پارت سازه با همکاری دانشکدهٔ مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی برگزار می‌کند:

کارگاه آموزشی حضوری

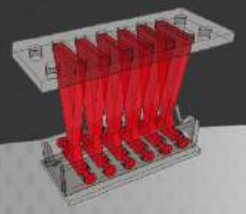
آموزش مدل‌سازی، تحلیل و طراحی
سازه‌های مجهز به میراگر

پارت سازه

دانشگاه شهید بهشتی

سرفصل‌ها:

- ✔ مبانی و کلیات کنترل سازه‌ها و میراگرها
- ✔ مدل‌سازی میراگرها در نرم‌افزار محاسباتی Etabs
- ✔ تحلیل و طراحی میراگرها بر اساس آئین‌نامه ASCE 7
- ✔ بررسی آئین‌نامه‌ها و نشریات داخلی مربوطه



ASCE
AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS
ETABS®

دکتر هادی قمری
سرپرست فنی شرکت پارت سازه

مهندس علیرضا مقدم نژاد
عضو تیم فنی شرکت پارت سازه

چهارشنبه ۱۳ تیرماه | **ساعت ۸:۳۰ الی ۱۶:۳۰**

هزینهٔ ثبت نام برای دانشجویان: ۵۰۰ هزار تومان
هزینهٔ ثبت نام برای سایر افراد: ۷۰۰ هزار تومان

جهت ثبت‌نام QR Code روبرو را اسکن کنید:

محل برگزاری: تهران، حکیمیه، بلوار بهار، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور دانشگاه شهید بهشتی، ساختمان دکتر هشترودی، سالن کنفرانس

مقدمه:

در هنگام وقوع زلزله، سازه‌ها تحت اثر بارهای لرزه‌ای با شدت زیاد قرار گرفته و برخی اعضاء باربر جانبی آن‌ها وارد ناحیهٔ غیرخطی می‌شوند. در این حالت، بخش عمده‌ای از انرژی ورودی به سازه از طریق میرایی ذاتی سازه و مکانیزم غیرخطی هیسترتیک (چرخه‌ای) مستهلک می‌شود. در زلزله‌های شدیدتر، انرژی ورودی به سازه افزایش یافته و سهم بیشتری از انرژی، توسط ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک تلف می‌شود. تغییر شکل‌های مزبور ناشی از بوجود آمدن مفاصل پلاستیک به‌صورت موضعی در نقاطی از سازه بوده که خود موجب افزایش استهلاک انرژی در سیستم می‌شود. در نتیجه مقدار زیادی از انرژی ورودی زلزله به ساختمان به واسطهٔ تخریب‌های موضعی در سیستم باربر جانبی سازه مستهلک شده، به نحوی‌که در صورت عدم اتخاذ تمهیدات لازم، این امر می‌تواند به از دست دادن کارایی و در نهایت فروریزش سازه بیانجامد.

مقدمه

در سالیان اخیر، روش‌های ابداعی جهت افزایش کارایی و ایمنی سازه‌ها در برابر خطرات طبیعی از جمله زلزله در دست تحقیق و ارائه می‌باشد. از منظر انرژی، برای طراحی لرزه‌ای مناسب باید مقدار انرژی هیسترتیک مستهلک شده توسط سازه کاهش یابد. این عمل توسط سیستم‌های کنترلی در سازه‌ها به دو طریق زیر صورت می‌گیرد:

1: کاهش مقدار انرژی ورودی به سازه (به عنوان مثال، به روش جداسازی پایه).

2: معرفی مکانیزم‌های اضافی اتلاف انرژی در سازه، به نحوی‌که سهم عمده‌ای از انرژی ورودی را مستهلک کرده و در نتیجه خسارات وارد شده به سازهٔ اصلی در اثر استهلاک انرژی هیسترتیک را کاهش دهند.

بخشی از علل استفاده از حرکت به سمت استفاده از سیستم‌های کنترل لرزه‌ای سازه‌ها، شامل موارد زیر خواهد بود:

1: افزایش انعطاف‌پذیری: تمایل به سمت سازه‌های بلندتر، بزرگتر و سازه‌های انعطاف‌پذیرتر.

2: افزایش تقاضا برای سطوح ایمنی بالاتر: سازه‌های بلندتر و استفاده بیشتر از نیروگاه‌های هسته‌ای.

3: افزایش الزامات عملکردی سخت‌گیرانه‌تر: دستورالعمل‌های سخت‌گیرانه‌تر برای سازه‌هایی مثل ایستگاه‌های ردیابی، سازه‌های تلسکوپی رادیویی، سازه‌های هوافضا (Aerospace).

4: استفاده بهتر از مصالح با حداقل هزینه: در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی و صرفه‌جویی در استفاده از مصالح، وزن و هزینهٔ تمام شده.

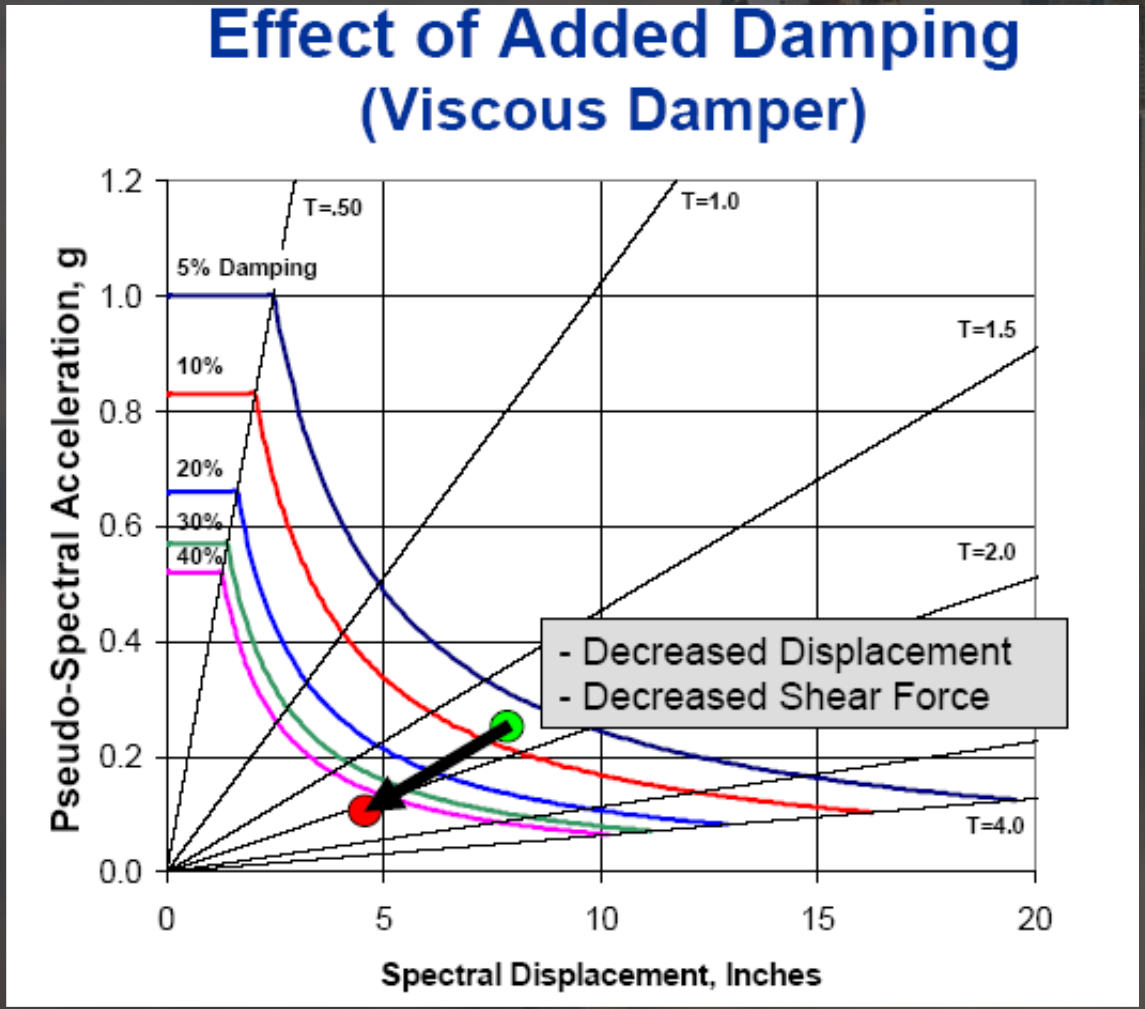
تعاریف:

1: میرایی ذاتی:

یک خاصیت سازه‌ای وابسته به جرم و سختی و خاصیت ذاتی استهلاک انرژی است.

2: میرایی اضافه شده:

میرایی اضافه شده در اثر میراگرهای نصب شده در سازه که بین 10 الی 30 درصد خواهد بود.



تعاریف

3: میراگر:

المان سازه‌ای شکل‌پذیر، به عنوان جزئی از سیستم میرایی می‌باشد که در اثر حرکت نسبی دو انتهای آن، باعث اتلاف انرژی می‌گردد. میراگر شامل تمام پین‌ها، پیچ‌ها، ورق‌های اتصال، مهاربندهاي کششی و اجزاء دیگر که برای اتصال میراگر به دیگر المان‌های سازه‌ای مورد نیاز است، می‌باشد. انواع میراگرها از لحاظ نحوهٔ عملکرد عبارتند از میراگرهای وابسته به تغییر مکان، میراگرهای وابسته به سرعت یا ترکیبی از این دو (وابسته به شتاب). میراگرها بسته به نوع و براساس رفتار مورد انتظار، به‌صورت‌های خطی یا غیرخطی طراحی می‌شوند.

تعاریف

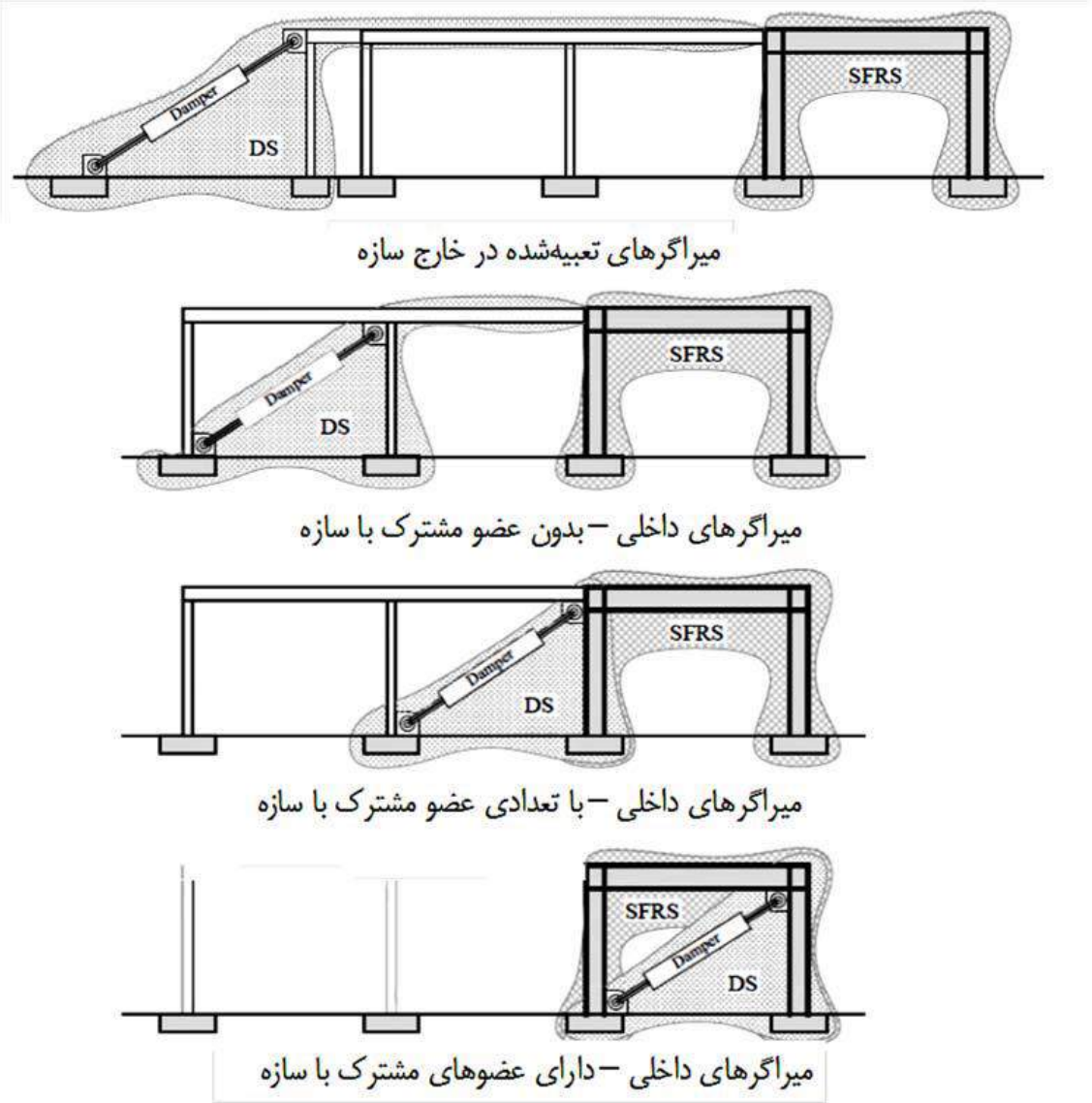
1: میراگر وابسته به تغییر مکان: نیروی میراگر وابسته به تغییر مکان، اساسا تابع تغییر مکان نسبی بین دو انتهای میراگر می‌باشد. در این وسایل، پاسخ وابستگی اندکی نسبت به سرعت نسبی دو انتهای میراگر یا فرکانس تحریک دارد. همچنین همواره سختی هم دارند. مانند میراگرهای تسلیم‌شوندهٔ فلزی و میراگرهای اصطکاکی.

2: میراگر وابسته به سرعت: رابطهٔ نیرو - تغییر مکان برای میراگر "وابسته به سرعت" اساسا تابع سرعت دو انتهای میراگر می‌باشد. این رابطه می‌تواند تابع تغییر مکان نسبی میان دو انتهای میراگر باشد. ممکن است سختی هم داشته یا نداشته باشند. مانند میراگرهای سیال ویسکوز مایع و میراگرهای ویسکوالاستیک.

3: میراگرهای وابسته به شتاب: ادواتی هستند که در آن‌ها، نیروی میراگر عمدتا به شتاب وارده بر میراگر بستگی دارد. خانوادهٔ میراگرهای جرمی (جرم متوازن، مایع متوازن، ستون مایع متوازن و غیره) در این دسته‌بندی قرار می‌گیرند.

4: سیستم میرایی:

مجموعه‌ای از المان‌های سازه‌ای شامل میراگر، المان‌های سازه‌ای یا مهاربندهای موجود جهت انتقال نیرو از میراگر به پی ساختمان و المان‌های سازه‌ای مورد نیاز برای انتقال نیرو از میراگر به سیستم مقاوم لرزه‌ای می‌باشد.



