

مطالعه آزمایشگاهی و عددی قاب‌های خمشی فولادی دارای پین فیوز با اتصال مستهلک کننده پیچی اصطکاکی

علی‌رضا گرایلی^{۱*}، عبدالرضا سروقد مقدم^۲، احسان درویشان^۳، همایون کوثریه^۳

۱- دانشجوی دکتری تخصصی، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن

۲- دانشیار، مهندسی عمران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران

۳- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، رودهن

*رودهن، صندوق پستی ۳۹۷۳۱۸۹۸۱، Arg110@iran.ir

چکیده

با بررسی نتایج مربوط به زلزله‌های نورثریج در سال ۱۹۹۴ و زلزله‌های مخرب دیگر، مشاهده گردید که قوی کردن اعضا سازه‌ای و افزایش طول خط جوش اتصالات تیر به ستون در سازه‌های فولادی عملکرد مناسب لرزه‌ای نداشته‌اند. پس از آن برای جلوگیری از شکست ترد اتصالات، نحوه تشکیل مفصل پلاستیک در خارج از ناحیه اتصال مورد بررسی قرار گرفت و تیرها با مقطع کاهش یافته پیشنهاد گردید. اما در استفاده از مستهلک کننده‌ها در قاب‌های خمشی کمتر توجه شده است. اتصال پیشنهادی پین فیوز (pin-fuse SBC)، یکی از اتصالاتی است که می‌تواند از طریق لغزش و اصطکاک نیروهای وارده را در نزدیکی اتصال مستهلک کند. پین فیوزها در هنگام وقوع بارهای لرزه‌ای، از طریق لغزش دورانی سطوح فولادی نسبت به یکدیگر عمل نموده و نیروی اصطکاک بین صفحات فیوز، موجب استهلاک انرژی زلزله خواهد شد. قاب‌های موردنظر، قابلیت جذب انرژی بالایی از طریق فیوزهای مزبور داشته که می‌تواند در مناطق با فعالیت لرزه‌خیزی شدید مورد استفاده قرار گیرد. در مدل پیشنهادی در این پژوهش، اتصال مورد نظر یک مفصل واقعی در نزدیکی اتصال تیر به ستون با سوراخ‌هایی لوبیایی طراحی شده است که پس از رسیدن به لنگری کمتر از لنگر اتصال، قابلیت چرخش و حرکت پیدا می‌کند. از این‌رو نتایج آزمایشگاهی مدل پیشنهادی تحت بارهای چرخه‌ای با نتایج عددی اجزای محدود بررسی و مورد مقایسه قرار گرفته است. این نتایج نشان می‌دهد که اتصال پین فیوز پس از رسیدن به حد لازم و به دلیل حذف سهم جان از مقاومت خمشی و عدم وقوع کمانش پیش‌بینی در جان تیر و با ایجاد فیوزی مطمئن دور از اتصال تیر و ستون، علاوه بر آن که مقاومت اتصال پین فیوز و شکل‌پذیری به ترتیب ۱۱ و ۶ درصد افزایش داده است، توانسته است به تغییر مکان نسبی تا ۹ درصد برسد که این میزان بیشتر از حد آیین‌نامه در قاب‌های خمشی ویژه است.

واژگان کلیدی

اتصال پین فیوز، میراگر اصطکاکی، منحنی هیستریزس، سوراخ لوبیایی

Experimental and numerical steel moment frames with pin-fuse with slotted bolted friction damper (pin-fuse SBC)

A. Gerayeli, A. Sarvghad Moghadam, Eh. Darvishan

Abstract

By examining the results related to the Northridge earthquakes in 1994 and other destructive earthquakes, it was observed that strengthening the structural members and increasing the length of the welding line of beam-to-column connections in steel structures did not have a suitable seismic performance. After that, to prevent the brittle failure of the connections, the way of forming the plastic joint outside the connection area was investigated and beams with a reduced cross-section were proposed. But less attention has been paid to the use of absorbers in bending frames. The proposed pin-fuse connection, (pin-fuse SBC), is one of the connections that can absorb the incoming forces near the connection through sliding and friction. When an earthquake occurs, the pin-fuses acts through the rotational sliding of the steel surfaces towards each other, the presence of friction between the fuse plates will cause the consumption of the earthquake energy. Frames equipped with pin-fuses, this frame has the ability to absorb high energy through said fuses, it can be used in areas with strong seismic activity. In the model proposed in this research, the intended connection of a real joint near the beam-to-column connection is designed with bean-shaped holes that can rotate and move after reaching an anchorage lower than the connection moment. Therefore, the experimental results of the proposed model under cyclic loads have been investigated and compared with the numerical results of finite elements. These results show that the pin fuse connection after reaching the required limit and due to the removal of the contribution of the web from the bending resistance and the absence of torsional buckling in the beam web and by creating a safe fuse away from the connection of the beam and the column, in addition to the resistance of the fuse pin connection and plasticity has increased by 11% and 6%, respectively, it has been able to reach a relative displacement of up to 9%, which is more than the regulation limit in special bending frames.

Keywords

PinFuse connection, Friction damper, Hysteresis curve, Slotted bolted friction

تجربه زلزله‌های دهه‌های گذشته خصوصاً زلزله نورثریج نشان داد که قوی‌تر کردن اعضای تیر و ستون در قاب‌های خمشی رضایت بخش نبوده است چرا که با افزایش سختی نیروهای زلزله هم بزرگتر شده و صدمات بیشتری در اعضای قاب خصوصاً اتصالات تیر به ستون وارد شده است. امروزه در اغلب آیین نامه‌ها طراحی لرزه‌ای سازه‌ها مبتنی بر روش طراحی بر اساس ظرفیت است. در این روش نخست یک عضو به عنوان فیوز انتخاب شده و بقیه اعضا بر اساس فیوز و تحت امر آن طراحی می‌گردند. فیوزها با شکل پذیری خود مانع از انتقال نیروی بیشتر از نیروی تسلیم به اعضای دیگر می‌شوند و سایر نقاط تحت فرمان فیوز و در امنیت نیرویی قرار گرفته و میزان تغییر شکل عنصر فیوز معرف میزان جذب انرژی در سازه می‌گردد [۱].

اتصالات قاب خمشی برای مقاومت در برابر نیروهای خمشی و هم‌چنین توانایی ایجاد مفصل پلاستیک داخل تیرها در حین زلزله و استهلاک انرژی زلزله در حین حرکات رفت و برگشتی، طراحی می‌شوند. در زلزله سال ۱۹۹۴ نورثریج اتصالات خمشی در قاب‌های خمشی فولادی متحمل شکست‌های ترد غیر منتظره‌ای در محل ناحیه اتصال تیر به ستون شدند، که دلایل آن را می‌توان تنش‌های پسماند حرارتی جوشکاری، تمرکز تنش، تنش‌های چند محوره و درخواست حداکثری نیرو در آن محل دانست که باعث آسیب پذیری اتصال در شکل پذیری بالا می‌شود. یک راه حل برای این مشکل کاهش درخواست نیرو در محل اتصال و ملایم کردن مسیر تنش است [۲]. از این رو در این پژوهش رفتار تیرهای فولادی مجهز به پین فیوز به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

به این منظور، در مدل پیشنهادی این پژوهش، مفصل خمشی در نزدیکی تکیه گاه و کمی دورتر از ناحیه اتصال در تیر مطابق شکل (۱)، پیش بینی گردیده است. با ایجاد مفصل از پیش ساخته شده اما کنترل شده در تیر می‌توان قبل از رسیدن به لنگر پلاستیک در ناحیه اتصال در میزان لنگری کمتر از لنگر پلاستیک در نزدیکی اتصال، آسیب دیدگی اتصال تیر به ستون را تا حد زیادی از بین برد.

