



مروری بر تکنیک‌های نوین در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی: حرکت گهواره‌ای و قطعات مستهلک‌کننده انرژی

شهرام تباشیری

دانشجوی دکترای سازه، گروه مهندسی عمران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

چکیده

بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی به دلیل اهمیت بالای آن در کاهش خسارات جانی و مالی در مناطق زلزله خیز، همواره یکی از مباحث کلیدی در مهندسی سازه بوده است. استفاده از حرکت گهواره‌ای و قطعات مستهلک‌کننده انرژی به عنوان دو رویکرد نوین و مؤثر در این زمینه شناخته شده‌اند. در این مقاله مروری، ابتدا اصول و مبانی حرکت گهواره‌ای و نحوه عملکرد آن در کاهش نیروهای لرزه‌ای بررسی می‌شود. سپس، انواع مختلف قطعات مستهلک‌کننده انرژی شامل دمپره‌های ویسکوز، دمپره‌های اصطکاکی و دمپره‌های فلزی معرفی و عملکرد هر یک تحلیل می‌شود. همچنین، مطالعات موردی و نتایج تجربی و عددی مربوط به استفاده از این تکنیک‌ها در سازه‌های فولادی ارائه می‌گردد. بررسی این مقالات نشان می‌دهد که ترکیب حرکت گهواره‌ای و قطعات مستهلک‌کننده انرژی می‌تواند به طور قابل توجهی پایداری و ایمنی سازه‌هایی فولادی را در برابر زلزله بهبود بخشد.

واژگان کلیدی: حرکت گهواره‌ای، نیروهای لرزه‌ای، قطعات مستهلک‌کننده انرژی



مقدمه

در دهه‌های اخیر، با پیشرفت فناوری سازه‌ها و افزایش خطرات زلزله در مناطق مختلف جهان، توسعه روش‌های نوین برای ارتقای عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها بسیار حیاتی و ضروری شده است. سازه‌های فولادی به عنوان یکی از انواع سازه‌هایی که توانایی بالایی در مقابله با نیروهای لرزه‌ای دارند، تحت تأثیر مستقیم زلزله قرار می‌گیرند و باید برای حفظ ایمنی و عمر مفید خود به طور مداوم بهبود یابند.

یکی از روش‌های نوین که در سال‌های اخیر به توجه بسیاری از محققان و مهندسان معماری و عمران برخورد کرده است، حرکت گهواره‌ای است. این روش، به ویژه در سازه‌های بلند و انعطاف‌پذیر مانند سازه‌های فولادی، قابلیت خوبی برای کاهش نیروهای لرزه‌ای و جذب انرژی زلزله دارد. از سوی دیگر، قطعات مستهلک‌کننده انرژی مانند دمپ‌های ویسکوز و اصطکاکی نیز نقش مهمی در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها ایفا می‌کنند، زیرا انرژی تولید شده در زمان زلزله را جذب کرده و به صورت گرمایی تخلیه می‌کنند.

در این مقاله مروری، به بررسی عمیق‌ترین دو روش پرداخته شده و اثرات و مزایای استفاده از حرکت گهواره‌ای و قطعات مستهلک‌کننده انرژی در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. این بررسی نه تنها به مهندسان و طراحان در تصمیم‌گیری در مورد استفاده از این تکنیک‌ها کمک می‌کند، بلکه در توسعه تکنولوژی‌های جدید برای بهبود ایمنی و پایداری سازه‌ها نیز مؤثر است.

حرکت گهواره‌ای (Rocking Motion)

بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های مقاوم در برابر زلزله بیانگر ایجاد تغییرشکل‌های غیرارتجاعی و نیروهای قابل توجه (در حد مقاومت نهایی مورد انتظار در مقاطع بحرانی اعضای لرزه بر (در صورت وقوع یک زمین لرزه مخرب می‌باشد. گذشته از دشواری تامین ظرفیتهای مورد نیاز در مقاطع بحرانی سازه، ایجاد تغییرشکل‌های پسماند و بروز خرابیهای پس از زلزله در اعضای اصلی سازه‌های متعارف و متعاقبا دشواری یا ناممکن تعمیرات پس از زلزله از دلایل رویکرد پژوهشگران به پیشنهاد سیستم‌های نوین مقاوم در برابر زلزله بوده است. در میان سیستم‌های سازه‌ای نوین متعدد، کاربرد سازه‌های فولادی مرکزگرا دارای حرکت گهواره‌ای به دلیل تمرکز آسیب‌های لرزه‌ای در اعضای غیراصلی با امکان قابلیت تعویض ساده به همراه حذف یا کاهش قابل توجه تغییرمکان‌های جانبی پسماند مورد توجه قرار گرفته است.

پیشینه پژوهش‌های انجام شده در زمینه کاربرد مهندسی حرکت گهواره‌ای در کاهش بارهای لرزه‌ای، به دهه هفتاد قرن گذشته میلادی بازمی‌گردد. از دیدگاه طراحی وجود حساسیت بیشتر در مواردی مانند لنگرهای واژگونی و نیروهای برکنش ناشی از زلزله¹ در سازه‌ها و پلهای دارای دهانه بلند در سازه‌های متعارف، مبدا توجه به موضوع بوده است. در این خصوص با بررسی سیستم‌های سازه‌ای متعارف دارای لنگرهای واژگونی بزرگ ناشی از زلزله مشخص شده بود که نیروهای کششی قابل توجهی در تراز اتصال سازه به فونداسیون این قبیل سازه‌ها ایجاد میگردد. همچنین، با در نظر گرفتن ملاحظات طراحی، تامین ظرفیت کششی مورد نیاز به منظور مهار نیروهای کششی یاد شده توأم با صرف هزینه‌های زیاد و دشواریهای اجرایی قابل ملاحظه تشخیص داده شد.

از سوی دیگر، در نقطه مقابل تامین ظرفیت کششی مورد نیاز در محل اتصال روسازه به فونداسیون در سازه‌های با تکیه‌گاه² ثابت ایده امکان استفاده از سازه‌های آزاد در برابر برکنش³ که با طراحی و اجرای جزئیات ویژه در کف ستون‌ها امکان وقوع پدیده برکنش ناشی

¹ Uplift

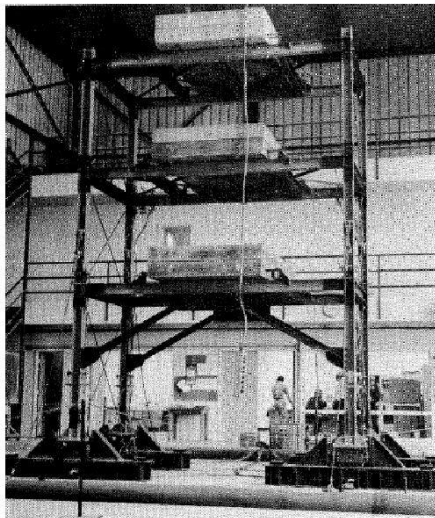
² Fixed-base structures

³ Uplift-free structures

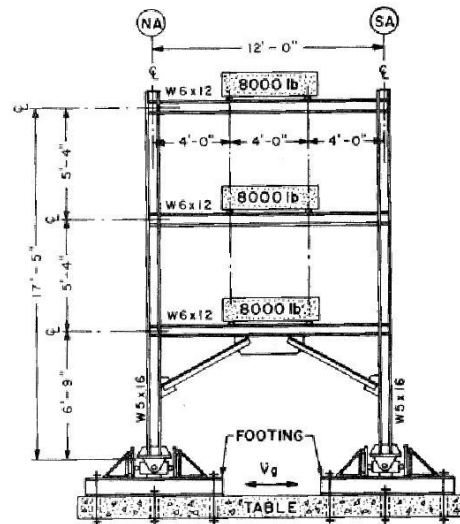
از حرکت گهواره ای را فراهم مینمایند به عنوان یک گزینه جایگزین مورد توجه قرار گرفت. به این ترتیب با ایجاد یک سازوکار استهلاک انرژی زمین لرزه از طریق وقوع برکنش در پایه و فراهم نمودن سیکل حرکتی برای وسایل مستهلک کننده انرژی، امکان کاهش تقاضای لرزه ای به عنوان یک مشوق جدی در توسعه کاربرد سیستم های سازه ای نوین مطرح میگردد.