میراگرهای تعبیه‌شده در خارج سازه

میراگرهای داخلی – بدون عضو مشترک با سازه

میراگرهای داخلی – با تعدادی عضو مشترک با سازه

میراگرهای داخلی – دارای عضوهای مشترک با سازه

طبقه‌بندی انواع سیستم‌های کنترل سازه‌ها:

سیستم‌های کنترل برحسب میزان انرژی مورد نیاز و نیز نحوهٔ عملکرد به چهار گروه کلی زیر تقسیم می‌شوند:

1: سیستم‌های کنترل غیرفعال (Passive Control Systems).

2: سیستم‌های کنترل فعال (Active Control Systems).

3: سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال (Semi-Active Control Systems).

4: سیستم‌های کنترل مختلط (Hybrid Control Systems).

سیستم‌های کنترل غیرفعال با استفاده از جذب یا انعکاس قسمتی از انرژی ورودی ناشی از زلزله به سازه، از آن‌ها محافظت کرده و جهت کارکرد به منبع انرژی خارجی نیاز ندارند. سیستم‌های جداسازی پایه و میراگر با جرم متوازن، نمونه‌هایی از سیستم‌های غیرفعال هستند.

سیستم‌های کنترل فعال در بسیاری از موارد نسبت به سیستم‌های کنترل غیرفعال عملکرد بهتری نشان می‌دهند. اینگونه سیستم‌ها با اعمال نیروی خارجی در خلاف جهت نیروی لرزه‌ای وارد بر ساختمان، سعی بر کنترل رفتار آن در هنگام بروز زلزله را دارند. همچنین سیستم‌های مذکور این قابلیت را دارند که خود را با شرایط بارگذاری مختلف تطبیق دهند. این سیستم‌ها از پاسخ‌های سازه‌ای اندازه‌گیری شده جهت تعیین نیروی کنترل اعمالی به سازه استفاده می‌کنند. در این صورت، نیاز به استفاده از سیستم‌های پیچیده و کنترل هوشمند، برای اعمال نیروهای مورد نیاز و نیز الگوریتم‌های مناسب تعیین بهینهٔ این نیروها است.

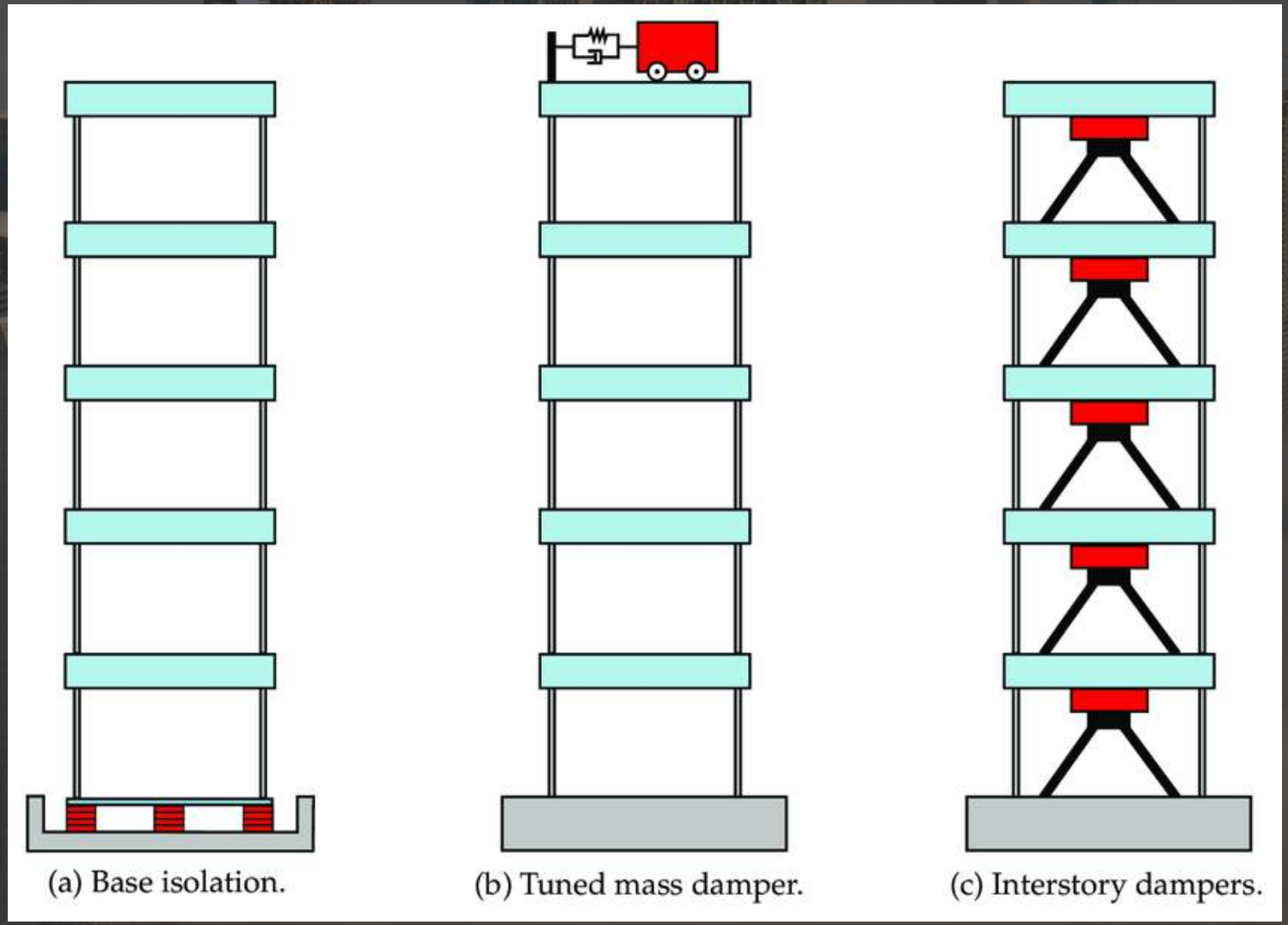
از مشکلات عمدهٔ سیستم‌های کنترل فعال این است که جهت عملکرد مناسب، به میزان انرژی خارجی زیادی نیاز داشته و از آنجا که این سیستم‌ها انرژی خارجی قابل توجهی جهت کنترل سازه به آن وارد می‌کنند، امکان ناپایدار شدن سازه بر اثر سیستم‌های مذکور وجود دارد. سیستم‌های میراگر با جرم فعال و تاندون‌های فعال نمونه‌هایی از سیستم‌های فعال هستند.

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال که می‌توان آن‌ها را سیستم‌های کنترل غیرفعال قابل تنظیم نیز نامید، مجهز به میراگرهایی هستند که در هر لحظه قابل کنترل بوده، اما قادر به اعمال انرژی به سازه نمی‌باشند. آن‌ها برعکس سیستم‌های کنترل فعال به انرژی خارجی قابل توجه، نیازی ندارند. این مسأله بخصوص هنگام وقوع زلزله نقش تعیین کننده‌ای دارد.

از ویژگی‌های سیستم‌های کنترلی مذکور این است که می‌توانند در هر لحظه عملکرد خود را براساس نیروی وارده تطبیق دهند (ویژگی سیستم‌های فعال) و تنها انرژی را جذب یا مستهلک کنند (ویژگی سیستم‌های غیرفعال)؛ لذا پایداری سیستم را تأمین می‌کنند. از طرفی این نوع سیستم‌های کنترل، در مقایسه با سیستم‌های کنترل فعال، انرژی بسیار کمتری مصرف کرده و نسبت به سیستم‌های کنترل غیرفعال در کاهش پاسخ‌های سازه‌ای مؤثرتر هستند. بعلاوه، در صورت آسیب دیدن منبع انرژی، مانند سیستم‌های کنترل غیرفعال عمل می‌کنند.

در سیستم کنترل مختلط بطور همزمان از میراگرهای کنترل فعال و غیرفعال استفاده می‌شود. اینگونه سیستم‌ها معمولا طوری تنظیم می‌شوند که در زلزله‌های ضعیف و متوسط که کارآیی سیستم کنترل غیرفعال کم بوده و سیستم کنترل فعال احتیاج به اعمال انرژی کمتری دارد، مشابه سیستم کنترل فعال و در زلزله‌های شدید که کارآیی سیستم کنترل غیرفعال بسیار مناسب بوده و سیستم کنترل فعال به دلیل وجود حد اشباع در تولید نیروی کنترل مورد نظر دچار مشکل می‌شود، مانند سیستم کنترل غیرفعال عمل نمایند.

کنترل غیرفعال سازه‌ها (Passive Control of Structures):



کنترل غیرفعال

غیرفعال بودن این سیستم‌های کنترل بدین معنی است که عامل کنترل‌کننده تا پیش از تحریک سازهٔ غیرفعال است. با شروع تحریک سازه، سیستم فعال شده و شروع به فعالیت کنترل خود می‌نماید و پس از خاتمهٔ تحریک، دوباره به حالت غیرفعال باز می‌گردد. این سیستم‌ها مجهز به وسایلی هستند که مشخصات سازه‌ای مثل شکل‌پذیری، مقاومت و غیره را اصلاح کرده یا انرژی را مستهلک می‌نمایند. بنابراین طی این عمل، ارتعاشات سازه کاهش می‌یابد.

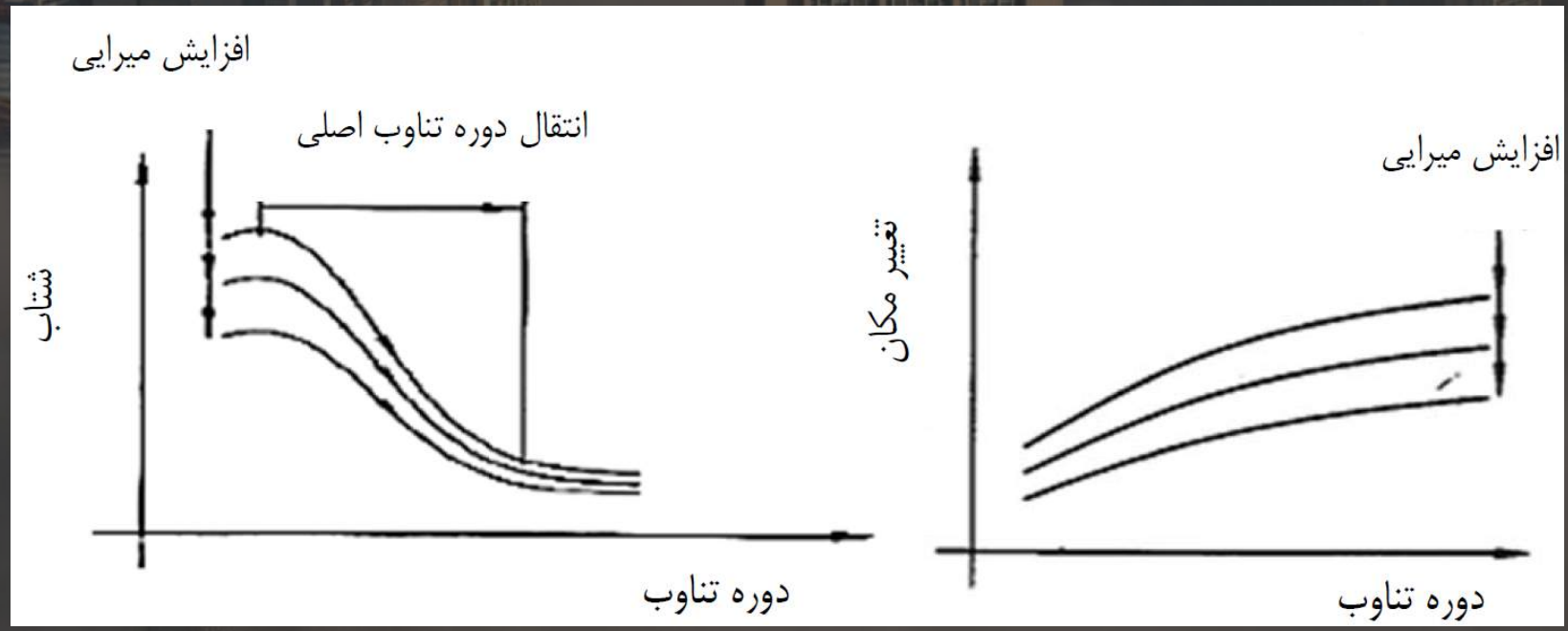
سیستم‌های کنترل غیر فعال جهت کارکرد به منبع انرژی خارجی نیازی ندارند. این سیستم‌ها با تولید حرکت نسبی درون دستگاه‌های کنترل، با استفاده از حرکت سازه یا تبدیل انرژی جنبشی به گرما، انرژی ورودی به سازه را مستهلک می‌کنند. از آنجا که سیستم‌های مذکور هیچگونه انرژی خارجی به سیستم وارد نمی‌کنند، باعث ناپایداری سازه نمی‌شوند. مزیت دیگر آن‌ها، هزینهٔ کم نگهداری‌شان است.

این سیستم‌های کنترل به جهت داشتن مشخصات دینامیکی (جرم، سختی، زمان تناوب میرایی) ثابت، تا حدودی به ویژگی‌های تحریک مانند دامنهٔ شتاب (PGA) و فرکانس غالب رکورد زلزله حساس هستند. این حساسیت بر میزان کارآیی عامل کنترل کننده برای تحریک‌هایی که ماهیت دلخواه و غیرمشخصی دارند (مانند زلزله) به شدت اثر گذاشته و در نتیجه سبب محدود شدن کارآیی و کاربرد هر سیستم برای بارگذاری و تحریک خاصی می‌شود.