مهندسی عمران پس از زلزله نورثریج در لس آنجلس در سال ۱۹۹۴ و زلزله ای عظیم در کوبه ژاپن دچار تحول عظیم شد. تا آن زمان فلسفه کلی طراحی لرزه‌ای بر پاسخ جلوگیری از واژگون شدن سازه و ممانعت از تلفات جانی بود. بنابراین برای

اطمینان از عدم واژگونی سازه، مهندسین نیاز داشتند تا سازه‌هایی را طراحی کنند که منجر به کاهش خسارت بر اساس کاربری ساختمان گردد [۲].



شکل ۱- مدل شماتیک مفصل درقاب

بر اساس کاربری، ساختمان‌ها باید مطابق با عملکردهای لرزه‌ای متفاوتی باشند. به‌عنوان مثال تسهیلات بحرانی مانند بیمارستان‌ها که نیاز دارند کماکان پس از چندین زلزله به‌صورت قابل استفاده باقی بمانند، باید بر اساس معیارهای متفاوتی نسبت به انبار کالا طراحی شوند.

راهنماهای جدید مربوط به ساختمان‌ها توسط سازمان‌های متفاوتی بیان‌شده‌اند تا نیازهای فوق را برآورده کنند. دوتا از سازمان‌های مربوطه عبارتند از VISION 2000 که توسط انجمن مهندسین سازه کالیفرنیا^۱ و راهنماهای (NEHRP) برای نوسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها (BSSC) که توسط عامل مدیریت حوادث اضطراری فدرال^۲ منتشر می‌شوند.

راهنماهای فوق جزو اولین راهنماهایی می‌باشند که چارچوب طراحی، بر اساس سطح عملکرد را بیان می‌کنند. در این چارچوب، نیاز لرزه‌ای سازه باید با دقت محاسبه شود و با محدوده‌های مجاز مربوط به سطح عملکرد مورد نیاز مقایسه شود [۳].

همان طور که گفته شد اولین تلاش‌ها در این زمینه از اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی صورت گرفت در این زمان سیستم‌های انتخاب شده برای جداسازی لرزه‌ای بسیار محدود بودند این سیستم‌ها شامل میراگرهای تیر فولادی و قطعات لاستیک لایه‌ای که در پی ساختمان نصب می‌شدند بودند. در همان زمان با تحقیق در رفتار فلزات سیستم جدیدی که بر پایه رفتار پلاستیک سرب بنا شده بود معرفی شد که آن را میراگر سیستم سری - تزریقی نامیدند و اولین بار در پل تقاطع یکی از خیابان‌های نیوزلند استفاده شد. روش منطقی دیگری که همزمان پیشنهاد شد استفاده از تغییر شکل پلاستیک تیرهای فولادی برای ایجاد میرایی داخلی لخت در ساختمان بود.

اولین میراگرهای تیر فولادی که نسبت به اعضای فولادی

دیگر مقاومت بیشتری در مقابل پدیده خستگی دارند با تلاش‌های انجام شده، توسط Skinner و همکارانش در سال ۱۹۷۵-۱۹۷۲ معرفی گردید [۴ و ۵].

پیشرفت عمده این سیستم مرهون تحقیقات مستمر پژوهشگران مختلف در سال‌های ۱۹۷۹ تا ۱۹۸۸ میلادی بوده که بر روی تیرهای پیوند ایزوله شده و سایر مشخصات و ضوابط طراحی این نوع قاب‌ها بود [۶ و ۷]. در این سیستم، بین اجزای مهاربندی یک المان به عنوان تیر پیوند طول e قرار گرفت که به عنوان یک فیوز، میزان شکل پذیری و رفتار سازه را تحت کنترل خود نگه می‌داشت.

بررسی‌های دیگری که توسط دانشمندان ژاپنی صورت گرفت که در آن‌ها با انجام آزمایشات مختلفی روی میراگرها و رسم منحنی هیستریزیس اقدام به پایه ریزی سیستم‌های اتلاف انرژی کردند [۸ و ۹].

Pachideh و همکارانش در سال ۲۰۲۰، مدل آزمایشگاهی و عددی از مهاربندی با عضو لوزی شکل مجهز به میراگر تسلیم شونده را مورد بررسی قرار دادند [۱۰].

بدین منظور با ساخت و بکارگیری سه نمونه نیمه سخت، سخت و ساده انجام آزمایش چرخه‌ای بر روی آنها، سیستم پیشنهادی مورد بحث و بررسی قرار گرفته و عملکرد و قابلیت آن در مقایسه با سایر سیستم‌های مهاربندی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. در سیستم ساده پیشنهادی، حلقه فولادی و اعضای مهاربند برخلاف سایر سیستم‌های مورد بررسی در تحقیقات گذشته، به صورت غیرمستقیم عمل می‌کنند. بنابراین ضمن بکارگیری حداکثری از ظرفیت میراگر، در صورت گسیختگی میراگر، سیستم همچنان قابلیت اعمال نیرو را دارا می‌باشد و گسیختگی حلقه فولادی منجر به گسیختگی کل سیستم مهاربند نمی‌شود [۱۱-۱۲].

در سال ۲۰۰۹ Oh و همکارانش به منظور حل مشکلات آسیب‌های وارده به اتصالات تیر به ستون، یک سیستم ساختاری ابتکاری نو با میراگرهای شکافدار ایجاد کردند که نه تنها عملکرد لرزه‌ای خوبی را میسر می‌سازند بلکه قابلیت تعویض یا تعمیر را پس از یک زلزله سنگین به آسانی دارا می‌باشد. آزمایش آنها از این قرار بود که ۴ نمونه اتصال تیر به ستون ساختند که شامل ۲ میراگر (SSD)، که تفاوت آن‌ها در ابعاد آن‌ها بود، یک اتصال ترکیبی از میراگر و دال بتنی که ابعاد آن مانند میراگر دوم بود و یک اتصال مستقیم تیر به ستون بوسیله جوش بود. نمونه چهارم برای ارزیابی این اتصالات از یک بارگذاری چرخه‌ای استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن بود که در طول

بارگذاری تغییر شکل پلاستیک در نمونه‌های دو میراگر و ترکیبی فقط در میراگر اتفاق می‌افتد و به اعضای سازه‌ای هیچ گونه آسیبی وارد نمی‌شود. همچنین میراگرها قادرند تا رسیدگی به گسیختگی تعداد زیادی چرخه بارگذاری را تحمل کنند. در نمونه چهارم مشاهده شد که مفصل پلاستیک در تیر تشکیل شده و باعث تغییر پلاستیک شکل در عضو سازه‌ای می‌شود [۱۳].

در سال ۲۰۱۰ Khoshnoodian و Kiani، تحقیقی در مورد انتخاب معیار مناسب برای ارزیابی تأثیر میراگر SSD روی پاسخ سازه و دستیابی به یک توزیع مناسب برای جانمایی میراگر در پلان و ارتفاع انجام دادند. نتایج این تحقیق این بود که توزیع ۴ میراگر در پلان هر طبقه را می‌توان به عنوان توزیع بهینه در جانمایی پلانی و ارتفاعی این میراگر دانست [۱۴].

میراگر EADAS در ابتدا توسط Najari Varzaneh و همکارانش، تحت بار چرخه‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت که یک مدل یک طبقه و یک دهانه با ۸ نوع میراگر EADAS با ابعاد و اندازه‌های مختلف مورد بررسی و تحلیل، تحت نرم افزار ABAQUS قرار گرفت. با اضافه شدن میراگر به قاب فولادی میرایی سیستم افزایش می‌یابد و باعث اتلاف انرژی در سازه می‌شود [۱۵].

