تیر، ستون و میراگرهای منحنی فولادی در نظر گرفته شد. مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به ترتیب برابر با ۲۰۰ گیگاپاسکال و ۰/۳ بود. سخت‌شدگی کینماتیکی خطی برای تحلیل تیر، ستون و میراگر منحنی استفاده شد. این مدل در نرم‌افزار ABAQUS به عنوان یک ابزار در قسمت مصالح در دسترس هست که بصورت (سخت‌شدگی کینماتیک، داده ورودی) پارامترسازی شده است. در این تحقیق، نمودار تنش - کرنش به صورت چندخطی ایده‌آل در نظر گرفته شد. مدل پلاستیک مصالح مورد استفاده بر اساس سطح تسلیم فون میزس و تئوری جریان پلاستیک انتخاب شده است [۲۳-۲۶]. معیار سطح تسلیم فون میزس بر مبنای انرژی تغییرشکل هست که معیار مناسبی برای مدلسازی مصالح شکل‌پذیر همچون فولاد می‌باشد. نوع فولاد تیر، ستون، نبشی‌ها و میراگرهای منحنی SN400YB می‌باشد و تنش تسلیم آنها به طور میانگین ۳۰۷ مگاپاسکال بود [۲۰].

## ۲-۲- مش‌بندی و نوع تحلیل

سیستم قاب خمشی فولادی نیمه صلب مجهز به میراگر منحنی فولادی با استفاده از المان پوسته‌ای نازک ایزوپرمتریک چهار گرهی (S4R) با انتگرال کاهش یافته مدلسازی شده است [۲۲]. اعضای استفاده شده برای قاب‌های مطالعه شده شامل تیر، ستون، نبشی، میراگر منحنی و ورق لچکی برای اتصال میراگر به تیر و ستون می‌باشد. مش‌بندی مدل‌ها در ابعاد  $30 \times 30$  میلی‌متر برای همه‌ی مدل‌های اجزای محدود در نظر گرفته شد. این المان دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی چرخشی در هر گره است و می‌تواند برای شبیه‌سازی پدیده کمانش کلی و موضعی در سازه‌های جدار نازک استفاده شود. هر دو رفتار غیرخطی هندسی و مصالح در مدلسازی اجزای محدود در نظر گرفته شده است [۲۷]. شکل ۱ هندسه و مش‌بندی مدل‌های اجزای محدود نمونه‌های آزمایشگاهی را در مطالعه انجام شده توسط هسو و حلیم [۲۰] نشان داده است.



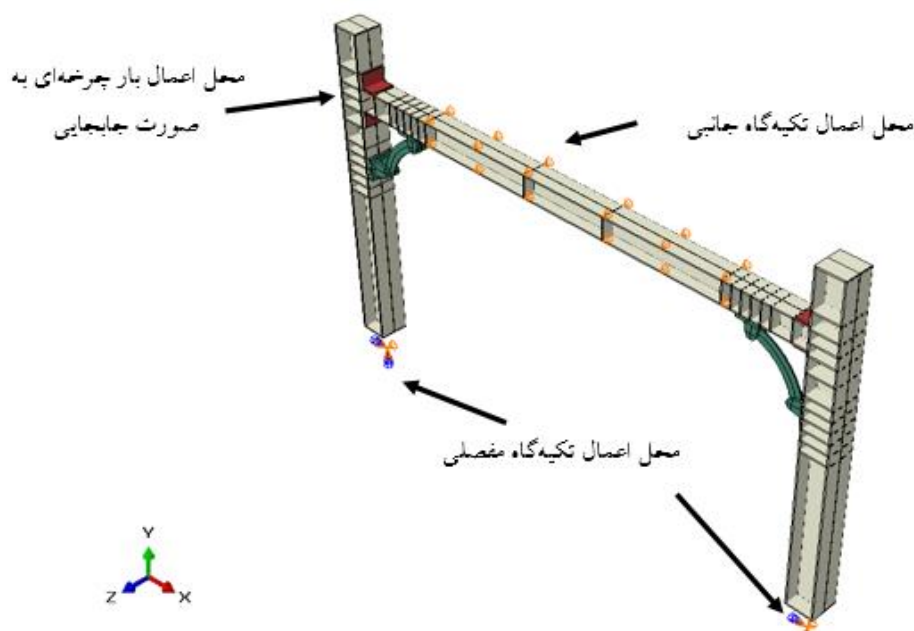
شکل ۱: هندسه و مش‌بندی مدل‌های اجزای محدود.

تحلیل استاتیکی غیرخطی برای تحلیل مدل‌ها استفاده شده است. در مدل‌سازی رفتار هندسی غیرخطی، سخت‌شدگی کرنشی و تغییرشکل‌های بزرگ المان‌ها محاسبه شده است [۲۸]. با توجه به مناسب بودن روش حل ضمنی برای تجزیه و تحلیل‌های استاتیک

غیرخطی، این روش برای تجزیه و تحلیل غیرخطی سیستم قاب خمشی فولادی نیمه صلب با میراگرهای منحنی فولادی که تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار دارند، استفاده شد. علاوه بر این، برای حل معادلات غیرخطی مدل‌های اجزای محدود از روش حل نیوتن-رافسون نیز استفاده شده است [۲۹ و ۳۰].

## ۲-۳- شرایط مرزی و بارگذاری

شرایط بارگذاری چرخه‌ای و شرایط مرزی مطابق با مشخصه‌های مطالعه‌ی آزمایشگاهی انجام شده توسط هسو و حلیم [۲۰] شبیه‌سازی شد. در شکل ۲ شرایط تکیه‌گاهی و محل بارگذاری چرخه‌ای به نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تمام درجات آزادی به جز چرخش حول محور Z در انتهای ستون‌ها بسته است. طبق مختصات کلی نشان داده شده در شکل ۲، یک بار چرخه‌ای در جهت محور X اعمال شد. همچنین، با توجه به شرایط مرزی تنظیمات آزمایش [۲۰]، برای جلوگیری از انحراف خارج از صفحه، تیر بالای در جهت Z بسته شد (شکل ۲). بارگذاری چرخه‌ای به روش کنترل تغییر مکان و طبق پروتکل آزمایشگاهی نمونه‌ی تست شده توسط هسو و حلیم [۲۰] اعمال شد. در مدل‌های المان محدود برای اتصال نبشی‌ها به تیر و ستون از قید اندرکنشی Tie استفاده است. در این قید اندرکنشی لبه‌های نبشی‌ها به صورت صلب مقید به سطوح قرار گرفته قرار می‌گیرد.

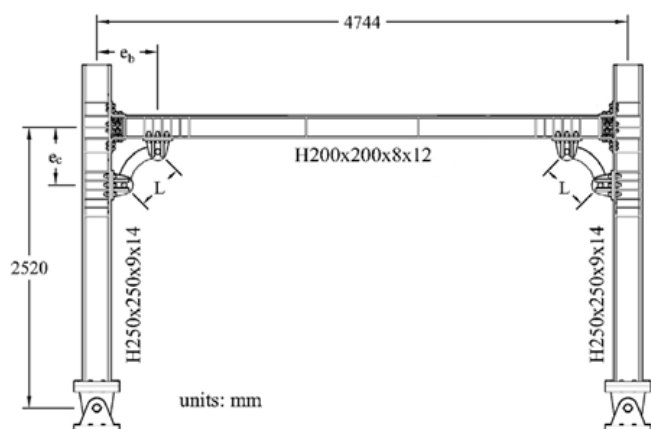


شکل ۲: شرایط مرزی و بارگذاری چرخه‌ای مدل‌های اجزای محدود.

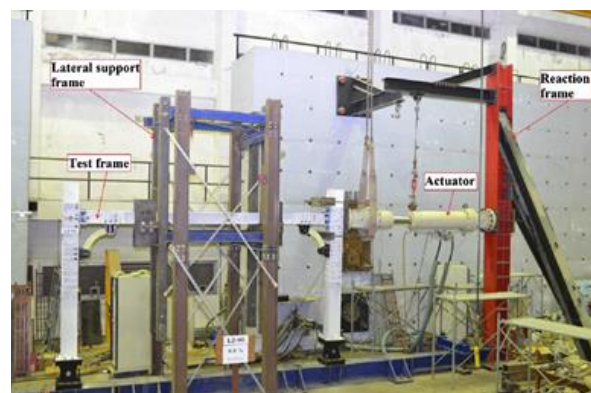
## ۳- اعتبارسنجی مدل اجزای محدود

به منظور اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی از مطالعه‌ی آزمایشگاهی هسو و حلیم [۲۰] استفاده شد. همان طور که در پیشینه تحقیق نیز اشاره شد، در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی، نوع جدیدی از میراگرهای منحنی شکل فولادی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی معرفی گردیده است. میراگرها در مابین منطقه‌ی تیر و ستون قرار گرفتند. به منظور ارزیابی تاثیر میراگرهای منحنی شکل بر رفتار سازه، هشت قاب فولادی مختلف تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. در شکل ۳ مشخصات هندسی و تنظیمات آزمایش نمونه‌های مورد بررسی در مطالعه هسو و حلیم [۲۰] نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد طول دهانه قاب برابر ۴۷۴۴ میلی‌متر و ارتفاع ستون برابر ۲۵۲۰ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۴ منحنی‌های بار-جابجایی مدل L1-90 نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ ماکزیمم نیروی برش پایه مدل المان محدود برابر با ۱۲۳ کیلو نیوتون و مقدار ماکزیمم نمونه آزمایشگاهی ۱۲۸ کیلو نیوتون است.

مطابق نتایج ماکزیمم برش پایه، نسبت مدل المان محدود به آزمایشگاهی ۰,۹۶ می باشد. همانطور که واضح است، مقادیر مقاومت و شکل پذیری متناظر با نمونه های آزمایشگاهی و عددی تطابق خوبی با یکدیگر دارند.