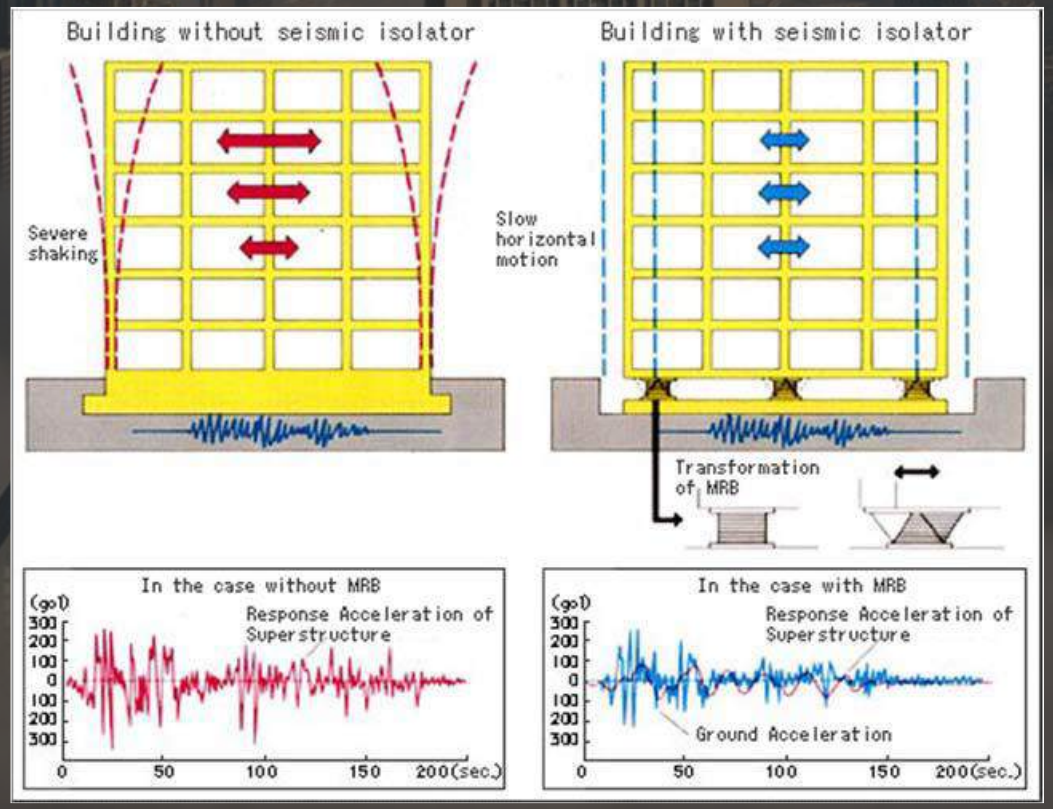
در حالت کلی، سیستم‌های کنترل غیرفعال بر اساس روش جذب انرژی‌شان طبقه‌بندی می‌شوند. سیستم‌های مذکور بطور عمده با روش‌هایی مانند لغزش اصطکاکی، عبور سیالات از روزنه، تغییر شکل ویسکوالاستیک جامدات یا سیالات، تبدیل حالت و تسلیم‌شدگی در فلزات، انرژی را جذب و پاسخ سیستم‌های سازه‌ای را میرا می‌کنند. از انواع سیستم‌های کنترل غیرفعال متداول در سازه‌ها می‌توان به سیستم جداسازی پایه، میراگر با جرم متوازن، میراگر مایع متوازن، میراگر تسلیم‌شوندهٔ فلزی، میراگر اصطکاکی، میراگر ویسکوالاستیک و میراگر با سیال ویسکوز و انتقال انرژی به‌صورت هدفمند (Targeted Energy Transfer) اشاره کرد.

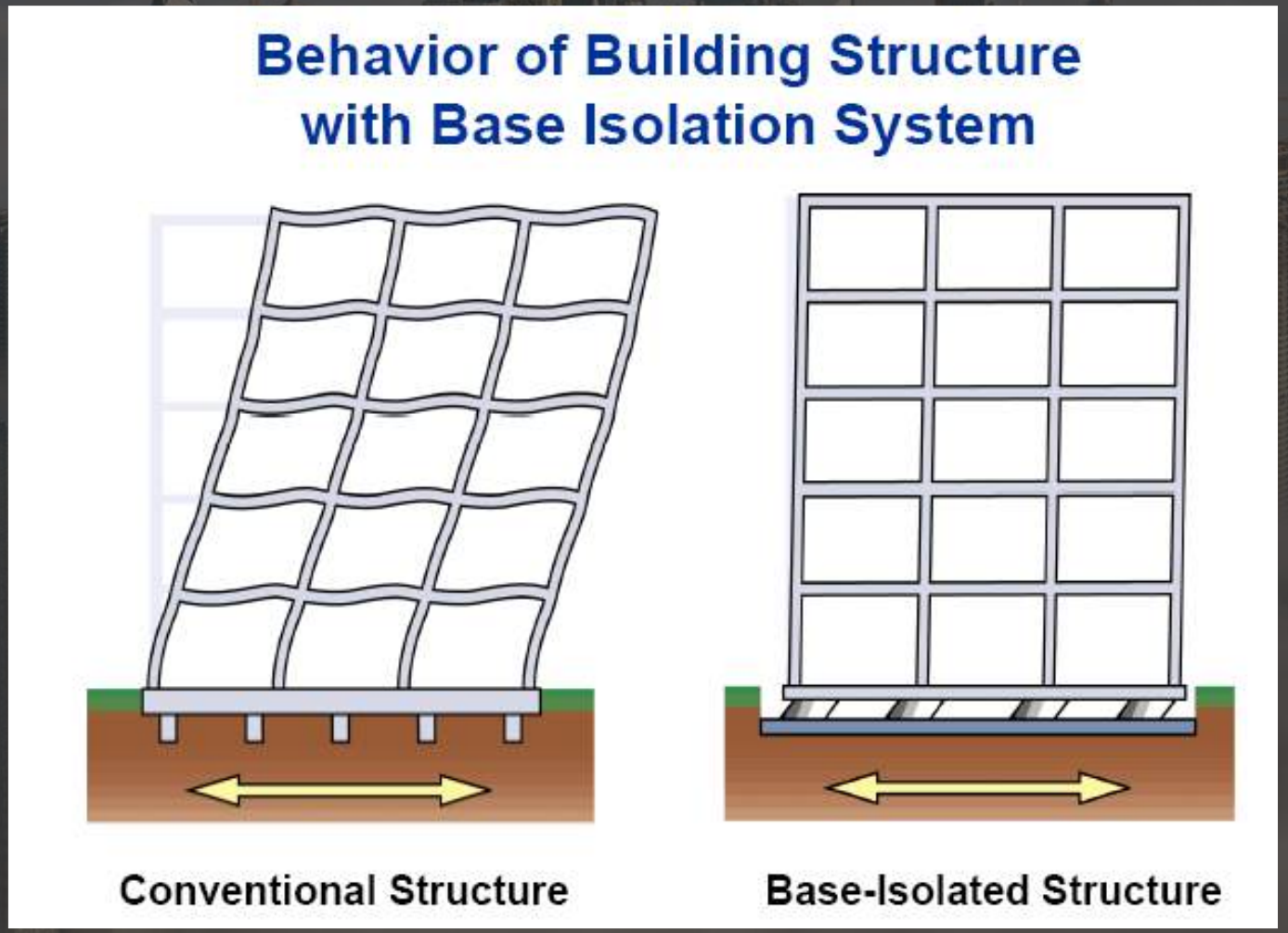
سیستم جداسازی پایه (Base Isolation System):

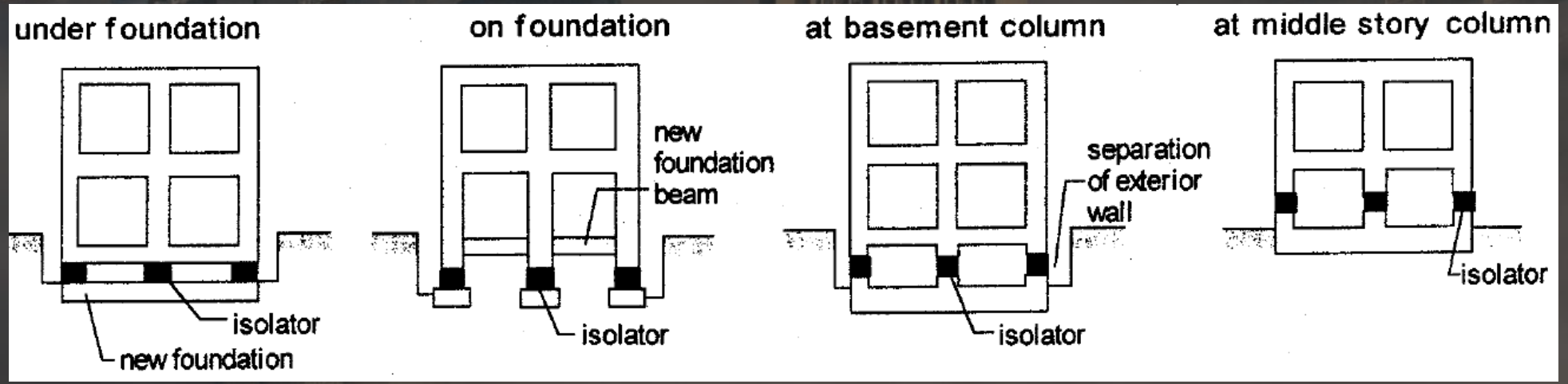
قرار دادن ساختمان‌ها بر روی یک سیستم جداساز، صرف‌نظر از تفاوت‌های گسترده و تنوع در جزئیات روش‌های جداساز پایه، مبتنی بر استفاده از یک لایه با سختی جانبی کم در بین پی و سازه است. اینگونه جداسازی سبب افزایش قابل ملاحظهٔ زمان تناوب سازه و در نتیجه کاهش بسیار زیاد شتاب طیفی و به تبع آن کاهش در شتاب طبقات و نیز کاهش در انرژی ورودی به سازه می‌شود که این خود، رانش‌های بین طبقه‌ای سازه را تقلیل می‌دهد.



به عبارت دیگر، اصل جداسازی لرزه‌ای پایه، ایجاد انعطاف‌پذیری در تراز پایهٔ سازه در یک صفحهٔ افقی، به همراه قرار دادن اجزاء میراکننده (با میرایی برابر 5 درصد تا 30 درصد میرایی بحرانی)، برای محدود کردن دامنهٔ حرکت ناشی از مؤلفهٔ افقی زلزله (حدود 100 تا 400 میلی‌متر) است. شکل زیر بطور شماتیک پاسخ یک سیستم جداسازی شده در پایه را با سیستم معمولی مقایسه کرده و شکل بعدی نیز کاربرد این جداسازها را در سازه‌های ساختمانی نشان می‌دهد.



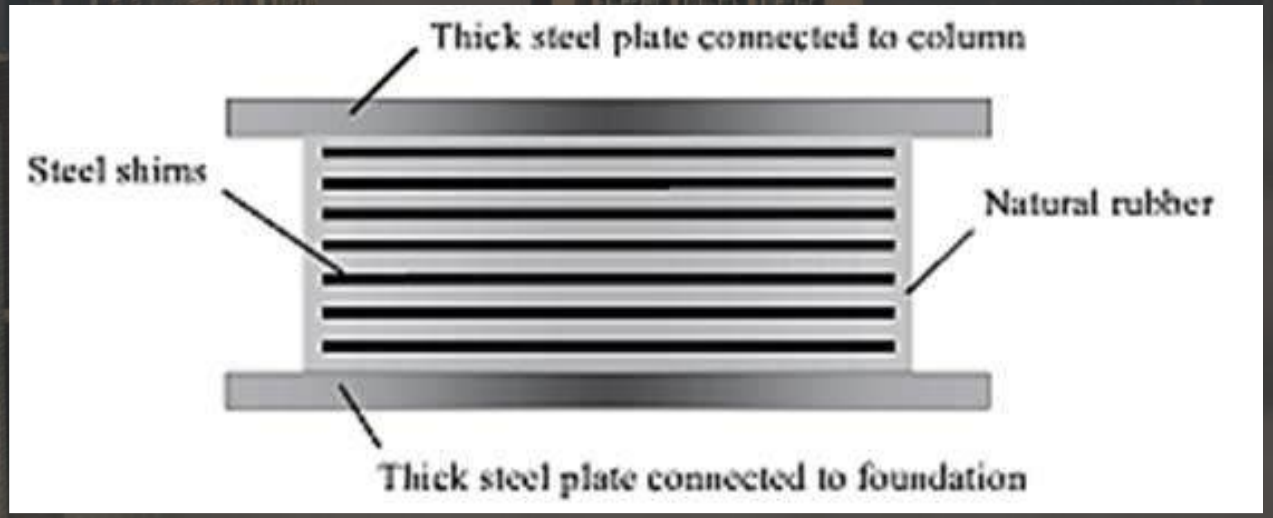

Behavior of Building Structure
with Base Isolation System
Conventional Structure
Base-Isolated Structure


under foundation
isolator
new foundation
on foundation
new
foundation
beam
isolator
at basement column
separation
of exterior
wall
isolator
at middle story column
isolator

انواع مختلف سیستم‌های جداسازی کف عبارتند از: الاستومرها، جداسازهای سرب - لاستیک (Lead-Rubber Bearings یا به اختصار LRB)، جداسازهای لاستیکی با میرایی بالا (High Damping Rubber Bearings یا به اختصار HDRB)، ورق‌های اتصال لاستیک مسلح (Elastomeric Bearing Pads) و جداسازهای آونگی اصطکاکی (Friction Pendulum System یا به اختصار FPS).

1: الاستومر (Elastomer):

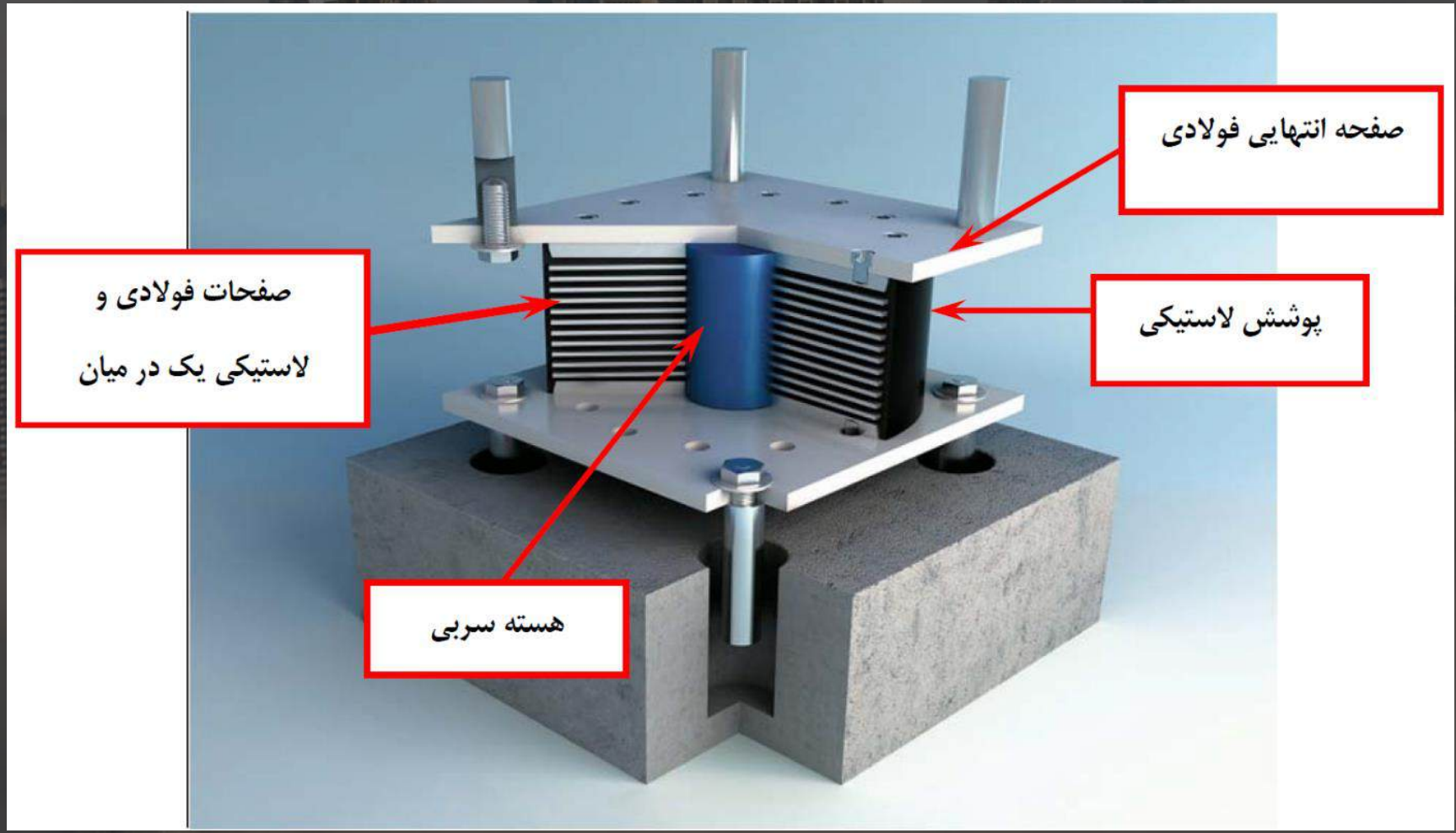
الاستومرهای اولیه از صفحات لاستیک طبیعی ساخته می‌شدند. امروزه جهت تقویت آن‌ها از صفحات فولادی در بین صفحات لاستیکی استفاده می‌شود. معمولا ضخامت صفحات فولادی 25 میلی‌متر و ضخامت صفحات لاستیکی بین 7.5 الی 20 سانتی‌متر است.



