



# Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



## A numerical study on the cyclic behavior of special truss moment frames with X-shaped pipe damper

Vahid Akrami<sup>1\*</sup>, Meysam Norouzi<sup>2</sup>

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

2- M.Sc. Graduate, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

### ABSTRACT

*Special Truss Moment Frame (STMF) is a type of steel moment frames that has high lateral stiffness due to deep girders and can be used over long spans. For an STMF subjected to cyclic loading, energy dissipation is provided through the yielding of the special part located in the mid-span. This paper presents a numerical study on the cyclic behavior of STMFs in which the special part is equipped with yielding damper as a means of energy dissipative device. For this purpose, it is aimed to investigate the effect of the parameters of X-shaped pipe damper (XPD) on the cyclic behavior of STMFs. The application of these dampers has been investigated in two configurations; once with clamped and again with pin-ended beams at the special part. The results of finite element analysis are compared based on the parameters of cyclic behavior (stiffness and strength), the amount of maximum cumulative plastic strain and the energy dissipation capacity of the specimens. Based on the results obtained from the analysis of the STMF with pin-ended beams at the special part, the use of proposed X-shaped damper increases the energy dissipation capacity of the frame by 70%. Increasing the thickness of the X-shaped pipe damper increases the yield and ultimate load bearing capacity of the frame. In addition, the stress and strain concentration in the frame members is reduced which in turn prevents the damage evolution in these members.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 31 December 2022

**Revise Date:** 17 March 2023

**Accept Date:** 13 April 2023

### Keywords:

*Special truss moment frame  
X-shaped pipe damper  
Finite element modeling  
Cyclic behavior  
Energy dissipation*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.377263.3000>

\*Corresponding author: Vahid Akrami.

Email address: v.akrami@uma.ac.ir

## مطالعه عددی رفتار چرخه‌ای قاب خمشی خرپایی ویژه مجهز به میراگر لوله‌ای X شکل

وحید اکرمی<sup>۱\*</sup>، میثم نوروی<sup>۲</sup>

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

۲- کارشناس ارشد گرایش سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### چکیده

قاب‌های خمشی خرپایی ویژه (STMF<sup>۱</sup>) جلوه‌ای از یک سیستم قاب خمشی فولادی را نشان می‌دهد که به دلیل وجود تیرهای خرپایی عمیق، سختی جانبی بالا داشته و می‌تواند عرض دهانه طولانی را پوشش دهد. هنگامی که یک قاب STMF در معرض بارگذاری چرخه‌ای قرار می‌گیرد، اتلاف انرژی از طریق شکل‌پذیری قسمت ویژه که در میانه دهانه تیر خرپایی قرار دارد صورت می‌گیرد. در این تحقیق مروری بر نتایج عددی یک قاب STMF با دهانه ویرندل ارائه می‌شود که قسمت ویژه آن به منظور اتلاف انرژی بیشتر توسط میراگرهای تسلیمی به عنوان ابزار افزایشدهنده سختی و میرایی تقویت خواهد شد. برای این منظور از میراگر لوله‌ای X شکل (XPD) استفاده شده و تاثیر پارامترهای این میراگر بر رفتار چرخه‌ای قاب‌های STMF بررسی خواهد شد. افزودن این میراگرها در دو حالت با اعضای یال بالا و پایین دارای انتهای گیردار و مفصلی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌های اجزای محدود بر اساس پارامترهای چرخه ای (حد باربری و سختی اولیه و نهایی)، مقدار بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی و همچنین اتلاف انرژی صورت گرفته در طی بارگذاری با هم مقایسه شده است. طبق نتایج حاصل شده از تحلیل مدل‌های عددی قاب خمشی با تیر خرپایی دارای اتصال مفصلی در دو انتهای قسمت ویژه که به مجموعه میراگر پیشنهادی مجهز شده است، استفاده از این میراگر باعث افزایش اتلاف انرژی تا ۷۰٪ می‌شود. افزایش ضخامت میراگر لوله‌ای X شکل باعث افزایش باربری اعم از نیروی تسلیم و نهایی می‌شود. علاوه بر این، تمرکز تنش و کرنش در اعضا به میزان زیادی کاهش می‌یابد که در نتیجه از آسیب در اعضا اجتناب می‌شود.

کلمات کلیدی: قاب خمشی خرپایی ویژه، میراگر لوله‌ای X شکل، مدل المان محدود، رفتار چرخه‌ای، اتلاف انرژی

شناخته دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.377263.3000">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.377263.3000</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.377263.3000">10.22065/jsce.2023.377263.3000</a>	۱۴۰۲/۱۰/۳۰	۱۴۰۲/۰۱/۲۴	۱۴۰۲/۰۱/۲۴	۱۴۰۱/۱۲/۲۶	۱۴۰۱/۱۰/۱۰
نویسنده مسئول: وحید اکرمی v.akrami@uma.ac.ir					پست الکترونیکی:	

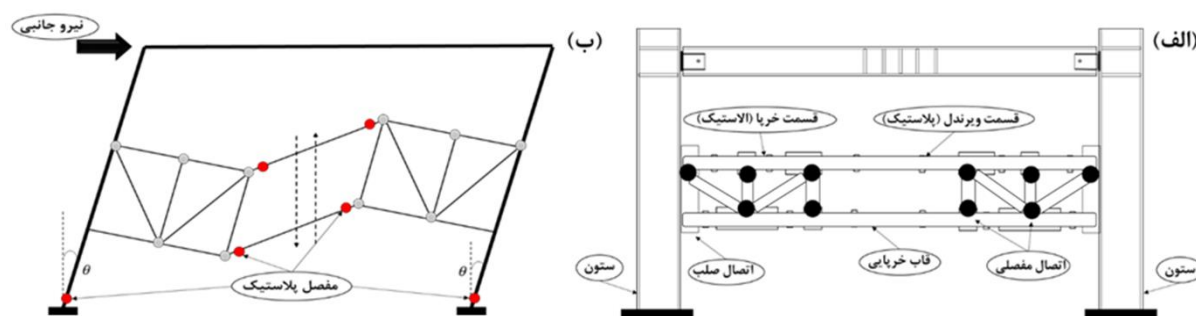
<sup>1</sup> Special truss moment frame

<sup>2</sup> X-shaped Pipe Damper

## ۱- مقدمه

در چند دهه اخیر استفاده از قاب‌های خمشی خرپایی ویژه (STMF<sup>۳</sup>) به عنوان یک نمونه نسبتاً جدید از سیستم‌های قاب خمشی فولادی برای مناطق زلزله‌خیز گسترش یافته است. این نوع قاب‌ها، انرژی لرزه‌ای را از طریق شکل‌پذیری قسمت ویژه‌ای که در نزدیکی وسط دهانه شاه تیر خرپایی واقع شده، مستهلک می‌کنند. رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی خرپایی ویژه از طریق تشکیل چهار مفصل پلاستیک داخل یال‌های قسمت ویژه قاب کنترل می‌شود. می‌توان با طراحی و مونتاژ دقیق اعضای سازه‌ای قاب‌های خمشی خرپایی ویژه، ظرفیت تغییرشکل غیرالاستیک قابل توجهی را در داخل قسمت ویژه خرپا فراهم نمود. در STMFها طول دهانه بین دو ستون نباید از ۶۵ فوت (۲۰ متر) و عمق کلی آن نباید از ۶ فوت (۱٫۸ متر) تجاوز کند. ستون‌ها و قسمت‌های خرپایی خارج از بخش ویژه قاب باید به گونه‌ای طراحی شوند که تحت نیروهای اعمال شده اساساً الاستیک باقی بمانند و تسلیم کامل و کرنش سخت‌شوندگی فقط در قسمت ویژه ایجاد شود. هر خرپای افقی که بخشی از سیستم مقاوم در برابر بارهای لرزه‌ای می‌باشد، باید دارای قسمت ویژه‌ای باشد که در یک چهارم میانه دهانه خرپا قرار دارد [۱].

تحقیقات انجام شده در دهه ۱۹۹۰ در مورد رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی خرپایی ویژه فولادی با استفاده از مقاطع جفت نبشی [۲-۴]، منجر به تدوین مقررات مربوطه در آیین نامه طراحی لرزه‌ای مؤسسه ساخت و ساز فولادی آمریکا (AISC<sup>۴</sup>) گردید [۵]. ائتلاف انرژی لرزه‌ای STMFها از طریق شکل‌پذیری اعضای یال در قسمت ویژه که به عنوان یک "فیوز" سازه‌ای عمل می‌کنند، صورت می‌گیرد. هنگامی که یک STMF تحت نیروهای جانبی قرار می‌گیرد، نیروی برشی قائم در وسط تیر خرپایی عمدتاً توسط اعضای یال و اعضای جان مورب (در صورت وجود) در قسمت ویژه تحمل می‌شود. حداکثر مقاومت برشی قائم مورد انتظار در قسمت ویژه زمانی حاصل می‌شود که قسمت ویژه به طور کامل تسلیم شده و در آن کرنش سخت‌شوندگی ایجاد شود. در شکل ۱ نمای شماتیک یک قاب STMF، اعضای مختلف آن و همچنین موقعیت‌های مستعد تشکیل مفصل‌های پلاستیک، نشان داده شده است. این نوع قاب‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که تحت بارگذاری جانبی مفصل‌های پلاستیک در انتهای ستون‌ها و در هر دو انتهای قسمت ویژه تشکیل شوند. در شکل ۱(ب) پیکربندی تغییر شکل یافته و مکانیزم تشکیل مفصل پلاستیک یک STMF با پانل ویراندل نشان داده است.



شکل ۱: قاب خمشی خرپایی ویژه فولادی (الف) نمای شماتیک، (ب) مکانیزم تشکیل مفصل پلاستیک تحت بارگذاری جانبی.