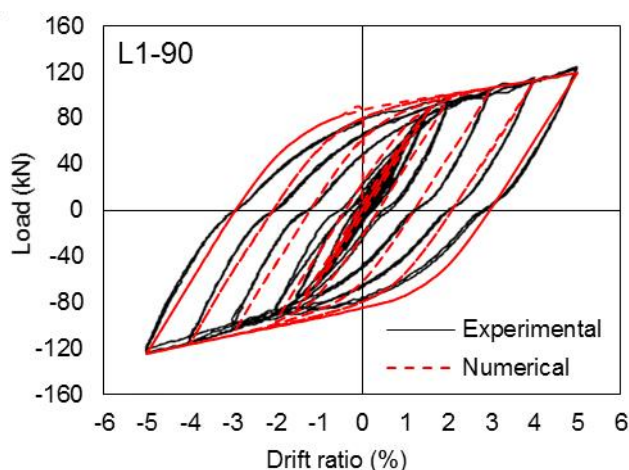


(ب)



(الف)

شکل ۳: الف) مشخصات هندسی و ب) تنظیمات آزمایش.



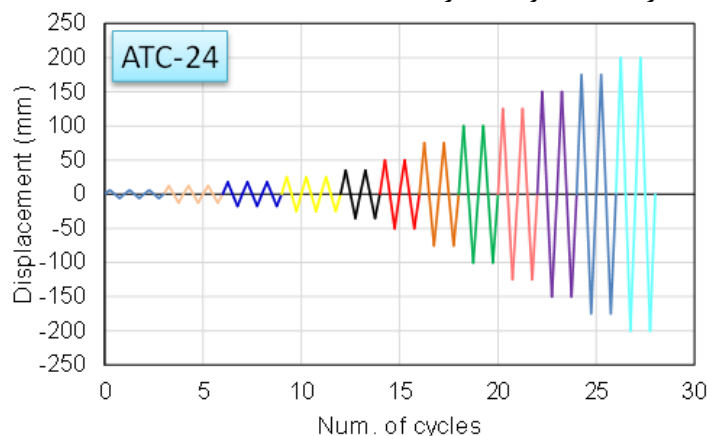
شکل ۴: مقایسه منحنی بار-جابجایی مدل آزمایشگاهی و عددی.

#### ۴- مطالعه ی پارامتریک

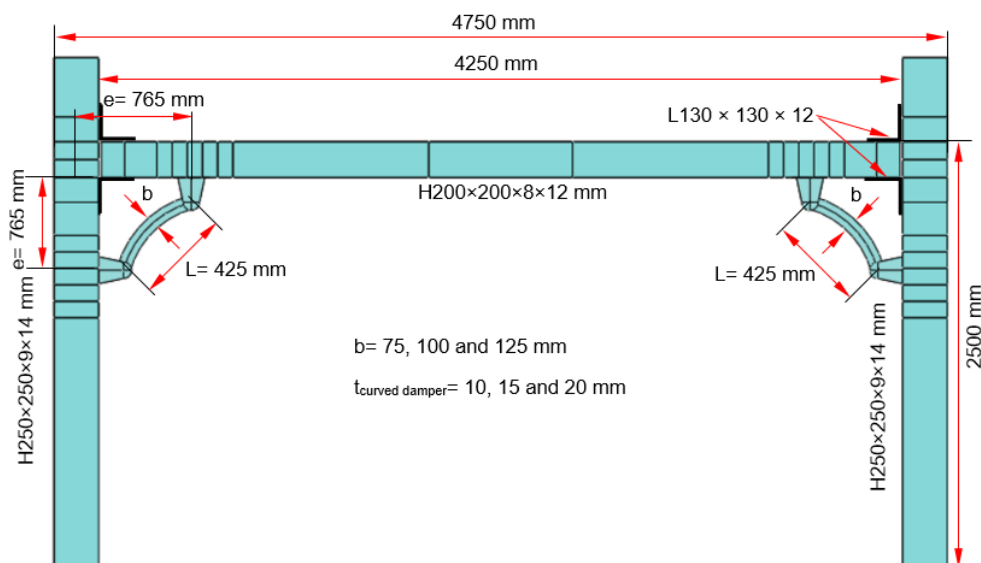
علت اصلی استفاده از دستگاه های استهلاک انرژی غیرفعال در سازه ها این است که تعداد شکل پذیری های مخرب را در اعضای سازه محدود می کنند. در میان دستگاه های استهلاک انرژی غیرفعال مختلف موجود، میراگرهای فولادی هیسترتیک بعنوان یکی از موثرترین و اقتصادی ترین مکانیزم ها برای استهلاک انرژی زلزله ی وارده هستند که از طریق شکل پذیری غیرالاستیک مصالح فولادی بدست می آید. در واقع تحقیق حاضر یک قاب فولادی خمشی را با وجود میراگرهای هیسترتیک غیرفعال بررسی کرده است تا عملکرد لرزه ای سازه را بهبود بخشد و بعد از زلزله در صورت خرابی هریک از اعضای آن به راحتی قابل تعمیر بوده و بعنوان المان فیوز عمل کند. مشخصات هندسی و مکانیکی سیستم پیشنهاد شده به صورت عددی توسط روش اجزای محدود بررسی شده است. پارامترهای مختلف این تحقیق شامل عرض میراگر (۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ میلی متر)، ضخامت میراگر (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی متر) و نوع فولاد میراگر (SN400YB با تنش تسلیم برابر با ۲۹۳ مگاپاسکال و LY160 با تنش تسلیم برابر با ۱۶۰ مگاپاسکال) می باشد. مطابق جدول ۱، نوع ورق فولادی مورد استفاده در میراگر در مدل های مختلف از نوع SN400YB و LY160 در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم پایین و مشخصات منحصر به



فرد فولاد LY160 از مهمترین دلایل استفاده از آن برای میراگرهای تحقیق حاضر می‌باشد. اندازه‌ی نبشی بالا و نشیمن اتصال برابر با  $12 \times 130 \times 130$  میلی‌متر در نظر گرفته شد. پروتکل بارگذاری مطابق با ATC-24 [۳۱] بر روی مدل‌های مورد بررسی همانند شکل ۵ اعمال شده است. بنابراین مطابق جدول ۱، در مجموع ۳۱ مدل اجزای محدود شبیه‌سازی شده و پاسخ آنها در برابر بارگذاری چرخه‌ای ارزیابی شده است. قاب مورد بررسی و موقعیت میراگر در محل اتصال تیر به ستون در شکل ۶ نشان داده شده است. این میراگر بین دو انتهای قاب قرار گرفته است. طول و ارتفاع قاب به ترتیب  $4/75$  و  $2/5$  متر است.



شکل ۵: پروتکل بارگذاری چرخه‌ای ATC-24 [۳۱].



شکل ۶: مشخصات هندسی قاب‌های مورد مطالعه.

جدول ۱: پارامترهای مدل‌های تحلیل

Mode	Damper steel type	(mm) Damper thickness	(mm) Damper width	Contraction
1	-	-	-	No Damper
2			75	SN400YB t:10 b:75
3		10	100	SN400YB t:10 b:100
4			125	SN400YB t:10 b:125
5			75	SN400YB t:15 b:75
6	SN400YB	15	100	SN400YB t:15 b:100
7			125	SN400YB t:15 b:125
8			75	SN400YB t:20 b:75
9		20	100	SN400YB t:20 b:100
10			125	SN400YB t:20 b:125



11		75	SN400YB t:25 b:75
12	25	100	SN400YB t:25 b:100
13		125	SN400YB t:25 b:125
14		75	SN400YB t:30 b:75
15	30	100	SN400YB t:30 b:100
16		125	SN400YB t:30 b:125
17		75	LY160 t:10 b:75
18	10	100	LY160 t:10 b:100
19		125	LY160 t:10 b:125
20		75	LY160 t:15 b:75
21	15	100	LY160 t:15 b:100
22		125	LY160 t:15 b:125
23		75	LY160 t:20 b:75
24	Steel LY160	100	LY160 t:20 b:100
25		125	LY160 t:20 b:125
26		75	LY160 t:25 b:75
27	25	100	LY160 t:25 b:100
28		125	LY160 t:25 b:125
29		75	LY160 t:30 b:75
30	30	100	LY160 t:30 b:100
31		125	LY160 t:30 b:125

## ۵- نتایج و بحث

مدل‌های پارامتریک با ابعاد و مشخصات مصالحی مختلف تحت پروتکل بارگذاری چرخه‌ای ATC-24 [۳۱] تحلیل شدند. نتایج بدست آمده از مطالعه‌ی پارامتریک مدل‌های اجزای محدود تحت بارگذاری چرخه‌ای در جدول ۲ لیست شده است. از یک منحنی دوخطی ایده‌آل به منظور محاسبه‌ی ظرفیت تسلیم مدل‌های پارامتری استفاده شد. بنابراین طبق آیین‌نامه FEMA-356 [۳۲] منحنی پوش از منحنی چرخه‌ای استخراج شد. همچنین پارامتر شکل‌پذیری نیز در این تحقیق بررسی شده است، که از نسبت جابجایی نهایی به جابجایی تسلیم مطابق فرمول زیر بدست می‌آید:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

که در آن،  $\mu$  پارامتر شکل‌پذیری و  $\Delta_u$  و  $\Delta_y$  به ترتیب جابجایی نهایی و تسلیم می‌باشد.