استفاده از صفحات فولادی باعث کاهش تغییر شکل قائم الاستومر شده و از بشکه‌ای شدن لاستیک جلوگیری می‌کند. امروزه در ساخت الاستومرها از لاستیک‌های مصنوعی مانند نئوپرن نیز استفاده می‌شود. بدلیل انعطاف‌پذیر بودن لاستیک و تغییر شکل‌های برشی الاستیک بالا، میزان میرایی بحرانی الاستومرها بین 2 درصد تا 3 درصد می‌باشد. به همین دلیل در ردهٔ تکیه‌گاه‌های با میرایی پایین قرار می‌گیرند. تولید و ساخت الاستومرها در مقایسه با سایر تکیه‌گاه‌ها ساده‌تر و کم هزینه‌تر بوده و خصوصیات مکانیکی آن‌ها تابع دما و زمان نیست. به دلیل میرایی بحرانی کم، الاستومرها مقاومت چندانی در برابر بارهای بهره‌برداری نداشته و جهت کنترل تغییر مکان‌های جانبی بالاتر باید از میراگرهای دیگری استفاده شود.

2: سیستم جداساز لرزه‌ای سرب - لاستیک (Lead Rubber Bearing یا به اختصار LRB):

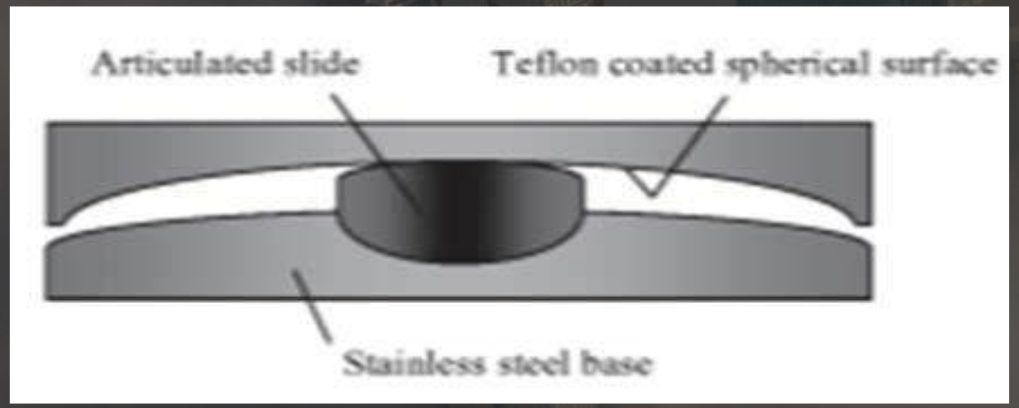
این نوع جداسازها شامل هستهٔ سربی، ورقه‌های لاستیک و فولاد که یک در میان قرار گرفته‌اند و پوشش لاستیکی می‌باشد. هستهٔ سربی یک استوانهٔ توپر از جنس سرب است که در مرکز جداساز لرزه‌ای قرار می‌گیرد. در واقع وظیفهٔ لاستیک و هستهٔ سربی جذب ارتعاشات و اتلاف انرژی و وظیفهٔ صفحات فولادی تحمل بار سازه است. به لحاظ اجرایی، قطر هستهٔ سربی باید کمی از قطر سوراخ بزرگتر باشد (حدود 1 درصد) و با فشار در محل خود قرار گیرد. پوشش لاستیکی جهت جلوگیری از زنگ‌زدگی صفحات فولادی نصب می‌شود.

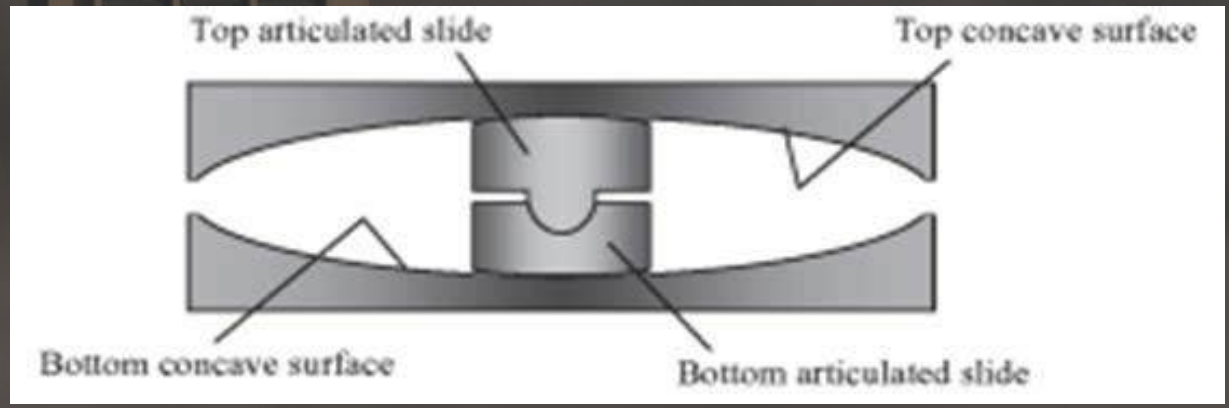

صفحه انتهایی فولادی
پوشش لاستیکی
صفحات فولادی و
لاستیکی یک در میان
هسته سربی

عملکرد این سیستم وابسته به بار جانبی وارده است. در صورتی‌که نیروی جانبی قابل توجه نباشد، هستهٔ سربی جلوی حرکت صفحات فولادی را گرفته و در نتیجه تکیه‌گاه، سختی جانبی بیشتری خواهد داشت. با افزایش نیروی جانبی، صفحهٔ فولادی به هستهٔ سربی نیرو وارد کرده و منجر به تغییر شکل و در نهایت جاری شدن هستهٔ سربی می‌شود. این فرآیند باعث میرایی هیسترتیک شده و انرژی توسط هستهٔ سربی جذب می‌شود که منجر به کاهش سختی جانبی تکیه‌گاه می‌گردد. میرایی معادل این تکیه‌گاه بین 15 درصد الی 35 درصد می‌باشد.

3: سیستم آونگی اصطکاکی (Friction Pendulum System به اختصار FPS):

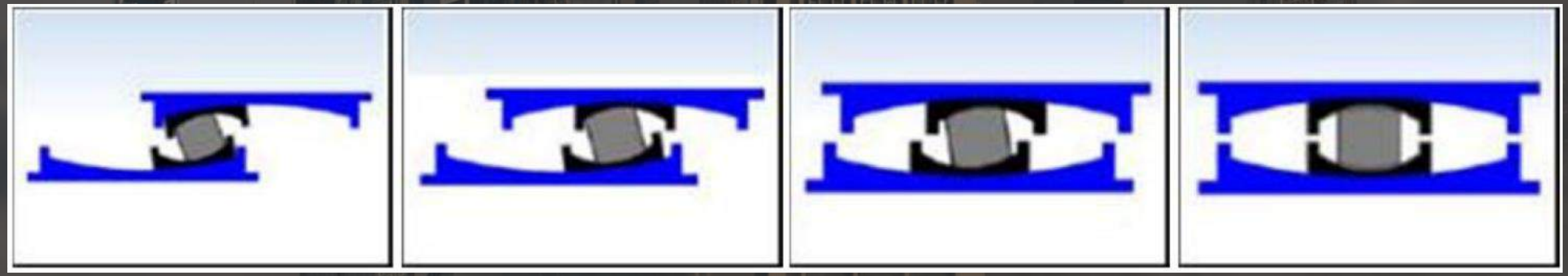
تکیه‌گاه‌های اصطکاکی اولیه متشکل از دو سطح صاف با قابلیت لغزش نسبت به هم بودند. نیروی مقاوم در برابر بار خارجی اعمال شده از حاصل‌ضرب ضریب اصطکاک و بار قائم وارده بدست می‌آید. بزرگترین نقطهٔ ضعف سیستم اصطکاکی مسطح، عدم بازگشت ساختمان به موقعیت اولیه پس از زلزله است. برای حل این مشکل، از سطح لغزش مقعر یا بخشی از سطح کره استفاده می‌شود. به این نوع این نوع سیستم‌ها، سیستم آونگی اصطکاکی اطلاق می‌شود. سطح کروی معمولا دارای پوشش تفلونی با ضریب اصطکاک حدود 3 درصد است.





بدلیل داشتن سطحی مقعر، در اثر اعمال نیروی جانبی تغییر مکان در هر دو جهت افقی و قائم مشاهده می‌شود. هنگامی‌که اثر نیروی خارجی از بین می‌رود، مؤلفهٔ مماس بر سطح مقعر به عنوان نیروی بازگرداننده عمل کرده و تکیه‌گاه را به موقعیت اولیه هدایت می‌نماید. مقدار نیروی قائم و سرعت اعمال بارگذاری از جمله پارامترهای مؤثر بر ضریب اصطکاک هستند؛ سرعت بالای بارگذاری باعث افزایش شدید ضریب اصطکاکی می‌شود. یکی از مزایای این سیستم، هزینهٔ نگهداری پایین آن است. پوشش تفلون از زنگ زدن فولاد سطح لغزش جلوگیری کرده و با توجه به اینکه لغزش معمولاً تنها در هنگام زلزله رخ می‌دهد، نیازی به تعویض آن در طول عمر مفید سازه نیست. همچنین تغییرات دما و گذشت زمان تأثیر چندانی در خصوصیات مکانیکی تکیه‌گاه ندارد. در حالت بعدی، میراگر با دو سطح مقعر مشاهده می‌شود. در این حالت به دلیل استفاده از دو سطح مقعر می‌توان با تکیه‌گاه‌های کوچکتر، میزان جابجایی مورد نظر را تأمین نمود.

در شکل زیر نیز سیستم جداساز آونگی اصطکاکی سه‌گانه (Triple friction pendulum) نشان داده شده است:

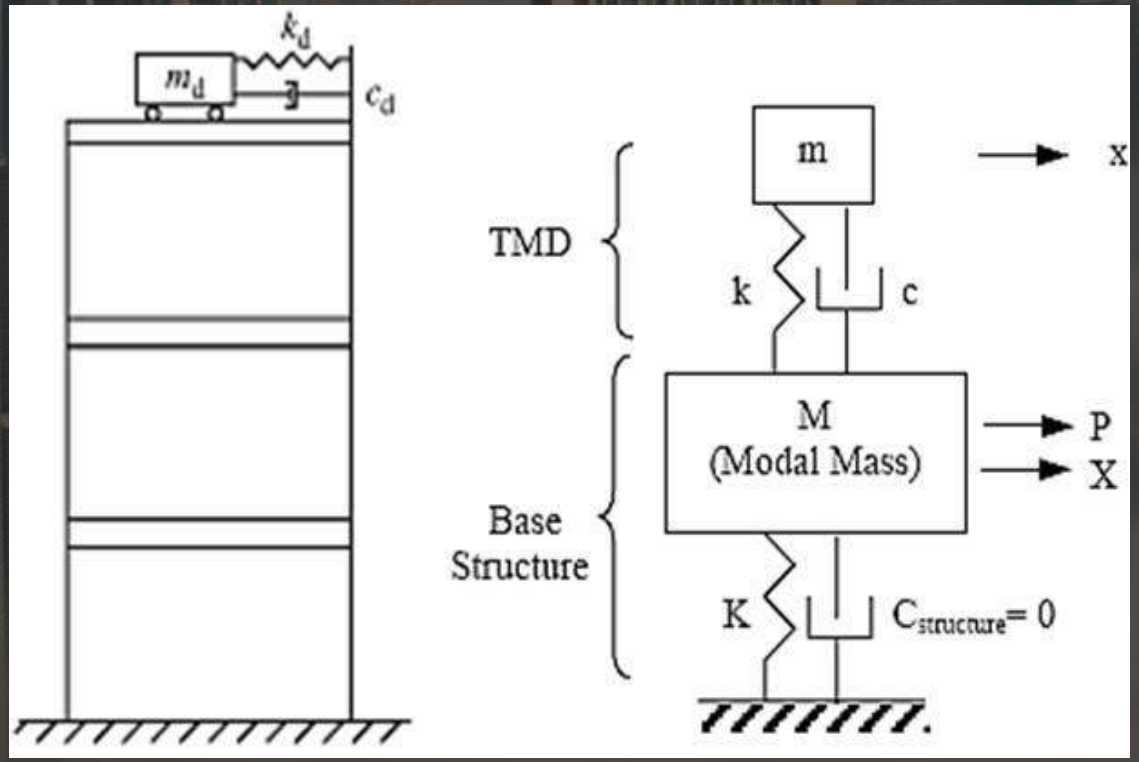


مشاهدات نشان می‌دهد که این سیستم‌ها مؤثر بوده و نیرویی را که از زمین به سازه منتقل می‌شود، به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند. می‌توان گفت جداسازی پایه برای کاهش نیروی انتقال یافته از زمین به سازه تا حد نصف یا حتی یک سوم نیروی تولید شده بسیار مؤثر بوده است. طبق تحقیقی که در چین انجام شده، استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند هزینه‌های ساخت را بین 5 درصد الی 20 درصد در مقایسه با ساختمان بدون جداسازی پایه کاهش دهد.

