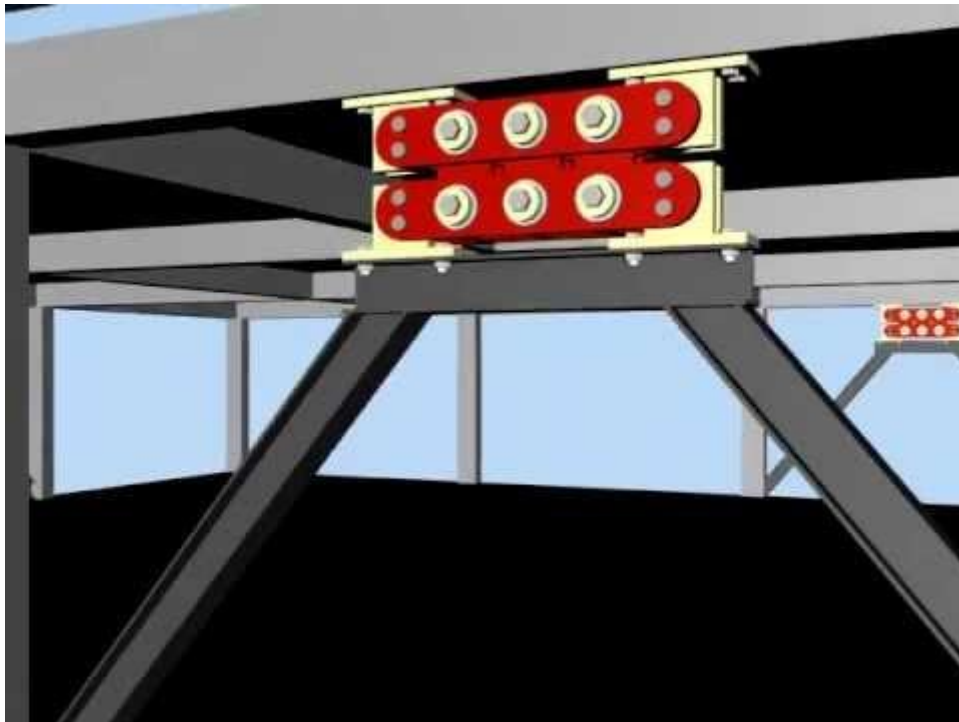


استفاده از میراگرهای اصطکاکی برای کنترل لرزهای در برج‌های لاگاردنیا در شهر گورگان، هند



خلاصه

برای ساخت یک آپارتمان ۱۸ طبقه از یک سیستم سازه‌ای نوین قاب با میرایی اصطکاکی استفاده شده است. با استفاده از میراگرهای اصطکاکی پال در مهاربندهای فولادی، مقاومت در برابر زلزله و احتمال کنترل آسیب وارده به ساختمان به طور چشمگیری افزایش یافته است. هنگام وقوع یک زلزله بزرگ، میراگرهای اصطکاکی قبل از تسلیم شدن اعضا می‌لغزند و بخش عمده‌ای از انرژی لرزهای را مستهلک می‌کنند؛ بنابراین از وابستگی نهایی به انعطاف پذیری اجتناب شده و اعضای سازه‌ای عموماً در حالت الاستیک و بدون آسیب باقی می‌مانند. نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی سه بعدی نشان دهنده عملکرد بهتر قاب‌های دارای میراگرهای اصطکاکی در مقایسه با سازه‌های مرسوم هستند. انرژی مستهلک شده میراگرهای اصطکاکی، نیروهای جانبی اینرسی و دامنه ارتعاشات را کاهش می‌دهد. این سیستم باعث صرفه جویی در مصالح ساختمانی می‌شود.

مقدمه

مجتمع مسکونی لاگاردنیا شامل ۷ برج ۸ طبقه با دو طبقه زیرزمین است (شکل ۱). مجتمع در زمینی به مساحت ۱۱ ایکر (۴۴۵۱۵/۴۶ متر مربع) در گورگان و به فاصله حدود ۸ کیلومتر از فرودگاه بین‌المللی دهلی نو قرار گرفته است. مجتمع مفهوم جدیدی از زندگی خوب را ارائه می‌کند که روح خود را از گاردنیا (گلی بسیار زیبا در مناطق استوایی) الهام گرفته است. مجتمع لاگاردنیا را شرکت Unitech Limited از دهلی نو ساخته است و مالک آن نیز می‌باشد. برای ساخت این مجتمع از آخرین مصالح ساختمانی برای راحتی و امنیت ساکنان استفاده شده است. استفاده از فناوری طراحی مقاوم در برابر زلزله، اولین بار در هند و در این پروژه استفاده شد.