مفاهیم و مشخصات سیستم های دارای حرکت گهواره ای

شمای قاب فولادی خمشی ۳ طبقه کوچک مقیاس (مقیاس ۱ به ۲) که تحت انجام آزمایش های میز لرزان در دانشگاه برکلی کالیفرنیا قرار گرفت در شکل ۱ نشان داده شده است. تعبیه تکیه گاه های غلتکی در پایه ستون ها امکان ایجاد برکنش و حرکت گهواره ای را برای نمونه آزمایشگاهی فراهم می نمود. شایان ذکر است که نمونه آزمایشگاهی مورد نظر فاقد هرگونه مکانیسم تامین کننده بازگرداندگی (به استثنای وزن خود نمونه) و قطعات مستهلک کننده انرژی بوده است. نتایج آزمایش در مقایسه پاسخ لرزه ای نمونه مورد نظر با قاب مشابه دیگری که با تکیه گاه ثابت ساخته شده بود، بیانگر کاهش نیروهای اعضای قاب و شتاب طبقات در سازه دارای حرکت گهواره ای بوده است (Clough, 1997).



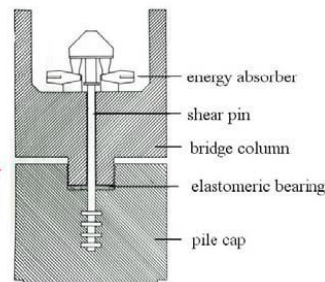
ب



الف

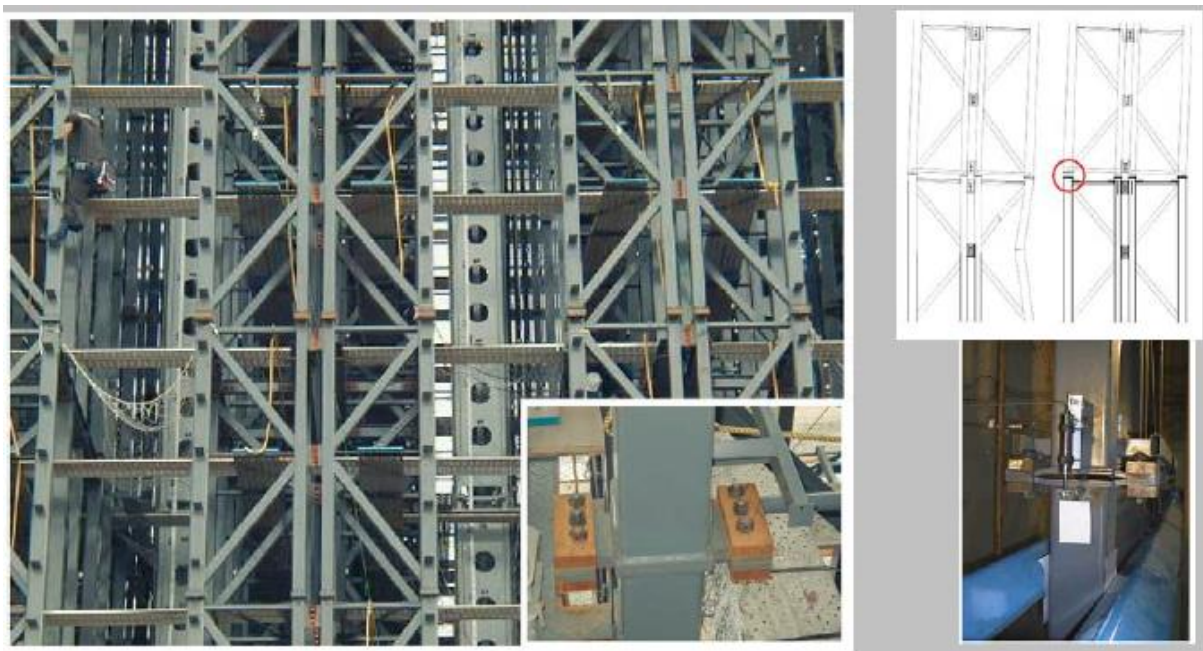
شکل ۱: (الف) نمای جانبی و ابعاد نمونه ب) تصویر نمونه آزمایشگاهی (Clough, 1997)

نخستین کاربرد عملی و مهندسی سازه های دارای حرکت گهواره ای مرکزگرا به طراحی و ساخت پل راه آهن رانجیتیکی (Rangitikei) در کشور نیوزیلند در سال ۱۹۸۱ میلادی باز می گردد. در شکل ۲ نشان داده شده است که پل مورد نظر دارای ۶ دهانه به طول کلی ۳۱۵ متر و پایه هایی به ارتفاع ۷۰ متر بوده که در هر پایه دارای دو عضو جاذب انرژی بزرگ میباشد. در این پل اجزای سازه از مقاطع توخالی بتنی پیش تنیده ساخته شده که با توجه به جزئیات پایه نشان داده شده امکان ایجاد حرکت گهواره ای در آن فراهم می شود. خصوصیات مرکزگرایی و بازگرداندگی سیستم توسط وزن خود پل تامین می گردد. با توجه به توضیحات بالا، رفتار سیستم سازه ای پل در عمل به صورت یک پاندول وارونه می باشد (Cornak, 1998).



شکل ۲: کاربرد حرکت گهواره ای و وسایل مستهلک کننده انرژی در پایه پل راه آهن رانجیتیکی جنوبی (Cornak, 1998)

به علاوه، تجربیات زلزله های پیشین بیانگر نمونه هایی از امکانپذیر بودن کاهش خسارات و آسیب های ایجادشده در ساختمان هایی بوده است که در طی زمین لرزه وقوع برکنش ناشی از حرکت گهواره ای را تجربه نموده بودند (Rutenberg, 1998 & Hayashi, 1999). در نتیجه، از دیدگاه مهندسی بررسی امکان استفاده از مزایای برکنش و حرکت گهواره ای در ساختمان نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. به عنوان شکل ۳ کاربرد یک جزئیات ویژه برای وصله ستون های فولادی با آزادی امکان وقوع برکنش در محل وصله یاد شده به منظور اجتناب از توسعه آسیب ناشی از ایجاد نیروهای محوری بزرگ در ستون ها نشان داده شده است (Wada, 2001).



شکل ۳: ایجاد آزادی امکان وقوع برکنش در محل وصله ستون های فولادی یک ساختمان صنعتی (Wada, 2001)

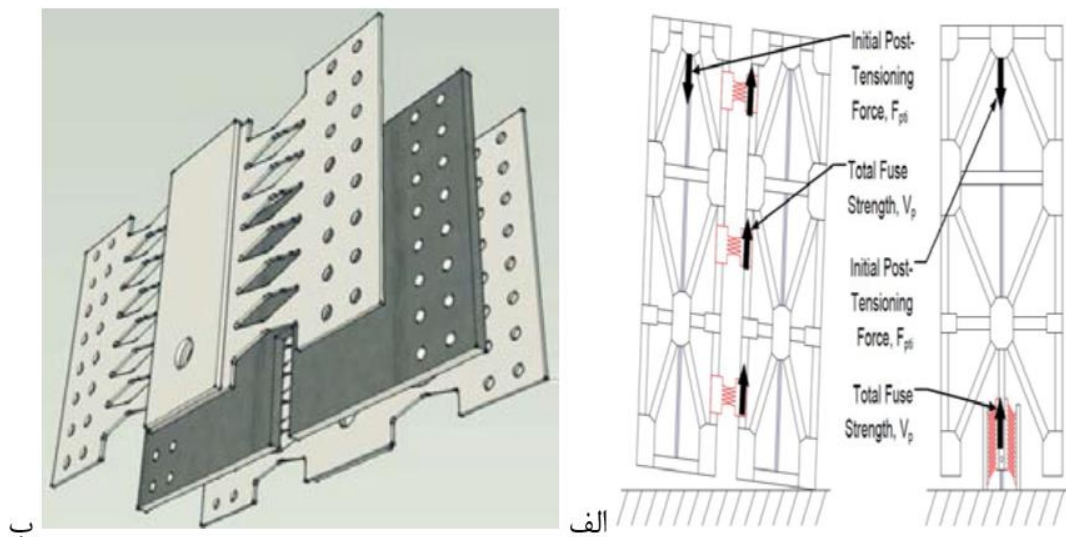
در زمینه امکان کاربرد حرکت گهواره ای در پایه ساختمان پژوهش های متعددی در سالیان اخیر در قالب مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام پذیرفته است. به عنوان نمونه کاربرد سازه های آزاد در برابر برکنش به کمک اجرای جزئیات پای ستون مشابه کلید برشی روغن کاری شده به منظور تسهیل حرکت گهواره ای در مطالعات میز لرزان یک نمونه آزمایشگاهی قاب خمشی ۴ طبقه در مقیاس ۱ به ۹ قابل ذکر میباشد (Iwashita, 2002). همچنین، در خصوص ایده مبتنی بر طراحی کف ستون های جاری شونده در پایه سازه های فولادی به منظور ایجاد آزادی حرکت برکنش و بررسی رفتار سازه های مورد نظر، مطالعاتی در کشور ژاپن انجام پذیرفت (Midorikawa, 2008).