مجموع انرژی جذب شده ( $E_D$ ) یکی دیگر از پارامترها بود که از نمودارهای چرخه‌ای بار-جابجایی استخراج شد. برای محاسبه‌ی انرژی جذب شده، از مساحت بسته‌ی بین حلقه‌های هیستریزاس استفاده شد و در نهایت کل انرژی جذب شده از مجموع مساحت بسته‌ی همه‌ی حلقه‌ها بدست آمد [۳۳-۳۶]. پارامترهای اشاره شده برای همه‌ی مدل‌های پارامتریک محاسبه شد و در جدول ۲ لیست شد. بعد از شبیه‌سازی و تحلیل قاب‌های مورد مطالعه با استفاده از روش اجزای محدود، نتایج به شکل توزیع تنش و منحنی‌های بار-جابجایی نشان داده شدند. این باید مورد توجه باشد که پس از بدست آوردن خروجی‌ها، مدهای بهینه بر اساس سطح منحنی هیستریزاس و جذب انرژی آن انتخاب شد.

جدول ۱: نتایج مدل‌های مطالعه‌ی پارامتری

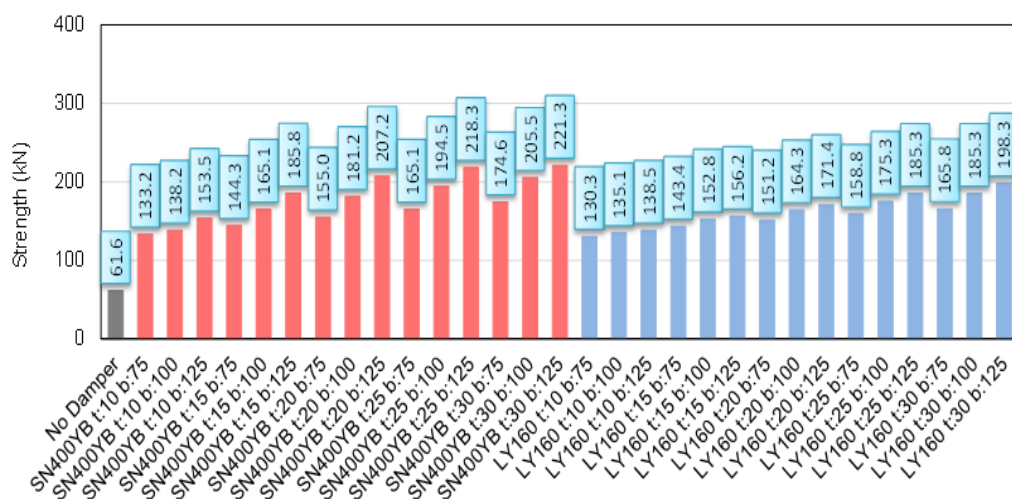
Mode	Contraction	$K_{ini}$ (kN/mm)	$P_y$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$E_{Tot}$ (kN.m)	$\mu$ ( $\Delta_u/\Delta_y$ )
1	No Damper	1.2	53.6	61.6	65.0	2.8
2	SN400YB t:10 b:75	2.3	91.8	133.2	102.0	3.1
3	SN400YB t:10 b:100	2.6	110.6	138.2	101.7	2.9
4	SN400YB t:10 b:125	2.8	124.5	153.5	107.0	2.8
5	SN400YB t:15 b:75	2.4	101.3	144.3	109.8	3.0
6	SN400YB t:15 b:100	2.7	119.0	165.1	124.5	2.9
7	SN400YB t:15 b:125	2.9	146.8	185.8	117.0	2.5
8	SN400YB t:20 b:75	2.6	110.9	155.0	115.6	2.9

9	SN400YB t:20 b:100	2.9	134.3	181.2	129.8	2.9
10	SN400YB t:20 b:125	3.0	168.9	207.2	134.4	2.3
11	SN400YB t:25 b:75	2.7	117.2	165.1	120.1	2.8
12	SN400YB t:25 b:100	3.0	156.2	194.5	131.8	2.4
13	SN400YB t:25 b:125	3.1	188.6	218.3	139.7	2.1
14	SN400YB t:30 b:75	2.7	128.2	174.6	123.2	2.7
15	SN400YB t:30 b:100	3.0	175.0	205.5	133.6	2.2
16	SN400YB t:30 b:125	3.2	195.7	221.3	144.4	2.0
17	LY160 t:10 b:75	2.2	85.4	130.3	236.3	4.5
18	LY160 t:10 b:100	2.6	99.6	135.1	237.7	4.5
19	LY160 t:10 b:125	2.8	107.0	138.5	246.0	4.5
20	LY160 t:15 b:75	2.4	94.0	143.4	260.0	4.5
21	LY160 t:15 b:100	2.7	105.8	152.8	288.9	4.5
22	LY160 t:15 b:125	2.9	123.1	156.2	273.1	4.2
23	LY160 t:20 b:75	2.6	98.0	151.2	273.9	4.6
24	LY160 t:20 b:100	2.9	114.8	164.3	308.9	4.5
25	LY160 t:20 b:125	3.0	138.2	171.4	330.1	3.9
26	LY160 t:25 b:75	2.7	103.1	158.8	286.5	4.5
27	LY160 t:25 b:100	3.0	123.5	175.3	326.5	4.2
28	LY160 t:25 b:125	3.1	146.2	185.3	350.5	3.7
29	LY160 t:30 b:75	2.7	106.9	165.8	297.8	4.5
30	LY160 t:30 b:100	3.0	133.1	185.3	342.3	4.0
31	LY160 t:30 b:125	3.2	151.0	198.3	368.6	3.7

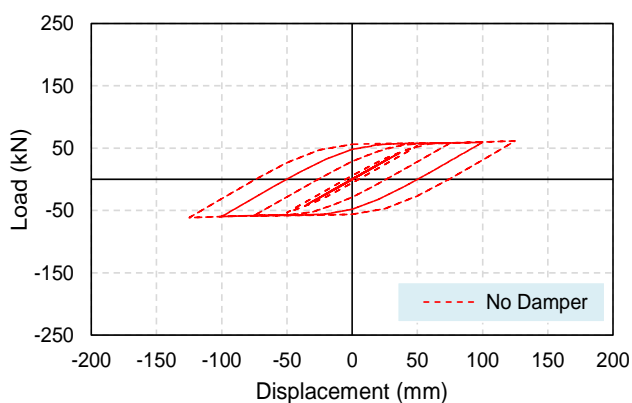
#### ۵-۱- منحنی هیستریزیس بار - جابجایی

بعد از تحلیل مدل‌های پارامتریک تحت بارگذاری چرخه‌ای، مقادیر مقاومت قاب‌ها مطابق جدول ۲ و شکل ۷ با یکدیگر مقایسه شدند. همانطور که دیده می‌شود، استفاده از میراگرهای منحنی فولادی در قاب‌های مورد بررسی باعث افزایش مقاومت قاب بین ۱۶۱ درصد تا ۱۸۶ درصد نسبت به قاب بدون میراگر می‌شود. همچنین مقاومت قاب‌ها وابسته به مشخصه‌های هندسی و نوع میراگر منحنی فولادی می‌شود. به عبارت دیگر، شکل‌پذیری غیرخطی میراگر منحنی منجر به افزایش جذب انرژی قاب‌ها می‌شود و بنابراین قاب‌ها می‌توانند مقاومت بیشتری نشان دهند.

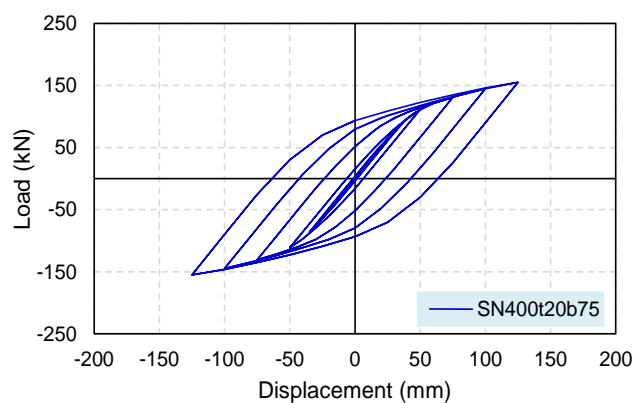
منحنی هیستریزیس یکی از معیارهای ارزیابی اصلی برای عملکرد لرزه‌ای سیستم سازه است. حلقه‌های هیستریزیس نشان دهنده‌ی مشخصه‌های مهمی شامل مقاومت، سختی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و رفتار اتصال تیر به ستون مدل‌های اجزای محدود می‌باشند. برای مثال، منحنی‌های هیستریزیس بار-جابجایی برخی مدل‌ها در شکل ۸ و منحنی پوش نمودارهای هیستریزیس تمامی مدل‌ها با تاکید بر ضخامت میراگر و نوع فولاد آن در مقایسه با قاب بدون میراگر در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین کانتور توزیع تنش فون میزس برخی از مدل‌ها بعنوان مثال در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۷: مقایسه‌ی مقاومت قاب‌های شبیه‌سازی شده.