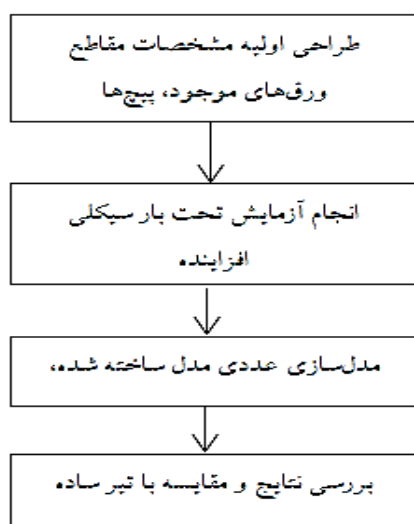
Fintel و Ghosh، از مفهوم فیوز سازه‌ای برای تیرهای خمشی با ستون قوی و تیر ضعیف پرداختند [۱۶]. Chan و همکارانش، آزمایش‌های بارگذاری یک طرفه و چرخه‌ای روی تیرهای پیوند کوتاه بصورت ورق‌های نازک فولادی جوش شده داخل یک قطعه قوطی انجام دادند و با توجه به استهلاک انرژی بالا، کاربرد آن را برای بهسازی لرزه‌ای قاب‌های موجود توصیه نمودند [۱۷].

در سایر پژوهش‌های موجود برخی دیگر از اعضای سازه‌ای که سیستم‌های استهلاکی آن‌ها را می‌توان به عنوان فیوز سازه‌ای نام برد، مورد بررسی قرار گرفت [۲۳-۱۸].

Tagawa و همکارانش یک سیستم پیشنهادی مهاربندی متشکل از میراگر شکافدار فولادی را ارائه کردند. در ابتدا، چگونگی محاسبه سختی جانبی و مقاومت این سیستم مهاربندی همراه با میراگر شکافدار فولادی مطرح شد و در نهایت نیز یک مدل سه خطی هیستریزیس برای پیش‌بینی رفتار این سیستم ارائه نمودند [۲۴].

Aghlra و همکارانش، در تحقیقی آزمایشگاهی به بررسی رفتار فیوزهای لوله‌ای و بهبود رفتار خمشی و استهلاک انرژی زلزله پرداختند. آن‌ها با بررسی نمونه‌های واقعی، ابعاد تعداد نمونه‌ها، قطر و ضخامت لوله‌ها و طول را مورد مقایسه قرار

حرکت کرده و در محدوده چرخش هیچ گونه کمانشی نخواهد داشت. در این اتصال، مشارکت نکردن جان تیر در مولفه خمشی تیر باعث می گردد که اندر کنش میان مولفه های کنترل شونده توسط نیرو و مولفه های کنترل شونده توسط تغییر مکان از میان برود. بدین ترتیب بهبود پارامترهای پایداری (کمانش موضعی بال و جان و کمانش جانبی-پیچشی جان) موجب ایجاد رفتار چرخه ای پایدار در این نوع اتصال در زوایای تغییر مکان نسبی بیشتر از ضوابط پذیرش اتصال (بر اساس استاندارد مرتبط داخلی و خارجی) و مستهلک شدن انرژی القایی بیشتر زلزله در این اتصال می گردد. مسئله مهمی که در انتخاب فیوزها می بایست مورد بررسی قرار داد، اثر ابعاد مسئله است و فیوزها می بایست از نظر هزینه و تعویض ارزیابی شود و این مسئله سبب شده است تا در این پژوهش رفتار فیوزهای بررسی گردد. روند مطالعاتی پژوهش حاضر در فلوچارت شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲- روند پژوهش حاضر

۲- مطالعات آزمایشگاهی

برای ساخت نمونه آزمایشگاهی از فولاد سازه ای رایج در کشور (ST-37) و از کارخانه فولاد مبارکه اصفهان استفاده شده است. مدل پژوهش حاضر در آزمایشگاه پژوهشگاه پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله (آزمایشگاه مهندسی سازه) ساخته شد. اکچواتور استفاده شده ساخت شرکت هلی پیس کنترل^۳ آلمان و شیر کنترل شرکت رکسروت^۴ با طول ۲۲۰ سانتیمتر، جابجایی مثبت منفی ۱۵ سانتی متر حداکثر نیروی وارده ۵۰ تن بوده است. نمای کلی قاب پین فیوز پیشنهادی در

دادند. نتایج نشان می دهد که علاوه بر نشان دادن رفتار هیسترسیزی پایدار و استهلاک قابل توجه انرژی انرژی در یک تغییر جابجایی مناسب، جایگزینی آسان قطعات لوله را پس از هر شکست می دهد [۲۵].

Ahmadi و همکارانش با مقایسه اتصال پیچی با سوراخ استاندارد و روش اصلاح شده با سوراخ لوبیایی مشاهده کردند ترکیب پیچ پر مقاومت اصطکاکی با سوراخ لوبیایی یک مدل میراگر ایجاد می شود که باعث بالا رفتن شکل پذیری اتصال می شود. نتایج این پژوهش نشان می دهد با تبدیل سوراخ گرد به لوبیایی میزان دوران در حدود ۲۱ درصد افزایش می یابد [۲۶].

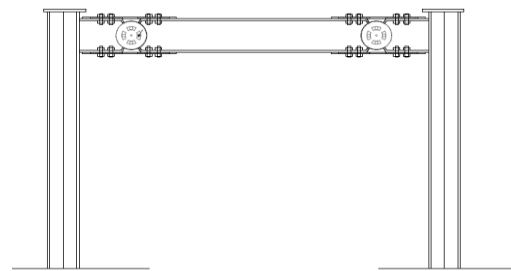
Rezaee و Naghipour، رفتار مدل پین فیوز پیشنهادی را با تیر RBS مقایسه نموده و مشاهده نمودند مفصل پلاستیک در پیچ ها تشکیل شده و در ستون ها اتفاقی نمی افتد. این در حالی است که در تیرهای RBS در تیرها اتفاق می افتد [۲۷].

Saleh و همکارانش، در مدلی آزمایشگاهی قاب خمشی با جان لوله ای را بررسی نمودند که در تیرهای کوتاه که با برش در جان پیوسته تیر و جایگزینی جان لوله ای در محل از پیش تعیین شده جهت ایجاد مفصل پلاستیک بدست می آید. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اتصال با حذف سهم جان از مقاومت خمشی مقطع منجر به ایجاد فیوز شکل پذیر دور از اجزاء اتصال تیر به ستون می گردد و ظرفیت تغییر مکان جانبی طبقه را تا ۹ درصد افزایش دهد که این میزان بیشتر از ضوابط پذیرش اتصال خمشی ویژه بر اساس استانداردهای AISC و FEMA350 است. همچنین استفاده جان لوله ای در محل مفصل پلاستیک منجر به بهبود پایداری کمانش جانبی-پیچشی می گردد بطوری که تنها، کمانش موضعی بال تیر در نمونه های آزمایشگاهی مشاهده گردید. در این مدل با توجه به مشارکت بیشتر جان تیرهای عمیق، در مقاومت خمشی مقطع، اتصال با مقطع کاهش یافته توسط جان اکاردئونی لوله ای شکل گزینه ای مناسب برای تیرهای عمیق در سیستم های باربر جانبی لرزه ای است [۲۸].