(به عنوان نمونه، شمای نمونه آزمایشگاهی کوچک مقیاس (نسبت ۱ به ۲) قاب فولادی ۳ طبقه دارای کف ستون های جاری شونده که تحت اثر مطالعات میز لرزان قرار گرفت در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: آزمایش میز لرزان قاب فولادی دارای کف ستون های جاری شونده (الف) تصویر نمونه آزمایشگاهی (ب) نمای از نزدیک کف ستون جاری شونده (Iwishita, 2002)

در کشور آمریکا نیز سیستم های سازه ای دارای حرکت گهواره ای با کاربرد فیوزهای برشی پروانه ای در حالت های دوگانه (Ma, 2011) و منفرد (Scholl, 1990) مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که در شکل ۵ نشان داده شده است فیوزهای برشی یاد شده در حالت دوگانه در فضای مابین دو قاب مجاور یکدیگر و در حالت ساده در پایه ساختمان قرار گرفتند. نمای شماتیک کاربرد سازه های برکنش آزاد با فیوز پروانه ای در حالت های ساده و دوگانه به همراه نمای از نزدیک فیوز پروانه ای در این تصویر نشان داده شده است.



شکل ۵: (الف) شماتیک کاربرد سازه های برکنش آزاد با فیوز پروانه ای در حالت ساده و دوگانه را نشان میدهد (Ma, 2011) (ب) نمای از نزدیک فیوز پروانه ای (Scholl, 1990)

اجزای اصلی این قبیل سازه های فولادی دارای حرکت گهواره ای

- قاب فولادی آزاد در برابر برکنش
- وسایل مستهلک کننده انرژی که به آن فیوز لرزه ای هم گفته می شود

- وسایل تامین کننده بازگرداندگی سیستم به آن مرکزگرایی⁴ هم گفته می شود

به عنوان نمونه در پژوهش های ذکر شده در بالا کاربرد کف ستون های جاری شونده و فیوزهای برشی پروانه ای به عنوان وسایل مستهلک کننده انرژی و سیستم های کابلی پیش تنیده و بارهای دائمی ثقلی به وسایل تامین کننده بازگرداندگی سیستم مورد توجه قرار گرفته است. در بخش های بعدی توضیحات بیشتری در خصوص وسایل فوق الذکر ارائه میگردد.

قطعات مستهلک کننده انرژی (Energy Dissipating Devices)

با عنایت به بروز تغییرشکل های غیرارتجاعی در سازه های متعارف⁵ در یک زلزله شدید، ایجاد آسیب های قابل ملاحظه در اعضای اصلی سازه اجتناب ناپذیر است. تجربیات زلزله های پیشین به همراه مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شده بیانگر بروز رفتار غیرارتجاعی و کماتش در اعضای مهاربندی قاب های فولادی مهاربندی شده هم مرکز، تشکیل مفاصل خمیری برشی در عضو پیوند قاب های فولادی مهاربندی شده برون محور و ایجاد مفاصل خمیری خمشی در تیرها و در پارهای اوقات ستون های قاب های خمشی فولادی به عنوان نمونه هایی از سازه های طراحی شده منطبق بر ضوابط آئین نامه های طراحی⁶ رایج میباشد.

از سوی دیگر، کاربرد وسایل مستهلک کننده انرژی در سازه های دارای حرکت گهواره ای میتواند در هنگام وقوع یک زلزله شدید موجب تمرکز تغییرشکل های غیرارتجاعی و آسیب ها در این اعضا و باقی ماندن اجزای اصلی سازه در محدوده ارتجاعی گردد. در ادامه، به تعدادی از سیستم های مستهلک کننده انرژی پیشنهادی در مطالعات پیشین اشاره گردیده و متعاقباً در مطالعات آزمایشگاهی بررسی کاربرد نمونه هایی از آنها جهت تعبیه در سازه های دارای حرکت گهواره ای در دستورکار قرار خواهد گرفت.

وسایل جاری شونده فلزی

در این وسایل استهلاك انرژی از طریق جاری شدن فلزات و تغییرشکل های غیرارتجاعی آنها در سیکل های بارگذاری مختلف در زمان وقوع زلزله تحقق میپذیرد. در اغلب موارد ذکر شده در مراجع فنی استهلاك انرژی مورد نظر با تشکیل مفاصل خمیری خمشی ناشی از تغییرشکل های عمود بر صفحه در قطعات صفح های فیوز لرزه ای طراحی شده انجام میگردد.

وسایل مستهلک کننده اصطکاکی

وسایل مستهلک کننده انرژی اصطکاکی یکی از انواع مهم و مؤثر در بهبود رفتار لرزه ای سازه ها می باشند. این وسایل با جذب انرژی ناشی از ارتعاشات زلزله و تبدیل آن به انرژی حرکتی یا گرمایی، به کاهش نیروهای لرزه ای و تقلیل تغییرات نسبی سازه در طول زلزله کمک می کنند.

وسایل مستهلک کننده ویسکوز مایع و ویسکوالاستیک

برخلاف میراگرهای جاری شونده فلزی و اصطکاکی که سیستم های وابسته به تغییر مکان میباشند، میراگرهای ویسکوز مایع و ویسکوالاستیک در زمره سازوکارهای وابسته به سرعت قرار میگیرند. میراگرهای ویسکوز مایع شامل یک پیستون سوراخدار بوده که درون سیلندری حاوی مایع تحت فشار قرار میگیرد که بر اثر عبور مایع از سوراخ پیستون استهلاك انرژی محقق میگردد.

وسایل تامین کننده بازگرداندگی سیستم (مرکز گرایی)

⁴ Self centering

⁵ Conventional structures

⁶ Code-conforming structures

یکی دیگر از اجزای اساسی قاب های فولادی دارای حرکت گهوارهای وسایل تامین کننده بازگرداندگی سیستم میباشند که علاوه بر اینکه تامین کننده سختی و پایداری سیستم هستند عملاً پس از پایان زلزله نیز نقش تعیین کنندهای در غلبه بر نیروی پسماند فیوز به منظور بازگرداندن سیستم به وضعیت تعادلی اولیه بر عهده دارند.