در سیستم سازه‌ای انتخاب شده، میراگرهای اصطکاکی پال در سیستم مهاربندی فولادی قاب‌های بتنی جای داده شده‌اند. استفاده از مهاربند فولادی باعث حذف نیاز به دیوارهای بتنی گران قیمت و استفاده از میراگرهای اصطکاک سبب حذف نیاز به وابستگی به شکل پذیری اعضا شد. مهاربندهای دارای میراگر اصطکاکی در دیوار اطراف پله‌ها یا محور آسانسورها تعبیه شدند. استفاده از این مهاربندها انعطاف پذیری بیشتری در برنامه ریزی فضا در اختیار قرار می‌دهد، زیرا بر خلاف دیوارهای برشی لازم نیست به صورت پیوسته و روی هم قرار بگیرند. از آنجا که مهاربند دارای میراگر اصطکاکی، هیچ بار ثقلی را متحمل نمی‌شود، نیازی به ادامه دادن آن‌ها در زیرزمین‌ها و اتصال آن‌ها به فونداسیون نیست. این کار به ما اجازه می‌دهد که فضای بیشتری به عنوان پارکینگ در زیرزمین‌ها داشته باشیم. در طبقه همکف برش جانبی ناشی از مهاربندها با یک دیافراگم صلب به دیوارهای حائل اطراف زیرزمین منتقل می‌شوند. مهندسان معمار برای اضافه کردن زیبایی ساختمان، بعضی از میراگرهای اصطکاکی را در معرض دید قرار دادند. در کل از ۶۶ میراگر اصطکاکی برای محافظت از سازه و مستهلک کردن انرژی استفاده شد.

پلان یک طبقه از یک آپارتمان ۳ خوابه در شکل ۲ نشان داده شده است. مساحت هر آپارتمان حدود ۲۰۰ متر مربع (۲۱۰۰ فوت مربع) است. چهار آپارتمان در هر طبقه وجود دارد که تقریباً پلان متقارنی دارند. بین طبقه همکف و نهم، دو آپارتمان شمالی تنها با یک لابی آسانسور به دو آپارتمان جنوبی متصل شده‌اند. در طبقات بالاتر دو جفت آپارتمان به صورت صلب به هم متصل شده‌اند. این موضوع به دلیل نیازهای عملکردی و طراحی این‌گونه اجرا شده است. با در نظر گرفتن خروج از محوریت تصادفی در جرم و عملکرد زلزله در یک گوشه نسبت به محورهای اصلی، سازه فاقد صلبیت پیچشی در پایین‌تر از طبقه نهم است. این موضوع یک چالش سازه‌ای منحصر به فرد بود. گزینه‌های مختلفی برای غلبه بر این نقص در نظر گرفته شد. در نهایت یک راه حل ترکیبی انتخاب شد. این راه حل ایجاد دیوار برشی بتنی در اطراف آسانسور مرکزی از روی پی تا طبقه نهم به همراه یک دال ضخیم برای لابی بود که دارای مهاربند و میراگر اصطکاکی از زمین تا طبقه نهم می‌باشد.

آخرین پیشرفت‌های علمی

در هنگام وقوع یک زلزله بزرگ، انرژی زیادی به سازه منتقل می‌شود. روش مصرف شدن این انرژی مقدار آسیب به سازه را تعیین می‌کند. معیار طراحی تعیین شده در آیین‌نامه‌های ساختمانی مانند استانداردهای هندی، اساس فلسفه طراحی سازه‌ها به گونه‌ای است که در برابر زلزله‌های متوسط سازه‌ها بدون آسیب قابل ملاحظه‌ای باقی بمانند و از ریزش سازه در طول زلزله‌های بزرگ جلوگیری شود. در کل، اطمینان از بقا به شکل پذیری سازه برای مستهلک کردن انرژی در هنگام وقوع تغییر شکل‌های غیر الاستیک بزرگ بستگی دارد. این روش باعث ایجاد آسیب‌های دائمی می‌شود که نیازمند هزینه‌های تعمیراتی است که می‌تواند از نظر اقتصادی به اندازه فروریختن یک ساختمان هزینه در بر داشته باشد. مثال‌های اخیر از این موارد را می‌توان در زلزله‌های سال ۱۹۹۴ نورتریج در کالیفرنیا و سال ۱۹۹۵ کوبه در ژاپن دانست. خسارت به ساختمان‌ها و هزینه‌های ایجاد شده برای نورتریج و کوبه به ترتیب بیش از ۵۰ و ۱۵۰ میلیارد دلار بوده است. این زلزله‌ها نشان دادند که ساخت و ساز سنتی، حتی در کشورهای پیشرفته از نظر صنعت و فناوری در مقابل تخریب ایمن نیستند.