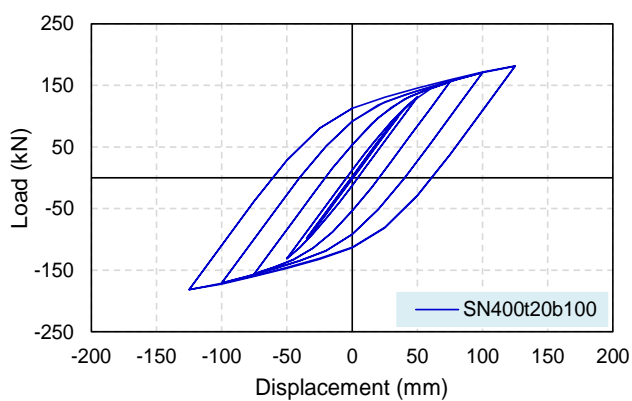


(a) No Damper

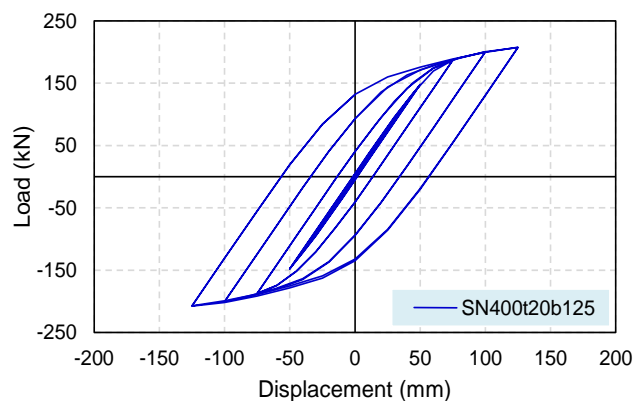


(b) SN400YB t:20 b:75

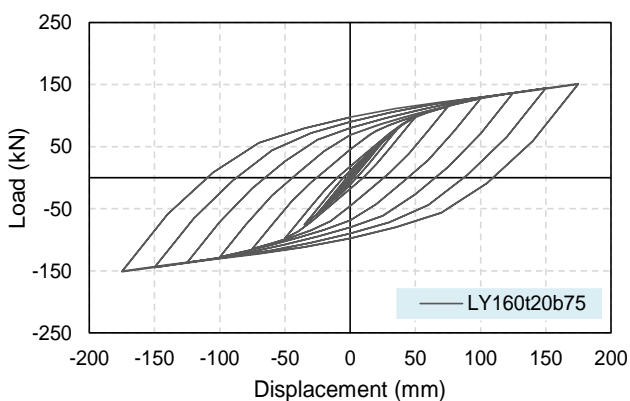
شکل ۸: منحنی هیستریزس مدل‌های اجزای محدود مطالعه پارامتریک



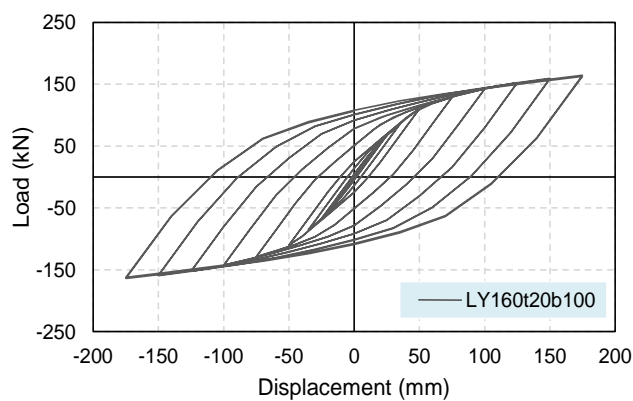
(c) SN400YB t:20 b:100



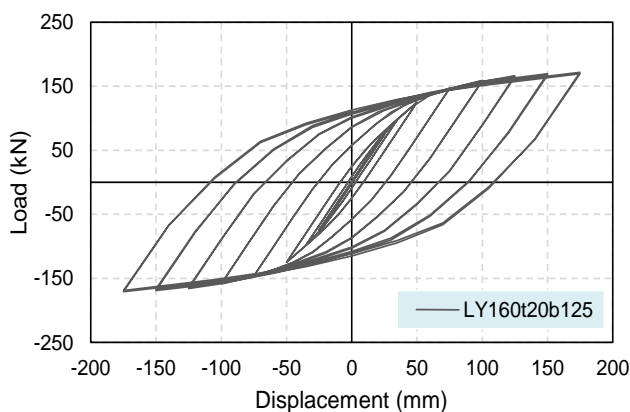
(d) SN400YB t:20 b:125



(e) LY160 t:20 b:75

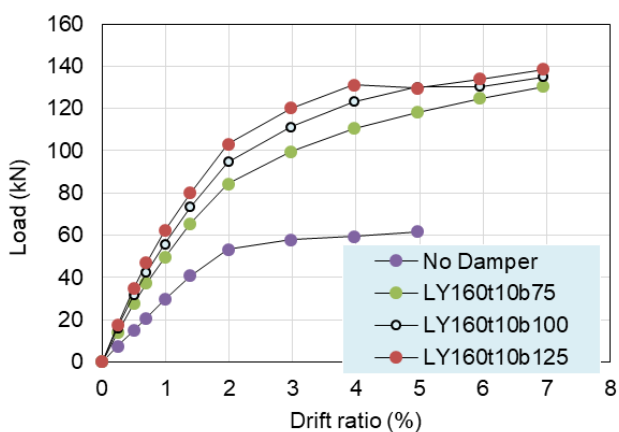


(f) LY160 t:20 b:100

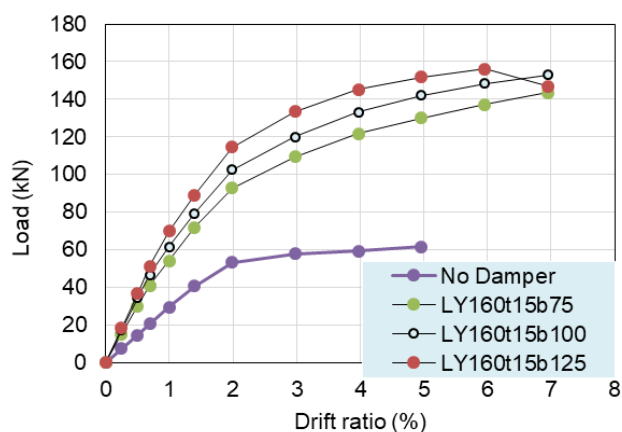


(g) LY160 t:20 b:125

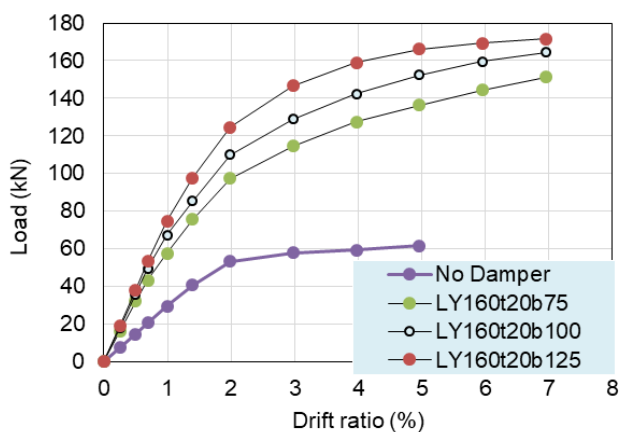
ادامه شکل ۸: منحنی هیستریزیس مدل‌های اجزای محدود مطالعه پارامتریک.



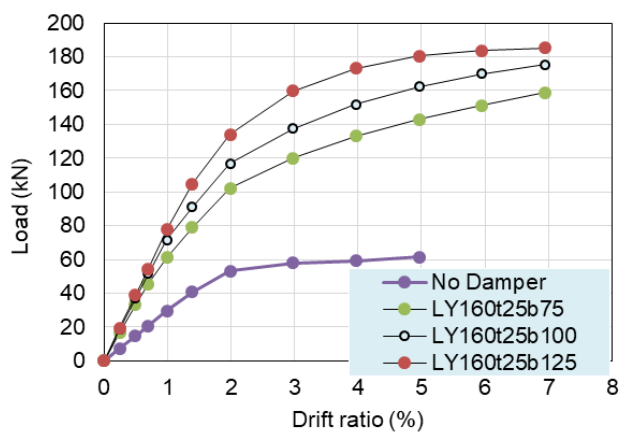
(a)



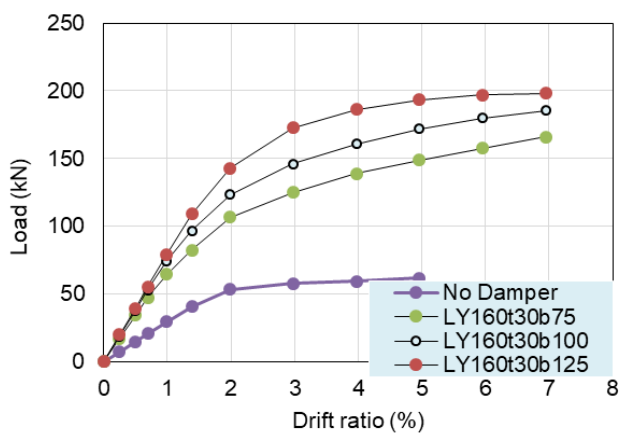
(b)



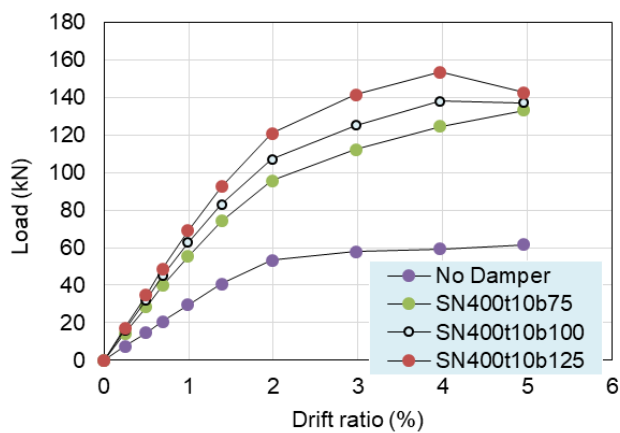
(c)



(d)

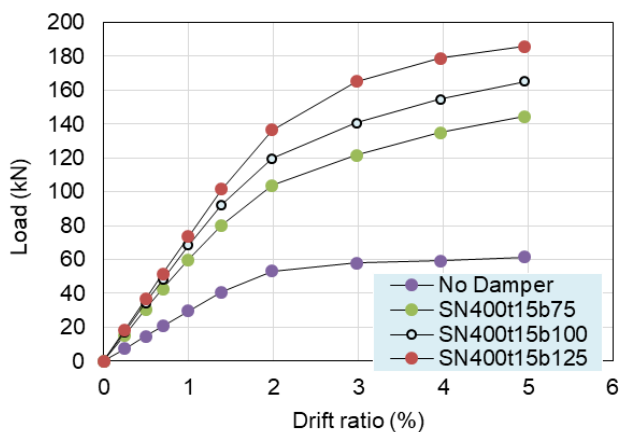


(e)