مروری بر مطالعات پیشین

وسایل جاری شونده فلزی

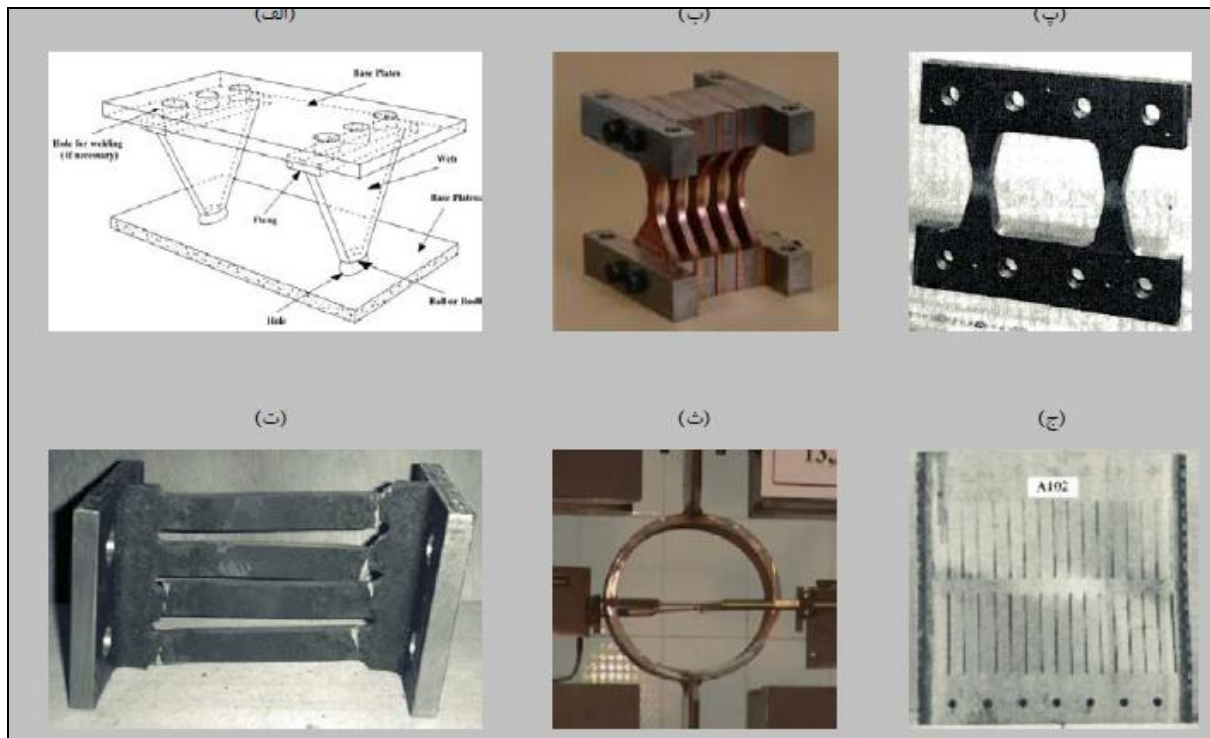
قطعات فلزی افزاینده میرایی و سختی^۷ به سیستم با مکانیسم جاری شدن خمشی به صورت عمود بر صفحه که به اختصار ADAS نامیده می شود و تاثیر آنها بر رفتار لرزه ای سازه ها به طور مکرر مورد مطالعه پژوهشگران مختلف قرار گرفته است (Andalib, 2018) قطعات فلزی مثلثی شکل افزاینده میرایی و سختی^۸ به اختصار TADAS گفته می شود نیز با دارا بودن مکانیسم جاری شدن خمشی در سازه های فولادی مورد استفاده قرار گرفته است (Chan, 2009). در مراجع فنی یک سیستم حلقه فولادی شکل پذیر با توانایی استهلاک انرژی ناشی از جاری شدن تحت اثر لنگرهای خمشی ارائه گردیده است (Hossani, 2011 & Li, 2011). در خصوص مکانیسمهای جاری شدن فلزات تحت اثر تغییر شکل های درون صفحه ای نیز مطالعات متعددی انجام پذیرفته است. به عنوان نمونه پژوهش های انجام یافته در مورد کاربرد قطعات پانل برشی جاری شونده^۹ به اختصار YSPD قابل ذکر است (Chan, 2008 & Ma, 2010). همچنین، پیشنهاداتی در خصوص ایجاد شکاف در صفحات فولادی به منظور حصول رفتار چرخهای مناسب توسط پژوهشگران پیشین پیشنهاد گردیده است در واقع صفحه فولادی اولیه با ایجاد این شکاف ها به مجموعه ای از اعضای پیوندی موازی با هم تبدیل میگردد که با عنایت به مقادیر کوچکتر نسبت عرض به ضخامت در مقایسه با صفحه اصلی از شرایط فشردگی مناسب تری برخوردار میباشند که به نوبه خود در افزایش ظرفیت کمانش برشی صفحه موثر خواهد بود.

در سیستم های پیشنهادی برای صفحات شکافدار فولادی نسبتاً ضخیم (با نسبت عرض به ضخامت اعضای پیوندی در محدوده ۱ تا ۲) نمونه های مورد نظر دارای چرخه های هیستریزس پایدار تا کرنش های برشی به بزرگی 10 % تا 20 % بوده اند (Pollino, 2007a). در مورد کاربرد صفحات فولادی نازکتر (با نسبت عرض به ضخامت اعضای پیوندی در حدود ۱۰) کرنش های برشی به بزرگی ۲/۵٪ پیش از رخداد کمانش گزارش گردیده است (Pollino, 2008). به منظور بهبود رفتار چرخه ای درون صفحه ای وسایل جاری شونده فوق الذکر، پیشنهاداتی در خصوص استفاده از بازشوهای لانه زنبوری به جای شکاف های ساده در صفحات فولادی ارائه شد که عملاً موجب باقی ماندن صفحات پیوندی پروانه ای شکل در صفحات فولادی میگردد. شایان ذکر است که این آرایش به دلیل انطباق بیشتر هندسه صفحات پیوندی با دیاگرام لنگر خمشی موجب توزیع به مراتب یکنواخت تر جاری شدن در سرتاسر طول اعضای پیوندی میگردد. براساس گزارشهای آزمایشگاهی با انتخاب نسبتهای مناسب عرض به ضخامت در این سیستم امکان حصول کرنش های برشی به بزرگی ۳۰٪ قبل از بروز هرگونه کاهندگی در رفتار چرخه ای قطعه فراهم گردید (Pollino, 2007b). شکل ۶ نمونه هایی از وسایل مستهلک کننده انرژی جاری شونده توصیه شده در مراجع فنی را نشان می دهد.

⁷ Added Damping and Stiffness

⁸ Triangular-plate Added Damping and Stiffness

⁹ Yielding Shear Panel Device

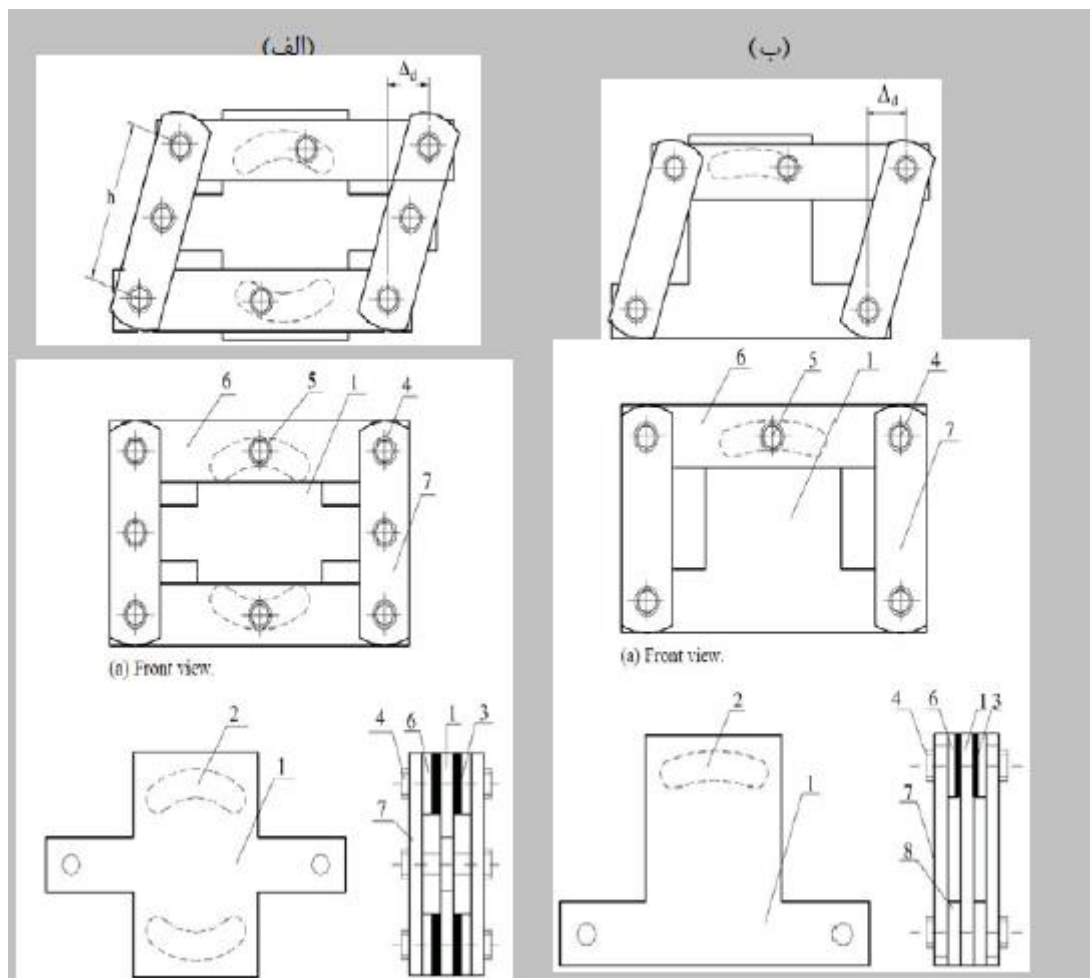


شکل ۶: (الف) TADAS [۲۱] (ب) ADAS [۱۶] (پ) Honeycomb damper میراگری با بازشوهای لانه زنبوری (ت) (Pollino, 2007b) (ث) Steel slit damper [۲۷] (ح) حلقه فولادی [۲۳] (ج) میراگر دیوار برشی با شکاف Shear wall with slits (د) صفحات شکاف دار فولادی (Pollino, 2008)