در حالی که به نظر می‌رسید، مقررات آیین‌نامه‌های ساختمانی گذشته برای اکثر ساختمان‌ها کافی است، اما روش‌های ایمن‌تری برای ساختمان‌های مهم مورد نیاز بود. در ساختمان‌های مدرن اجتناب از ریزش سازه‌ای به تنهایی کافی نیست. هزینه‌های نازک کاری، محتویات، تجهیزات حساس و الکترونیکی انبار شده می‌تواند بسیار بیشتر از هزینه خود سازه باشد، بنابراین باید از آن‌ها محافظت شود.

با توجه به خسارت‌های مالی و آسیب‌های اجتماعی بزرگ در زلزله‌های اخیر، لازم است که مقامات نظام مهندسی ساختمان، مهندسان سازه، سازندگان، بانک‌ها و بیمه‌ها دقت و توجه بیشتری در مورد پاسخ لرزه‌ای ساختمان در مقایسه با ایمنی لحاظ کنند تا بتوانند خسارت‌ها را کنترل کنند.

ساخت و ساز سنتی

قاب‌های فولادی دارای مهاربند در کنترل تغییر شکل‌های جانبی ناشی از باد و زلزله‌های متوسط، کارایی و صرفه اقتصادی بیشتری دارند. در هنگام وقوع زلزله‌های بزرگ این سازه‌ها نمی‌توانند عملکرد خوبی داشته باشند. یک مهاربند تحت تنش کششی، کشیده می‌شود و تحت تنش فشاری دچار کمانش می‌گردد. در بارگذاری بعدی در همان راستا، این مهاربند کشیده شده حتی در کشش هم عملکرد مؤثری نخواهد داشت، مگر اینکه از آنچه قبلاً بود هم بیشتر کشیده شود. در نتیجه استهلاک انرژی به سرعت کاهش پیدا کرده و سازه ممکن است فرو بریزد. زلزله ۱۹۹۵ کوبه شکست‌های زیادی را در ساختمان‌های با مهاربند نشان می‌دهد.

قاب‌های خمشی مقاومت خوبی در برابر زلزله از خود نشان می‌دهند، زیرا قاب‌هایی که جزئیات مناسبی دارند، می‌توانند تحت بارهای تکراری معکوس شونده رفتار شکل پذیر و پایداری داشته باشند. این مزیت در بسیاری از آیین‌نامه‌های ساختمانی با اختصاص دادن نیروهای لرزه‌ای پایین‌تر به این قاب‌ها در نظر گرفته شده است. با این وجود این سازه‌ها بسیار انعطاف پذیر بوده و ایجاد سختی کافی برای کنترل تغییر مکان طبقه برای جلوگیری از آسیب‌های غیر سازه‌ای در آن‌ها هزینه بر است.

اغلب از دیوارهای برشی بتنی یا مهاربندهای فولادی برای افزایش صلبیت قاب‌های خمشی استفاده می‌شود. عموماً سازه‌های سخت‌تر شتاب زمین بالاتری را جذب می‌کند و در نتیجه نیروهای بیشتری را در اعضای تکیه گاهی و پی تحمل می‌کنند؛ بنابراین هر مزیتی که با اضافه کردن سختی به دست بیاید با افزایش مقدار ورودی انرژی و نیاز به مقاومت و شکل پذیری بیشتر خنثی می‌شود. شکل پذیری در یک دیوار بتن مسلح به شدت به جزئیات و کنترل کیفیت حساس است و اغلب با تردید به آن نگاه می‌شود. علاوه بر هزینه بالای ساخت، استفاده از دیوار برشی شدیداً انعطاف پذیری فضا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. جانمایی این دیوارهای برشی باید از بالا تا روی پی ادامه پیدا کند. پر کردن قاب‌ها با مصالح بنایی و آجر هم تقریباً رایج است. علیرغم اینکه این روش در مقاومت در برابر باد بسیار خوب عمل می‌کند، اما عملکرد ضعیفی در برابر زلزله‌های بزرگ دارد.

مشکلات ایجاد شده به دلیل وابستگی به شکل پذیری سازه را در صورتی می‌توان کاهش داد که بخش عمده‌ای از انرژی لرزه‌ای به صورت مکانیکی و بدون وابستگی به سازه اولیه مستهلک شود. با ظهور میراگرهای اصطکاکی پال افزایش قابل ملاحظه مقاومت در برابر زلزله و احتمال کنترل آسیب به سازه به صورت اقتصادی ممکن شده است.