در سال‌های گذشته، بسیاری از ابزارهای ابتکاری که باعث افزایش قابلیت ائتلاف انرژی (یا میرایی) و همچنین سختی در سیستم‌های سازه‌ای می‌شوند، به طور گسترده معرفی و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۶]. سونگ و اسپنسر<sup>۵</sup> [۷] در تحقیقات تجربی و تحلیلی خود، اثربخشی میراگرها در کاهش پاسخ لرزه‌ای و به حداقل رساندن آسیب اعضای سازه‌ای باربر را بررسی نموده‌اند. تا به امروز، سیستم‌های ائتلاف انرژی غیرفعال مختلفی معرفی شده‌اند و دستورالعمل‌های تحلیل و طراحی برای سازه‌های ساختمانی که این سیستم‌ها را در خود جای داده‌اند، ارائه شده‌اند [۸]. تحقیقات انجام شده نشان داده است، شکل‌پذیری یک سیستم خرپایی را می‌توان با بکارگیری

<sup>3</sup> Special Truss Moment Frame

<sup>4</sup> American Institute of Steel Construction

<sup>5</sup> Soong and Spencer

سیستم‌های اتلاف‌کننده انرژی در انتهای یال‌های پایین تیرها بهبود بخشید [۹]. در راستای استفاده از میراگرهای تسلیمی، فتحی زاده و همکاران [۱۰] از میراگر خمیده در محل اتصالات تیر به ستون با هدف توسعه یک سیستم جدید مقاوم در برابر نیروی لرزه‌ای و مقرون به صرفه برای طراحی قاب خمشی فولادی استفاده کرده‌اند. در این تحقیق از سیستم پیشنهادی به عنوان فیوزهای اولیه پذیرای انرژی ورودی یاد شده است. در تحقیق پکان و همکاران<sup>۶</sup> [۱۱] از مهارندهای کمانش تاب (BRB)<sup>۷</sup>، برای اتلاف انرژی قاب‌های خمشی خرپایی ویژه استفاده شده است. پیکربندی سیستم پیشنهادی شامل مفصل‌هایی است که در انتهای اعضای یال بالا و پایین قسمت‌های ویژه در نظر گرفته شده است. از نتایج این مطالعه بر می‌آید که سیستم پیشنهادی منجر به ایجاد پاسخ لرزه‌ای قابل پیش‌بینی‌تر می‌شود و امکان ساخت و ساز سبک‌تر را فراهم می‌کند. علاوه بر این، در صورت استفاده از این سیستم، آسیب به اعضای سازه‌ای به میزان زیادی کاهش می‌یابد. با توجه به مزایای مهارندهای کمانش تاب، مطالعه تجربی دیگری توسط جیانسنینلاپادامرونگ و همکاران<sup>۸</sup> [۱۲] صورت گرفته است که در آن از مهارند کمانش تاب کوتاه برای تقویت قاب خمشی خرپایی ویژه به منظور اتلاف انرژی بیشتر استفاده کرده‌اند. در مطالعه مذکور یک قاب STMF در مقیاس کامل متشکل از اعضای خرپا ساخته شده از جفت مقطع C شکل با استفاده از دو مهارند BRB که در یک الگوی شورون در قسمت ویژه قرار دارند تقویت شده است. در اعضای یال قسمت ویژه بال‌های جفت مقطع C شکل به صورت تیر با مقطع کاهش یافته<sup>۹</sup> (RBS) در نظر گرفته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته است. بر اساس نتایج این مطالعه، از تیر با مقطع کاهش یافته (RBS) می‌توان به عنوان یک عضو یال در یک قاب خمشی خرپایی ویژه برای کاهش تقاضای مقاومت اعضای خارج از قسمت ویژه استفاده کرد. همچنین مشاهده شده است که مهارندهای کمانشی کوتاه را می‌توان برای افزایش مقاومت و سختی قاب‌های خمشی خرپایی ویژه استفاده کرد. هرچند این مهارندها ممکن است در یک زلزله متوسط آسیب ببینند، اما می‌توان آن‌ها را به راحتی جایگزین کرد. در مطالعه‌ای که توسط ساچان و رای<sup>۱۰</sup> [۱۳] انجام شده است، از میراگر تسلیمی برشی آلومینیومی (Al-SYD)<sup>۱۱</sup> به عنوان یک سیستم اتلاف انرژی در قاب خمشی خرپایی استفاده کرده‌اند. پیوند برشی آلومینیومی یکی از سیستم‌هایی است که از رفتار هیستریزس فلز برای افزایش اتلاف انرژی لرزه‌ای استفاده می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تسلیم و کمانش پیوندهای برشی باعث کاهش سختی چندان نمی‌شود. اما پس از پارگی کامل صفحات جان پیوندهای برشی، افت قابل توجهی در سختی و اتلاف انرژی قاب خمشی خرپایی مشاهده می‌شود. همچنین، عسکرانی و همکاران [۱۴] به منظور افزایش اتلاف انرژی قاب‌های STMF، از میراگرهای فولادی شکاف‌دار در قسمت ویژه این قابها استفاده کرده‌اند. بر اساس نتایج بدست آمده، استفاده از این میراگرها میزان اتلاف انرژی و ظرفیت تغییرشکل سیستم را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد. گو و همکاران<sup>۱۲</sup> [۱۵] در یک مطالعه تجربی، میراگر فولادی جدید را با نام میراگر لوله‌ای X شکل<sup>۱۳</sup> (XPD) بررسی کرده‌اند. میراگر پیشنهادی از طریق اتصال و جوشکاری دو نیم لوله ساخته می‌شود. بررسی‌ها بر پایه سختی اولیه و خصوصیات تسلیم میراگرها انجام شده و عملکرد مکانیزم‌های غیرخطی از طریق تست‌های چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر روش‌های جوشکاری و پیکربندی لوله‌ها بر سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و راندمان جذب انرژی XPD مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس نتایج، XPDها با نصف لوله دوتایی می‌توانند مقاومت بار جانبی مشابهی را نسبت به میراگرهای دو لوله نشان دهند. تمام نمونه‌های XPD حلقه‌های هیستریک پایداری را ارائه کردند و پس از تسلیم تا گسیختگی، افزایش مقاومت ثابتی داشتند. XPDهای با جوش پیرامونی، رفتار بهتری را نسبت به نمونه‌های با جوش گوشه نشان دادند. بر اساس نتایج، استفاده از XPD در قاب‌های خمشی فولادی می‌تواند رفتار چرخه‌ای این قاب‌ها را تا حد زیادی بهبود بخشد. با توجه به نتایج این پژوهش و تحقیقاتی نظیر مرجع [۱۴]، تعیین تاثیر استفاده از میراگرهای XPD در قاب‌های STMF شایسته بررسی می‌باشد.

در این تحقیق نتایج تحلیل‌های عددی بر روی یک قاب STMF با دهانه و برنند ارائه می‌شود که قسمت ویژه آن به منظور اتلاف انرژی بیشتر توسط میراگرهای تسلیمی به عنوان ابزار افزایشدهنده سختی و میرایی تقویت شده است. برای این منظور از میراگر لوله‌ای XPD استفاده شده و تاثیر پارامترهای این میراگر بر رفتار چرخه‌ای قاب‌های STMF بررسی شده است. افزودن این میراگرها در دو حالت با

<sup>6</sup> Pekcan et al.

<sup>7</sup> Buckling Restrained Braces

<sup>8</sup> Jiansinlapadamrong et al.

<sup>9</sup> Reduced Beam Section

<sup>10</sup> Sachan and Rai

<sup>11</sup> Aluminium Shear Yielding Damper

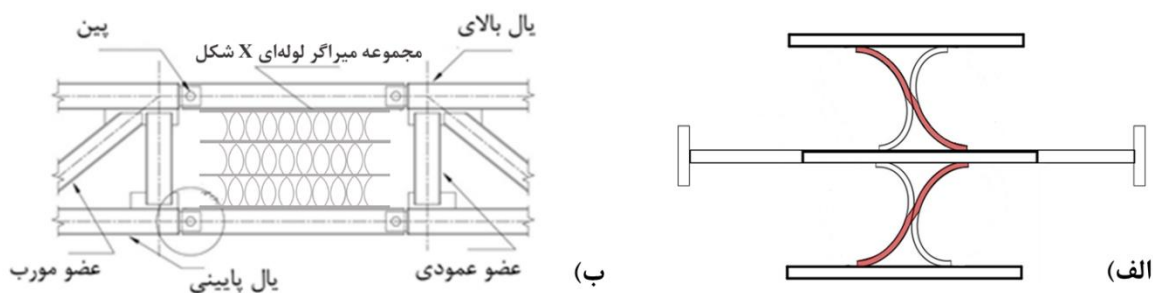
<sup>12</sup> Guo et al.

<sup>13</sup> X-shaped Pipe Damper

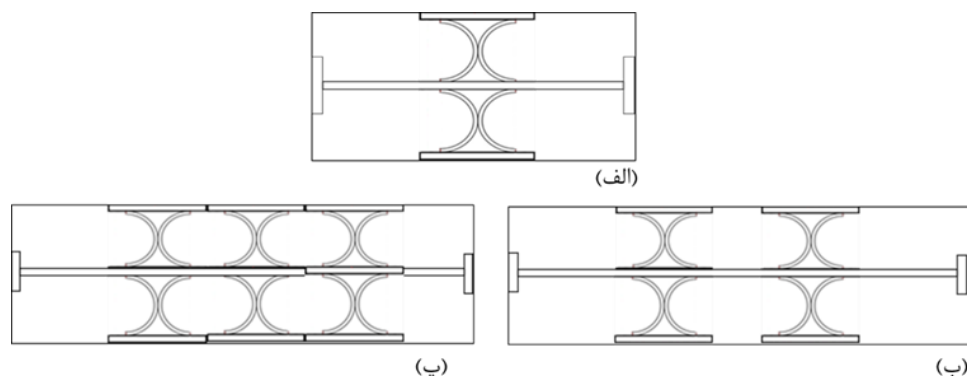
اعضای یال بالا و پایین دارای انتهای گیردار و مفصلی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل های اجزای محدود بر اساس پارامترهایی نظیر حد باربری و سختی اولیه و نهایی، مقدار بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی و همچنین اتلاف انرژی صورت گرفته در طی بارگذاری با هم مقایسه شده است. مشخصات قاب STMF، میراگر XPD، نحوه مدلسازی و تحلیل و همچنین نتایج بدست آمده، در بخش های بعد ذکر شده است.