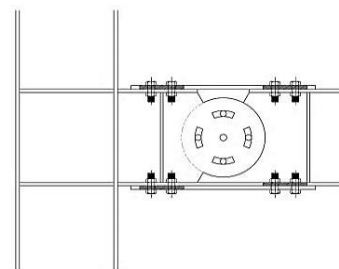
با بررسی نتایج مربوط به مطالعات پیشین در مدل حاضر رفتار فیوز شکل پذیر دور از اجزاء اتصال تیر به ستون سبب بهبود پارامترهای مرتبط با کمانش موضعی و جانبی مفصل پلاستیک شده است. در مدل حاضر کاهش اثر جان در مقاومت خمشی موجب کاهش اساس مقطع پلاستیک تیر و بوجود آمدن یک ناحیه تضعیف ظرفیت خمشی شده می گردد که محل مفصل پلاستیک از ابتدا قابل پیش بینی باشد و به عنوان یک فیوز سازه ای در این ناحیه عمل نماید. از طرفی ورق بال هیچ اتصالی به جان تیر ندارد و بلافاصله پس از رسیدن به نیروی لغزشی



قاب خمشی مطابق شکل (۳) و مفصل پین فیوز آن در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳- جزئیات اجرایی قاب خمشی پین فیوز

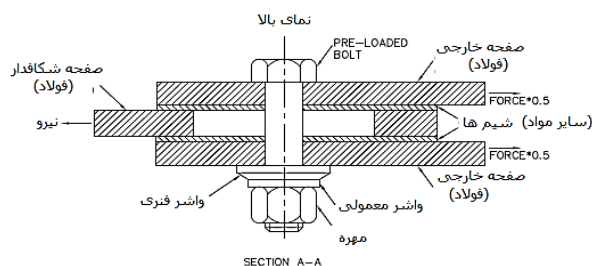
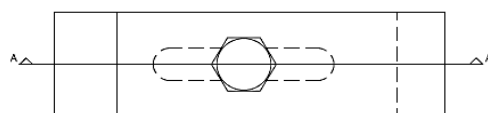


شکل ۴- جزئیات پین فیوز

مجاور را کاهش می‌دهد. صرفنظر از لرزه خیزی منطقه، ضوابط فعلی طراحی، هنوز هم منجر به خسارات ساختمانی قابل توجهی پس از زلزله می‌شوند. شکل (۶) نشان می‌دهد که سوراخ لوبیایی شامل تعدادی صفحه است.



شکل ۵- مدل ساخته شده در آزمایشگاه



شکل ۶- شمای کلی سوراخ‌های لوبیایی

صفحات خارجی و شیم‌ها (واشر)، دارای سوراخ‌های معمولی پیچ هستند، درحالی که صفحات با سوراخ لوبیایی، یک سوراخ حاوی شیار دارند. شکل (۷)، نشان‌دهنده محل قرارگیری پیچ‌ها در مقطع مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. نحوه محاسبه نوع و تعداد پیچ‌های لغزشی اتصال با در نظر گرفتن لنگر پلاستیک، از روابط (۱) تا (۳) استفاده شده است:

$$z_p = \sum A_i y_i \quad (1)$$

$$M_p = z_p F_y \quad (2)$$

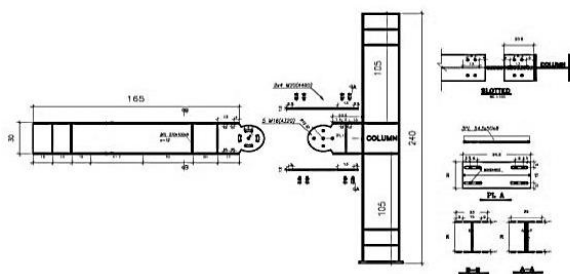
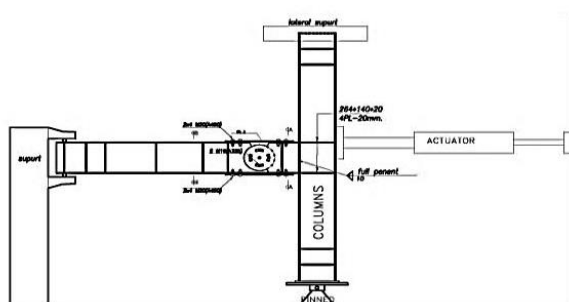
$$M_{pe} = \Phi R_y z_p F_y \quad (3)$$

این مفصل از طریق دو جان دستک تیر متصل به ستون و توسط تعدادی پیچ به تک جان تیر که دارای سوراخ لوبیایی است متصل است و به هنگام تغییر شکل جانبی قاب پس از رسیدن به حد لازم به راحتی می‌چرخد. پیچ‌های مصرفی دارای استاندارد ASTM490 شامل پیچ و مهره‌های معروف به سازه شش گوشه با سایزهای مختلف گرما دیده با سرمایش سریع از جنس آلیاژ فولاد با حداقل ۱۵۰ ksi از آزمایش کششی است.

برای ساخت مدل پیشنهادی در بالا و پایین مفصل خمشی پیشنهادی از دو عدد ورق با سوراخ‌های لوبیایی استفاده شد تا با پیش تنیدگی پیچ‌ها از ظرفیت اصطکاکی بین ورق‌ها جهت استهلاک انرژی در مفصل پس از لغزش پیچ‌ها استفاده شود. در واقع با استفاده از دو مفصل خمشی بکار رفته در تیر، از دو سیستم مستهلک کننده شده تا با قابلیت اطمینان بیشتری در سازه، استهلاک انرژی‌های ناشی زلزله صورت پذیرد. مدل ساخته شده در آزمایشگاه در شکل (۵) نمایش داده شده است که در آن از سوراخ‌های لوبیایی در صفحات بالا و پایین استفاده شده است.

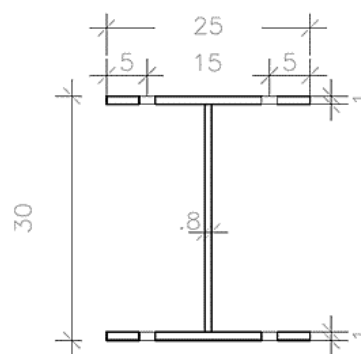
سوراخ‌های لوبیایی، بواسطه اتلاف انرژی از طریق اصطکاک، تقاضای وارد بر روی عناصر سازه‌ای و غیرسازه‌ای

پذیری در اعضا و اتصالات و یا افزایش غیر اقتصادی ابعاد تیر ستون نبوده که نتیجتاً ضمن صرف جویی در مصرف مصالح مصرفی و اقتصادی شدن طرح، نقاط محتمل در ضعفهای سازه‌ای را جبران خواهد نمود و به میزان قابل توجهی پاسخهای لرزه‌ای از جمله جابجایی شتاب و برش پایه زلزله را کاهش خواهد داد. میراگرهای مورد استفاده در این قاب می‌تواند از انواع مختلف موجود در بازار باشد و یکی از مزیت‌های آن در مفصل خمشی آنست که می‌توان به جای استفاده از میراگر دورانی اصطکاکی که هزینه ساخت بیشتری دارد، از دو ردیف میراگر محوری در بالا و پایین مفصل خمشی بر روی بال‌های بالایی و پایینی تیر جهت مقابله با نیروهای کشش و فشار لنگر ایجاد شده، ناشی از خمش استفاده کرد که در این تحقیق از دو صفحه با قابلیت اصطکاک استفاده شده است.