شایان ذکر است که علاوه بر میراگرهای جاری شونده ذکر شده در بالا، کاربرد سایر مکانیسمهای تسلیم مانند سازوکارهای جاری شدن محوری و پیچشی نیز مورد توجه بوده است که گزارشهای آنها در مراجع مربوطه موجود میباشد (Wu, 2005).

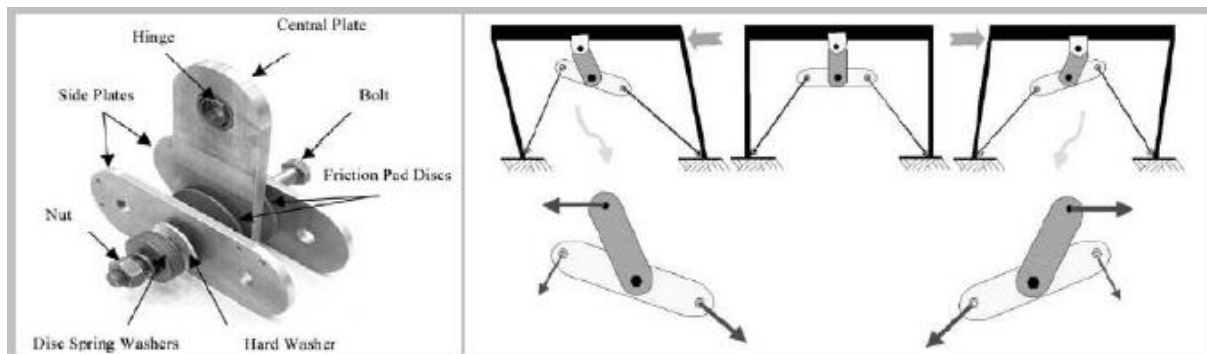
وسایل مستهلک کننده اصطکاکی

ایده اصلی در سیستم های اصطکاکی استهلاک انرژی از طریق مکانیسم اصطکاک لغزشی میباشد که قدمت کاربرد آن در اتصالات فولادی به حدود سه دهه قبل باز میگردد. در طی این مدت میراگرهای اصطکاکی متعددی توسط پژوهشگران مختلف به منظور استفاده در قاب های فولادی پیشنهاد گردید. به عنوان نمونه کاربرد سیستم میراگر اصطکاکی پال در محل تقاطع اعضای مهاربندی ضربدری قاب فولادی مورد مطالعه قرار گرفت (Aiken, 1993). همچنین، میراگر اصطکاکی در پروژه های عملی مانند کنترل سازه ادارات مرکزی آژانس فضایی کانادا مورد استفاده قرار گرفته است (Mualla, 2002). در سالهای اخیر یک مدل اصلاح شده برای میراگر اصطکاکی پال پیشنهاد گردید که ضمن برخورداری از قابلیت استهلاک انرژی مشابه با نمونه اصلی سهولت بیشتری را در ساخت و نصب میراگر فراهم مینماید (Grigorian, 1993). شمای کلی میراگرهای اصطکاکی پال در حالت های اصلی و اصلاح شده در شکل ۷ نشان داده شده است.

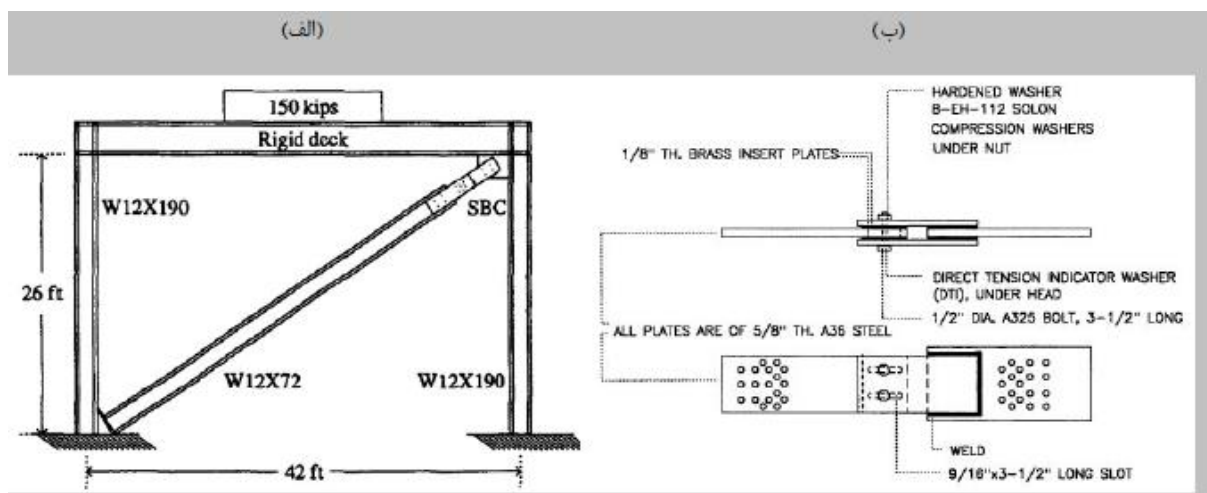


شکل ۷: شمای کلی میراگر اصطکاکی پال، (الف) آرایش اصلی (Mualla, 2002) (ب) آرایش اصلاح شده (Grigorian, 1995)

همچنین، یک میراگر اصطکاکی دارای جدار استوانه‌ای و بالشتکهای لغزنده داخلی توسط صنایع فلزیسومیتومو در ژاپن عرضه گردید که عملکرد آن طی مطالعات آزمایشگاهی مقایسه‌ای میان سیستم‌های استهلاک انرژی در مرکز تحقیقات مهندسی زلزله دانشگاه برکلی مورد بررسی قرار گرفت (Butterworth, 1999). در شکل ۸ پیشنهاد پژوهشگران پیشین (Butterworth, 2000) در طراحی و ساخت یک نمونه دیگر از میراگر اصطکاکی که استهلاک انرژی در آن از طریق حرکت پاندولی عضو اصطکاکی انجام میپذیرد نمایش داده شده است. به علاوه، اتصالات پیچی شیاردار به عنوان نمونه‌ای از سازوکارهای استهلاک انرژی اصطکاکی توسط پوپوف، گریگوریان و همکاران پیشنهاد (SBC) گردید و مطابق شکل ۹ کاربرد آن در سیستم مهاربندی قطری مورد بررسی قرار گرفت (Haghollahi, 2014).