## ۲- مجموعه میراگر پیشنهادی

در این تحقیق، از طرح میراگر لوله ای X شکل که در مطالعه گو و همکاران [۱۵] پیشنهاد شده است، به منظور طراحی مجموعه میراگر پیشنهادی استفاده شده است. بنابر نتایج مطالعه مذکور این میراگر می تواند باربری و اتلاف انرژی را به طور موثرتری افزایش دهد و در عین حال از مزایای ساخت ساده برخوردار می باشد. با توجه به مطالب بیان شده در بخش قبل به منظور افزایش باربری و اتلاف انرژی قاب خمشی خرابی ویژه می توان از میراگر غیر فعال (تسلیمی) استفاده نمود. در شکل ۲(الف) مجموعه میراگر تشکیل شده از میراگر لوله ای X شکل، به همراه تغییر شکل آن تحت بار جانبی نشان داده شده است. در قاب های خرابی ویژه محل تشکیل مفصل پلاستیک در وسط دهانه آن یا به عبارتی بهتر در چهار گوشه قسمت ویژه می باشد. بنابراین به منظور افزایش شکل پذیری، اتلاف انرژی و تاخیر در تشکیل مفصل پلاستیک، مجموعه میراگر پیشنهادی در قسمت ویژه نصب می شود. از مجموعه میراگر پیشنهادی در چینش ها، عرض ها و ضخامت های مختلف در قاب خمشی خرابی مورد نظر استفاده خواهد شد. انتظار می رود این سه پارامتر تاثیر بسزایی بر پاسخ چرخه ای و عملکرد قاب خمشی خرابی ویژه داشته باشند. چنانچه قبلا نیز گفته شد، افزودن این میراگرها در دو حالت با اعضای یال بالا و پایین دارای انتهای گیردار و مفصلی مورد بررسی قرار گرفته است. برای نمونه های دارای یال یکسره، قرارگیری میراگرهای لوله ای در دو ردیف و به صورت تکی، دوتایی و سه تایی بوده است که نمای کلی و شماتیک این مجموعه میراگرها در شکل ۳ نشان داده شده است. در این نمونه ها از میراگر XPD-180 استفاده شده است که اجزای آن از نیم دایره تشکیل شده و دارای زاویه ۱۸۰ درجه می باشد. برای حالت با یال مفصلی، قرارگیری میراگرها در سه ردیف ۹ تایی از نوع XPD-90 بوده است که اجزای آن از ربع دایره تشکیل شده و دارای زاویه ۹۰ درجه می باشد. در شکل ۲(ب) جزئیات کلی طرح استفاده شده برای حالت با یال مفصلی، نشان داده شده است. با توجه به مطالبی که در ادامه بیان خواهد شد، بررسی این نمونه به دلیل معایب مشاهده شده در نمونه های با یال یکسره و به عنوان یک امکان سنجی برای تحقیقات پارامتریک بیشتر بر روی چنین نمونه هایی می باشد. در این نوع طراحی برای هندسه سیستم مورد نظر، پس از وقوع حوادثی از قبیل زلزله، قسمت ویژه و مجموعه میراگر لوله ای X شکل یکجا قابل تعمیر و تعویض می باشد. جدول ۱ جزئیات مربوط به هر کدام از نمونه های تحلیل شده در این تحقیق را ارائه می دهد.



شکل ۲: مجموعه میراگر پیشنهادی؛ (الف) تغییر شکل تحت بار جانبی؛ (ب) جزئیات اتصال بین در قسمت ویژه.



شکل ۳: تعداد میراگرهای پیشنهادی برای نمونه های با یال یکسره؛ (الف) میراگر تکی، (ب) میراگر دو تایی، (پ) میراگر سه تایی

جدول ۱: جزئیات مربوط به نمونه های تحلیل شده در تحقیق حاضر.

نام مدل	نوع یال قاب در قسمت ویژه	تعداد ردیف میراگر	تعداد میراگر در هر ردیف	عرض میراگر	ضخامت میراگر	نوع فولاد میراگر
STMF	یکسره	-	-	-	-	-
Pin-STMF	مفصلی	-	-	-	-	-
1XPD-t3.0	یکسره	۲	۱	هم عرض یال	۳۰ مم	پر مقاومت
1XPD-t2.5	یکسره	۲	۱	هم عرض یال	۲۵ مم	پر مقاومت
1XPD-t2	یکسره	۲	۱	هم عرض یال	۲۰ مم	پر مقاومت
2XPD-t2	یکسره	۲	۲	هم عرض یال	۲۰ مم	پر مقاومت
3XPD-t2	یکسره	۲	۳	هم عرض یال	۲۰ مم	پر مقاومت
3XPD-t2-W/2	یکسره	۲	۳	۱/۲ عرض یال	۲۰ مم	پر مقاومت
3XPD-t2-W/3	یکسره	۲	۳	۱/۳ عرض یال	۲۰ مم	پر مقاومت
3XPD-t2-mat2	یکسره	۲	۳	هم عرض یال	۲۰ مم	مقاومت متوسط
3XPD-t2-mat3	یکسره	۲	۳	هم عرض یال	۲۰ مم	کم مقاومت
Pin-STMF- 9XPD-t2	مفصلی	۳	۹	هم عرض یال	۲۰ مم	پر مقاومت

### ۳- مشخصات قاب خمشی خرابایی ویژه

در این تحقیق برای مدل سازی عددی از نرم افزار اجزای محدود غیرخطی آباکوس استفاده شده است. به منظور ایجاد مدل اجزای محدود قاب خمشی خرابایی ویژه و صحت سنجی آن، از مطالعه تجربی سیماساتین و همکاران<sup>۱۴</sup> [۱۶] استفاده شده است. پیکربندی و ابعاد هندسه نمونه تجربی مورد مطالعه مطابق شکل ۴(الف) می باشد. در این شکل، تیر فوقانی به صورت دو سر مفصل و به منظور اعمال بارگذاری تعبیه شده و رفتار خمشی قاب از طریق تیر خرابایی تحتانی تامین می شود. چنانچه در شکل مذکور مشاهده می شود اعضای تیر و ستون قاب خمشی فولادی از مقاطع W می باشد. از مقاطع جفت HSS برای اعضا یال و جان تیر خرابایی ویژه استفاده شده است. بنابر مطالب بیان شده در تحقیق مذکور، مقاطع سازه ای توخالی جفت (HSS) دارای مزایای مانند، به حداقل رساندن کمانش پیچشی جانبی و به حداکثر رساندن فشردگی بال ها در مقایسه با HSS تکی با ظرفیت خمشی یکسان هستند [۱۶].

<sup>14</sup> Simasathien et al.

#### ۴- مدلسازی المان محدود

برای مدلسازی عددی در این تحقیق از نرم افزار اجزای محدود غیر خطی آباکوس<sup>۱۵</sup> استفاده شده است. تحلیل انجام شده از نوع شبه استاتیکی عمومی<sup>۱۶</sup> با بارگذاری چرخه‌ای بوده است. المان‌های مورد استفاده در مدل‌های اجزای محدود این تحقیق از نوع C3D8R می‌باشد. این المان سه بعدی که دارای ۸ گره بوده و هندسه مکعبی یا آجری شکل دارد، دارای فرمول‌بندی کاهش یافته می‌باشد. با توجه به نتایج تحلیل‌های حساسیت مش، ابعاد مش برای تمامی اعضای قاب خمشی خرپایی ویژه برابر با ۵ cm در نظر گرفته شده است. اتصال تمامی اعضای قاب به هم از طریق مقید نمودن آنها با قید بستن<sup>۱۷</sup> بوده است.

#### ۵- مشخصات مصالح فولادی

مطابق گزارش سیماساتین و همکاران [۱۶]، برای مدلسازی المان تیر و ستون از فولاد نوع A992 با مدول الاستیسیته ۲۱۰ GPa و ضریب پواسون ۰/۳ استفاده شده است. تنش تسلیم این نوع فولاد برابر مقدار ۳۴۵ MPa در نظر گرفته می‌شود. برای مقاطع HSS تنش تسلیم برابر ۳۱۵ MPa در نظر گرفته شده است. پس از صحت‌سنجی مدل عددی با مدل تجربی، از مجموعه میراگر پیشنهادی به منظور افزایش اتلاف انرژی قاب خمشی خرپایی ویژه استفاده می‌شود. برای بررسی تاثیر نوع فولاد این میراگرها بر رفتار کلی قاب، در این مطالعه مطابق جدول ۱ از سه نوع میراگر لوله‌ای X شکل با مصالح فولادی متفاوت استفاده می‌شود. خصوصیات مکانیکی این سه نوع فولاد در جدول شماره ۲ گزارش شده است.

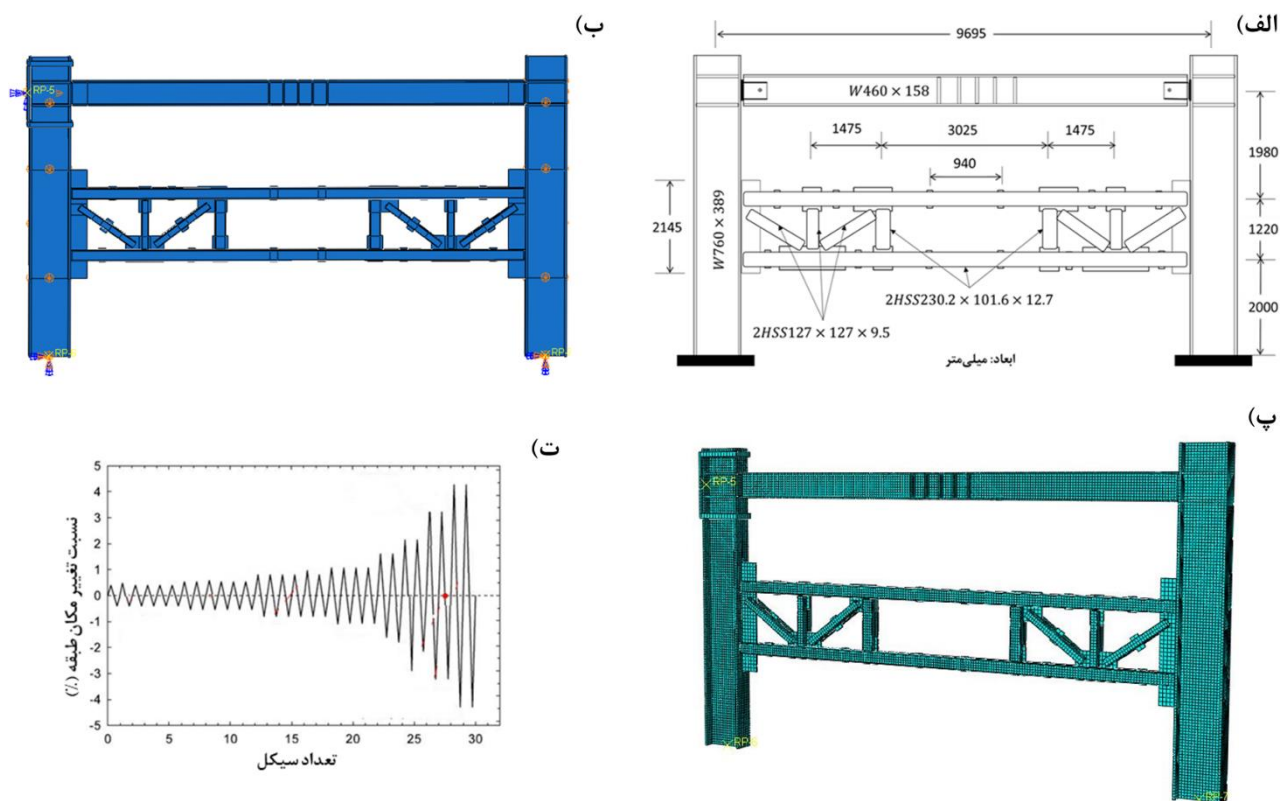
جدول ۲: خصوصیات مصالح میراگرها لوله‌ای X شکل.