شکل ۸- شمای کلی قاب تحت آزمایش و جزئیات قاب خمشی پین فیوز

مفصل در این تیر طوری طراحی می‌شود که در برابر بارهای سرویس معمولی و زلزله‌های متوسط، با سطح ایمنی بهره برداری خوبی عمل نماید، یعنی اینکه قدرت اتصال برای نیروی خاصی طراحی می‌شود و تا زمانی که به آن نیرو نرسد، مفصل وارد عمل نشده و قاب به صورت ارتجاعی قرار می‌گیرد اما بعد از آنکه، لغزش در پیچ‌های اصطکاکی اتفاق می‌افتد، مفصل خمشی پین فیوز واقع در قاب، انرژی مناسبی را در اثر چرخش و جابجایی جذب کرده و پریود طبیعی سازه را تغییر داده و



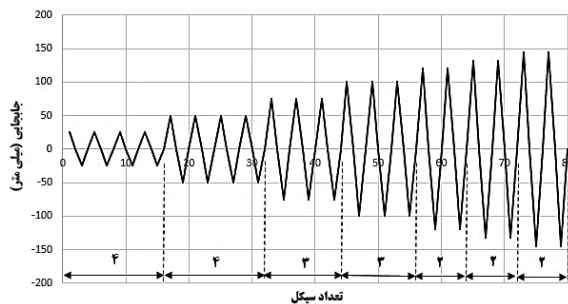
شکل ۷- محل قرارگیری پیچ‌ها

در روابط (۱) تا (۳)، z_p ، اساس مقطع، F_y تنش تسلیم عضو فولادی، M_p و M_{pe} به ترتیب لنگر پلاستیک و لنگر پلاستیک کاهش یافته است. با در نظر داشتن جنس پیچ، نیروی پیش تنیدگی و ضریب اصطکاک تیرها، تعداد پیچ‌ها بر اساس نیروی پیش تنیدگی عمود بر سطح و آستانه لغزش پیچ از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$M_{slip} = n \cdot N_b \mu_s d \quad (4)$$

در رابطه فوق، N_b ، نیروی پیش تنیدگی پیچ، μ_s ضریب اصطکاک، d ارتفاع تیر و n تعداد پیچ‌هاست.

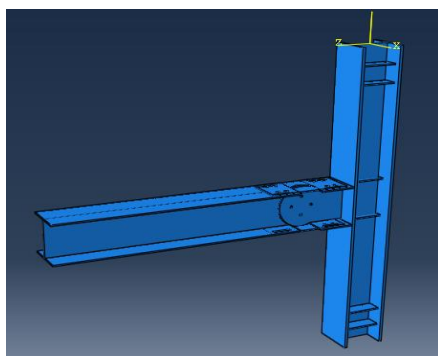
در سوراخ‌های لوبیایی معمولاً صفحات شیم را بین صفحات خارجی و با سوراخ لوبیایی کار می‌گذارند. شیم‌ها از موادی ساخته شده‌اند که در تماس با فولاد، رفتار اصطکاکی مناسبی از خود نشان می‌دهند. یک پیچ پیش بارگذاری شده، صفحات را به هم متصل می‌کند. در شکل (۸) جهت و نحوه اعمال بار را نشان می‌دهد. وقتی از اصطکاک یا نیروی لغزش از یک حد خاص تجاوز کند، صفحه با سوراخ لوبیایی بر روی صفحات خارجی می‌لغزد. بدین ترتیب، انرژی از طریق اصطکاک، تلف می‌شود. سوراخ‌های لوبیایی به شیوه‌ای ساده‌تر، اتلاف انرژی زمانی ممکن می‌شود که در اتصال پیچی اصطکاکی، لغزش نسبی بین دو صفحه رخ دهد. با این روش می‌توان بدون استفاده از بخش‌های سنگین‌تر افزایش سختی سازه، حفاظت لرزه‌ای را با هزینه‌ای به صرفه‌تر تامین کرد. طبق بررسی‌های به عمل آمده در صورت استفاده از این سیستم و با ایجاد اتلاف انرژی قابل ملاحظه در تیرهای قاب خمشی و سرگرم کردن نیروهای زلزله در نقاط از پیش تعیین شده، سازه با کمترین آسیب در حرکات رفت و برگشتی زلزله جابجا و خم شده و انرژی زیادی را جذب می‌کند و دیگر نیازی به اعمال ضوابط سخت گیرانه شکل



شکل ۱۰- بارگذاری اعمالی به سازه

مدل عددی نمونه‌ی آزمایش شده به وسیله‌ی نرم افزار ABAQUS به عنوان یک برنامه اجزای محدود ساخته شد. مصالح فولاد استفاده شده در تیر و ستون از جنس ST37 با تنش تسلیم و تنش نهایی ۲۴۰ و ۳۷۰ مگاپاسکال و پیچ‌های مورد استفاده در ورق‌های بال و پایین از نوع پرمقاومت با تنش تسلیم و تنش نهایی ۹۹۰ و ۱۱۶۰ مگاپاسکال در کرنش تسلیم ۰/۱۵ فرض شدند و مدول الاستیسیته تمامی نمونه‌ها ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

قاب پین فیوز یک دهانه مورد مطالعه به صورت T شکل مورد مطالعه قرار گرفت در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS مدلسازی شده است. مشخصات تیر و ستون و جزییات پین فیوز در شکل (۱۱) و جدول (۱) نشان داده شده است.



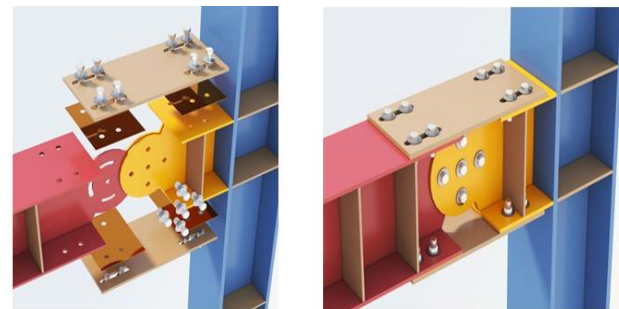
شکل ۱۱- اتصال پین فیوز مجهز به میراگر اصطکاکی در مدل سازی با نرم افزار ABAQUS

جدول ۱- ابعاد اعضای سازه‌ای

ابعاد	بال (mm)	جان (mm)
ستون	۲۵۰×۲۰	۲۶۰×۱۲
تیر	۲۵۰×۱۰	۲۸۰×۱۰

چرخه هیستریزیس سازه را در حرکات متناوب، مطلوب‌تر می‌نماید.

مدل پیشنهادی در قاب‌های خمشی، برای ایجاد چرخش و جابجایی از پیش تعیین شده، با پیش بینی دو مفصل خمشی در ابتدا و انتهای تیر قرار می‌گیرد. بدیهی است این مدل یک روش ابداعی برای کنترل زلزله می‌باشد که با توجه به مساحت و تعداد طبقات برای هر سازه‌ای باید به صورت مجزا طراحی و محاسبه شود. همان‌طور که در شکل (۹)، نشان داده شده است مفصل پین فیوز در ابتدا و انتهای تیر جهت استهلاک لنگرهای خمشی و جابجایی دورانی در نزدیکی تکیه‌گاه تعبیه خواهد شد. دوران مفصل‌های خمشی مذکور توسط تعدادی از پیچ‌های پیش تنیده با قابلیت ایجاد اصطکاک بین صفحات کنترل شده‌اند تا ضمن داشتن صلبیت در قاب، پس از غلبه به نیروهای لغزشی پیچ‌ها دارای قابلیت استهلاک نیرو باشند.



شکل ۹- مدل سه بعدی پین فیوز ساخته شده

۲-۱- بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده

با بررسی رویه‌های بارگذاری آیین نامه‌های طراحی مشاهده می‌شود که تکرار یک یا چند سیکل برای در نظر گرفتن خستگی در نمونه‌های آزمایشگاهی بوده و مدلسازی در نمونه‌های اجزای محدود اثری قابل صرف نظر کردن دارد. تاریخچه بارگذاری پیشنهادی AISC، با اعمال سیکل‌های متوالی مطابق شکل (۱۰) به سازه اعمال می‌شود.