میراگرهای اصطکاکی پال

در بین تمام روش‌های موجود برای مستهلک کردن انرژی از جسم در حال حرکت، بیشترین کاربرد را میراگرهای اصطکاکی به خود اختصاص داده‌اند. این روش مؤثرترین، قابل‌اعتمادترین و اقتصادی‌ترین روش برای استهلاک انرژی است. چندین قرن است که مهندسان مکانیک از این مفهوم برای کنترل حرکت ماشین‌آلات و اتومبیل‌ها استفاده می‌کنند. در اواخر دهه هفتاد اصل ترمز اصطکاکی الهام بخش ساخت میراگرهای اصطکاکی پال شد. مشابه اتومبیل‌ها، حرکت یک ساختمان در حال ارتعاش هم قابل کنترل است.

میراگرهای اصطکاکی مناسب برای انواع مختلف ساختمان عبارت‌اند از:

۱- دیوارهای برشی بتنی پیش ساخته و درجا

۲- قاب‌های فولادی / بتنی مهاربندی شده

۳- ساختمان‌های کوتاه

۴- قاب‌های پوششی

میراگرهای اصطکاکی پال برای مهاربندهای ضربدری کششی، مهاربندهای قطری منفرد، مهاربندهای شورن و اتصالات پوششی قابل استفاده هستند.

میراگرهای اصطکاکی پال از نظر اجرا ساده و بدون خطا و از نظر اقتصادی ارزان هستند. اساساً این میراگرها شامل تعدادی صفحات فولادی می‌باشند. این ورق‌ها به یکدیگر با بولت‌های فولادی دارای مقاومت بالا متصل شده‌اند. لغزش بدون هیچ‌گونه چسبندگی و خطا رخ می‌دهد. میراگرهای اصطکاکی به صورتی طراحی شده‌اند که در طول طوفان‌ها و بارهای سرویس دچار لغزش نشوند. هنگام وقوع یک زلزله بزرگ، میراگرهای اصطکاکی تحت یک مقدار بار بهینه از پیش تعیین شده قبل از تسلیم شدن اعضای سازه‌ای دیگر، لغزش کرده و بخش عمده‌ای از انرژی لرزه‌ای را مستهلک می‌کنند. با انتخاب درست بار لغزشی می‌توان پاسخ سازه را به مقدار بهینه‌ای تغییر داد. این امر به ساختمان اجازه می‌دهد که در طول بزرگ‌ترین زلزله‌ها هم الاستیک باقی بماند یا حداقل اینکه تسلیم شدگی در آن به تأخیر بیفتد. مطالعات پارامتری نشان داده است که بار لغزش بهینه مستقل از زلزله است و بیشتر یک مشخصه سازه‌ای محسوب می‌شود. همچنین در بازه تغییرات ۲۰ درصدی در خصوص بار لغزش، پاسخ لرزه‌ای تغییرات قابل ملاحظه‌ای نخواهد داشت. دیگر ویژگی ساختمان‌های دارای میراگر اصطکاکی این است که دوره طبیعی آن‌ها با دامنه ارتعاش متغیر است؛ بنابراین از پدیده تشدید جلوگیری می‌شود. بعد از زلزله، سازه الاستیک به دلیل داشتن ویژگی فنی به حالت اصلی خود برمی‌گردد.

میراگرهای اصطکاکی پال آزمایش‌های شدید میز لرزش را در کانادا و ایالات متحده با موفقیت پشت سر گذاشته‌اند. در سال ۱۹۸۵، یک قاب مهاربندی شده با استهلاک اصطکاکی در روزی میز لرزش در دانشگاه بریتیش کلمبیا در ونکوور آزمایش شد. حتی یک زلزله شبیه‌سازی شده با یک حرکت زمین با حداکثر شتاب $0.9g$ هم باعث خسارت به قاب مدل نشد، در حالی که قاب‌های معمولی در سطوح لرزه‌ای پایین‌تری به شدت آسیب دیدند. در سال ۱۹۸۷ یک قاب با مهاربند استهلاک اصطکاکی نه طبقه در مرکز تحقیقات مهندسی زلزله در دانشگاه کالیفرنیا در برکلی مورد آزمایش قرار گرفت. تمام اجزای قاب مدل با استهلاک اصطکاکی تا $0.84g$ هم الاستیک باقی ماند، در حالی که قاب خمشی در حدود شتاب $0.3g$ به حد تسلیم شدگی رسید.