نمونه	نوع مصالح	مدول الاستیسیته (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	مرجع
۱	پر مقاومت	۲۰۴	۳۳۴	۴۹۲	[۱۵]
۲	مقاومت متوسط	۲۱۰	۲۸۸	۴۶۴	[۱۸، ۱۷]
۳	کم مقاومت	۲۱۰	۲۳۳	۳۴۰	[۱۹]

<sup>15</sup> ABAQUS

<sup>16</sup> Static general

<sup>17</sup> Tie constraint



شکل ۴: مدل‌سازی عددی؛ (الف) پیکربندی کلی قاب؛ (ب) مدل عددی قاب و شرایط مرزی؛ (پ) مش بندی نمونه‌ها؛ (ت) بارگذاری نمونه‌ها.

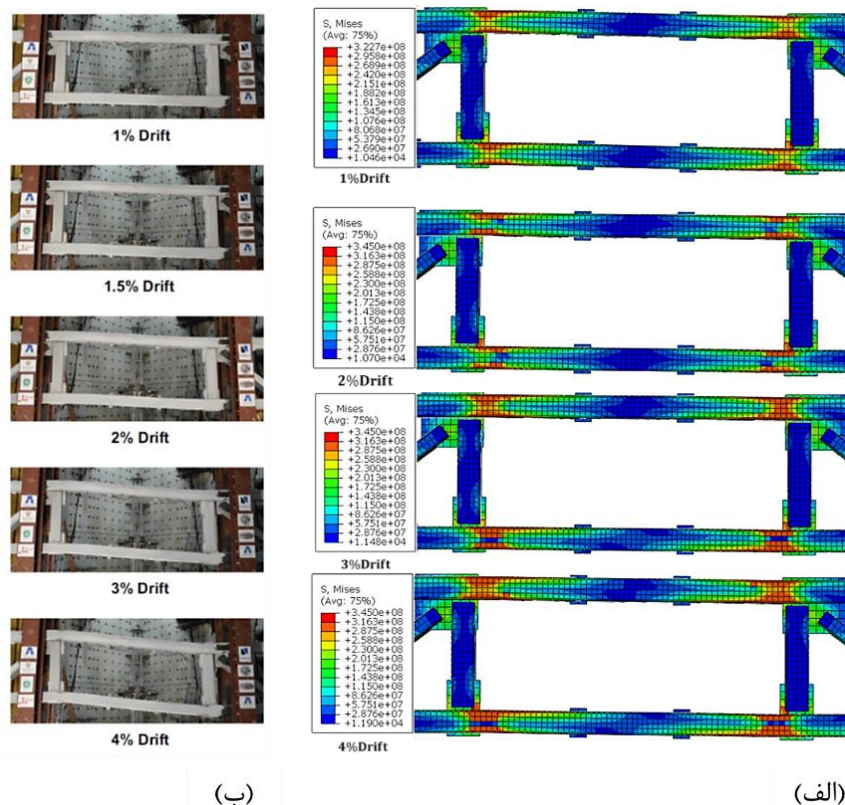
## ۶- شرایط مرزی و بارگذاری نمونه‌ها

مطابق با پیکربندی نمونه‌های آزمایشگاهی تست شده توسط سیماساتین و همکاران [۱۶]، شرایط مرزی در پای هر دو ستون به صورت تکیه‌گاه مفصلی مدل‌سازی شده است. در قسمت فوقانی قاب خمشی خرپایی ویژه یا همان ناحیه اتصال تیر به ستون، به منظور ایجاد اتصال مفصلی از نبشی جان در تیر استفاده شده است. برای ممانعت از حرکت قاب در جهت عمود بر صفحه، درجه آزادی مربوط به آن بسته شده است. بارگذاری اعمال شده به قاب خمشی خرپایی ویژه به صورت بارگذاری مبتنی بر جابجایی می‌باشد که به ورق بارگذاری تعبیه شده در بالای ستون سمت چپ قاب اعمال شده است. مطابق تحقیق سیماساتین و همکاران [۱۶]، پروتکل بارگذاری در شکل ۴ آورده شده است.

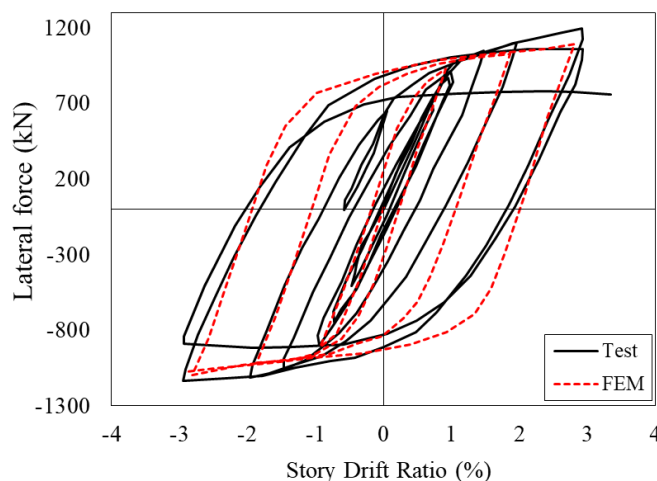
## ۷- صحت‌سنجی نمونه‌ها

چنانچه پیشتر بیان شد، جهت صحت‌سنجی مدل‌های عددی از نمونه تجربی مورد مطالعه توسط سیماساتین و همکاران [۱۶] استفاده شده است. در مطالعه مذکور، خرابی نمونه مورد بررسی به دلیل تشکیل مفصل پلاستیک در گوشه‌های قسمت ویژه تیر خرپایی رخ داده است. در شکل ۵، تغییر شکل هر دو مدل تجربی و مدل اجزای محدود (قسمت ویژه) در انتهای چرخه‌های مختلف بارگذاری نشان داده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، محل تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل‌های عددی انطباق مناسبی با نمونه آزمایشگاهی دارد.





شکل ۵: تغییر شکل قسمت ویژه در سطح تغییر مکان مختلف؛ (الف) مدل اجزای محدود، (ب) مدل تجربی.



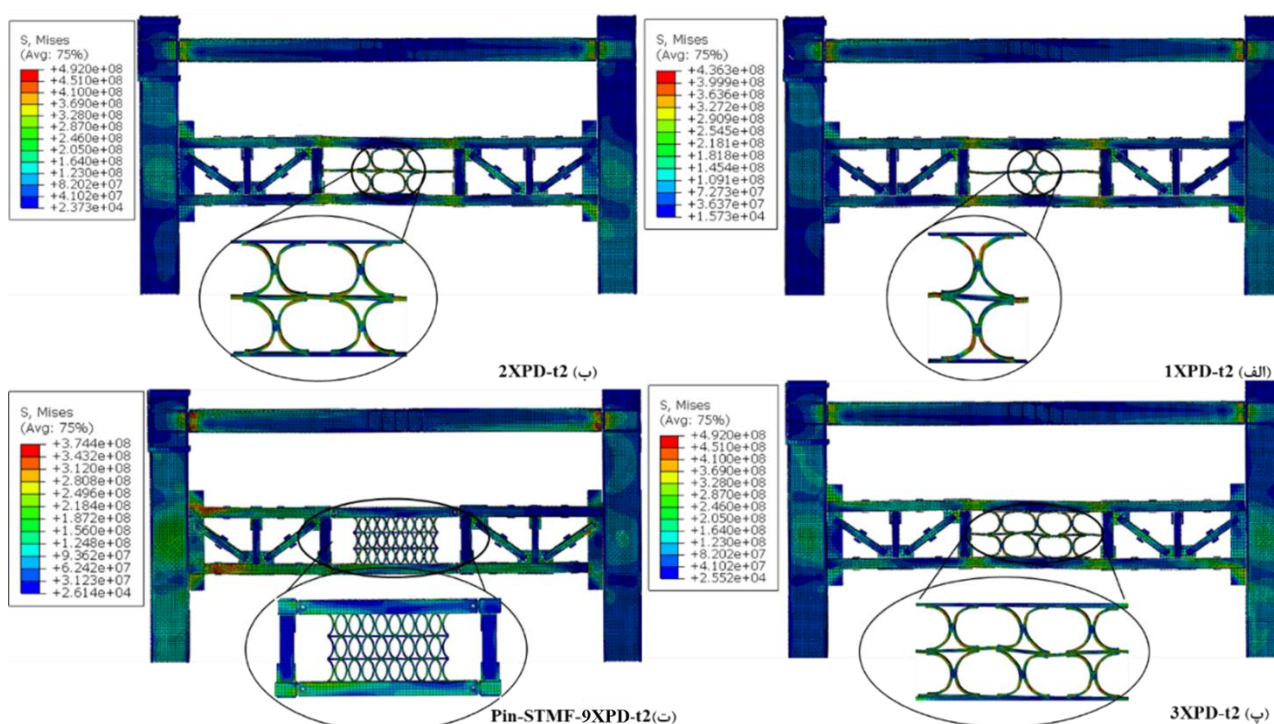
شکل ۶: مقایسه منحنی نیرو-جابجایی حاصل از تست آزمایشگاهی و تحلیل اجزای محدود.

بررسی‌ها نشان داد، مفاصل پلاستیک در مکان‌های مورد انتظار (انتهای اعضای یال در قسمت ویژه) بدون هیچ گونه تسلیم در اعضای خارج از قسمت ویژه تشکیل می‌شوند. به منظور مقایسه بهتر، نمودار بار-جابجایی بدست آمده از نتایج آزمایش و مدل اجزای محدود در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل، هر دو نمونه تست شده و المان محدود دارای رفتار هیستریزس پایدار تا تغییر مکان ۳٪ همراه با انطباق مناسب چرخه‌های بارگذاری می‌باشند.