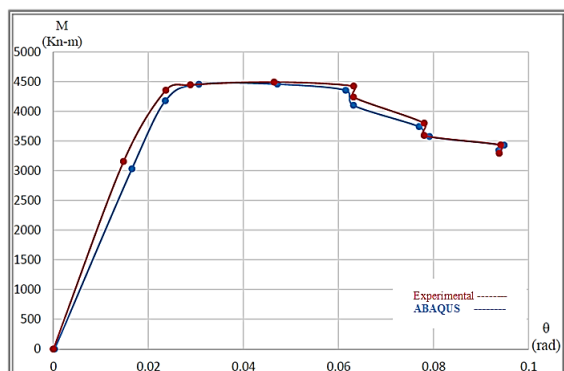
۳- مطالعات عددی

به هنگام خمش، تا زمانی که نیروهای بال تیر به سطح لغزش اتصالات لغزشی برسند، اتصال مذکور مانند یک اتصال ارتجاعی صلب عمل می‌کند. تیر با یک گشتاور ثابت به دور پیچ‌های مرکزی جان تیر می‌چرخد تا وقتی که پیچ‌ها به انتهای شیارهای خود برسند.



سیکل‌های مختلف نشان داده شده است.

برای کنترل چرخش مفصل از پیش ساخته شده مذکور، از ظرفیت اصطکاک ورق‌های بالا و پایین تیر استفاده شده است. ورق‌های مذکور با سوراخ‌های لوبیایی و با تعداد پیچ‌های لازم به بال‌های بالا و پایین تیرهای طرفین، متصل می‌شود.



شکل ۱۳- مقایسه منحنی پش‌اور نتایج آزمایشگاهی و عددی

این ورق‌ها می‌بایست نیروهای ناشی از زوج نیروهای لنگر پلاستیک در محل مفصل را تحمل کنند و آستانه لغزش پیچ‌ها می‌بایست کمی کمتر از این زوج نیروها باشد.

طبق بررسی‌های به عمل آمده در صورت استفاده از این سیستم و با ایجاد اتلاف انرژی قابل ملاحظه در تیرهای قاب خمشی و سرگرم کردن نیروهای زلزله در نقاط از پیش تعیین شده، سازه با کمترین آسیب در حرکات رفت و برگشتی زلزله جابجا و خم شده و انرژی زیادی را جذب می‌کند و دیگر نیازی به اعمال ضوابط سخت گیرانه شکل پذیری در اعضا و اتصالات و یا افزایش غیر اقتصادی ابعاد تیر ستون نخواهیم بود که نتیجتاً ضمن صرف جویی در مصرف مصالح مصرفی و اقتصادی شدن طرح، نقاط محتمل در ضعف‌های سازه‌ای را جبران خواهد نمود و به میزان قابل توجهی پاسخ‌های لرزه‌ای از جمله جابجایی شتاب و برش پایه زلزله را کاهش خواهد داد. همچنین مفصل در این تیر طوری طراحی می‌شود که در برابر بارهای سرویس معمولی و زلزله‌های متوسط، با سطح ایمنی بهره برداری خوبی عمل نماید، یعنی اینکه قدرت اتصال برای نیروی خاصی طراحی می‌شود و تا زمانی که به آن نیرو نرسد، مفصل وارد عمل نشده و قاب به صورت ارتجاعی قرار می‌گیرد اما بعد از آنکه، لغزش در پیچ‌های اصطکاکی اتفاق می‌افتد، مفصل خمشی واقع در قاب، انرژی مناسبی را در اثر چرخش و جابجایی جذب کرده و پیروید طبیعی سازه را تغییر داده و چرخه

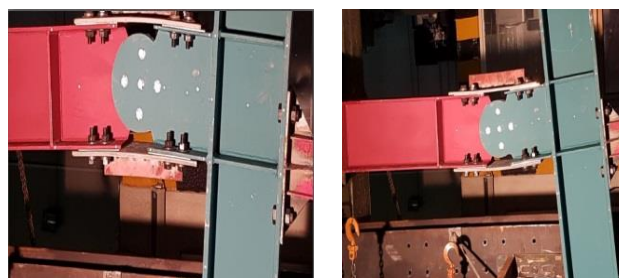
به‌منظور دست یابی به مش بندی بهینه برای سازه در تحلیل عددی، ۵ حالت مطابق جدول برای بررسی ابعاد مش بندی به کار گرفته شده است که در جدول (۲)، نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، تفاوت مابین مش‌بندی‌های ۴ و ۵ ناچیز مشاهده شده است. از این‌رو در محاسبات از مش نوع ۴ استفاده شده است. المان‌های سالیید هشت گره‌ای و به‌صورت انتگرال کامل (C3D8)، برای مدل‌سازی قطعات از جمله جوش‌ها استفاده گردید.

جدول ۲- نتایج آنالیز حساسیت برای مش‌بندی

پارامتر	Mu (kN.m)	خطا (%) نسبت به مدل ۵
۱ (۰/۱-۰/۰۵-۰/۰۳) m	۶۶۶	۲۳/۷
۲ (۰/۰۵-۰/۰۲۵) m	۶۴۱/۸	۲۰/۸
۳ (۰/۰۵-۰/۰۲۵-۰/۰۱۵) m	۵۵۱/۴	۷/۸
۴ (۰/۰۵-۰/۰۲۵-۰/۰۱) m	۵۰۹/۲	۰/۲
۵ (۰/۰۴-۰/۰۲-۰/۰۱) m	۵۰۸/۲	-

۴- بررسی نتایج

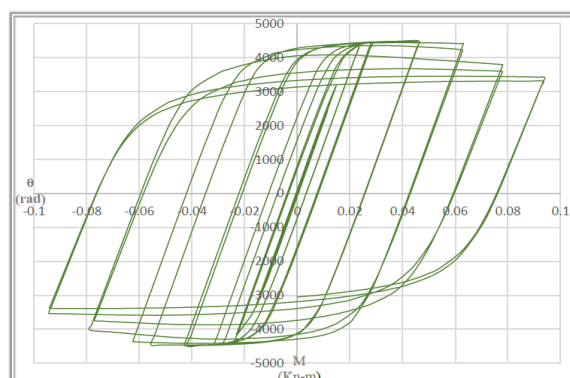
در این پژوهش، رفتار مدل پیشنهادی در مفصل خمشی بکار رفته در قاب‌های خمشی در محدوده تغییر شکل‌های مورد نیاز سازه‌ها در بارگذاری رفت و برگشتی به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۱۲)، عملکرد مدل حاضر را تحت بارگذاری چرخه‌ای نشان می‌دهد.