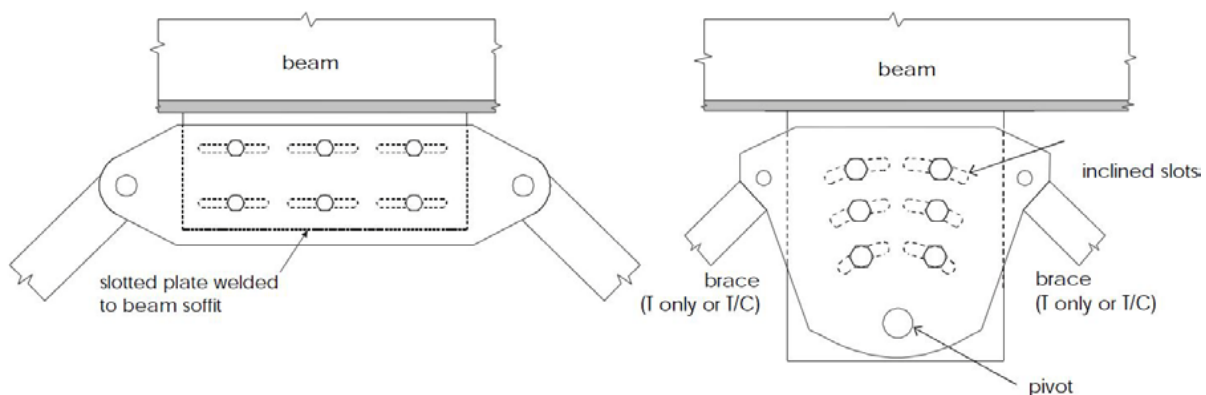


شکل ۸: (استهلاک انرژی به وسیله حرکت پاندولی عضو اصطکاکی (Butterworth, 2000)

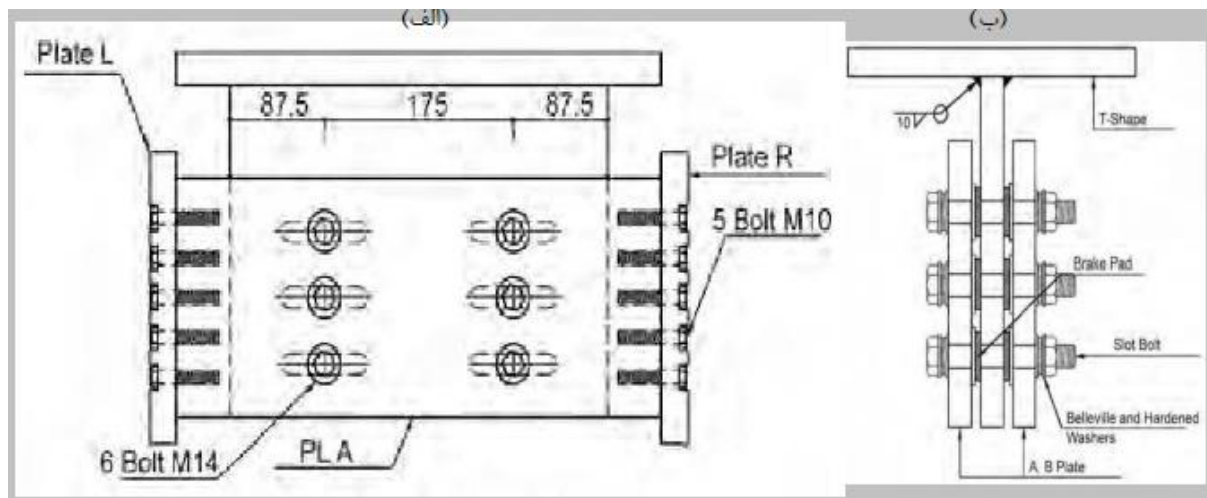


شکل ۹: اتصالات پیچی شیاردار (الف) کاربرد در سیستم مهاربندی قطری، (ب) نما و مقطع عرضی میراگر (Haghollahi, 2014)

همچنین، در پژوهش های باترورث یک نمونه سیستم اصطکاکی مانند شکل ۱۰ جهت کاربرد در سیستم شورون پیشنهاد گردیده است (Trembley, 2008). در داخل کشور نیز یک نمونه سیستم اصطکاکی مشابه میراگر باترورث با استفاده از لنت ترمز به جای صفحه برنجی پیشنهاد گردید که شمای کلی آن در شکل ۱۱ نشان داده شده است. آزمایش های انجام شده در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله موید رفتار مناسب سیستم اصطکاکی مورد نظر از دیدگاه استهلاک انرژی بوده است (Ashour, 1987).



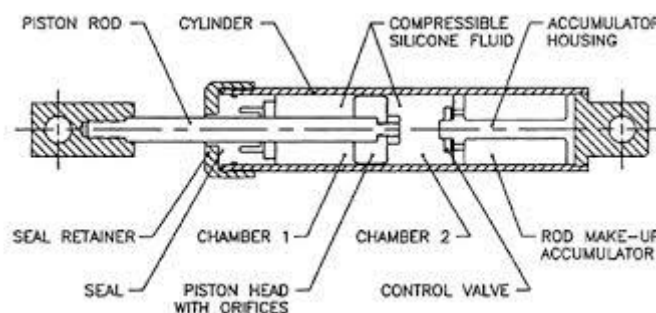
شکل ۱۰: کاربرد میراگر باترورث در سیستم قاب های شورون، (الف) لغزنده افقی، (ب) لغزنده چرخشی (Trebley, 2008 & Ashour, 1987)



شکل ۱۱: کاربرد میراگرهای اصطکاکی با لنت ترمز در قاب های شورون (الف) نمای روبرو، (ب) مقطع عرضی (Trebley, 2008)

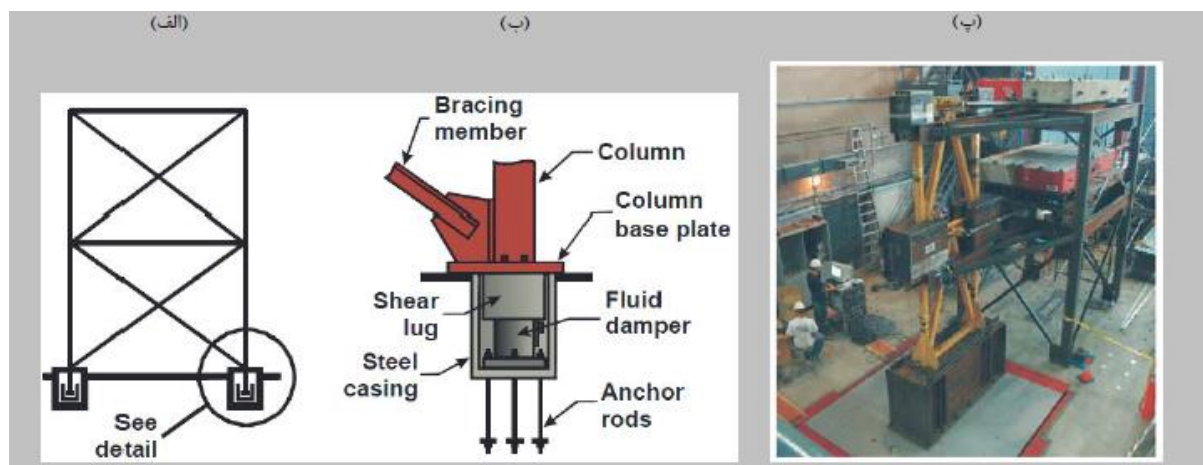
وسایل مستهلک کننده ویسکوز مایع و ویسکوالاستیک

برخلاف میراگرهای جاری شونده فلزی و اصطکاکی که سیستم های وابسته به تغییر مکان میباشند، میراگرهای ویسکوز مایع و ویسکوالاستیک در زمره سازوکارهای وابسته به سرعت قرار میگیرند. میراگرهای ویسکوز مایع شامل یک پیستون سوراخدار بوده که درون سیلندری حاوی مایع تحت فشار قرار میگیرد که بر اثر عبور مایع از سوراخ پیستون استهلاك انرژی محقق میگردد. در مطالعات آزمایشگاهی انجام شده تاثیر میراگرهای ویسکوز مایع مانند نمونه نشان داده شده در شکل ۱۲ در کاهش مقادیر جابجایی نسبی بین طبقه ای، شتاب و برش طبقات قاب های فولادی مورد آزمایش به نصف تا ثلث مقادیر متناظر در قاب مشابه بدون میراگر گزارش گردیده است از طرف دیگر، کاربرد این قبیل میراگرها با مسائلی از قبیل هزینه های زیاد خرید و تعمیر و نگهداری مواجه بوده است (Zhang, 1989).