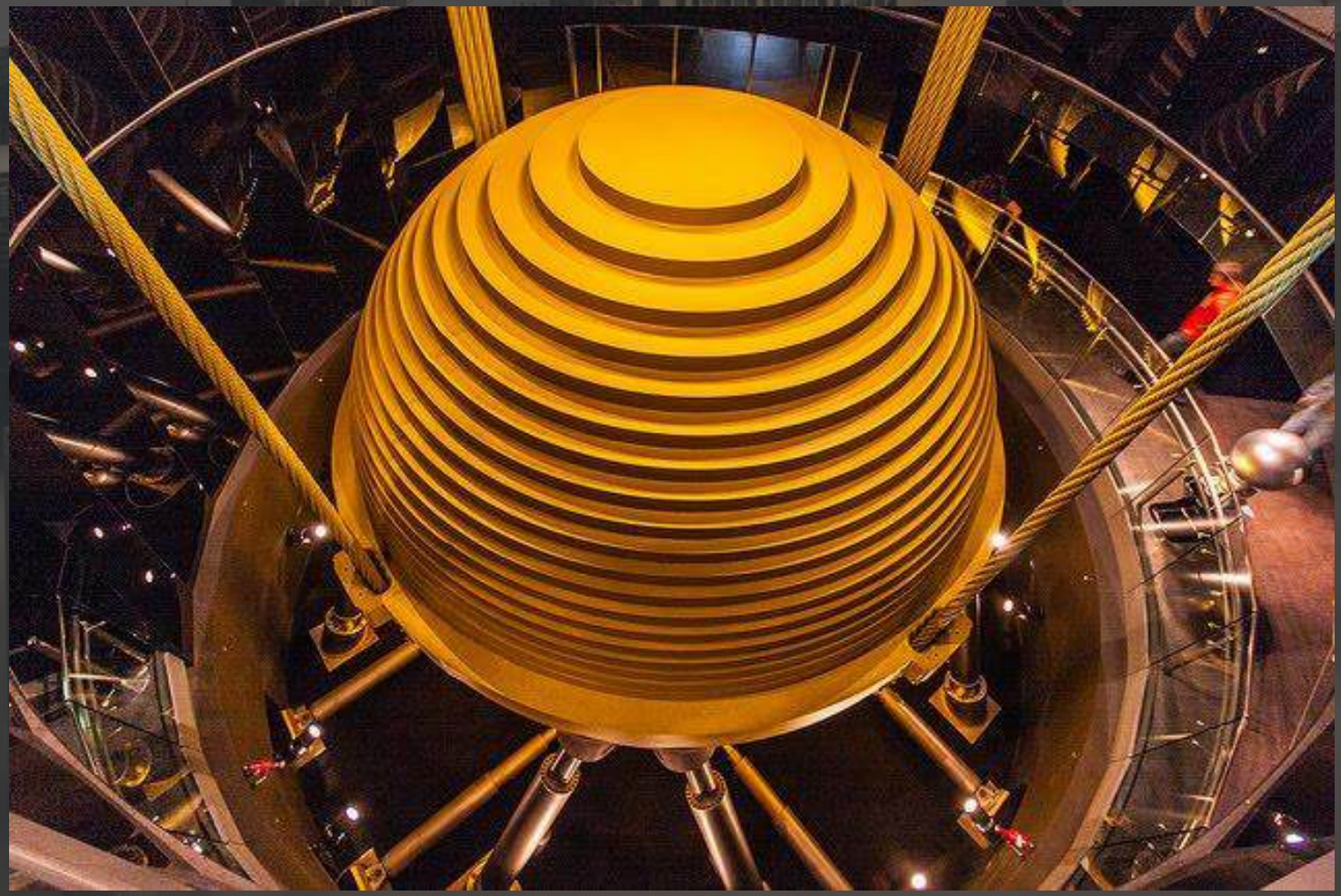
یکی از بزرگترین مشکلات این سیستم‌های کنترلی، تولید لنگر واژگونی بسیار بزرگ در تکیه‌گاه سازه است، که موجب ناپایداری آن می‌شود.

میراگر با جرم متوازن (Tuned Mass Damper یا به اختصار TMD):

میراگر با جرم متوازن، نوع دیگری از سیستم‌های کنترل غیرفعال است که در سال 1909 برای اولین بار توسط Frahmدر ایالات متحدهٔ آمریکا مطرح شد. این میراگر شامل یک سیستم جرم - فنر - میراگر است که در ارتفاعی از سازه قرار داده می‌شود تا پاسخ آن را کاهش دهد.

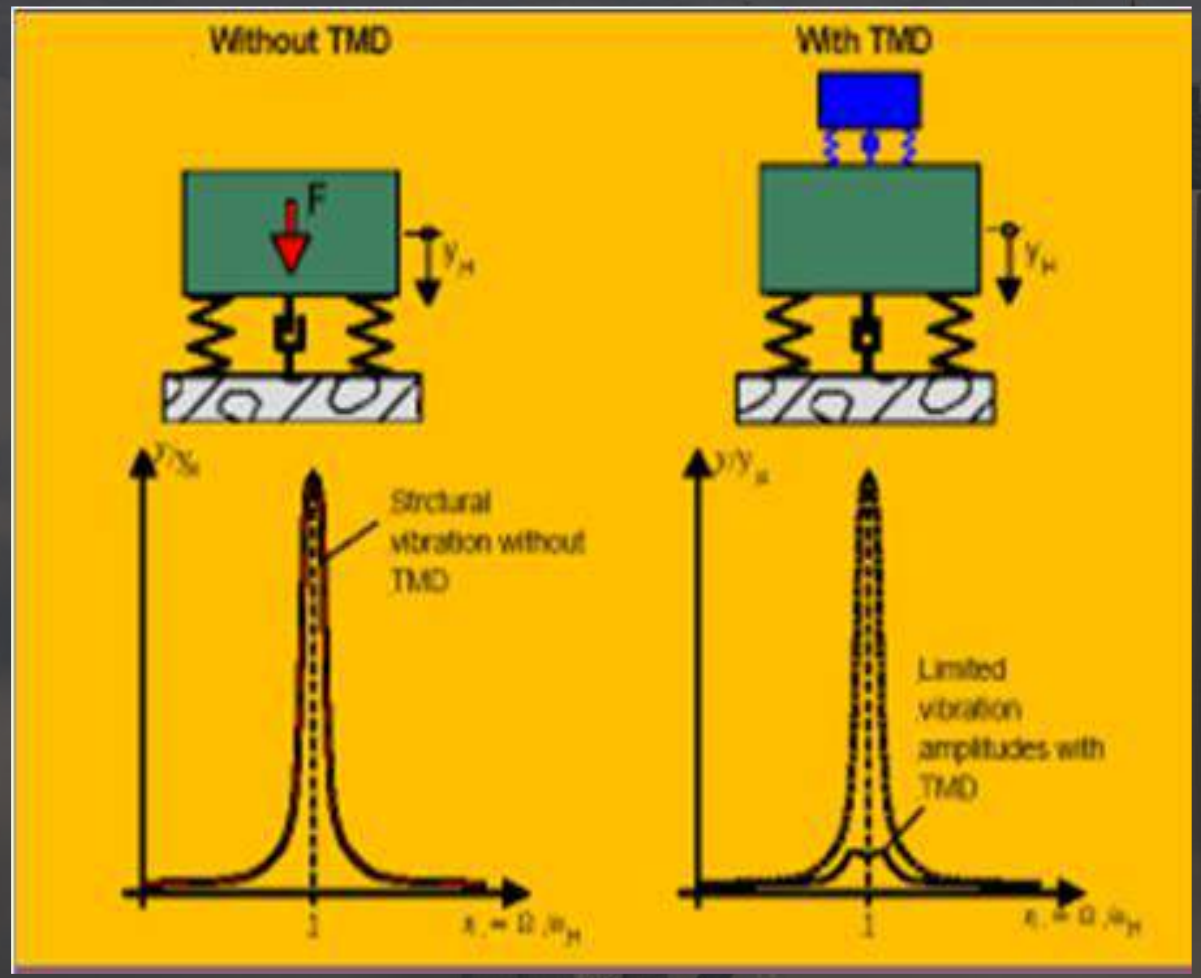


برای این کار، یک جرم اضافی (در حدود 1 الی 2 درصد جرم مؤثر مودی اولین مود ارتعاشی سازه) در ارتفاع مناسبی از سازه نصب شده و فرکانس زاویه‌ای ارتعاش آن با فرکانس زاویه‌ای مود اول سازه هماهنگ می‌شود تا ارتعاشات سازه را کنترل نماید.



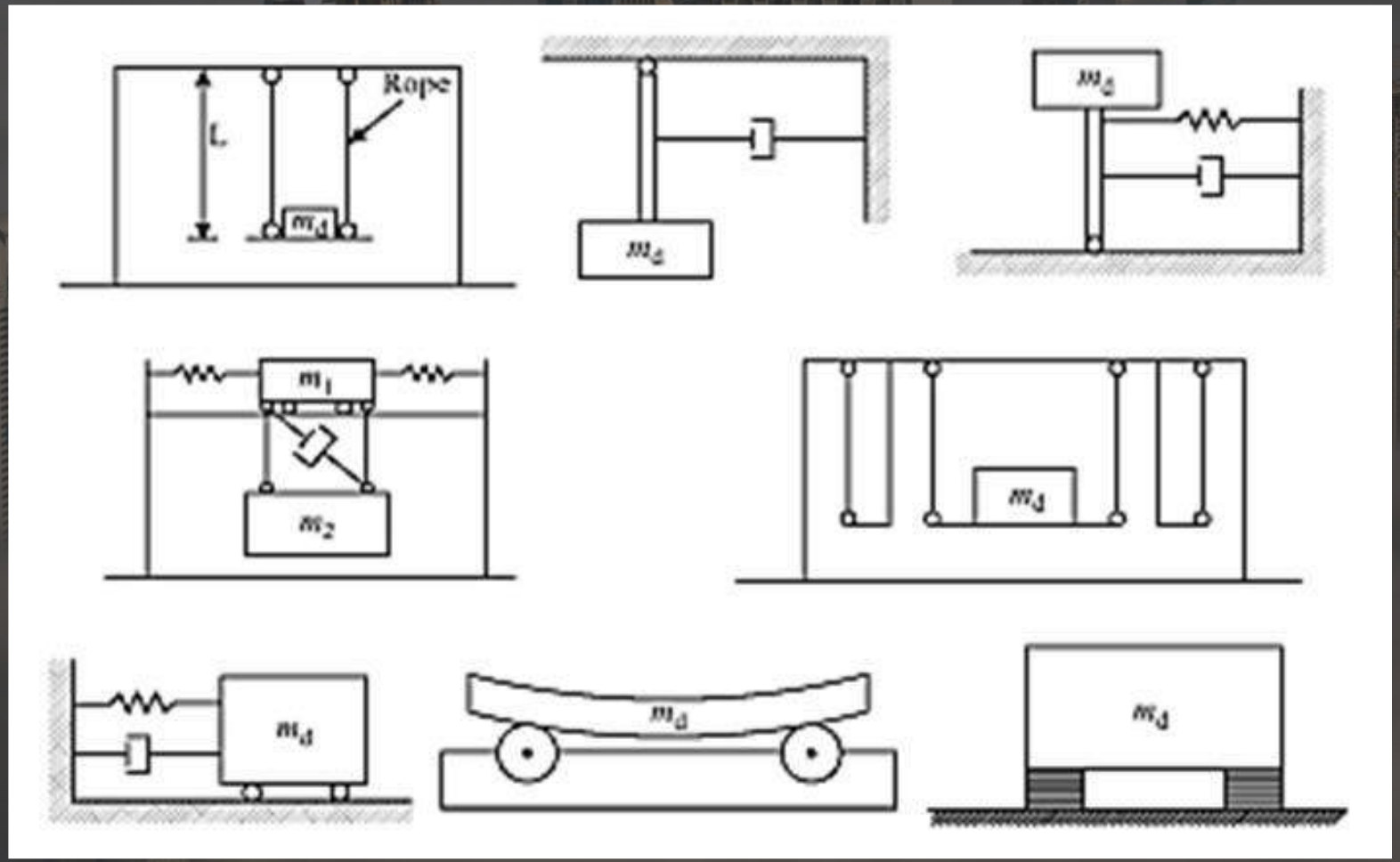
TMD

در واقع TMD توسط ارتعاشات سازه‌ای تحریک شده و بخشی از انرژی وارده به سازه صرف ارتعاش آن می‌شود. از طرف دیگر ارتعاشی وارد به TMD توسط میرایی آن کاهش یافته و در نتیجه انرژی سازه توسط میرایی این سیستم، میرا می‌شود. ظرفیت جذب انرژی TMD تابعی از نسبت جرم، سختی، فرکانس تنظیمی، فرکانس طبیعی و نسبت میرایی سازه است. جزئیات بیشتر در این زمینه در تحقیقات Luft (1993)، Warburton (1982) و Fujino and Abe (1979) ارائه شده است.



اثر وجود TMD بر رفتار سازه را می‌توان معادل افزایش میرایی سازه در نظر گرفت. سازه‌هایی که میرایی کمی داشته و دارای یک مود رفتاری غالب هستند، TMD می‌توان بطور مؤثری پاسخ سازه را کاهش دهد. با این وصف، جهت تأمین آسایش ساکنین سازه‌هایی که در برابر باد آسیب‌پذیر هستند، استفاده روزافزون از TMD مشاهده می‌شود. در شکل روبرو، پاسخ دینامیکی سازه بین حالت با و بدون میراگر جرم متوازن مقایسه شده است:

طرح‌های مختلفی که می‌توانند به عنوان TMD بکار روند، در شکل زیر مشاهده می‌شود:



استفاده از TMDها به‌صورت عنوان شده دارای محدودیت‌هایی می‌باشد:

1: TMD ها تنها برای کاهش پاسخ یک مود مؤثر هستند و همین امر باعث کاهش استفاده از آن‌ها جهت کنترل پاسخ‌های سازه در برابر بارهای لرزه‌ای می‌شود.