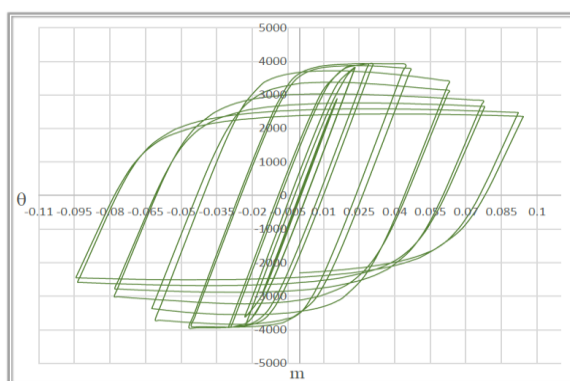
شکل ۱۲- عملکرد دورانی سازه موردنظر

در شکل (۱۳)، مقایسه عملکرد مفصل پیشنهادی نتایج آزمایشگاهی و تحلیل اجزای محدود تحت بار چرخه‌ای در

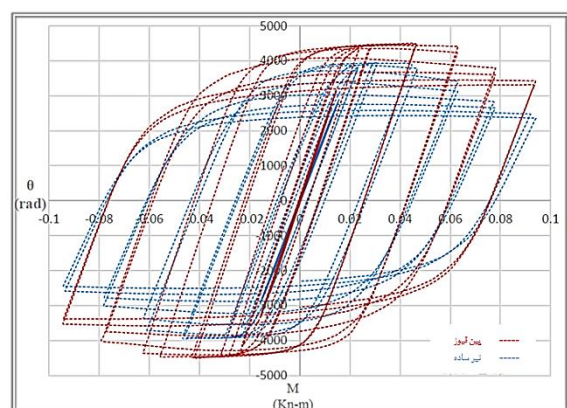
هیستریزیس سازه را در حرکات متناوب، مطلوب تر می نماید. در ادامه، در این بخش اتصال پین فیوز پیشنهادی با تیر ساده مقایسه شده است. با بررسی نتایج شکل های (۱۴) تا (۱۶)، نمودارهای چرخه ای لنگر-دوران برای دو اتصال، انرژی تلف شده و سختی اولیه، شکل پذیری و دوران مقایسه شده است.



شکل ۱۴- منحنی هیستریزیس مدل پین فیوز

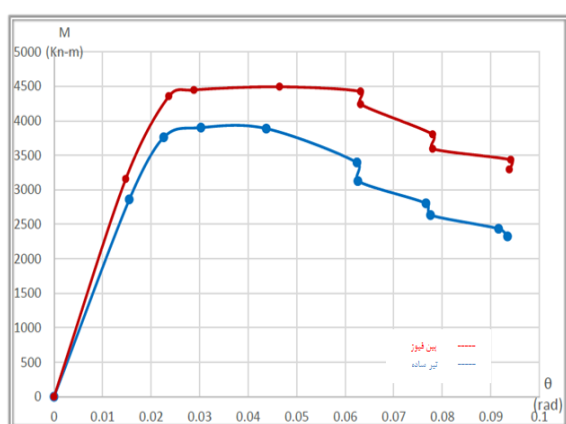


شکل ۱۵- منحنی هیستریزیس مدل تیر ساده



شکل ۱۶- مقایسه دو نمودار (M-q) برای مدل های تیر ساده و پین فیوز

با توجه به نتایج مشاهده می شود که در هر دو حالت، نمودارها از تقارن مناسبی برخوردار هستند که این مورد یکنواختی رفتار سازه تحت بارگذاری متناوب را نشان می دهد. از طرفی با توجه به نتایج، میزان کاهش سختی و زوال مقاومت در سازه پین فیوز کمتر از تیر ساده بوده است که نشان دهنده جذب انرژی بیشتر در این حالت است. همان طور که در این منحنی مشاهده می شود، میزان جذب انرژی و مقاومت نهایی در سازه پین فیوز بیشتر بوده که می توان گفت با توجه به درگیر نبودن جان سازه در لنگر خمشی وارده بر تیر سبب از بین رفتن اندرکنش مولفه های نیرویی و تغییر مکانی بال و جان تیر می شود پایداری بیشتر در مفصل پلاستیک شده است.



شکل ۱۷- مقایسه منحنی پوش برای مدل های تیر ساده و پین فیوز

همان طور که در منحنی شکل (۱۷) مشاهده می شود، میزان جذب انرژی و مقاومت نهایی در سازه پین فیوز بیشتر بوده که می توان گفت با توجه به درگیر نبودن جان سازه در لنگر خمشی وارده بر تیر سبب از بین رفتن اندرکنش مولفه های نیرویی و تغییر مکانی بال و جان تیر می شود پایداری بیشتر در مفصل پلاستیک شده است. در جدول (۳)، مقایسه پارامتری موارد مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۳- مقایسه پارامترهای اتصال پین فیوز با تیر معمولی

نام مدل	شکل پذیری	جذب انرژی (N/m)	مقاومت نهایی (N)	سختی (N/m)	لنگر ماکزیمم (kN.m)
پین فیوز	۹.۱۱۱۸	۶/۱۰E۴	۷۰۷۹۴۵	۶۵۴۰۶۸۸۰	۴۵۱۳
تیر معمولی	۶.۸۱	۳/۷۰E۴	۵۷۱۱۲	۵۴۲۲۰۳۴	۳۹۰۲

مفصل را تحمل کرده است. در مدل ارائه شده آستانه لغزش پیچ‌ها کمی کمتر از این زوج نیروها بوده است.

۵- مشاهده گردید با استفاده از مدل پیشنهادی، تا حدود ۰/۰۴ رادیان، تیر و ستون در ناحیه الاستیک نگه داده می‌شود و این یک حد الاستیک بسیار بالایی است.

۶- نتایج مقایسه منحنی‌های هیستریزس مدل‌ها نشان می‌دهد در ابتدای بارگذاری سختی هر دو اتصال تقریباً مشابه بوده ولی در ادامه مقاومت اتصال پین فیوز و شکل پذیری به ترتیب ۱۱ و ۶ درصد افزایش یافته است، از طرفی ظرفیت تغییر مکان جانبی و جذب انرژی و سختی پیچشی بهتری در اتصال پین فیوز مشاهده شده است. همچنین از کمناش‌های موضعی و پیچشی جلوگیری کرده و سازه را بدون آسیب دیدگی در حد ارتجاعی نگه داشته است.

۶- مراجع

- [۱] مهدی‌پور گنجی، ع. (۱۳۹۰)، "بکارگیری روش‌های تحلیل غیر خطی در ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی قاب خمشی"، اولین همایش منطقه‌ای عمران و معماری.
- [۲] رئیسی دهکردی، م. و علیزاده اسفیوخی، م. (۱۳۹۲)، "ارزیابی آسیب پذیری سازه‌های فولادی بر اساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای"، همایش ملی مهندسی عمران کاربردی و دستاوردهای نوین.
- [3] Muto, K., (1969), "Earthquake resistant design of 36-storied Kasumigaseki building", Proc. 4th World Conf. Earthq. Eng. Vol. 3, pp. 16-33. <http://www.mendeley.com>.
- [4] Kelly, J.M., Skinner, R.I. and Heine, A.J. (1972), "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 5, pp.63-88.
- [5] Skinner, R.I., Kelly, J.M. and Heine, A.J. (1974), "Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures", Earthquake engineering & structural dynamics, Vol. 3, pp. 287-296.
- [6] Higashi, Y., Endo, T. and Shimizu, Y. (1984), "Experimental studies on retrofitting of reinforced concrete building frames", Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 1, San Francisco-California-U.S.A.:21-28, pp. 477-484.
- [7] Kawamata, S. and M. Ohnuma (1981), "Strengthening effect of eccentric braces to existing reinforced concrete frames", Proceedings of the Second Seminar on Repair and Retrofit of Structural; Ann Arbor, Mich. National Science Foundation, pp. 262-269.
- [8] Ohishi, H., Takahashi, M. and Yamazaki, Y. (1988), "A seismic strengthening design and practice of an existing reinforced concrete school building in Shizuoka city", In Proceedings of the ninth world conference on earthquake engineering, Vol. 7, pp. 415-20.
- [9] Sugano, S. and M. Fujimura (1980), "Seismic strengthening of existing reinforced concrete building", Proceedings of Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Turkey, Vol. 4, pp. 449-456.
- [10] Pachideh, G., Kafi, M. and Gholhaki, M. (2020),

در مدل پین فیوز، اولین جاری شدگی در دوران ۰/۸ درصد و تا دوران ۹/۶۶ درصد بارگذاری ادامه پیدا کرده است. نه تنها تغییری در رفتار اتصال و میزان شکل پذیری رخ نمی‌دهد بلکه افزایش ظرفیت بارگذاری مشاهده شده است که به دلیل شکل پذیری بالای اتصال است.