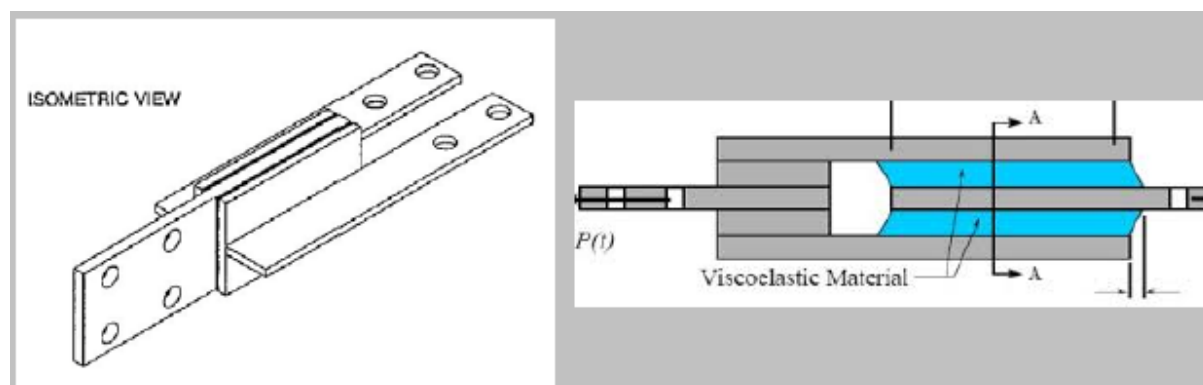
شکل ۱۲: میراگرهای ویسکوز مایع مورد استفاده در کاهش تقاضای لرزه ای قاب های فولادی (Zhang, 1989)

همچنین، همانگونه که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، یک مطالعه آزمایشگاهی در خصوص کاربرد میراگرهای ویسکوز مایع در سازه های فولادی دارای حرکت گهوارهای توسط ترمبلی و همکاران انجام پذیرفته است (Shukla, 1999). در سیستم پیشنهادی، میراگرهای ویسکوز مایع به صورت عمودی در مابین فونداسیون و کف ستونیک نمونه آزمایشگاهی ۲ طبقه کوچک مقیاس (با نسبت ۱ به ۲) تعبیه گردیدند. نتایج به دست آمده از مطالعات میز لرزان بیانگر کاهش تقاضای لرزه ای در نیروی برکنش پای ستون و برش پایه سیستم پیشنهادی در مقایسه با سازه متعارف متناظر بوده است.



شکل ۱۳: کاربرد میراگرهای ویسکوز مایع در سازه های فولادی دارای حرکت گهواره ای (الف) جانمایی میراگر در سازه، (ب) جزئیات میراگر، (پ) آماده سازی نمونه آزمایشگاهی (Shukla, 1999)

در شکل ۱۴ نمای شماتیک یک نمونه میراگر ویسکوالاستیک پیشنهادی در مراجع فنی (Popov, 1995) ارائه شده است. علاوه بر کاربرد میراگرهای ویسکوالاستیک در راستای کنترل ارتعاشات ساختمان های بلند در برابر باد، مطالعات پژوهشگران پیشین موید کارایی لرزه های قابل قبول آنها میباشد (Lee, 2007). همچنین، در سالین گذشته بررسی رفتار لرزه ای، دستورالعملهای طراحی و کاربرد بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک در ساختمان ها به میزان قابل توجهی توسعه یافته است.

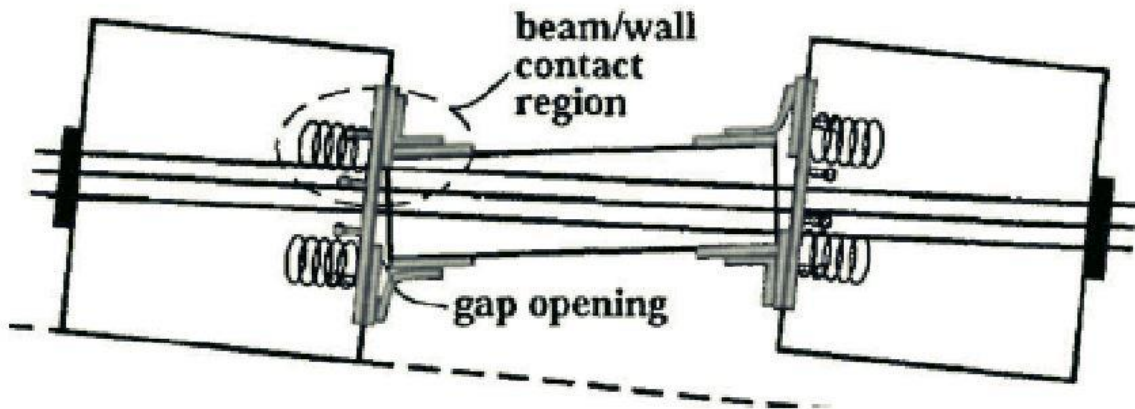


شکل ۱۴: نمای شماتیک یک نمونه میراگر ویسکوالاستیک پیشنهادی در مراجع فنی (Lee, 2007)

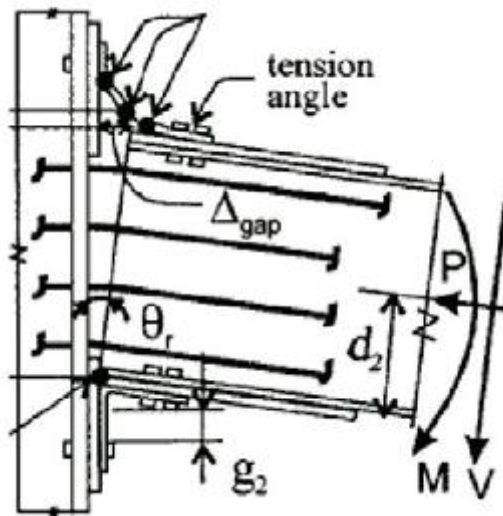
وسایل تامین کننده بازگرداندگی سیستم (مرکز گرایی)

یکی دیگر از اجزای اساسی قاب های فولادی دارای حرکت گهواره ای وسایل تامین کننده بازگرداندگی سیستم میباشد که علاوه بر اینکه تامین کننده سختی و پایداری سیستم هستند عملا پس از پایان زلزله نیز نقش تعیین کننده ای در غلبه بر نیروی پسماند فیوز به منظور بازگرداندن سیستم به وضعیت تعادلی اولیه بر عهده دارند. در تعدادی از مطالعات انجام شده بر روی قاب های فولادی دارای حرکت گهواره ای نیروهای ثقلی به عنوان تنها عامل تامین کننده بازگرداندگی سیستم انتخاب گردیدند. از طرف دیگر بررسی پژوهش های انجام یافته در خصوص ساختمان های فولادی دارای حرکت گهواره ای، بیانگر این موضوع است که در نمونه های متناظر با ساختمان های واقعی منابع دیگر تامین بازگرداندگی سیستم مورد نیاز میباشد که به عنوان نمونه کاربرد کابل های پس کشیده در این رابطه قابل ذکر است (Hsiao, 2012). در پژوهش های پیشین موارد متعددی از کاربرد کابل های پس کشیده در تامین خصوصیت بازگرداندگی و مرکزگرایی برای سیستم های سازه ای گوناگون ذکر شده است. به عنوان نمونه، کوراما و همکاران (Kurama, 2006)

از کابل های پس کشیده به منظور همبسته نمودن دیوارهای برشی بتنی مطابق جزئیات نشان داده شده در شکل ۱۵ استفاده نمودند. در مطالعات دیگر به گونه ای که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، نمونه ای از اتصالات پس کشیده تیر به ستون ارائه گردید که در آن کابل های پس کشیده مقاوت خمشی و بازگرداندگی اتصال را تامین نمودند (Yang, 2006). در یک مورد دیگر طی انجام آزمایش های میز لرزان مشاهده گردید که با نصب تاندونهای پس کشیده در نمونه ای آزمایشگاهی از پایه بتنی پل، نسبت تغییر مکان های جانبی نسبی (دریفت) از ۱ درصد به ۰/۱٪ کاهش یافت.