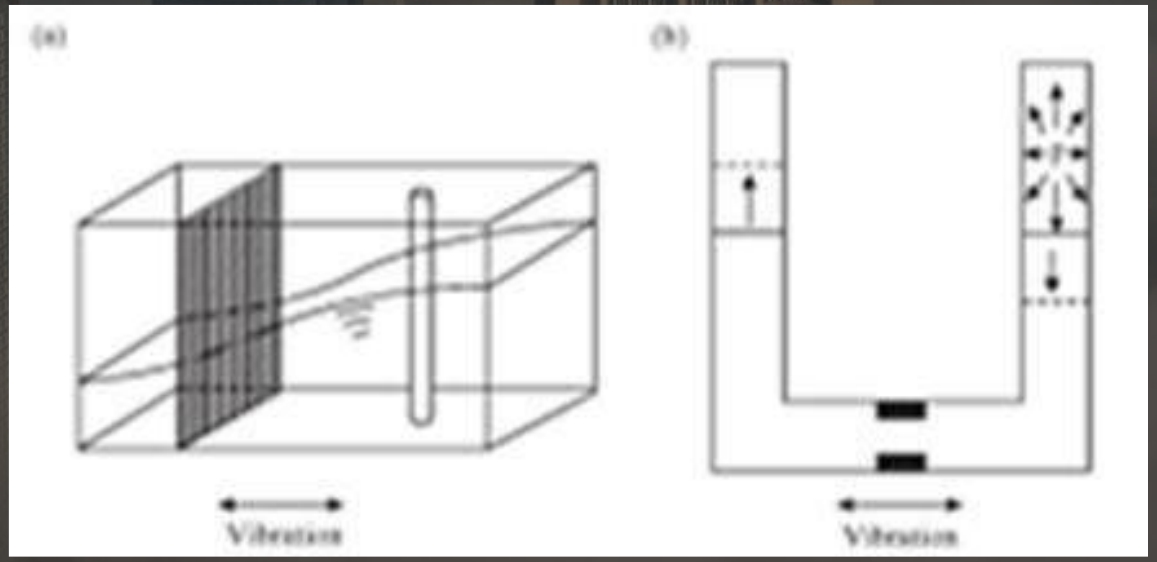
2: TMD ها فوق‌العاده نسبت به فرکانس تنظیمی حساس می‌باشند.

3: TMD ها فضای زیادی را اشغال می‌نمایند.

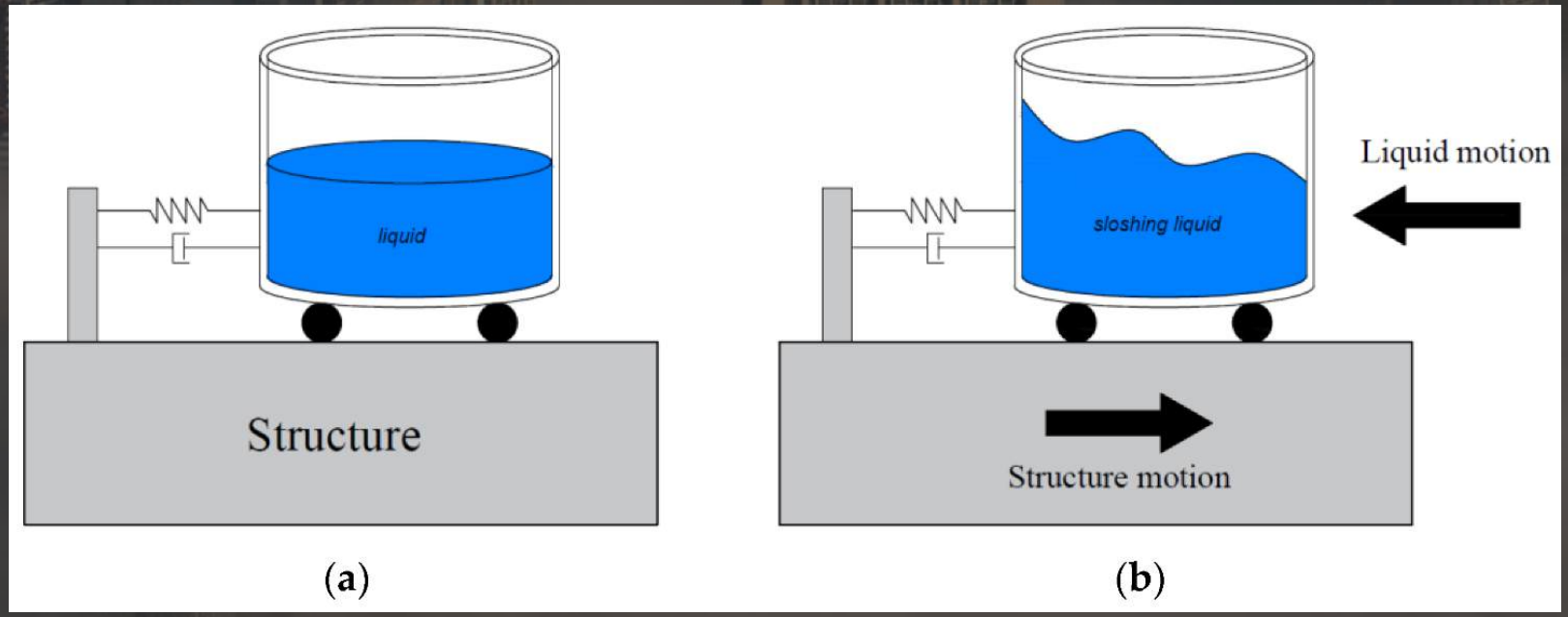
جهت رفع این محدودیت‌ها مخصوصا مورد 1 و 2، در صنعت معمولا یا از میراگرهای جرمی تنظیم شده فعال یا مختلط استفاده می‌شود. یکی از راهکارها جهت غلبه بر بزرگترین مشکل، میراگرهای با جرم متوازن که عدم توانایی آن‌ها در پوشش فرکانس‌های مختلف سازه و کنترل پاسخ چند مود می‌باشد، استفاده از چندین جرم (MTMD) یا چند TMD به‌صورت گسترده (DTMD) است. DTMD از چندین میراگر به موازات هم تشکیل شده که فرکانس آن‌ها در محدودهٔ فرکانس پایهٔ ساختمان قرار دارد.

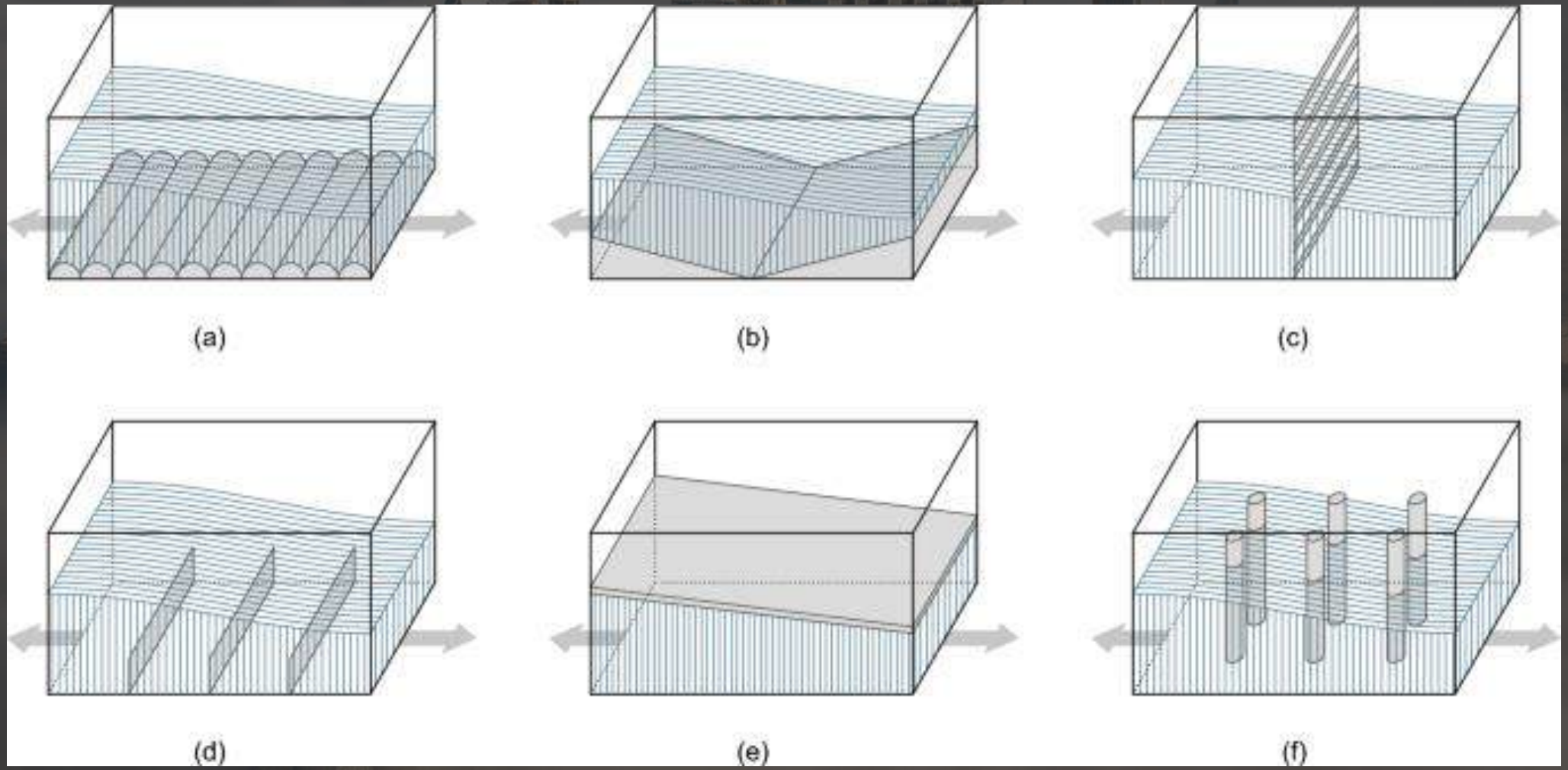
میراگر مایع متوازن (Tuned Liquid Damper یا به اختصار TLD):

این دسته شامل دو زیربخش کلی Tuned Liquid Column Damper یا به اختصار TLCD و Tuned Sloshing Damper یا به اختصار TSD می‌باشد. اساس یک میراگر مایع متوازن، شبیه به میراگر با جرم تنظیم شده است. بطور خاص، یک جرم ثانویهٔ متحرک که با جرم مایع تعریف می‌شود، به سیستم سازه‌ای اولیه اضافه می‌شود. گرانش به‌صورت نیروی بازگرداننده عمل کرده و اتلاف انرژی عمدتا از طریق اغتشاش محیط مایع و اصطکاک مایع با جداره بدست می‌آید. در شکل زیر، دو نمونهٔ متداول از TMD ها مشاهده می‌شوند.



در نمونهٔ نوسانی، حرکت افقی محفظه موجب حرکت رفت و برگشتی سطح آزاد مایع می‌شود. نمونهٔ ستونی مایع متوازن (TLCD) از یک محفظهٔ Uشکل تشکیل شده که تا ارتفاع مشخصی با مایع پر شده است. در نوع نوسانی از یک یا چند شبکه یا میله جهت فراهم کردن میرایی مورد نیاز استفاده شده و فرکانس طبیعی توسط ابعاد مخزن یا عمق مایع درون مخزن تنظیم می‌شود. در نوع ستونی، میرایی از طریق جریان پر تلاطم عبوری از روزنه فراهم شده و فرکانس طبیعی تابعی از شکل ستون و فشار هوا است.

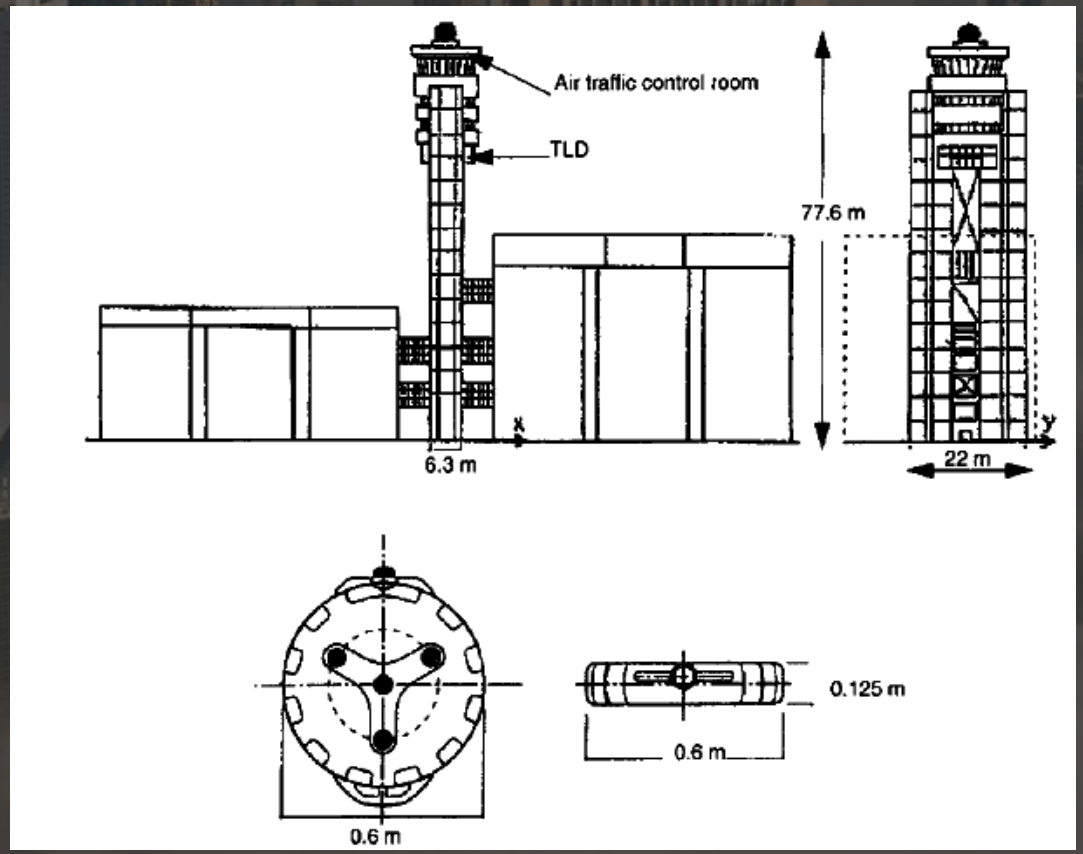



(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)

TLD ها دارای دو مزیت بزرگ هستند. اول: مؤثر بودن آن‌ها برای تمام جهات بارگذاری جانبی و دوم: آب موجود در TLD که می‌توان جهت مصارف آتش‌نشانی (سیستم ضد حریق) بکار رود. از طرف دیگر، TLD ها دارای دو نقطه ضعف هستند. اول: نسبت به TMD ها فضای بیشتری را به دلیل پایین بودن وزن مخصوص آب نسبت به سایر مواد مورد استفاده (مانند بتن و فولاد) در TMD اشغال می‌نمایند. دوم: بر خلاف TMD، پاسخ یک TLD در حالت کلی به شدت غیرخطی است. حرکت نوسانی سطح آزاد مایع یا جریان مایع از درون روزنه‌ها پدیده‌هایی کاملا غیرخطی هستند و این امر باعث پیچیده شدن روند تحلیل و طراحی سازه‌های حامل TLD می‌شود.