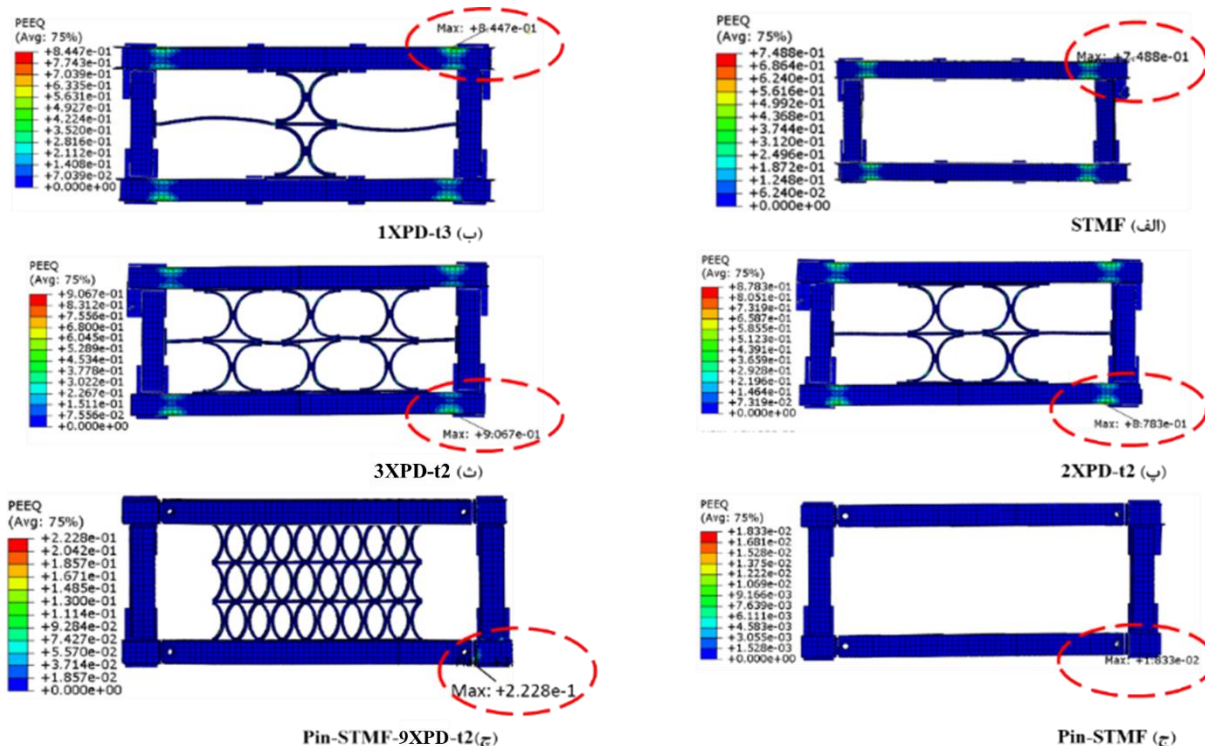
## ۸- نتایج تحلیل ها

در این بخش، نمونه‌های عددی تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار خواهد گرفت و پاسخ آن‌ها با یکدیگر مقایسه خواهد شد. با هدف ارزیابی و بررسی رفتار قاب خمشی خرابایی ویژه مجهز به میراگرهای پیشنهادی، از پارامترهایی مانند اتلاف انرژی، میرایی ویسکوز معادل، سختی اولیه، سختی نهایی، جابجایی تسلیم و نهایی، نیروی نهایی و تسلیم استفاده می‌شود.

در شکل ۷، توزیع تنش مایسز در قسمت ویژه و همچنین مجموعه میراگر لوله‌ای X شکل در قاب خمشی خرابایی ویژه پس از اعمال بارگذاری چرخه‌ای نشان داده شده است. همچنین، توزیع کرنش پلاستیک تجمعی در گوشه‌های قسمت ویژه برای نمونه قاب‌های با و بدون مجموعه میراگر لوله‌ای X شکل، در شکل ۸ به تصویر کشیده شده است. چنانچه در بخش صحت‌سنجی بیان شد، خرابی نمونه قاب خرابایی ویژه آزمایشگاهی، در پی تشکیل مفصل پلاستیک در انتهای قسمت ویژه بوده است. گسیختگی یال‌های قسمت ویژه تحت بارگذاری چرخه‌ای تا حد زیادی به میزان تمرکز کرنش‌های پلاستیک در گوشه‌های این ناحیه وابسته است. مطابق شکل ۸، در تحلیل عددی قاب خمشی خرابایی ویژه (بدون میراگر) مقدار بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی در انتهای بارگذاری معادل دریافت ۰/۰۴ رادیان برابر ۰/۷۴ بدست آمده است. با توجه به تصاویر شکل ۷ و شکل ۸، برای قاب خمشی خرابایی ویژه مجهز به میراگر می‌توان دید که با افزایش تعداد لوله‌ها سطح بیشینه تنش و کرنش در گوشه‌های قسمت ویژه افزایش یافته است.



شکل ۷: توزیع تنش در قسمت ویژه در انتهای بارگذاری معادل تغییرمکان ۰/۰۴ رادیان.

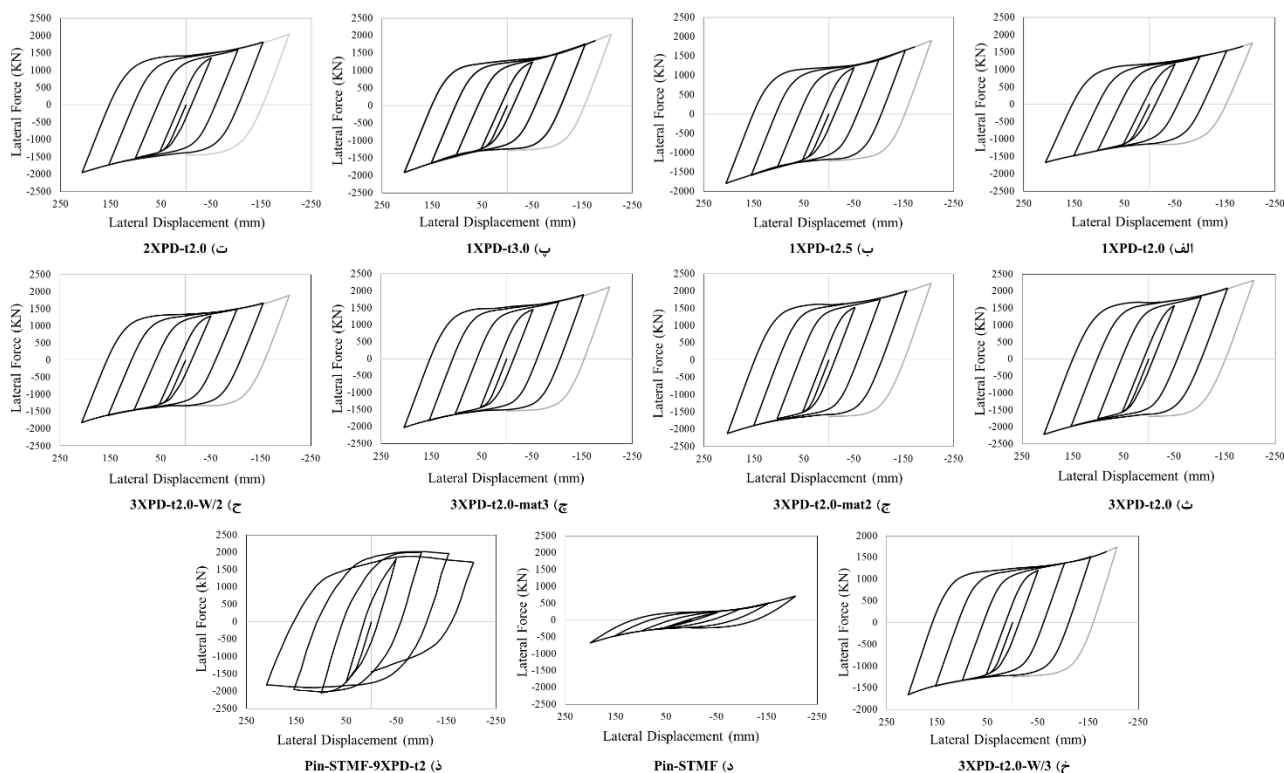


شکل ۸: توزیع کرنش پلاستیک تجمعی در گوشه‌های قسمت ویژه.

این مسئله می‌تواند در نتیجه افزایش مقاومت تسلیم ناحیه ویژه در اثر افزودن میراگرها اتفاق افتاده باشد. برای بررسی تاثیر میراگرهای لوله‌ای X شکل بر رفتار عمومی قاب خمشی خرپایی ویژه، نمودار رفتار چرخه‌ای نمونه‌های عددی قاب خمشی مجهز به مجموعه میراگر پیشنهادی در شکل ۹ نشان داده شده است. نمودارها تا قبل از رسیدن به بیشینه کرنش پلاستیک معادل ۱۸ به مقدار ۰/۷۴ با رنگ مشکی و پس از آن با رنگ خاکستری نشان داده شده است. همچنین پارامترهای رفتاری محاسبه شده بر اساس منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌ها در جدول ۳ گزارش شده است. در این جدول، مقادیر مربوط به سختی اولیه ( $K_0$ )، سختی موثر ( $K_{eff}$ )، جابجایی تسلیم ( $\Delta_y$ )، نیروی تسلیم ( $F_y$ )، جابجایی نهایی ( $\Delta_u$ )، نیروی نهایی ( $F_u$ )، انرژی تلف شده ( $E$ ) و میرایی ویسکوز معادل ( $\xi_{eq}$ ) گزارش شده است. چنانچه در شکل ۹ و جدول ۳ ملاحظه می‌شود، می‌توان انتظار ظرفیت باربری و اتلاف انرژی بیشتری از قاب خمشی خرپایی مجهز مجموعه میراگر پیشنهادی داشت که این مسئله به نوبه خود باعث افزایش سطح بیشینه تنش و کرنش در گوشه‌های قسمت ویژه می‌گردد.

برای رفع این مشکل، استفاده از مدل با المان‌های یال مفصلی در قسمت ویژه به عنوان یک راهکار پیشنهاد شده است. از آنجاکه در این پیکربندی نواحی مستعد پاره‌گی در دو انتهای یال قسمت ویژه به صورت مفصل بوده و پلاستیک نخواهند شد، لذا انتظار می‌رود سطح بیشینه تنش و کرنش در این نواحی کاهش داشته باشد. چنانچه در شکل ۷ و شکل ۸ مشاهده می‌شود، سطح بیشینه تنش و کرنش در قاب خمشی خرپایی ویژه‌ای که اتصال قسمت ویژه از نوع مفصلی بوده و از مجموعه میراگر 9XPD-t2 استفاده شده است، تا حد زیادی کاهش داشته است. مقدار بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی در انتهای بارگذاری معادل دریافت ۰/۰۴ رادیان از ۰/۷۴ برای نمونه STMF به ۰/۲۲ کاهش یافته است. این درحالی است که با توجه به نمودارهای رفتار چرخه‌ای شکل ۹ و داده‌های جدول ۳، سختی اولیه، ظرفیت تسلیم و ظرفیت نهایی این نمونه نیز نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر بوده و در محدوده مطلوبی قرار دارد. گفتنی‌ست، در نمونه Pin-STMF که فاقد میراگر بوده و اتصالات یال در ناحیه ویژه و همچنین پای ستون‌ها مفصلی می‌باشد، ظرفیت تحمل شده به دلیل وجود تیر بالای

است که اتصال آن به بال ستون از طریق ورق نبشی جان می‌باشد (که در حالت ایده‌آل مفصلی تلقی شده ولی در واقعیت اندکی لنگر تحمل می‌کند).



شکل ۹: نمودار چرخه ای قاب خمشی مجهز به میراگر لوله‌ای X شکل.