این میراگرهای اصطکاکی چرخه پسماند مستطیلی بزرگی دارند که مشابه یک ماده الاستوپلاستیک ایده‌آل رفتار می‌کند. بر خلاف میراگرهای ویسکوز، عملکرد این میراگرها مستقل از دما و سرعت است. به ازای یک نیرو و جابه‌جایی مشخص در میراگر، انرژی مستهلک شده در میراگر اصطکاکی پال نسبت به دیگر میراگرهای موجود بیشتر است؛ بنابراین تعداد میراگرهای اصطکاکی پال کمتری برای دستیابی به یک مقدار مورد نظر در استهلاک انرژی لازم است.

حداکثر نیرو در میراگرهای اصطکاکی به خوبی تعریف شده و برای هر حرکت زمینی در آینده ثابت خواهد بود؛ بنابراین طراحی اتصالات راحت و اقتصادی خواهد بود. هیچ چیز برای آسیب دیدن یا شکست در این میراگرها وجود ندارد؛ بنابراین این میراگرهای نیازی به بازرسی‌های منظم، نگه داری یا جابه‌جایی قبل و بعد از زلزله نخواهند داشت. معماران دوست دارند این میراگرها را در معرض دید قرار بدهند، زیرا این میراگرها به ظاهر زیبای سازه کمک می‌کنند. میراگرهای اصطکاکی پال شکل و شمایل جمع و جور دارند و می‌توان آن‌ها را به راحتی در داخل پارتیشن‌ها پنهان کرد. این میراگرهای اصطکاکی، استانداردهای کنترل کیفی بالایی را دارا هستند. هر میراگر برای اطمینان از بار لغزش مناسبی آزمایش شده و سپس به محل سایت منتقل می‌شود.

میراگرهای اصطکاکی پال کاربردهای وسیعی در سازه‌های بتنی و فولادی ساختمان‌های جدید و بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود دارند. تا به امروز بیش از ۴۰ ساختمان با استفاده از این میراگرها ساخته شده و تعداد زیادی هم در دست طراحی و ساخت هستند. اخیراً کارخانه تولید هواپیمای بوئینگ هم با استفاده از میراگرهای اصطکاکی پال بهسازی لرزه‌ای شده است.

معیار طراحی

فرآیند نیمه استاتیک طراحی داده شده در استانداردهای هندی و آیین نامه‌های ساختمانی در کشورهای دیگر بر اساس شکل پذیری بوده و صریحاً برای ساختمان‌هایی با میراگرهای اصطکاکی کاربرد ندارد. با این وجود آیین نامه‌های ساختمانی در ایالات متحده، کانادا و بعضی کشورهای دیگر اجازه استفاده از میراگرهای اصطکاکی را برای کنترل لرزه‌ای ساختمان می‌دهند. استفاده از این میراگرها مستلزم این است که تحلیل غیرخطی نشان بدهد که ساختمان‌هایی که مجهز به این میراگرها هستند به خوبی در حوادث لرزه‌ای عمل می‌کنند. در چند سال گذشته، دستورالعمل‌های زیادی برای فرآیند تحلیل و طراحی تجهیزات استهلاک انرژی غیرفعال در ایالات متحده منتشر شده است. آخرین و جامع‌ترین سند دستورالعمل NEHRP برای بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها، FEMA ۲۷۳/۲۷۴، است که در اکتبر ۱۹۹۷ منتشر شده است. الزامات و دستورالعمل‌های مندرج در استاندارد هندی «معیار طراحی مقاومت لرزه‌ای سازه‌ها»، ۱۸۹۳، پایه‌ای برای تحلیل و طراحی پروژه فوق بوده است.

این دستورالعمل ملزم می‌کند که سازه با تجهیزات استهلاک انرژی برای پاسخ دو سطح از لرزش زمین ارزیابی شود - یک زلزله مبنا در طراحی (DBE) و حداکثر شدت زلزله مورد نظر (DBE.(MCE) یک زلزله است که احتمال تجاوز آن در ۵۰ سال ۱۰٪ است، در حالی که MCE نشان دهنده حرکت شدید زمین با احتمال وقوع ۲٪ در ۵۰ سال است. تحت DBE سازه برای اطمینان از اینکه مقاومت‌های مورد نیاز اجزای سازه‌ای از ظرفیت آن‌ها بیشتر نباشد و جابه‌جایی در سازه در داخل حدود قابل تحمل باشد ارزیابی می‌شود. در MCE سازه برای تعیین ملزومات تغییر مکان بیشینه ارزیابی می‌شود. مسلم است که با جزئیات شکل پذیر مناسب، سازه توانایی کافی برای مقاومت با هر شرایط تنشی را که در طول MCE ایجاد شود را خواهد داشت و از فروریختن آن اجتناب خواهد شد. تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی برای هر دو زلزله DBE و MCE مورد نیاز است. حداکثر پاسخ در سه زلزله باید در طراحی مورد استفاده قرار بگیرد.