شکل ۱۵: کاربرد کابل های پس کشیده به منظور همبسته نمودن دیوارهای برشی بتنی (Kurma, 2006)



شکل ۱۶: (کاربرد کابل های تنیده شده در اتصالات پس کشیده تیر به ستون (Kurma, 2006)

جمع بندی

براساس یافته های اصلی پژوهش های پیشین در خصوص رفتار لرزهای سازه های دارای حرکت گهوارهای، مزیت اصلی این سیستم ها در مقایسه با سازه های متعارف با تکیهگاه ثابت در کاهش تقاضای لرزهای با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند برش پایه و دریفت های خمشی طبقات مورد اشاره قرار گرفت. از سوی دیگر حلقه های مفقوده در مطالعات پیشین مربوط به سازه های مدرن دارای حرکت گهوارهای و ضرورت تلاش در راستای پر کردن شکاف های موجود در دانش فنی روز در زمینه مورد مطالعه در کانون توجه قرار گرفت. در این میان لزوم در نظر گرفتن شرایط و فرضیات واقع بینانه تر در مقایسه جامع عملکرد لرزهای سیستم های متعارف در مقایسه با سیستم های نوین



دارای حرکت گهواره‌های برای ساختمان های واقعی و بررسی پارامترهای کلیدی مورد نیاز در به دست آوردن منحنی های شکنندگی به منظور ارزیابی احتمالات فراگذشت از حالت های آسیب مورد نظر در سازه های نوین یاد شده مورد تاکید قرار گرفت (Riahi Nouri, 2015)

A Review of Modern Techniques in Enhancing the Seismic Behavior of Steel Structures: Rocking Motion and Energy Dissipation Devices

Shahram Tabasheri

Ph.D. student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Zanzan Branch, Islamic Azad University, Zanzan, Iran.

Shahram8631@gmail.com

Abstract

Improving the seismic behavior of steel structures is of paramount importance in reducing human and financial losses in earthquake-prone areas. This topic has always been one of the key issues in structural engineering. The use of rocking motion and energy dissipation devices are recognized as two innovative and effective approaches in this field. In this review article, the principles and fundamentals of rocking motion and its role in reducing seismic forces are initially examined. Then, various types of energy dissipation devices, including viscous dampers, friction dampers, and metallic dampers, are introduced and their performance is analyzed. Additionally, case studies and experimental and numerical results related to the application of these techniques in steel structures are presented. The review of these articles indicates that the combination of rocking motion and energy dissipation devices can significantly enhance the stability and safety of steel structures against earthquakes.

Keywords: Rocking motion, Seismic Forces, Energy Dissipation Devices

منابع

ریاحی نوری، ابوالفضل، ۱۳۹۳، بهبود رفتار لرزه ای سازه های فولادی توسط حرکت گهواره ای و قطعات مستهلک کننده انرژی، رساله دکتری مهندسی عمران - زلزله

Clough, R. W., & Hucklebridge, A. A. (1977). *Preliminary experimental study of seismic uplift of a steel frame*. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.

Cormack, L. (1988). The design and construction of the major bridges on the Mangaweka rail deviation. *Transactions of the Institution of Professional Engineers New Zealand: Civil Engineering Section*, 15(1), 17-23.

Rutenberg, A., Jennings, P. C., & Housner, G. W. (1982). The response of veterans hospital building 41 in the San Fernando earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(3), 359-379.

Hayashi, Y., Tamura, K., Mori, M., & Takahashi, I. (1999). Simulation analyses of buildings damaged in the 1995 Kobe, Japan, earthquake considering soil-structure interaction. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 28(4), 371-391.

Wada, A., Yamada, S., Fukuta, O., & Tanigawa, M. (2001, October). Passive controlled slender structures having special devices at column connections. In *7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures* (pp. 2-5).

Iwashita, K., Kimura, H., Kasuga, Y., & Suzuki, N. (2002). Shaking table test of a steel frame allowing uplift. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (561), 47-54.



- Midorikawa, M., Toyomaki, S., Hori, H., Asari, T., Azuhata, T., & Ishihara, T. (2008, October). Seismic response of six-story eccentrically braced steel frames with columns partially allowed to uplift. In *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Ma, X., Krawinkler, H., & Deierlein, G. G. (2011). Seismic design, simulation and shake table testing of self-centering braced frame with controlled rocking and energy dissipating fuses. *John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford Univ., Stanford, CA.*
- Scholl, R. E. (1990, May). Improve the earthquake performance of structures with added damping and stiffness elements. In *Proc., 4th US Nat. Conf. on Earthquake Engrg* (pp. 489-498)..
- Andalib, Z., Kafi, M. A., Kheyroddin, A., Bazzaz, M., & Momenzadeh, S. (2018). Numerical evaluation of ductility and energy absorption of steel rings constructed from plates. *Engineering Structures*, 169, 94-106.
- Chan, R. W., Albermani, F., & Williams, M. S. (2009). Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(2), 260-268.
- Hossain, M. R., Ashraf, M., & Albermani, F. (2011). Numerical modelling of yielding shear panel device for passive energy dissipation. *Thin-Walled Structures*, 49(8), 1032-1044.
- Li, Z., Albermani, F., Chan, R. W., & Kitipornchai, S. (2011). Pinching hysteretic response of yielding shear panel device. *Engineering structures*, 33(3), 993-1000.
- Chan, R. W., & Albermani, F. (2008). Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*, 30(4), 1058-1066.
- Ma, X., Borchers, E., Pena, A., Krawinkler, H., Billington, S., & Deierlein, G. G. (2010). Design and behavior of steel shear plates with openings as energy-dissipating fuses. *John A. Blume Earthquake Engineering Center Technical Report*, (173).
- Pollino, M., & Bruneau, M. (2007)a. Seismic retrofit of bridge steel truss piers using a controlled rocking approach. *Journal of Bridge engineering*, 12(5), 600-610.
- Pollino, M., & Bruneau, M. (2008). *Analytical and experimental investigation of a controlled rocking approach for seismic protection of bridge steel truss piers* (No. 3). Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Pollino, M. (2007)b. *Analytical and experimental investigation of a controlled rocking approach for seismic protection of bridge steel truss piers*. State University of New York at Buffalo.
- Wu, B., Zhang, J., Williams, M. S., & Ou, J. (2005). Hysteretic behavior of improved Pall-typed frictional dampers. *Engineering Structures*, 27(8), 1258-1267.
- Aiken, I. D., Nims, D. K., Whittaker, A. S., & Kelly, J. M. (1993). Testing of passive energy dissipation systems. *Earthquake spectra*, 9(3), 335-370.
- Mualla, I. H., & Belev, B. (2002). Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation. *Engineering Structures*, 24(3), 365-371.
- Grigorian, C. E., Yang, T. S., & Popov, E. P. (1993). Slotted bolted connection energy dissipators. *Earthquake Spectra*, 9(3), 491-504.
- Popov, E. P., Grigorian, C. E., & Yang, T. S. (1995). Developments in seismic structural analysis and design. *Engineering structures*, 17(3), 187-197.
- Butterworth, J. W. (1999, September). Seismic damage limitation in steel frames using friction energy dissipators. In *6th International Conference on Steel and Space Structures* (pp. 1-2).
- Butterworth, J. (2000). Ductile concentrically braced frames using slotted bolted joints. *J Struct Eng Society of New Zealand*, 13(1), 39-48.
- Haghollahi, A., & Karami, S. (2014). STUDY OF APPLICATION OF FBP FRICTION DAMPER IN A C HEVRON BRACE FOR STEEL FRAME REHABILITATION. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 30(2), 125-132.
- Tremblay, R., Poirier, L. P., Bouaanani, N., Leclerc, M., Rene, V., Fronteddu, L., & Rivest, S. (2008, October). Innovative viscously damped rocking braced steel frames. In *Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering, Beijing, China* (pp. 12-17).
- Ashour, S. A. (1987). *Elastic seismic response of buildings with supplemental damping*. University of Michigan.
- Zhang, R. H., Soong, T. T., & Mahmoodi, P. (1989). Seismic response of steel frame structures with added viscoelastic dampers. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 18(3), 389-396.
- Shukla, A. K., & Datta, T. K. (1999). Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic force. *Journal of Structural Engineering*, 125(4), 401-409.
- Lee, W., Jeong, H., Billington, S., Mahin, S. A., and Sakai, J. (2007). Post-Tensioned Structural Concrete Bridge Piers with Self-Centering Characteristics. *Structural Engineering Research Frontiers* (pp. 1-15).

Kurama, YC., Weldon, BD. and Shen, Q. (2006). Experimental evaluation of posttensioned hybrid coupled wall subassemblages. *Journal of Structural Engineering*, 132(7): 1017-1029.