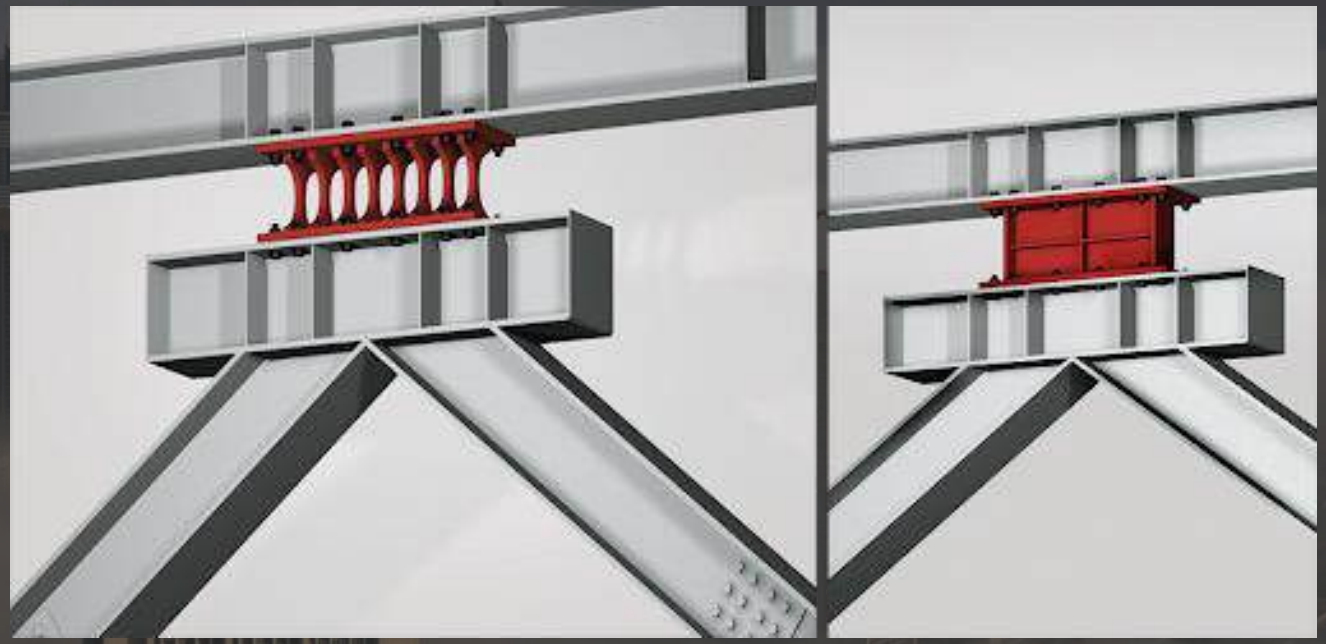
به علت کمبود مدل‌های سادهٔ منطقی برای تشریح رفتار دینامیکی یک TLD، تا به امروز رویهٔ طراحی با مقبولیت عام وجود ندارد. به دلیل شباهت نزدیک اصل اساسی عملکردی بین TMD و TLD، همان روشی که برای TMD ها شرح داده شد، می‌تواند برای TLD ها هم بکار رود؛ اما چون جرم و ضربه‌گیر مجازی وابسته به دامنه هستند، باید به وسیلهٔ آموزش تعیین شوند و لذا ممکن است در جزئیات اجرایی تغییر کنند. بنابراین انجام آزمایش برای بهینه‌سازی رفتار دینامیکی TLD نسبت به سازهٔ اولیه، الزامی است.

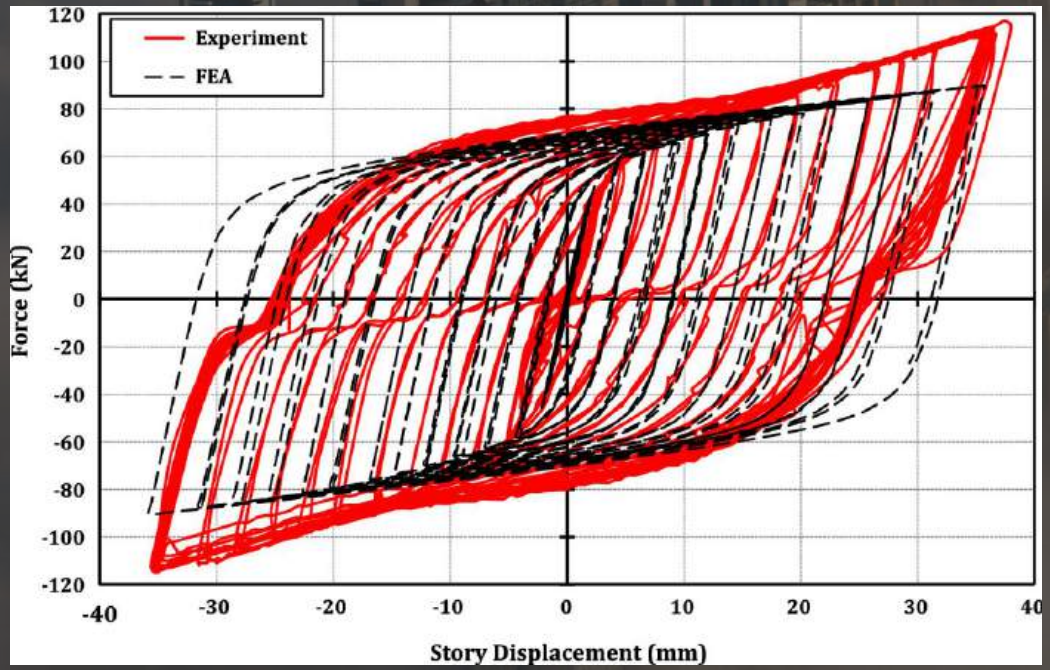
میراگرهای مایع متوازن نخست در کشتی‌ها مورد استفاده قرار گرفتند و در اوایل دهۀ 80 میلادی از آن‌ها جهت کاهش پاسخ‌های ارتعاشی سازه‌های عمرانی استفاده گردید. میراگر مایع متوازن در ابتدا برای کاهش ارتعاشات ناشی از باد در سازه‌های بلند با فرکانس‌های طبیعی خیلی کوچک بکار رفتند. اولین TLD نوسانی غیرخطی نیز در ژاپن اجرا شد.



میراگر تسلیم‌شوندهٔ فلزی (Metallic Yield Damper):

یکی از مکانیزم‌های مؤثر جهت استهلاک انرژی ورودی ناشی از زلزله، استفاده از تغییر شکل غیرالاستیک فلزات (شکل‌پذیری) می‌باشد که در ساخت میراگرهای تسلیم‌شوندهٔ فلزی مورد استفاده قرار گرفته است. تحقیقات اولیه در این زمینه از دههٔ 70 میلادی آغاز گردید. در شکل زیر، اتلاف انرژی توسط تغییر شکل‌های غیرالاستیک کششی قاب مستطیلی شکل فولادی در جهت قطری بادبند کششی صورت می‌گیرد. در این حالت، کمانش بادبند فشاری به ندرت رخ خواهد داد، زیرا طول مؤثر آن کم بوده و طراحی بگونه‌ای انجام می‌شود که نیروی بحرانی کمانش از نیروی تسلیم بیشتر گردد.

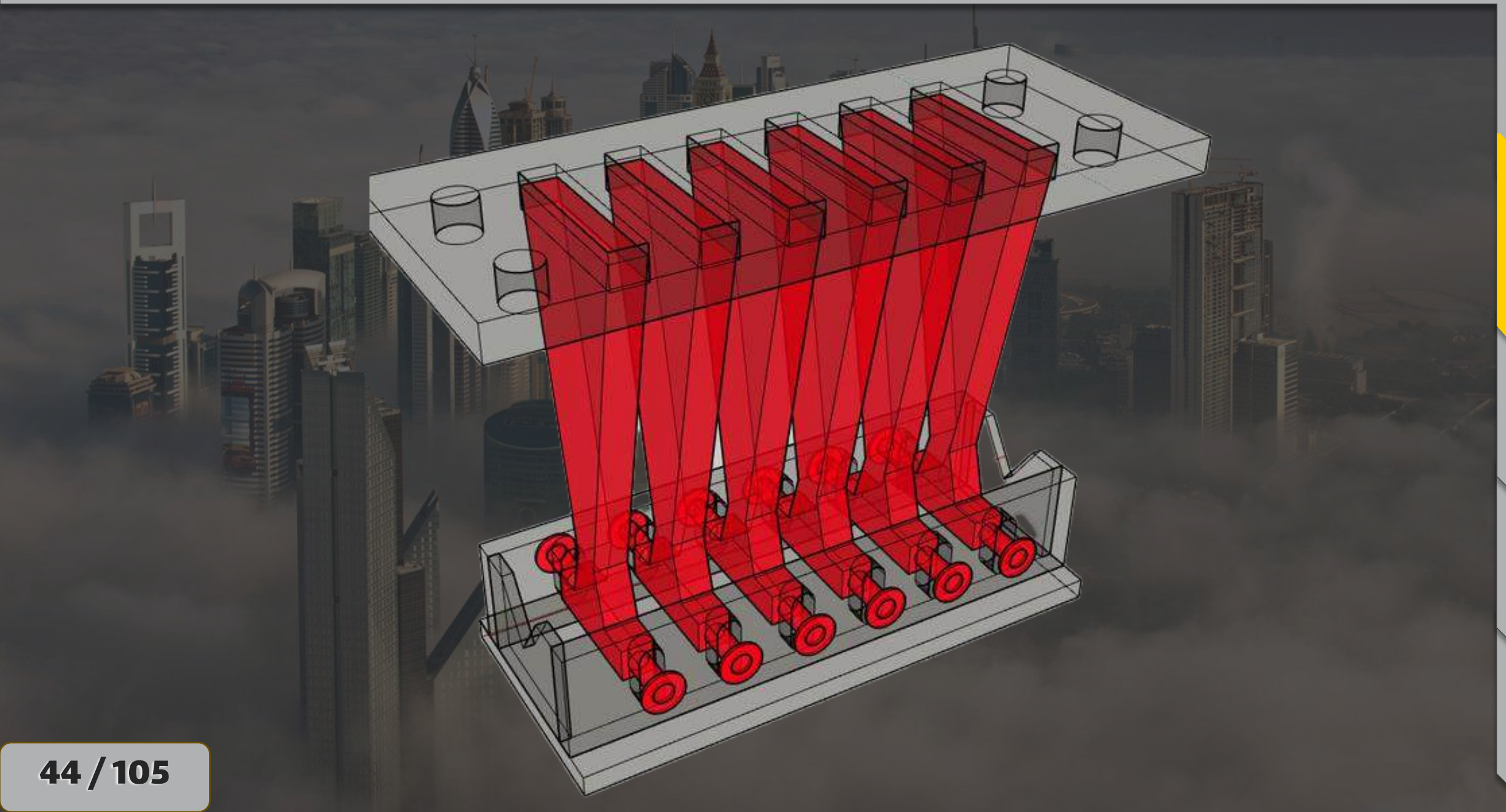



Experiment
FEA
Force (kN)
Story Displacement (mm)
120
100
80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
-100
-120
-40
-30
-20
-10
0
10
20
30
40

تسلیم شونده

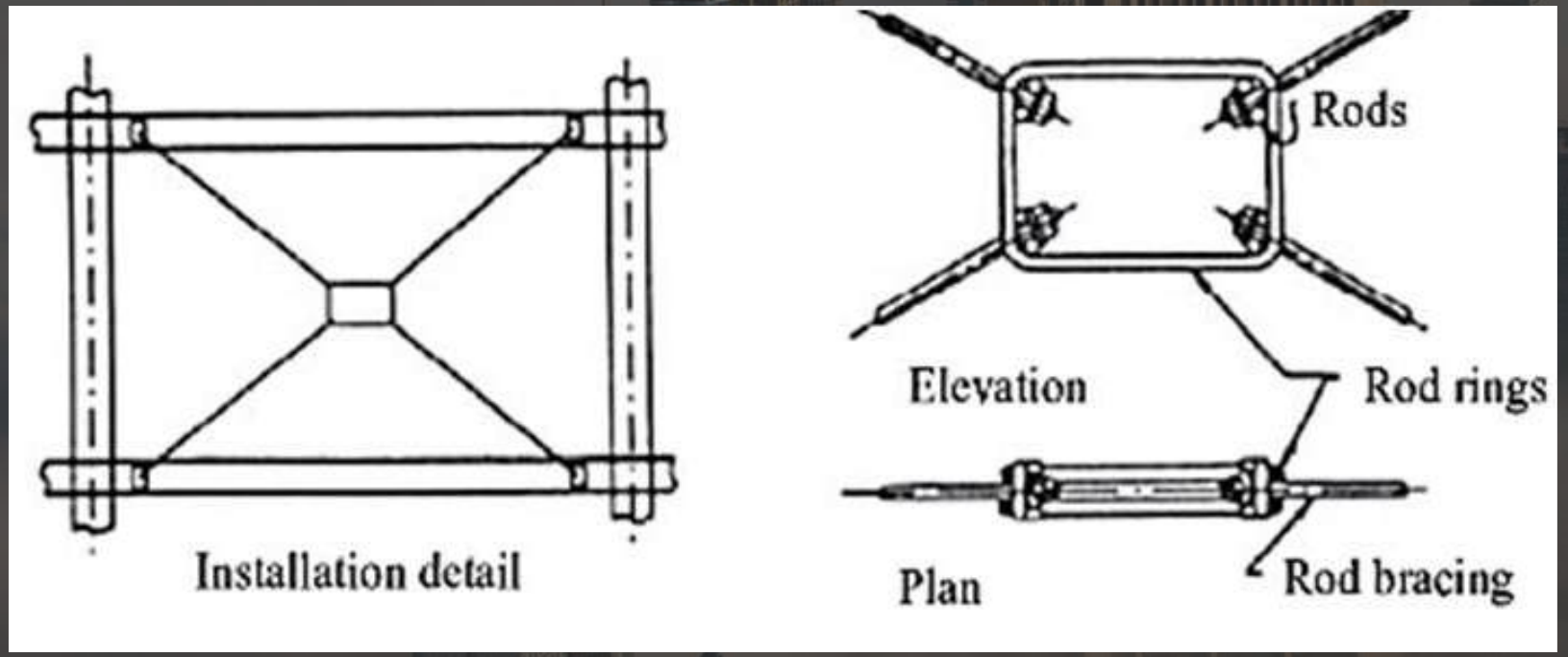
تسلیم شونده

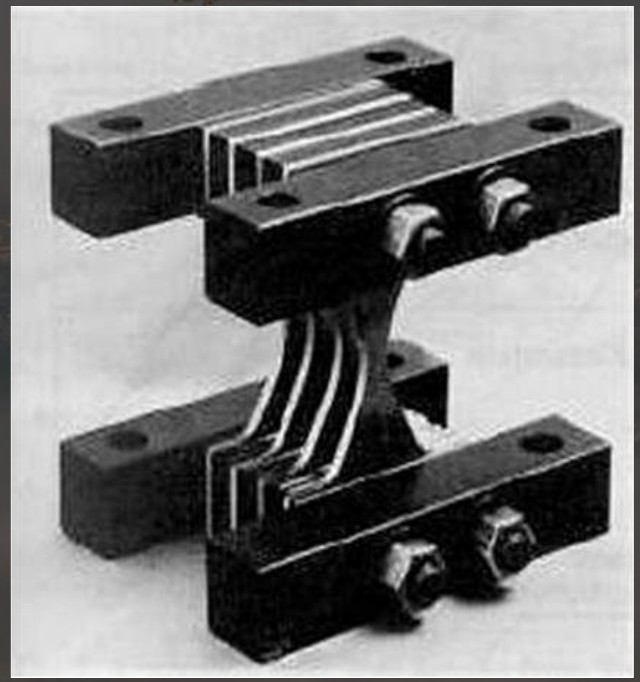
در بسیاری از میراگرهای تسلیم‌شوندهٔ فلزی، از ورق‌های فلزی نرم با شکل‌های مستطیل، X (Added Damping And Stiffness یا به اختصار ADAS) یا مثلثی (Triangular Added Damping And Stiffness یا به اختصار TADAS)، که فلز آن‌ها تقریبا بطور یکنواخت تسلیم می‌شود، استفاده می‌شود. ورق‌ها به‌صورت موازی به‌صورت موازی و به تعداد مورد نیاز در کنار هم قرار گرفته و نهایتا میراگر در انتهای مهاربند (7 یا 8) در سیستم نصب می‌شود. در این سیستم، حرکت نسبی طبقات نسبت به یکدیگر موجب حرکت ورقهٔ بالایی میراگر نسبت به ورقهٔ پایینی آن می‌شود. این عمل موجب جاری شدن تعداد زیادی از ورقه‌های فلزی جایگذاری شده در میراگر شده و خود این جاری شدن، موجب مستهلک نمودن مقدار زیادی از انرژی می‌شود (سایر اجزاء میراگر به نحوی طراحی می‌شوند که در حالت الاستیک باقی بمانند). همچنین مصالح دیگری مانند سرب (Lead) و آلیاژهای حافظه‌دار (Shape-Memory Alloys) نیز برای این نوع میراگرها استفاده می‌شود. با اضافه کردن این مجموعه به سیستم سازه‌ای در تغییر مکان‌های کوچک، سختی سازه افزایش یافته و در تغییر مکان‌های بزرگتر به دلیل تغییر شکل‌های غیرالاستیک در میراگر، افزایش میرایی نیز مشاهده خواهد شد.