راهنمای NEHRP ملزم می‌کند که میراگرهای اصطکاکی برای ۱۳۰٪ تغییر مکان MCE طراحی شوند و تمام مهاربندها و اتصالات به ازای بار لغزشی میراگر به اندازه ۱۳۰٪ طراحی شوند. تغییر در بار لغزش از مقدار طراحی نباید بیش از ۱۵٪ باشد.

بحث در مورد نتایج

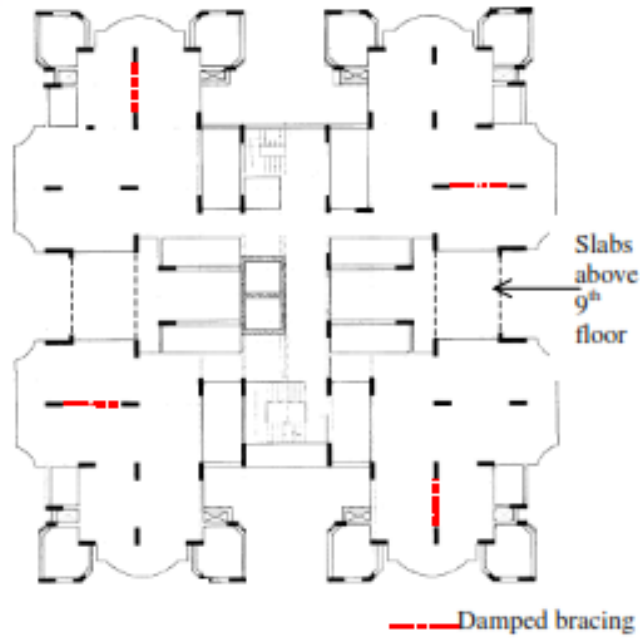
۱. تاریخچه زمانی تغییر شکل‌ها در بالای ساختمان در شکل ۶ نشان داده شده است. دامنه حداکثر FDF، به ترتیب، ۶۳٪ و ۶۴٪ در BMF و SWF است.
۲. پوش ورودی انرژی لرزه‌ای و انرژی مستهلک شده توسط میراگرهای اصطکاکی در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حدود ۴۰٪ از انرژی لرزه‌ای توسط میراگرهای اصطکاکی مستهلک شده‌اند. کل ورودی انرژی برای FDF به ترتیب ۸۰٪ و ۶۹٪ در BMF و SWF بوده است.
۳. چرخه پسماند یک میراگر معمول در مهاربند در شکل ۸ نشان داده شده است. لغزش در میراگر حدود ۸ میلی‌متر بوده است. انحراف دائمی در میراگر بعد از زلزله کمتر از ۱ میلی‌متر بوده است. میراگرهای اصطکاکی در تمام طبقات در استهلاک انرژی مشارکت کرده‌اند.
۴. ماکزیمم پوش‌های برش‌های طبقه در FDF، BMF و SWF در شکل ۹ نشان داده شده است. مقادیر FDF به ترتیب ۶۳٪ و ۵۳٪ در BMF و SWF هستند.
۵. حداکثر پوش برای بار محوری در یک ستون از دهانه مهاربندی شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقادیر FDF، ۲۷٪ در BMF است.
۶. در BMF تمام مهاربندها و ۲۵٪ ستون‌ها جاری شده‌اند. تمام اعضا در FDF الاستیک باقی مانده‌اند. دیوارهای برشی در محل پی، ۴۰٪ تنش اضافی تحمل کردند.