۵- نتیجه گیری

با نگاهی به اتصالات خمشی در زلزله‌های پیشین مشاهده گردید که بدلیل اتصال بال به جان در تیرها، اندرکنش مناسبی برای جلوگیری از کمناش جانبی پیچشی و نرسیدن به مفصل پلاستیک، عملکرد مناسبی نداشته‌اند. اکثر مستهلک کننده‌ها در اعضای مهاربندی استفاده شده است لذا در این پژوهش، مدل پیشنهادی نحوه استهلاک در قاب‌های خمشی به دلیل عدم اتصال جان و تیر، مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان می‌توان این اتصال پین فیوز اصطکاکی را با همین جزئیات در حالت جاری شوندگی بال‌های بالا و پایین آزمایش نمود. با بررسی نتایج موجود تحلیل‌های آزمایشگاهی و عددی موارد زیر مشاهده گردید:

- ۱- دوران مفصل‌های خمشی مذکور توسط تعدادی از پیچ‌های پیش تنیده با قابلیت ایجاد اصطکاک بین صفحات کنترل شده‌اند تا ضمن داشتن صلبیت در قاب، پس از غلبه به نیروهای لغزشی پیچ‌ها دارای قابلیت استهلاک نیرو باشند.
- ۲- استفاده از این نوع سیستم نیاز به تکنولوژی و فن‌آوری خاصی ندارد و با مصالح و نیروهای فنی موجود به راحتی می‌توان آن را ساخته و در انواع سازه‌های فولادی در ساختمان‌ها و پل‌آبگماها استفاده نمود و از واردات میراگر از کشورهای خارجی که هزینه‌های سنگینی دارد جلوگیری به عمل خواهد آورد.
- ۳- فیوز استفاده شده در این تیر، هدف اصلی فلسفه طراحی را برآورده کرده و با جذب و استهلاک میزان زیادی انرژی از شکل پذیری مطلوبی در سازه برخوردار بوده است.
- ۴- با ایجاد مفصل خمشی از پیش ساخته شده، قطعیت تشکیل مفصل در نزدیکی اتصال، حاصل می‌شود حال باید چرخش این مفصل را کنترل کرد. برای کنترل چرخش مفصل از پیش ساخته شده مذکور، از ظرفیت اصطکاک ورق‌های بالا و پایین تیر استفاده شده است. ورق‌های مذکور با سوراخ‌های لوبیایی و با تعداد پیچ‌های لازم به بال‌های بالا و پایین تیرهای طرفین، متصل شده است که نیروهای ناشی از زوج نیروهای لنگر پلاستیک در محل



- [24] Tagawa, H., Yamanishi, T., Takaki, A. and Chan, R.W. (2016), "Cyclic behavior of seesaw energy dissipation system with steel slit dampers", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 117, pp.24-34.
- [25] Aghlara, R., Tahir, M.M. and Adnan, A.B. (2018), "Experimental study of pipe-fuse damper for passive energy dissipation in structures", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 148, pp. 351-360.
- [۲۳] احمدی، م.، مکاری رحم دل، ج. و احمدی، م. (۱۳۹۱)، "بکارگیری اتصالات پیچی اصطکاکی با سوراخ لوبیایی در ورق‌های گیرداری سازه‌های فولادی برای افزایش میرایی"، *نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان*.
- [۲۴] رضایی، ر. و نقی پور، م. (۱۳۹۳)، "مقایسه منحنی لنگر-دوران اتصال تیر به ستون pin fuse و RBS در سازه‌های فولادی"، *اولین کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران*.
- [۲۵] صالح، ا.، زهرانی، س.م. و میرقادی، س.ر. (۱۳۹۴)، "مطالعه آزمایشگاهی اتصال نوین قاب خمشی فولادی با مقطع کاهش مقاومت یافته توسط جان لوله‌ای در تیرهای کوتاه"، *ششمین کنفرانس ملی سازه و فولاد*.
- "Evaluation of cyclic performance of a novel bracing system equipped with a circular energy dissipater", *Structures*, Vol. 28, pp. 467-481.
- [11] Pachideh, G., Gholhaki, M. and Kafi, M. (2020), "Experimental and numerical evaluation of an innovative diamond-scheme bracing system equipped with a yielding damper", *Steel and Composite Structures*, Vol. 36, pp. 197-211.
- [12] Kheyroddin, A., Gholhaki, M. and Pachideh, G. (2019), "Seismic evaluation of reinforced concrete moment frames retrofitted with steel braces using IDA and pushover methods in the near-fault field", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, Vol. 7, pp. 159-173.
- [13] Oh, S.H., Kim, Y.J. and Ryu, H.S. (2009), "Seismic performance of steel structures with slit dampers", *Engineering structures*, Vol. 31, pp.1997-2008.
- [14] Khoshnoodian F. and Kiani M. (2010), "Seismic performance of steel slit dampers in steel structurals with special moment frames", *First National Conference on Structure, Earthquake and Geotechnics, Babolsar*. (In Persian)
- [15] Najari Varzaneh, M., Hosseini, M. and Akbarpoor, A. (2014), "The study of EADAS elliptical steel damper function in seismic resisting of steel frames", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, Vol. 2, pp. 40-45.
- [16] Fintel, M. and Ghosh, S.K. (1981), "The structural Fuse: An inelastic approach to earthquake-resistant design of buildings", *Civil Engineering-ASCE*, Vol. 51, pp.48-51.
- [17] Chan, R.W., Albermani, F. and Williams, M.S. (2009), "Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65, pp.260-268.
- [18] Tremblay, R., St-Onge, E., Rogers, C., Morrison, T., Legeron, F., Desjardins, E., Tirca, L., Gray, M., Christopoulos, C. and Packer, J. (2011), "Overview of ductile seismic brace fuse systems in Canada", In *EUROSteel Conf*, pp. 939-945.
- [19] Wada, A., Connor, J.J., Kawai, H., Iwata, M. and Watanabe, A. (2010), "Damage tolerant structures", In *5th U.S.-Japan Work. Improv. Struct. Des. Constr. Pract. ATC- 15-4*, pp. 27-39.
- [20] Wada, A. and Huang, Y. (2016), "Preliminary seismic design of damage tolerant tall building structures", In *Proc., Symp. a New Dir. Seism. Des., Architectural Institute of Japan Tokyo*. pp. 77-93.
- [21] Wada, A. and Huang, Y. (2015), "Damage-controlled structures in Japan", In *US-Japan Work, Performance-Based Earthq. Eng. Methodol. Reinf. Concr. Build. Struct*, pp. 279-89.
- [22] Aiken, I., Clark, P., Tajirian, F., Kasai, K. and Kimura, I. (2017), "Unbonded braces in the United States-design studies, large-scale testing, and the first building application", In: *Symp. Passiv. Control Struct. Tokyo Inst. Technol.*, p. 203-17.
- [23] Lor, H.A., Izadinia, M. and Memarzadeh, P. (2018), "Experimental and numerical study of I-shape slit dampers in connections", *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 15.

پی نوشت

¹ Structural Engineering Association of California (SEAOC)

² Federal Emergency Management Agency (FEMA)

³ Helipers controls

⁴ Rexroth

⁵ Slotted Bolted Connection (SBC)