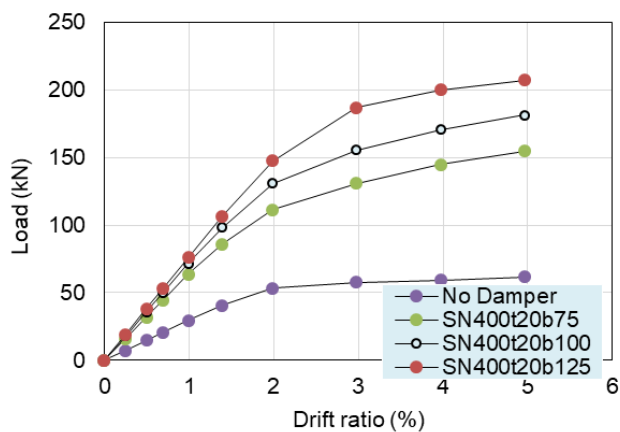


(f)

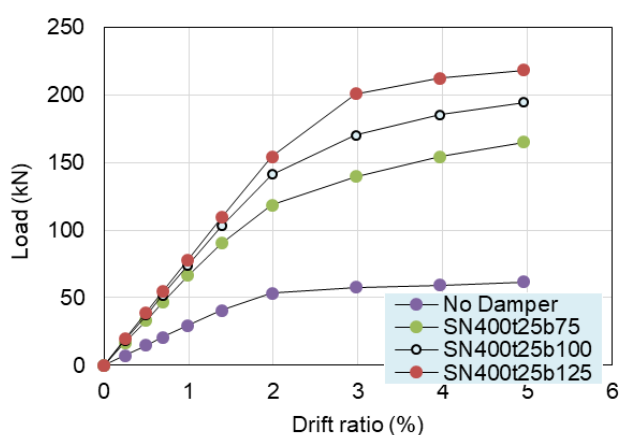
شکل ۹: منحنی پوش نمودارهای هیستریزیس مدل‌های اجزای محدود مطالعه پارامتریک



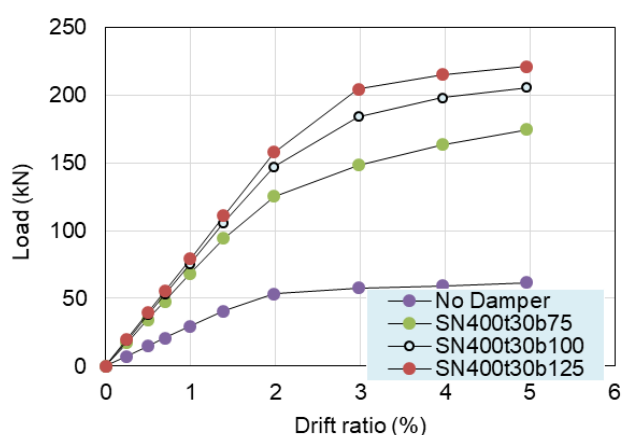
(g)



(h)



(i)

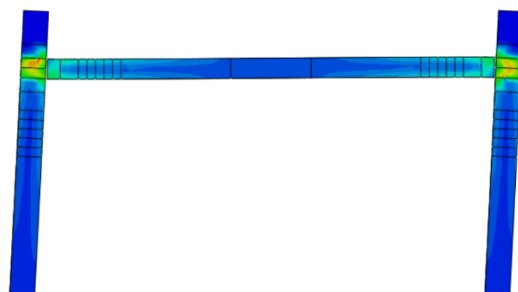
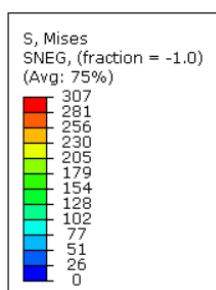


(j)

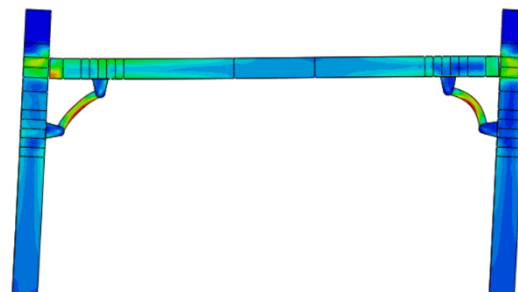
ادامه شکل ۹. منحنی پوش نمودارهای هیستریزس مدل‌های اجزای محدود مطالعه پارامتریک.

## ۵-۲- سختی اولیه

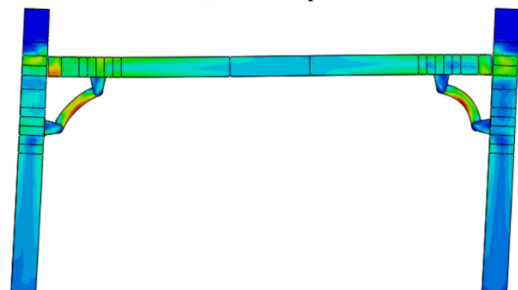
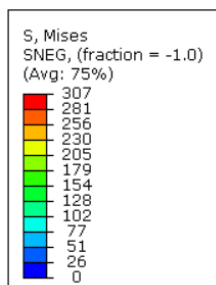
سختی اولیه یکی از اساسی‌ترین پارامترها در طراحی سازه‌ها است. مطابق جدول ۲، نمودار سختی اولیه در مقابل ضخامت میراگر منحنی برای مدل‌های پارامتریک تحقیق مطابق شکل ۱۱ رسم شده است. بر اساس نتایج، سختی اولیه به مشخصات هندسی میراگر منحنی وابسته نیست و فقط با عرض (b) و ضخامت (t) میراگرها تغییر می‌کند. از این رو، با افزایش عرض میراگر منحنی، سختی اولیه نیز افزایش می‌یابد چنانچه با افزایش عرض میراگر از ۷۵ میلی‌متر تا ۱۰۰ میلی‌متر، سختی اولیه در حدود ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عرض میراگر از ۷۵ میلی‌متر تا ۱۲۵ میلی‌متر، مقدار سختی اولیه در حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت میراگر منحنی، سختی اولیه‌ی سیستم قاب فولادی خمشی نیمه صلب مجهز به میراگر منحنی افزایش می‌یابد.