نتیجه گیری

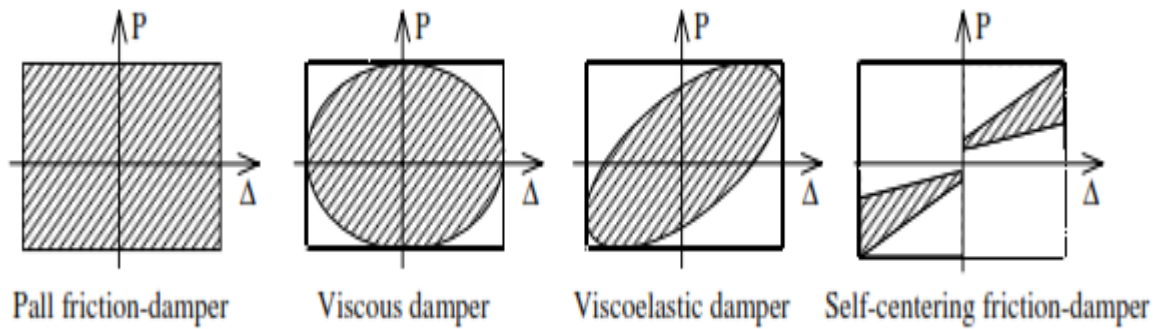
استفاده از میراگرهای اصطکاکی پال یک راه حل عملی و اقتصادی برای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها ایجاد کرده است. از آنجا که نیروهای لرزه‌ای اعمال شده روی سازه به شدت کاهش پیدا کرده‌اند، سیستم باعث کاهش مصالح ساختمانی هم می‌شود. مطالعات تحلیلی نشان داده است که سازه داراب میراگر اصطکاکی در زلزله بزرگ، با کاهش خسارت به ساختمان و محتویات، عملکرد رضایت بخشی خواهد داشت.



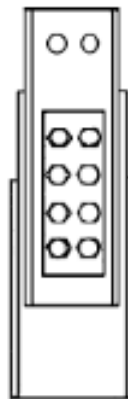
شکل ۱. مجتمع لاگاردنیا



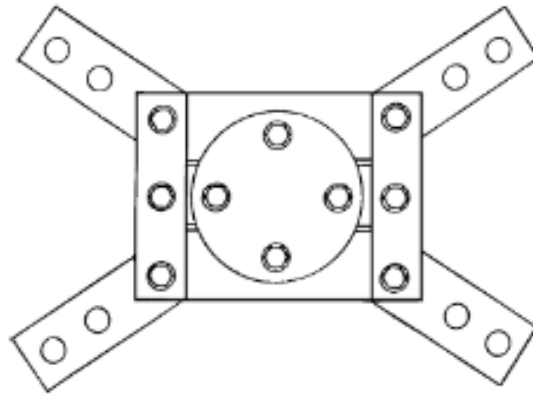
شکل ۲. پلان معمول آپارتمان با ۳ اتاق خواب