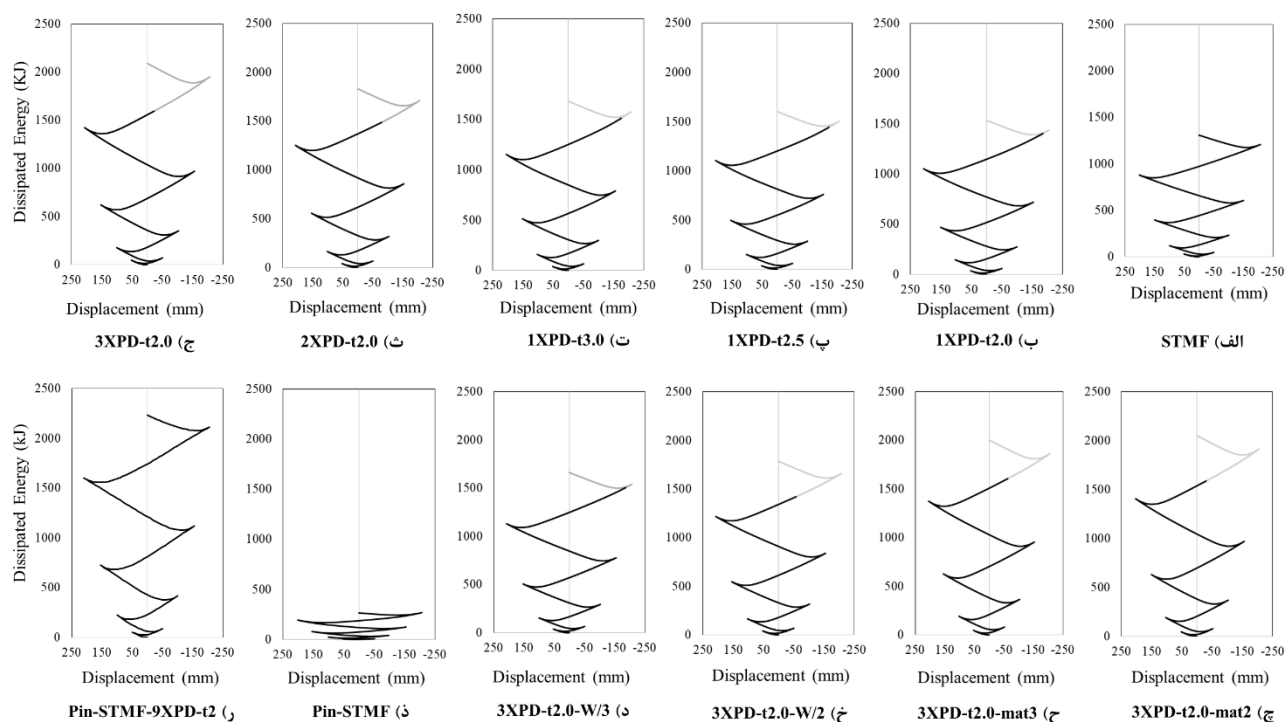
جدول ۳: پارامترهای رفتاری محاسبه شده بر اساس منحنی نیرو-جابجایی.

$\xi_{eq}$	E	$F_u$	$\Delta_u$	$F_y$	$\Delta_y$	$K_{eff}$	$K_0$	نمونه‌ها
-	kJ	kN	m	kN	m	kN/m	kN/m	
۰٫۳۹۶	۱۳۲۰	۱۳۴۸	۰٫۲	۱۰۱۴	۰٫۵	۶۴۴۸	۲۰۴۰۵	STMF
۰٫۳۳۰	۱۵۰۰	۲۰۳۶	۰٫۲	۱۲۴۸	۰٫۵	۹۵۳۹	۲۴۴۰۷	1XPD-t30
۰٫۳۳۴	۱۴۵۰	۱۹۰۹	۰٫۲	۱۱۹۷	۰٫۵	۹۰۱۸	۲۳۴۸۲	1XPD-t2.5
۰٫۳۴۸	۱۴۰۰	۱۷۶۷	۰٫۲	۱۱۵۵	۰٫۵	۸۸۰۰	۲۳۴۱۷	1XPD-t2
۰٫۳۵۱	۱۵۰۰	۲۰۴۸	۰٫۲	۱۳۵۶	۰٫۵	۹۶۸۷	۲۶۵۹۱	2XPD-t2
۰٫۳۵۵	۱۶۰۰	۲۲۹۳	۰٫۲	۱۵۲۰	۰٫۵	۱۰۸۹۹	۳۰۵۹۸	3XPD-t2
۰٫۳۶۷	۱۴۵۰	۱۹۰۳	۰٫۲	۱۲۵۴	۰٫۵	۸۹۸۷	۲۶۵۵۹	3XPD-t2-W/2
۰٫۳۷۶	۱۵۰۰	۱۷۴۲	۰٫۲	۱۲۰۳	۰٫۵	۸۲۱۲	۲۳۹۸۳	3XPD-t2-W/3
۰٫۳۶۳	۱۶۰۰	۲۲۲۸	۰٫۲	۱۵۲۲	۰٫۵	۱۰۶۷۲	۲۹۰۵۲	3XPD-t2-mat2
۰٫۳۶۵	۱۶۰۰	۲۱۱۴	۰٫۲	۱۴۱۹	۰٫۵	۱۰۱۰۹	۲۷۵۴۱	3XPD-t2-mat3
۰٫۱۷۳	۳۰۰	۷۱۰	۰٫۲	۲۲۳	۰٫۵	۳۴۱۰	۴۳۰۱	Pin-STMF
۰٫۴۳۷	۲۲۲۰	۲۰۰۰	۰٫۲	۱۷۷۸	۰٫۵	۸۶۷۰	۲۶۵۱۴	Pin-STMF-9XPD-t2

در قاب خمشی خرپایی فاقد میراگر، اتلاف انرژی چرخه‌ای از طریق تشکیل مکانیزم ویراندل در قسمت ویژه صورت می‌گیرد. با نصب مجموعه میراگر در قسمت ویژه قاب خرپایی، عضو فیوز شونده به قاب اضافه می‌شود و این مسئله منجر به اتلاف انرژی بیشتر می‌شود. در قاب خمشی خرپایی مجهز به مجموعه میراگر پیشنهادی، انرژی ورودی از دو طریق، اتلاف می‌شود. این دو سازوکار شامل مکانیزم ویراندل در قسمت ویژه و رفتار پلاستیک مجموعه میراگر می‌باشد. در نمونه دارای یال با انتهای مفصلی در قسمت ویژه، این اتلاف فقط از



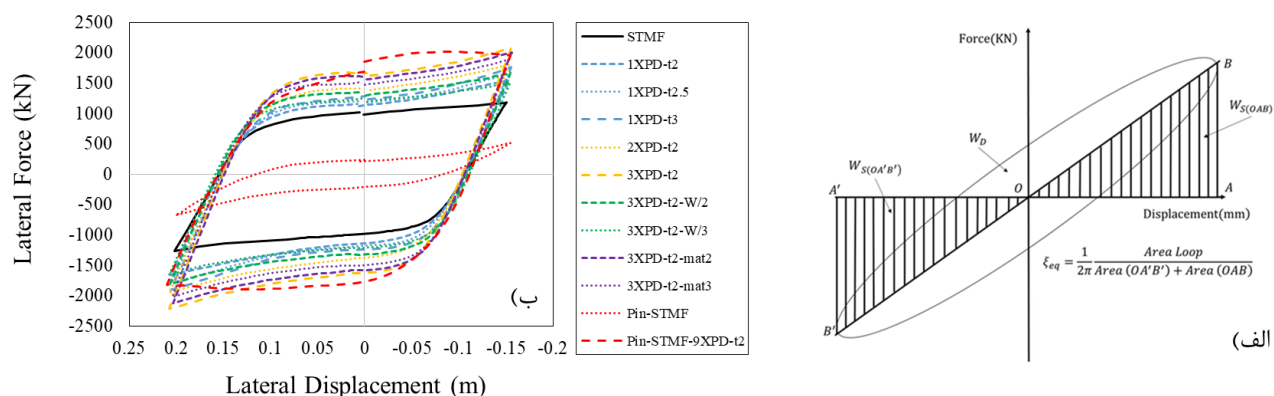
طریق تسلیم مجموعه میراگر صورت می‌گیرد. در شکل ۱۰، اتلاف انرژی نمونه‌های عددی در انتهای بارگذاری معادل دریافت ۰/۴ رادیان نشان داده شده است. در نمودار مذکور اتلاف انرژی با دو رویکرد شامل: بدون در نظر گرفتن بیشینه کرنش پلاستیک معادل شکست در نمونه STMF (نمودار خاکستری) و با در نظر گرفتن آن (نمودار مشکی) ارائه شده است. مقدار انرژی تلف شده برای حالت دوم در جدول ۳ نیز گزارش شده است. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود، قاب خمشی خرابایی مجهز مجموعه به میراگر پیشنهادی قابلیت اتلاف انرژی بیشتری نسبت به قاب خمشی خرابایی ویژه تنها دارد. بر اساس نتایج، قاب خمشی خرابایی دارای یال با انتهای مفصلی در قسمت ویژه که دارای مجموعه میراگر 9XPD-t2 می‌باشد، دارای بیشترین اتلاف انرژی نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد.



شکل ۱۰: اتلاف انرژی قاب خمشی خرابایی و قاب‌های مجهز به میراگر لوله‌ای X شکل.