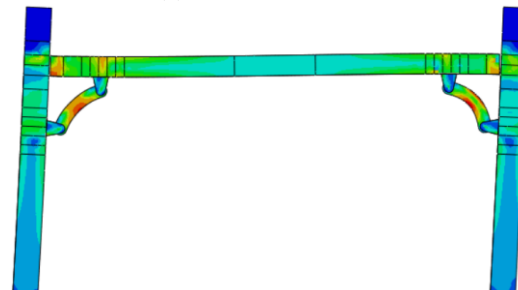
(a) No Damper



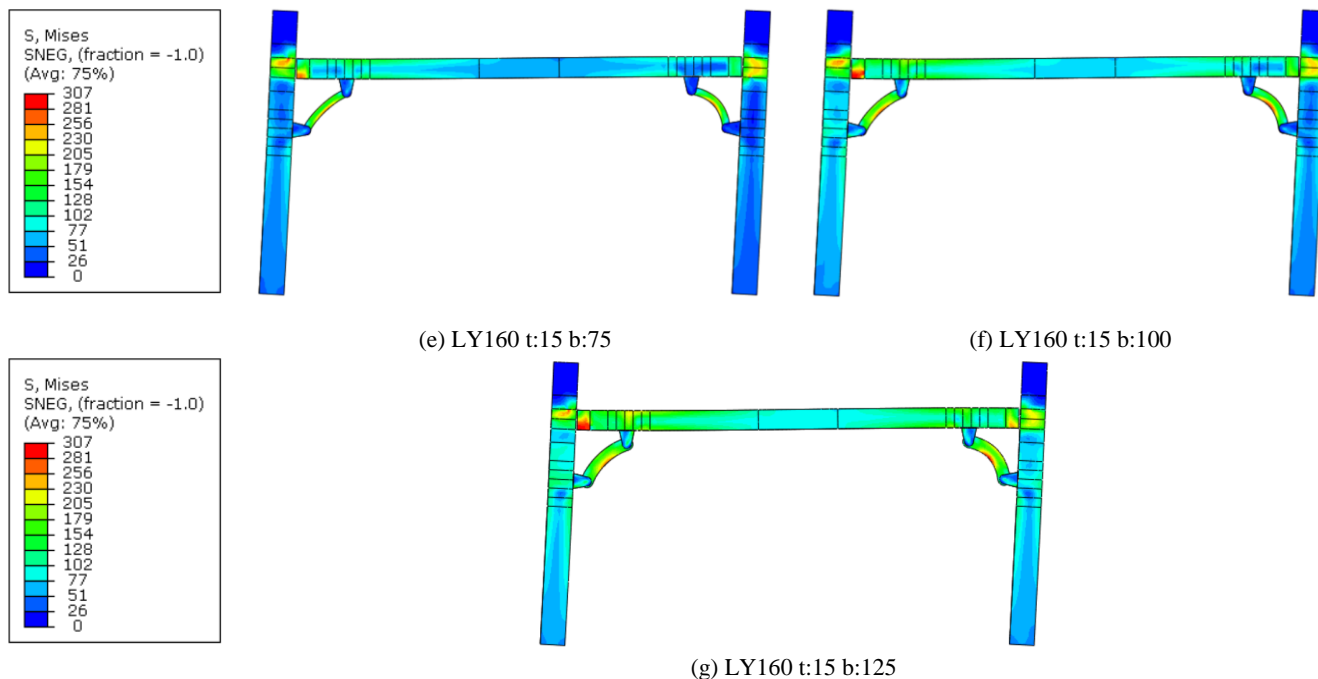
(b) SN400YB t:15 b:75



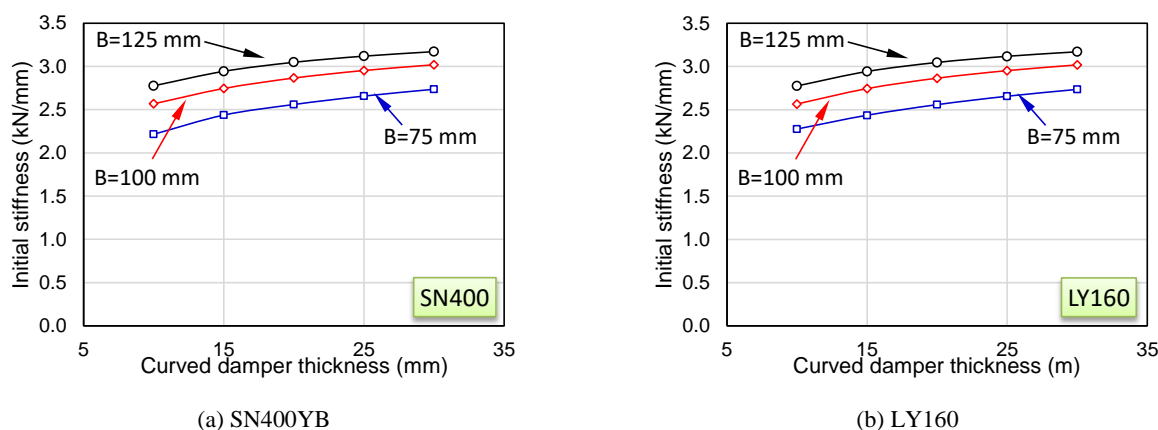
(c) SN400YB t:15 b:100



(d) SN400YB t:15 b:125



شکل ۱۰: کانتور تنش فون میزس مدل‌های عددی.



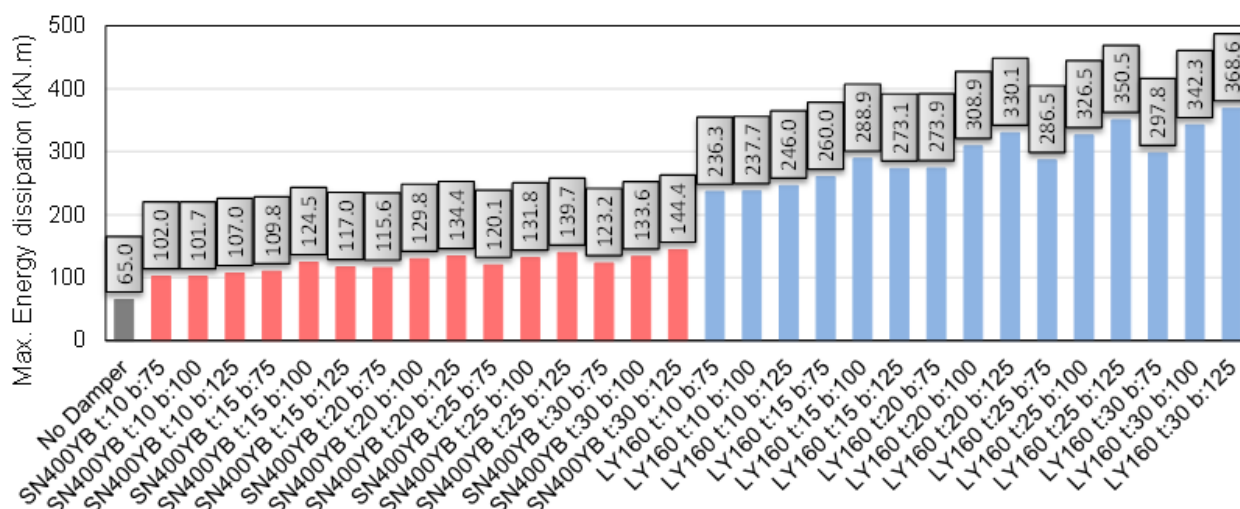
شکل ۱۱: مقایسه‌ی سختی اولیه در مقابل ضخامت میراگر منحنی.

### ۵-۳- انرژی جذب شده کل

اضافه کردن میراگر منحنی شکل فولادی به قاب‌ها و انتقال نیرو به آن، منجر به تسلیم‌شدگی در زمان زلزله می‌شود. بنابراین، مقدار زیادی از انرژی وارده به سازه تلف می‌شود. یکی از دلایل برای استفاده از میراگر این است که طراحان معمولاً تلاش می‌کنند تا میراگر به جای سازه خراب شود در نتیجه بعد از زلزله می‌تواند تعویض شود. مقادیر جذب انرژی قاب برای هر یک از آنها در جدول ۲ و شکل ۱۲ مقایسه شده است. استفاده از میراگرهای منحنی فولادی باعث افزایش انرژی جذب شده‌ی قاب در مقایسه با قاب بدون میراگر شده است؛ بطوریکه انرژی جذب شده‌ی قاب‌های فولادی مجهز به میراگرهای فولادی SN400YB در حدود ۳۶ درصد تا ۵۵ درصد وابسته به ضخامت میراگر و عرض میراگر در مقایسه با قاب بدون میراگر افزایش می‌یابد. انرژی جذب شده‌ی قاب‌های فولادی مجهز به میراگرهای فولادی LY160 در حدود ۷۲ درصد تا ۸۲ درصد وابسته به ضخامت میراگر و عرض میراگر در مقایسه با قاب بدون میراگر افزایش می‌یابد. همچنین انرژی جذب شده‌ی قاب‌های فولادی مجهز به میراگر منحنی شکل فولادی LY160 در مقایسه با میراگرهای منحنی SN400YB به طور



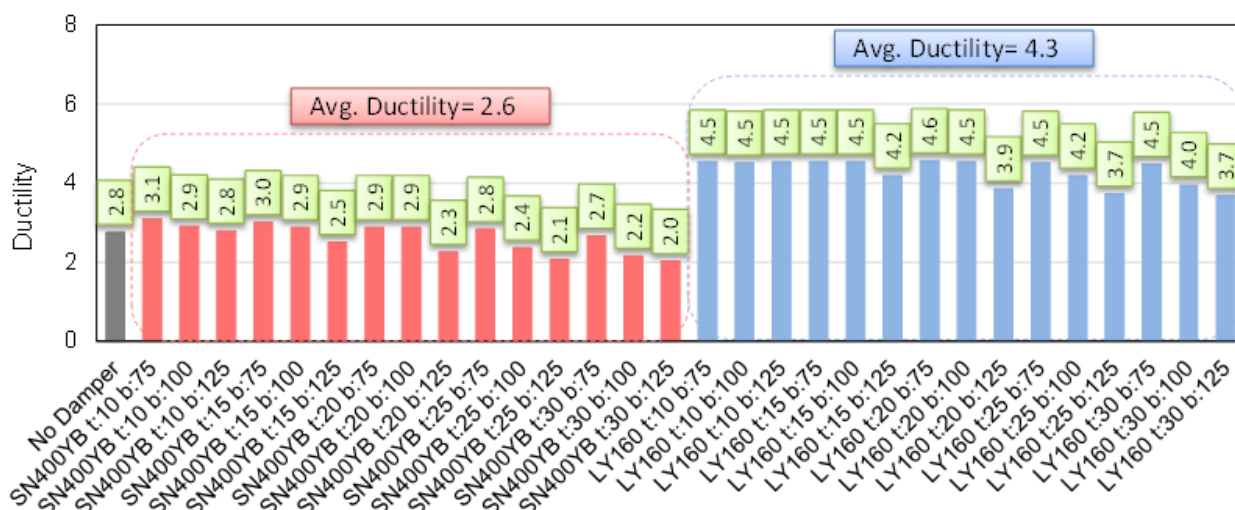
میانگین ۵۸ درصد افزایش یافت. همچنین مفصل پلاستیک به جای اینکه در محل اتصال ایجاد شود در میراگر منحنی فولادی شکل گرفت.



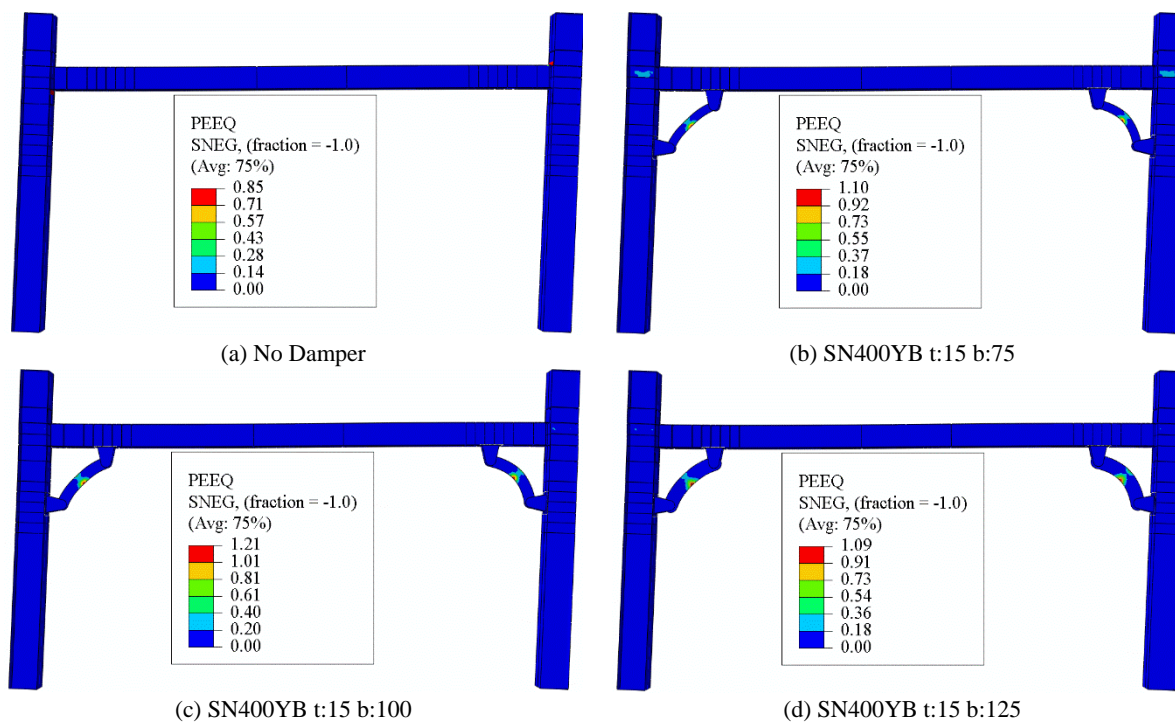
شکل ۱۲: مقایسه‌ی ماکزیمم انرژی جذب شده‌ی مدل‌های عددی.