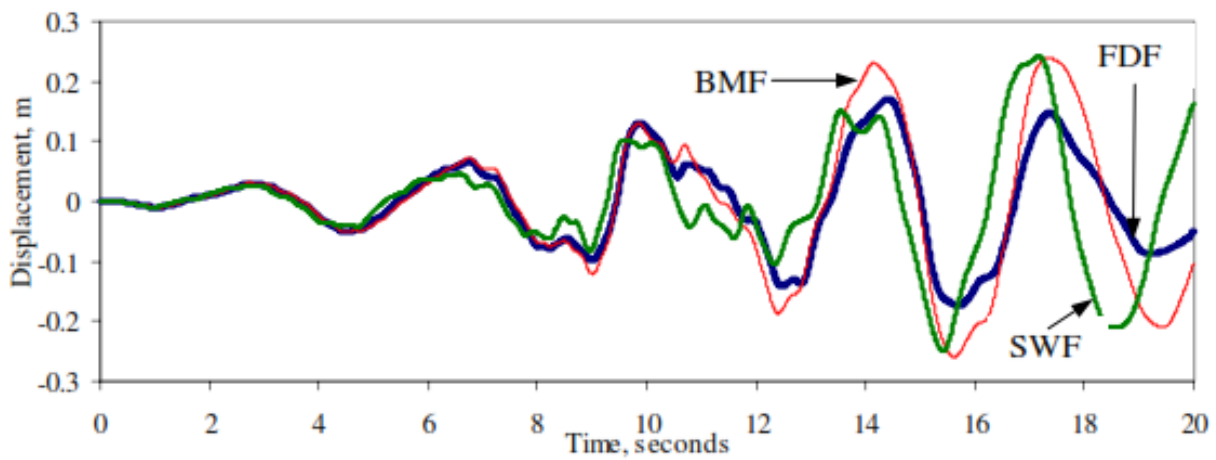
شکل ۳. چرخه پسماند میراگرهای مختلف



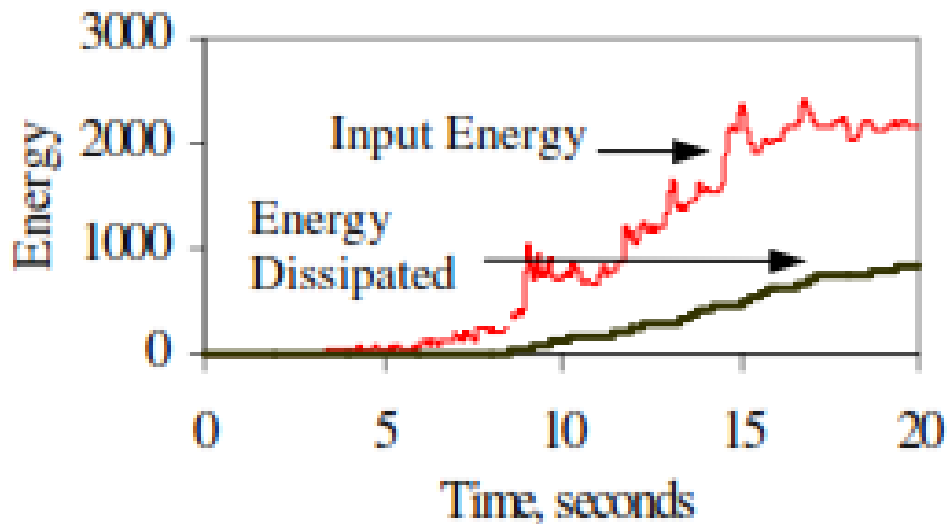
شکل ۴. میراگر اصطکاکی مهاربند قطری منفرد



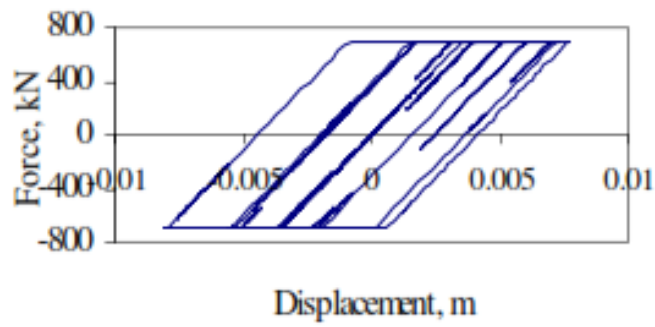
شکل ۵. میراگر اصطکاکی مهاربند ضربری



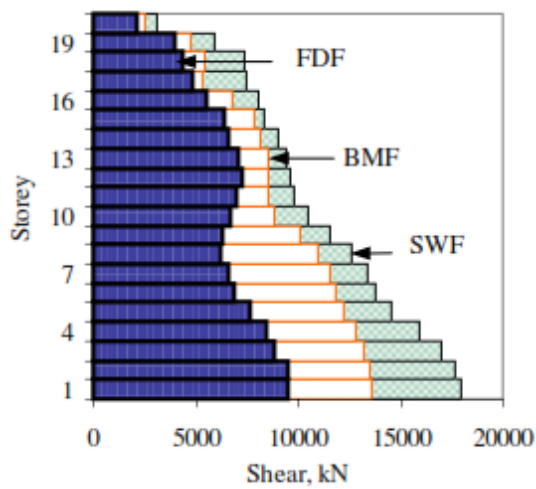
شکل ۶. تاریخچه‌های زمانی تغییر مکان در بام



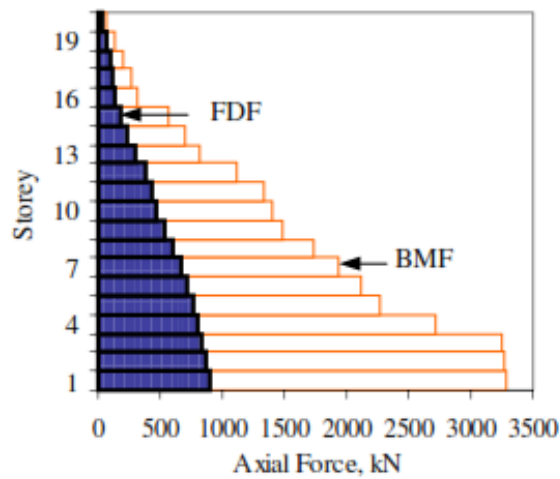
شکل ۷. ورودی انرژی و انرژی مستهلک شد در میراگر اصطکاکی



شکل ۸. چرخه پسماند میراگر اصطکاکی و مهاربند



شکل ۹. پوش برش طبقه



شکل ۱۰. پوش نیروی محوری ستون

مترجم: علی اکبر خلیلی