میرایی هیستریزیس، از نظر فیزیکی رایج‌ترین و بارزترین شکل اتلاف انرژی در سازه‌ها است که به صورت هیستریزیس از پاسخ نیرو-جابجایی حاصل می‌شود. برای یک حلقه از منحنی نیرو-جابجایی ایده‌آل شده، میرایی هیستریزیس می‌تواند به یک نسبت میرایی ویسکوز معادل تبدیل شود (شکل ۱۱-الف). میرایی ویسکوز معادل یا میرایی موثر، رفتار یک سیستم غیر الاستیک را با یک سیستم خطی با میرایی ویسکوز معادل سازی می‌کند [۲۰]. میرایی ویسکوز معادل از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{W_D}{W_{OA'B'} + W_{OAB}} \quad (1)$$

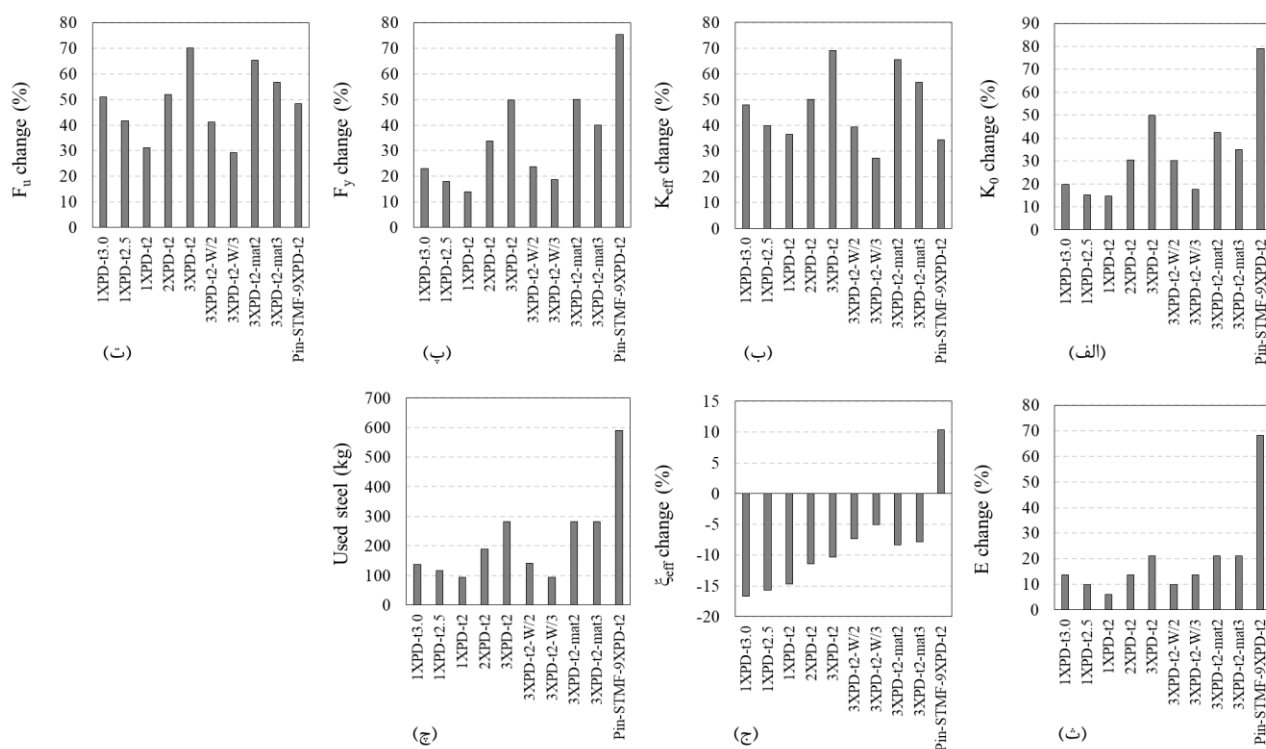


شکل ۱۱: محاسبه میرایی ویسکوز معادل؛ الف) پارامترهای منحنی هیستریزس [۲۱]؛ ب) آخرین سیکل سالم نمونه های مورد بررسی.

پارامترهای مورد استفاده در این رابطه در شکل ۱۱-الف تعریف شده‌اند. شکل ۱۱-ب آخرین چرخه سالم نیرو-جابجایی برای هر کدام از نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. با استفاده از چرخه‌های نمایش داده شده در این شکل و رابطه (۱)، میرایی ویسکوز معادل برای هر کدام از نمونه‌ها محاسبه و در جدول ۳ گزارش شده است. با توجه به نتایج این جدول، نمونه Pin-STMF-9XPD-t2 که دارای یال با انتهای مفصلی در قسمت ویژه و مجموعه میراگر 9XPD-t2 می‌باشد، بیشترین میرایی ویسکوز معادل را دارا می‌باشد.

## ۹- بررسی پارامتریک مشخصه‌های رفتاری

مقایسه کلی مشخصه‌های رفتاری نمونه‌های مورد بررسی در تحقیق حاضر در شکل ۱۲ جمع‌بندی شده است. با توجه به نمودارهای ارائه شده، افزودن میراگر لوله‌ای با پیکربندی‌های مختلف عموماً باعث بهبود سختی، باربری و بزرگتر شدن چرخه‌های بار-جابجایی نمونه‌های مورد بررسی شده است. در ادامه، تاثیر هر کدام از پارامترهای میراگر مطالعه شده بر مشخصه‌های رفتاری نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۲: مقایسه کلی رفتار نمونه‌های مورد بررسی؛ (الف) سختی اولیه؛ (ب) سختی موثر؛ (پ) ظرفیت تسلیم؛ (ت) ظرفیت نهایی؛ (ث) انرژی تلف شده؛ (ج) میرایی ویسکوز معادل؛ (چ) وزن فولاد مصرفی در میراگر.

ضخامت لوله‌های میراگر یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار چرخه‌ای نمونه‌های قاب حاوی میراگر می‌باشد. برای بررسی تاثیر این پارامتر، تغییرات حاصل در نتایج نمونه‌های 1XPD-t2، 1XPD-t2.5 و 1XPD-t3.0 نسبت به داده‌های قاب فاقد میراگر (STMF) محاسبه شده و در نمودارهای میله‌ای شکل ۱۲ ترسیم شده است. با توجه به نمودارهای موجود در این شکل می‌توان ملاحظه نمود که افزایش ضخامت لوله‌های میراگر باعث بهبود سختی، مقاومت و اتلاف انرژی نمونه‌های مورد بررسی شده است. از میان این مشخصه‌های رفتاری، باربری نهایی ( $F_u$ ) نمونه‌ها بیشترین تغییرات را داشته است، به نحوی که برای نمونه با کمترین و بیشترین ضخامت میراگر، مقدار باربری نهایی ۲۰٪ اختلاف داشته است. در خصوص میرایی ویسکوز معادل (نمودار ج) لازم به ذکر است هر چند افزایش ضخامت لوله‌های میراگر باعث افزایش اتلاف انرژی نمونه‌های مورد بررسی شده است (صورت کسر در رابطه ۱)، لیکن مخرج کسر در این رابطه رشد بیشتری داشته و تغییرات میرایی ویسکوز معادل در نمونه‌ها منفی بوده است. با توجه به نمودار، افزایش ضخامت لوله‌های میراگر باعث کاهش بیشتر میرایی ویسکوز معادل می‌شود. یکی از دلایل این مسئله می‌تواند تمرکز کرنش‌ها در گوشه‌های ناحیه ویژه و توقف نمودار به دلیل عبور این پارامتر از مقدار مشخص شده باشد.

تعداد لوله‌های میراگر یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار چرخه‌ای نمونه‌های قاب حاوی میراگر می‌باشد. برای بررسی تاثیر این پارامتر، تغییرات حاصل در نتایج نمونه‌های 1XPD-t2، 2XPD-t2 و 3XPD-t2 نسبت به داده‌های قاب فاقد میراگر (STMF) سنجیده می‌شود. مطابق نمودارهای شکل ۱۲، می‌توان ملاحظه نمود که افزایش تعداد لوله‌های میراگر نیز باعث بهبود سختی، مقاومت، اتلاف انرژی و میرایی ویسکوز معادل نمونه‌های مورد بررسی شده است. لیکن تاثیر این پارامتر بسیار بیشتر از افزایش ضخامت لوله‌های میراگر می‌باشد. افزایش تعداد لوله‌های میراگر از ۱ به ۳ عدد، عموماً باعث افزایش ۳۵٪ در مشخصه‌های رفتاری نمونه‌های مورد بررسی شده است. از میان این مشخصه‌های رفتاری، باربری نهایی ( $F_u$ ) نمونه‌ها بیشترین تغییرات را داشته است، به نحوی که افزایش تعداد لوله‌های میراگر از ۱ به ۳ عدد باعث ۴۰٪ اختلاف بیشتر در باربری نهایی نمونه‌ها شده است.

پارامتر مورد بررسی بعدی، عرض لوله‌های میراگر می‌باشد. برای بررسی تاثیر این پارامتر، تغییرات نتایج نمونه‌های 3XPD-t2، 3XPD-t2-W/3 و 3XPD-t2-W/2 نسبت به داده‌های قاب فاقد میراگر (STMF) بررسی می‌شود. با توجه به نمودارهای این شکل، کاهش عرض لوله‌های میراگر باعث کاهش سختی، مقاومت و اتلاف انرژی ولی در عین حال باعث افزایش میرایی و اسکوز معادل نمونه‌های مورد بررسی می‌شود. تاثیر این پارامتر کمتر از تاثیر تعداد لوله‌های میراگر و بیشتر از ضخامت لوله‌های میراگر می‌باشد. کاهش عرض لوله‌های میراگر از هم‌عرض یال به یک‌سوم عرض یال، باعث کاهش ۳۵٪ در مشخصه‌های رفتاری نمونه‌های مورد بررسی شده است. از میان این مشخصه‌های رفتاری، باربری نهایی ( $F_u$ ) نمونه‌ها بیشترین تغییرات را داشته است، به نحوی که کاهش عرض لوله‌های میراگر از هم‌عرض یال به یک‌سوم عرض یال باعث ۴۰٪ اختلاف بیشتر در باربری نهایی نمونه‌ها شده است.

آخرین پارامتر مورد بررسی، نوع مصالح به کار رفته در لوله‌های میراگر می‌باشد. برای بررسی تاثیر این پارامتر، تغییرات حاصل در نتایج نمونه‌های 3XPD-t2، 3XPD-t2-mat2 و 3XPD-t2-mat3 نسبت به داده‌های قاب فاقد میراگر (STMF) بررسی شده است. با توجه به نمودارهای این شکل، تغییر نوع مصالح لوله‌های میراگر از پر مقاومت به مقاومت متوسط و کم مقاومت، باعث کاهش جزئی سختی و مقاومت نمونه‌های مورد بررسی شده لیکن تاثیری بر مقدار اتلاف انرژی ندارد. همچنین این مسئله باعث اندکی بهبود در میرایی و اسکوز معادل نمونه‌ها شده است. به طور کلی، تاثیر این پارامتر کمتر از تاثیر سایر پارامترهای مورد بررسی می‌باشد. تغییر نوع مصالح لوله‌های میراگر از پر مقاومت به کم مقاومت، به طور تقریبی باعث کاهش ۱۵٪ در مشخصه‌های رفتاری نمونه‌های مورد بررسی شده است.