#### ۵-۴- شکل پذیری

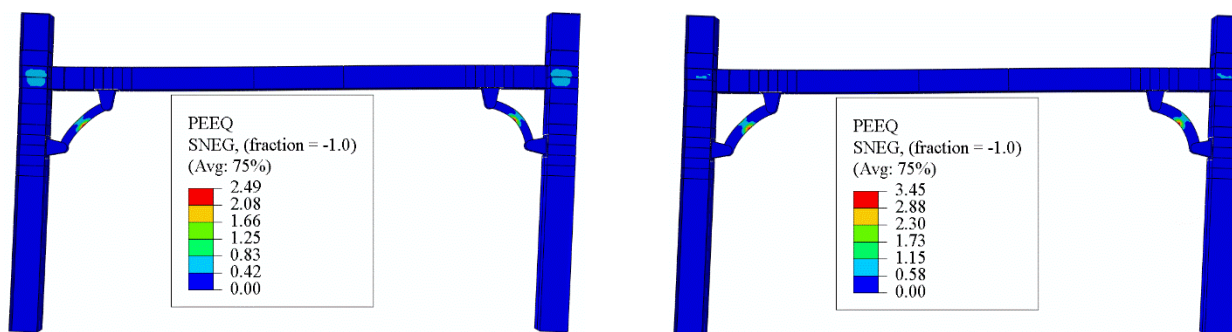
در بررسی عملکرد، تحلیل و طراحی سازه، پارامتر شکل‌پذیری ( $\mu$ ) استفاده می‌شود. پارامتر شکل‌پذیری بدست آمده از نتایج مدل‌های عددی در جدول ۲ لیست شده همچنین در صورت نمودار میله‌ای در شکل ۱۳ رسم شده است. در مدل‌های عددی، مقدار شکل‌پذیری قاب فولادی خمشی نیمه صلب بدون میراگر، قاب فولادی خمشی نیمه صلب مجهز به میراگر منحنی شکل فولادی SN400YB و قاب فولادی خمشی نیمه صلب مجهز به میراگر منحنی شکل فولادی LY160 به ترتیب برابر با ۲/۸، ۲/۶ و ۴/۳ می‌باشد. همانطور که شکل ۱۲ نشان می‌دهد، افزایش ضخامت میراگر منحنی، مقدار شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد. مطابق جدول ۲ و مقایسه‌ی نتایج واضح است که میانگین پارامتر شکل‌پذیری قاب‌های خمشی فولاد نیمه صلب مجهز به میراگر ساخته شده از فولاد LY160 در مقایسه با قاب فولادی بدون میراگر ۵۳ درصد افزایش یافته است. همچنین مقایسه‌ی نتایج نشان داد که میانگین پارامتر شکل‌پذیری قاب‌های خمشی فولاد نیمه صلب مجهز به میراگر ساخته شده از فولاد LY160 در مقایسه با قاب خمشی فولاد نیمه صلب مجهز به میراگر ساخته شده از فولاد SN400YB به مقدار ۶۵ درصد افزایش یافت. بنابراین مقایسه‌ی نتایج بیانگر این است که میانگین پارامتر شکل‌پذیری قاب خمشی فولاد نیمه صلب مجهز به میراگر ساخته شده از فولاد SN400YB در مقایسه با قاب فولادی بدون میراگر ۷/۷ درصد کاهش یافته است. همچنین کانتور توزیع کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) برخی از مدل‌ها بعنوان مثال در شکل ۱۴ ارائه شده است.



شکل ۱۳: مقایسه‌ی پارامتر شکل‌پذیری مدل‌های عددی.

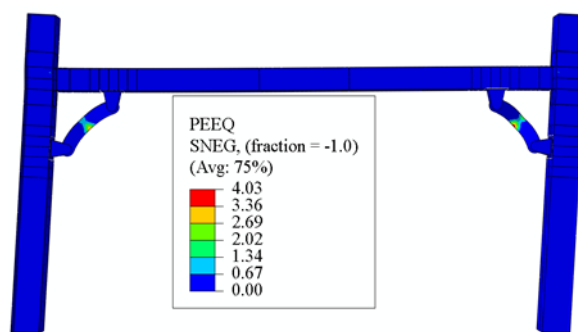


شکل ۱۴: کانطور کرنش پلاستیک معادل مدل‌های عددی.



(e) LY160 t:15 b:75

(f) LY160 t:15 b:100



(g) LY160 t:15 b:125

ادامه شکل ۱۴: کانتور کرنش پلاستیک معادل مدل‌های عددی.

## ۶- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، عملکرد میراگرهای منحنی با مقاومت تسلیم پایین در قاب‌های خمشی فولادی نیمه صلب بررسی شده است. این میراگرها غیرفعال بوده و در محل اتصال تیر به ستون نصب می‌شوند. پارامترهای مختلف این تحقیق شامل عرض میراگر (۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ میلی‌متر)، ضخامت میراگر (۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر) و نوع فولاد میراگر (SN400YB) با تنش تسلیم برابر با ۲۹۳ مگاپاسکال و LY160 با تنش تسلیم برابر با ۱۶۰ مگاپاسکال) می‌باشد. ارزیابی مدل‌های قاب‌های خمشی فولادی نیمه صلب با استفاده از روش اجزای محدود توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است. برای اعتبارسنجی، یک قاب خمشی فولادی نیمه صلب مجهز به میراگر منحنی مدلسازی شد که بصورت آزمایشگاهی تست و در تحقیقات آزمایشگاهی گذشته گزارش شده بود. مقایسه‌ی نتایج مدلسازی با آزمایشگاهی، تطابق خوبی را نشان دادند. مهمترین نتایج در ادامه ارائه شده است.

۱- استفاده از میراگرهای فولادی منحنی در قاب‌های مورد بررسی باعث افزایش مقاومت قاب بین ۱۶۱ درصد تا ۱۸۶ درصد نسبت به قاب بدون میراگر می‌شود. مدل SN400YB t:30 b:125 بیشترین مقدار بار تسلیم و مقاومت را داشت. همچنین، مقاومت قاب به مشخصه‌های هندسی و نوع فولاد میراگر منحنی وابسته است.

۲- انرژی جذب شده‌ی قاب‌های فولادی مجهز به میراگرهای فولادی SN400YB در حدود ۳۶ درصد تا ۵۵ درصد وابسته به ضخامت میراگر و عرض میراگر در مقایسه با قاب بدون میراگر افزایش می‌یابد. انرژی جذب شده‌ی قاب‌های فولادی مجهز به میراگرهای فولادی LY160 در حدود ۷۲ درصد تا ۸۲ درصد وابسته به ضخامت میراگر و عرض میراگر در مقایسه با قاب بدون میراگر افزایش می‌یابد. همچنین انرژی جذب شده‌ی قاب‌های فولادی مجهز به میراگر منحنی شکل فولادی LY160 در مقایسه با میراگرهای منحنی SN400YB به طور میانگین ۵۸ درصد افزایش یافت. مدل LY160 t:30 b:125 بیشترین مقدار انرژی جذب شده‌ی کل را داشت.

۳- با افزایش عرض میراگر از ۷۵ میلی‌متر تا ۱۰۰ میلی‌متر، سختی اولیه در حدود ۱۲ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عرض میراگر از ۷۵ میلی‌متر تا ۱۲۵ میلی‌متر، مقدار سختی اولیه در حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. مدل SN400YB t:30 b:125

بیشترین مقدار بار تسلیم و مقاومت را داشت. مدل‌های LY160 t:30 b:125 و SN400YB t:30 b:125 بیشترین مقدار سختی اولیه را داشتند.

۴- مقدار شکل‌پذیری قاب فولادی خمشی نیمه صلب بدون میراگر، قاب فولادی خمشی نیمه صلب مجهز به میراگر فولادی SN400YB و قاب فولادی خمشی نیمه صلب مجهز به میراگر منحنی شکل فولادی LY160 به ترتیب برابر با ۲/۸، ۲/۶ و ۴/۳ می‌باشد. بیشترین مقدار شکل‌پذیری در مدل LY160 t:20 b:75 رخ داد.

۵- به طور کلی می‌توان گفت اگرچه مدل SN400YB t:30 b:125 بیشترین مقدار مقاومت و شکل‌پذیری را دارد ولی انرژی مصرفی کل و شکل‌پذیری آن بسیار کاهش یافته است. ولی مدل LY160 t:30 b:125 بهینه‌ترین مدل می‌باشد زیرا دارای بیشترین مقدار جذب انرژی کل و سختی اولیه می‌باشد و شکل‌پذیری آن مقدار قابل توجه یعنی ۳/۷ می‌باشد.

۶- با تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه میراگر منحنی شکل فولادی از شکل‌گیری آن در محل اتصال تیر به ستون جلوگیری می‌شود و در نتیجه اصل اتصال قوی و اعضای ضعیف و دیگری اصل ستون قوی و تیر ضعیف فراهم شود.

۷- میراگرهای پیشنهادی چون سختی اولیه و مقاومت بالایی ندارند بنابراین در زلزله‌های با شدت کم نیز عملکرد خوبی خواهند داشت. همچنین بعلاوه اینک عدم نیاز به تقاضای برش پایه‌ی زیاد، نیاز به بزرگ کردن فونداسیون و بالا بردن وزن سازه و یا استفاده از شمع‌ها و در نتیجه بالا بردن هزینه نیست.

## مراجع

- [1] Girão Coelho, A. M., Silva, L. S. Da, and Bijlaard, F. S. K. (2006). "Ductility analysis of bolted extended end plate beam-to-column connections in the framework of the component method." *Steel and Composite Structures*, Techno Press, 6(1), 33–53. <https://doi.org/10.12989/scs.2006.6.1.033>
- [2] Azandariani, M.G., Gholhaki, M., Kafi, M.A. and Zirakian, T. (2020d). "Study of Effects of Beam-Column Connection and Column Rigidity on the Performance of SPSW System." *Journal of Building Engineering*, 33, p.101821. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101821>
- [3] Ma, H., Jiang, W., and Cho, C. (2011). "Experimental study on two types of new beam-to-column connections." *Steel and Composite Structures*, Techno Press, 11(4), 291–305. <https://doi.org/10.12989/scs.2011.11.4.291>
- [4] Mele, E., Calado, L., and De Luca, A. (2001). "Cyclic behaviour of beam-to-column welded connections." *Steel and Composite Structures*, Techno-Press, 1(3), 269–282. <https://doi.org/10.12989/scs.2001.1.3.269>
- [5] Rezaifar, O., Nazari, M., and Gholhaki, M. (2017). "Experimental study of rigid beam-to-box column connections with types of internal/external stiffeners." *Steel and Composite Structures*, Techno Press, 25(5), 535–544. <https://doi.org/10.12989/scs.2017.25.5.535>
- [6] Hsu, H. L., and Li, Z. C. (2015). "Seismic performance of steel frames with controlled buckling mechanisms in knee braces." *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier Ltd, 107, 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.010>
- [7] Dubina, D., and Stratan, A. (2002). "Behaviour of welded connections of moment resisting frames beam-to-column joints." *Engineering Structures*, Elsevier BV, 24(11), 1431–1440. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00091-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00091-3)
- [8] Pucinotti, R. (2006). "Cyclic mechanical model of semirigid top and seat and double web angle connections." *Steel and Composite Structures*, Techno Press, 6(2), 139–157. <https://doi.org/10.12989/scs.2006.6.2.139>
- [9] Shojaeifar, H., Maleki, A., and Lotfollahi-Yaghin, M. A. (2020). "Performance evaluation of curved-TADAS damper on seismic response of moment resisting steel frame." *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics, Materials and Energy Research Center*, 33(1), 55–67. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.01a.07>
- [10] Lor, H. A., Izadina, M., and Memarzadeh, P. (2019). "Experimental evaluation of steel connections with horizontal slit dampers." *Steel and Composite Structures*, Techno Press, 32(1), 79–90. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.32.1.079>
- [11] Mohammadi, M., Kafi, M. A., Kheyroddin, A., and Ronagh, H. R. (2019). "Experimental and numerical investigation of an innovative buckling-restrained fuse under cyclic loading." *Structures*, Elsevier BV, 22, 186–199. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.07.014>
- [12] Mohammadi, M., Kafi, M. A., Kheyroddin, A., and Ronagh, H. R. (2020). "Performance of innovative composite buckling-restrained fuse for concentrically braced frames under cyclic loading." *Steel and Composite Structures*, Techno-Press, 36(2), 163–177. <https://doi.org/10.12989/SCS.2020.36.2.163>
- [13] Xu, L., Li, Z., and Lv, Y. (2014). "Nonlinear seismic damage control of steel frame-steel plate shear wall structures using MR dampers." *Earthquake and Structures*, Techno Press, 7(6), 937–953. <https://doi.org/10.12989/eas.2014.7.6.937>

- [14] El-Bahey, S., and Bruneau, M. (2011). "Buckling restrained braces as structural fuses for the seismic retrofit of reinforced concrete bridge bents." *Engineering Structures*, Elsevier, 33(3), 1052–1061. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.027>
- [15] Roeder, C. W. C., and Popov, E. E. P. (1977). "Inelastic behavior of eccentrically braced steel frames under cyclic loadings." NASA STI/Recon Technical Report N, 78(August), 20375.
- [16] Chen, Y.-T., and Chai, Y. H. (2011). "Effects of brace stiffness on performance of structures with supplemental Maxwell model-based brace-damper systems." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley and Sons Ltd, 40(1), 75–92. <https://doi.org/10.1002/eqe.1023>
- [17] Benavent-Climent, A. (2010). "A brace-type seismic damper based on yielding the walls of hollow structural sections." *Engineering Structures*, Elsevier, 32(4), 1113–1122. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.12.037>
- [18] Kang, J. Do, and Tagawa, H. (2013). "Seismic performance of steel structures with seesaw energy dissipation system using fluid viscous dampers." *Engineering Structures*, Elsevier, 56, 431–442. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.015>
- [19] Piedrafita, D., Cahis, X., Simon, E., and Comas, J. (2013). "A new modular buckling restrained brace for seismic resistant buildings." *Engineering Structures*, Elsevier, 56, 1967–1975. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.013>
- [20] Hsu, H. L., and Halim, H. (2017). "Improving seismic performance of framed structures with steel curved dampers." *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, 130, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.063>
- [21] Karimian, A., Armaghani, A., and Behraves, A. (2019). "Performance of Low-yield Strength Plates in Beam-column Connections against Progressive Collapse." *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(1), pp. 335-345. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0653-y>
- [22] ABAQUS-6.12-1. (2012). standard user's manual. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.
- [23] Shojaeifar, H., Farzam, M. (2014). "Investigation of the Effect of Bond-Slip on Cracking of RC Beams Utilizing Lattice Models". *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 44.3(76), pp. 27-37. [https://ceej.tabrizu.ac.ir/article\\_3100.html?lang=en](https://ceej.tabrizu.ac.ir/article_3100.html?lang=en).
- [24] Mohebkah, A., and Azandariani, M. G. (2015). "Lateral-torsional buckling of Delta hollow flange beams under moment gradient." *Thin-Walled Structures*, Elsevier, 86, 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.10.011>
- [25] Mohebkah, A., and Azandariani, M. G. (2016). "Lateral-torsional buckling resistance of unstiffened slender-web plate girders under moment gradient." *Thin-Walled Structures*, Elsevier, 102, 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.02.001>
- [26] Mohebkah, A., and Azandariani, M. G. (2020). "Shear resistance of retrofitted castellated link beams: Numerical and limit analysis approaches." *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, 203, 109864. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109864>
- [27] Ali, M. M., Osman, S. A., Husam, O. A., and Al-Zand, A. W. (2018). "Numerical study of the cyclic behavior of steel plate shear wall systems (SPSWs) with differently shaped openings." *Steel and Composite Structures*, Techno Press, 26(3), 361–373. <https://doi.org/10.12989/scs.2018.26.3.361>
- [28] Talebizadehsardari, P., Eyvazian, A., Azandariani, M. G., Tran, T. N., Rajak, D. K. and Mahani, R. B. (2020). "Buckling analysis of smart beams based on higher order shear deformation theory and numerical method." *Steel and Composite Structures*, 35(5), 635–640. <https://doi.org/https://doi.org/10.12989/scs.2020.35.5.635>
- [29] Gorji Azandariani, M., Abdolmaleki, H., and Gorji Azandariani, A. (2020a). "Numerical and analytical investigation of cyclic behavior of steel ring dampers (SRDs)." *Thin-Walled Structures*, Elsevier, 151, 106751. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106751>
- [30] Gorji Azandariani, M., Gorji Azandariani, A., and Abdolmaleki, H. (2020e). "Cyclic behavior of an energy dissipation system with steel dual-ring dampers (SDRDs)." *Journal of Constructional Steel Research*, 172, 106145. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106145>
- [31] ATC-24. (1992). Guidelines for cyclic seismic testing of components of steel structures. California.
- [32] FEMA 356. (2000). Federal Emergency Management Agency, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, DC, USA.
- [33] Gorji Azandariani, M., Gholhaki, M., and Kafi, M. A. M. A. (2020b). "Experimental and numerical investigation of low-yield-strength (LYS) steel plate shear walls under cyclic loading." *Engineering Structures*, Elsevier Ltd, 203, 109866. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109866>
- [34] Gorji Azandariani, M., Gholhaki, M., and Kafi, M. A. (2020c). "Hysteresis finite element model for evaluation of cyclic behavior and performance of steel plate shear walls (SPSWs)." *Structures*, 29, 30–47. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.009>
- [35] Gorji Azandariani, M., Rousta, A. M., Usefvand, E., Abdolmaleki, H., and Gorji Azandariani, A. (2021a). "Improved seismic behavior and performance of energy-absorbing systems constructed with steel rings." *Structures*, Elsevier, 29, 534–548. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.041>
- [36] Gorji Azandariani, M., Gholhaki, M., Kafi, M. A., Zirakian, T., Khan, A., Abdolmaleki, H., and Shojaeifar, H. (2021b). "Investigation of performance of steel plate shear walls with partial plate-column connection (SPSW-PC)." *Steel and Composite Structures*, Techno Press, 39(1), 109–123. <http://dx.doi.org/10.12989/scs.2021.39.1.109>