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت، افزودن میراگر لوله‌ای با پیکربندی‌های مختلف عموماً باعث بهبود سختی، باربری و بزرگتر شدن چرخه‌های بار-جابجایی نمونه‌های مورد بررسی می‌شود. لیکن این مسئله باعث افزایش تمرکز تنش و کرنش در گوشه‌های ناحیه ویژه نمونه‌ها و توقف نمودار به دلیل عبور این پارامتر از مقدار مشخص شده می‌شود. برای کاهش تمرکز تنش و کرنش در ناحیه ویژه، استفاده از مدل با المان‌های یال مفصلی در قسمت ویژه مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجاکه در این پیکربندی نواحی مستعد پاره‌گی در دو انتهای یال قسمت ویژه به صورت مفصل بوده و پلاستیک نخواهند شد، سطح بیشینه تنش و کرنش در این نواحی تا حد زیادی کاهش یافته است. با توجه به شکل ۱۲-ج، این مدل دارای بیشترین میرایی و اسکوز معادل در بین نمونه‌های مورد بررسی می‌باشد. این در حالی است که با توجه به سایر نمودارهای شکل ۱۲، این نمونه علاوه بر سختی و مقاومت مناسب، دارای قابلیت اتلاف انرژی بالایی نیز بوده و قابلیت تعویض پس از بروز زلزله را نیز دارا می‌باشد. در کنار این مسئله، لازم به ذکر است که احتمالاً استفاده از نمونه مذکور از لحاظ اجرایی پرهزینه تر از سایر گزینه‌ها خواهد بود. با توجه به نمودار آخر در شکل ۱۲ که نشان دهنده میزان فولاد مصرفی در هر کدام از نمونه‌های مورد بررسی می‌باشد، می‌توان ملاحظه نمود که وزن فولاد مصرفی در میراگر این نمونه بیشتر از دو برابر با سایر نمونه‌ها تفاوت دارد. بعلاوه با توجه به تعداد نیم‌لوله‌های مورد استفاده، میزان جوشکاری انجام شده نیز در میراگر این نمونه بیشتر از سایر نمونه‌ها خواهد بود. با توجه به مزایا و معایب مطرح شده برای استفاده از این نوع میراگرها، می‌توان گفت که بررسی پارامتریک رفتار چنین نمونه‌هایی از لحاظ سازه‌ای و اقتصادی نیازمند انجام مطالعات بیشتر می‌باشد.

## ۱۰- نتیجه گیری

در این مطالعه از میراگرهای تسلیمی به منظور اتلاف انرژی بیشتر در قاب‌های خمشی خرپایی ویژه استفاده شده است. از مقاطع جفت HSS برای اعضا یال و جان تیر خرپایی ویژه استفاده شده است. به منظور بررسی بهبود رفتار چرخه‌ای و اتلاف انرژی بیشتر در قاب خمشی خرپایی ویژه، علاوه بر نمونه‌های با یال پیوسته در قسمت ویژه، نمونه دارای یال با اتصال مفصلی در دو انتهای قسمت ویژه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها با استفاده از تحلیل المان محدود صورت گرفته است. جهت صحت‌سنجی مدل‌های عددی از نمونه تجربی مورد مطالعه توسط سایر محققین استفاده شده است. ارزیابی رفتار مدل‌های عددی با توجه به توزیع تنش‌ها و کرنش‌های پلاستیک، نمودارهای چرخه‌ای نیرو-جابجایی و پارامترهایی مانند سختی اولیه، سختی نهایی، جابجایی تسلیم و نهایی، نیروی تسلیم و نهایی، اتلاف انرژی و میرایی و اسکوز معادل، صورت گرفته است. نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها عبارتند از:



- ۱- بررسی سختی و مقاومت نمونه‌های تحلیل شده نشان داد که فرار دادن مجموعه میراگرهای لوله‌ای X شکل در قسمت ویژه باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در سختی و مقاومت نمونه‌ها می‌شود. با افزایش تعداد میراگرهای لوله‌ای X شکل، افزایش ضخامت یا عرض آنها و همچنین افزایش تنش تسلیم میراگرها، افزایش سختی و مقاومت محسوس تر می‌شود.
  - ۲- بررسی توزیع تنش‌ها و کرنش‌ها در نمونه‌های دارای یال پیوسته در ناحیه ویژه، نشان داد که با افزایش تعداد میراگرهای لوله‌ای X شکل، سطح بیشینه تنش و کرنش در گوشه‌های قسمت ویژه افزایش می‌یابد. این مسئله می‌تواند در نتیجه افزایش مقاومت تسلیم ناحیه ویژه در اثر افزودن میراگرها اتفاق افتاده باشد.
  - ۳- برای رفع مشکل افزایش تنش و کرنش در یالهای ناحیه ویژه، استفاده از مدل با المان‌های یال مفصلی در قسمت ویژه و میراگر لوله‌ای X شکل، به عنوان یک راهکار پیشنهاد گردید. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که سطح بیشینه تنش و کرنش در این نمونه تا حد زیادی کاهش می‌یابد. مقدار بیشینه کرنش پلاستیک تجمعی در انتهای بارگذاری معادل دریفت ۰/۰۴ رادیان از ۰/۷۴ برای نمونه STMF به ۰/۲۲ در نمونه با المان‌های یال مفصلی کاهش یافت.
  - ۴- بررسی اتلاف انرژی چرخه‌ای در نمونه‌های با میراگرهای مختلف و مقایسه آنها با قاب خمشی خرپایی ویژه فاقد میراگر نشان داد که قاب خمشی خرپایی مجهز به مجموعه میراگر پیشنهادی قابلیت اتلاف انرژی بیشتری نسبت به قاب خمشی خرپایی ویژه تنها دارد. بر اساس نتایج، قاب خمشی خرپایی دارای یال با انتهای مفصلی در قسمت ویژه که دارای میراگر لوله‌ای X شکل می‌باشد، دارای بیشترین اتلاف انرژی نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد.
  - ۵- بررسی میرایی ویسکوز نمونه‌های تحلیل شده نشان داد که نمونه دارای یال با انتهای مفصلی در قسمت ویژه و مجموعه میراگر لوله‌ای X شکل، بیشترین میرایی ویسکوز معادل را در بین سایر نمونه‌ها دارا می‌باشد. این نمونه علاوه بر سختی و مقاومت مناسب، دارای قابلیت اتلاف انرژی بالایی نیز بوده و قابلیت تعویض پس از بروز زلزله را دارا می‌باشد.
- به طور کلی، استفاده از هر دو رویکرد مجموعه میراگر پیشنهادی با اتصال گیردار و مفصلی در دو انتهای قسمت ویژه تیر خرپایی می‌تواند منجر به افزایش اتلاف انرژی سیستم شود. طبق نتایج عددی به دست آمده، قاب خمشی با تیر خرپایی دارای اتصال مفصلی در دو انتهای قسمت ویژه که به مجموعه میراگر پیشنهادی مجهز شده است بهترین رویکرد برای هدف مطالعه مذکور می‌باشد. این در حالیست که در صورت استفاده از پیکربندی حاوی مجموعه میراگر پیشنهادی با اتصال گیردار در دو انتهای قسمت ویژه، احتمالاً این نواحی مشابه قاب خمشی خرپایی ویژه فاقد میراگر، مستعد بروز خرابی حین وقوع زمین‌لرزه بوده و نیازمند اقدامات تقویتی پس از زلزله باشند.

## سپاسگزاری

بدینوسیله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی برای حمایت از پژوهش حاضر سپاسگزاری به عمل می‌آید. همچنین، زحمات هیات داوران و اعضای کمیته علمی انجمن مهندسی سازه ایران در ارتقای کیفیت مقاله و انتشار آن شایسته قدردانی می‌باشد.

## مراجع

- [1] AISC 341 (2016). *Seismic provisions for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [2] Itani, A. and Goel, S.C. (1991). *Earthquake resistant design of open web framing systems*. Research Report No. UMCE 91-21, University of Michigan, Dept. Civil and Environmental Eng., Ann Arbor, MI.
- [3] Goel, S.C., and Itani, A.M. (1994). Seismic behavior of open-web truss-moment frames. *Journal of Structural Engineering*, 120(6), 1763-1780.
- [4] Basha, H.S. and Goel, S.C. (1994). *Seismic Resistant Truss Moment Frames with Ductile Vierendeel Segment*. Research Report No. UMCEE 94-29, University of Michigan, Department of Civil and Environmental Engineering, Ann Arbor, MI.
- [5] AISC 341 (1997). *Seismic provisions for structural steel buildings*. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

- [6] Soong, T.T., Dargush, G.F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. John Wiley & Sons, UK.
- [7] Soong, T.T., Spencer, B.F. (2002). Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and State-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24(3):243-59.
- [8] FEMA 450 (2003). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures with accompanying commentary*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- [9] Longo, A., Montuori, R. and Piluso, V. (2012). Failure mode control and seismic response of dissipative truss moment frames. *Journal of Structural Engineering*, 138(11):1388-97.
- [10] Fathizadeh, S.F., Dehghani, S., Yang, T.Y., Vosoughi, A.R., Farsangi, E.N. and Hajirasouliha, I. (2021). Seismic performance assessment of multi-story steel frames with curved dampers and semi-rigid connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 182, 106666.
- [11] Pekcan, G., Linke, C. and Itani, A. (2009). Damage avoidance design of special truss moment frames with energy dissipating devices. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(6):1374-1384.
- [12] Jiansinlapadamrong, C., Simasathien, S., Okazaki, T. and Chao, S.H. (2017). Cyclic loading performance of full-scale special truss moment frame with innovative details for high seismic activity. In: *16<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE)*, Santiago, Chile.
- [13] Sachan, A. and Rai, D.C. (2012). Aluminum Shear Yielding Damper (Al-SYD) as an Energy Dissipation Device in Truss Moment Frames (TMFs). In: *15<sup>th</sup> World Conference in Earthquake Engineering (WCEE)*, Lisbon, Portugal.
- [14] Askariani, S. S., Garivani, S., Hasani, M., & Hajirasouliha, I. (2021). Special truss moment frames equipped with steel slit dampers. *International Journal of Steel Structures*, 1-19.
- [15] Guo, W., Wang, X., Yu, Y., Chen, X., Li, S., Fang, W., Zeng, C., Wang, Y. and Bu, D. (2020). Experimental study of a steel damper with X-shaped welded pipe halves. *Journal of Constructional Steel Research*, 170, 106087.
- [16] Simasathien, S., Jiansinlapadamrong, C. and Chao, S.H. (2017). Seismic behavior of special truss moment frame with double hollow structural sections as chord members. *Engineering Structures*, 131, 14-27.
- [17] Zabihi Samani, M., Abed Ebrahimi, M. H., & tarighi, P. (2019). Evaluation of Slit Steel Damper & Reduced Beam Section Connections under Cyclic Loading. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 6(Issue 2), 209-222. doi: 10.22065/jsce.2017.98867.1329.
- [18] Kohnepooshi, O., & Salem, A. (2020). Structural behavior of steel slit damper in steel beam to column connection. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(1), 26-40. doi: 10.22065/jsce.2018.112329.1416.
- [19] Sahoo, D. R., Singhal, T., Taraithia, S. S., & Saini, A. (2015). Cyclic behavior of shear-and-flexural yielding metallic dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 247-257.
- [20] Chopra, A.K. (1995). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, New Jersey, U.S.A.
- [21] Araei, A.A. and Ghodrati, A. (2017). Predictive models for normalized shear modulus and damping ratio of modeled rockfill materials. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 14(1), 27-40.