تسلیم شونده

در میراگرهای فلزی پره مثلثی، معمولا اتصال ورق‌های مثلثی به ورق اتصال فوقانی به‌صورت جوشی است؛ به نحوی‌که قاعدهٔ ورق‌های مثلثی در داخل شیارهای ورق اتصال فوقانی قرار گرفته و جوش انجام می‌شود. به منظور جلوگیری از ایجاد نیروی محوری کششی یا فشاری در ورق‌های مثلثی، معمولا اتصال ورق‌های مثلثی به ورق اتصال تحتانی جوش نشده، بلکه به نحوی صورت می‌پذیرد که رأس ورق مثلثی امکان جابجایی در جهت قائم و ایجاد دوران را داشته باشد. بدین ترتیب ورق مثلثی در قسمت قاعده به‌صورت گیردار بوده و در قسمت رأس خود به‌صورت غلطکی است. این شرایط مرزی به کمک هندسهٔ مثلثی ورق منجر به توزیع یکنواخت تنش‌های خمشی در ارتفاع ورق مثلثی شده و انتظار می‌رود که تمام ورق وارد محدودهٔ غیر ارتجاعی خود شده و در استهلاک انرژی، مشارکت داشته باشد.


Rods
Elevation
Rod rings
Plan
Rod bracing
Installation detail



تسلیم شونده

تسلیم شونده

در صورتی‌که میراگر فلزی پره مثلثی تحت تغییر شکلی کمتر از تغییر شکل تسلیم میراگر قرار گیرد، رفتاری خطی و الاستیک از خود نشان داده و منجر به استهلاک انرژی نخواهد شد. در این شرایط، استفاده از میراگرهای تسلیم‌شونده صرفا منجر به افزایش سختی سازه خواهد شد؛ اما در صورتی‌که تغییر شکل وارده از تغییر شکل تسلیم میراگر بیشتر باشد، ورق‌های مثلثی وارد محدودهٔ غیرخطی خود شده و میراگر قادر خواهد بود که قابلیت استهلاک انرژی خود را بروز دهد.

سایر شکل‌بندی میراگرهای تسلیم‌شوندهٔ فلزی عبارتند از نوع خمشی لانه زنبوری (Bending Type of Honeycomb)، میراگرهای شکاف‌دار (Slit Dampers) و نوع برش پانلی (Shear Panel Type). ویژگی‌های مطلوب این میراگرها عبارتند از:

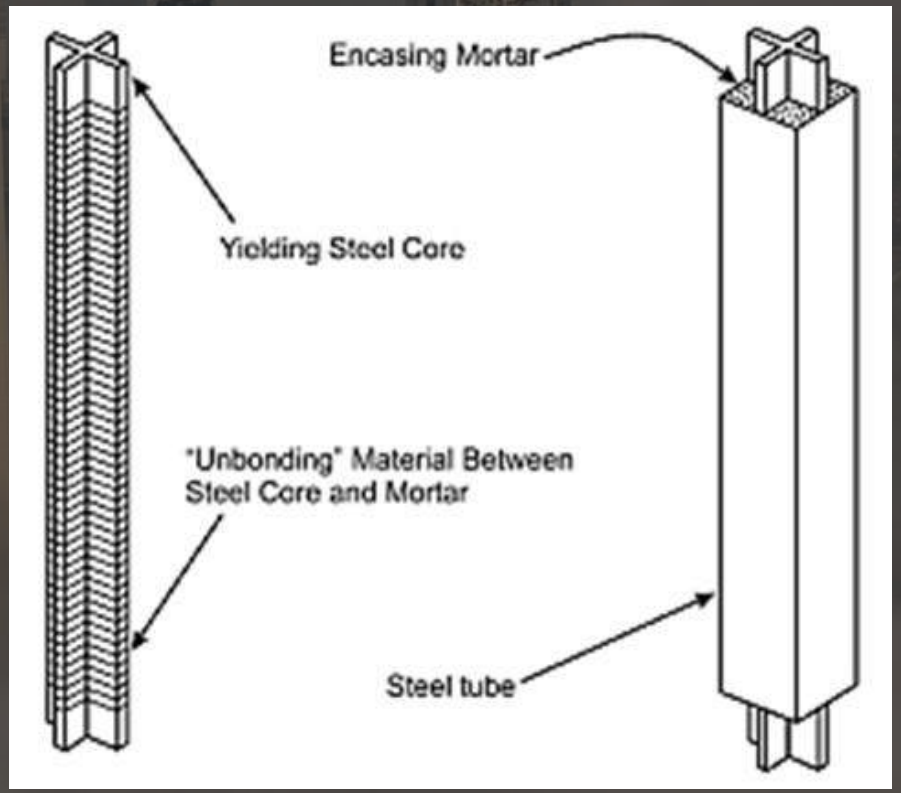
1: رفتار هیسترتیک پایداری دارند.

2: در دراز مدت، قابل اعتماد هستند.

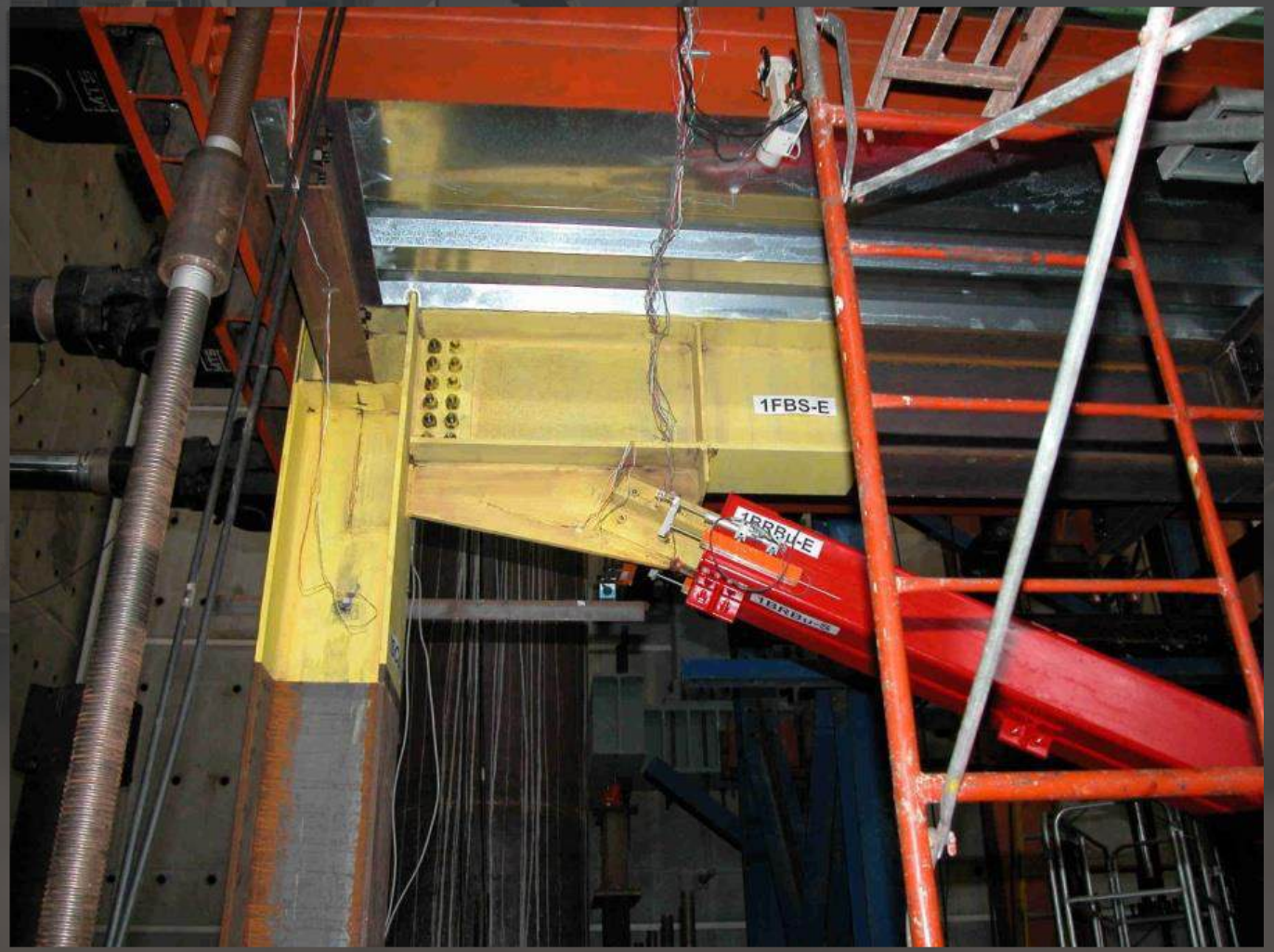
3: حساسیت نسبی آن‌ها به دمای محیط، ناچیز است.

مهاربند کمانش‌تاب (Buckling Restrained Brace یا به اختصار BRB):

نوع دیگری از نحوهٔ بکارگیری اصل تسلیم شدن فلزات، استفاده از آن‌ها به عنوان مهاربند می‌باشد. این مهاربندها دارای یک هسته از جنس ورق فلزی بوده که در یک قوطی فلزی پر شده با بتن قرار می‌گیرند.

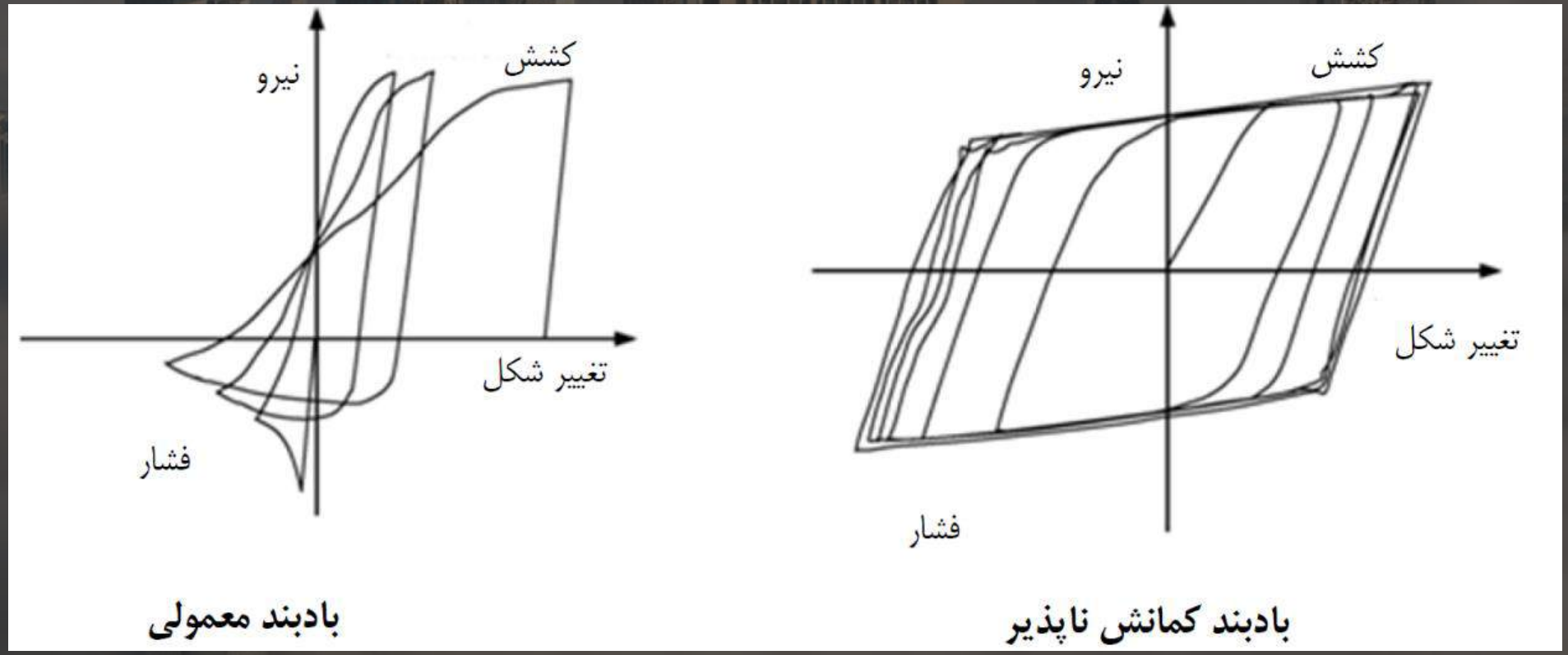


تسلیم شونده



تسلیم شونده

جهت کاهش اصطکاک، یک پوشش مخصوص بین هستهٔ فلزی و بتن قرار گرفته است. ورق فلزی هسته، دارای خاصیت استهلاک انرژی پایدار توسط تسلیم شدن تحت بارگذاری محوری رفت و برگشتی است. به علت اینکه پروفیل فلزی با بتن احاطه شده، تحت بارگذاری فوق دچار کمانش فشاری نمی‌شود.



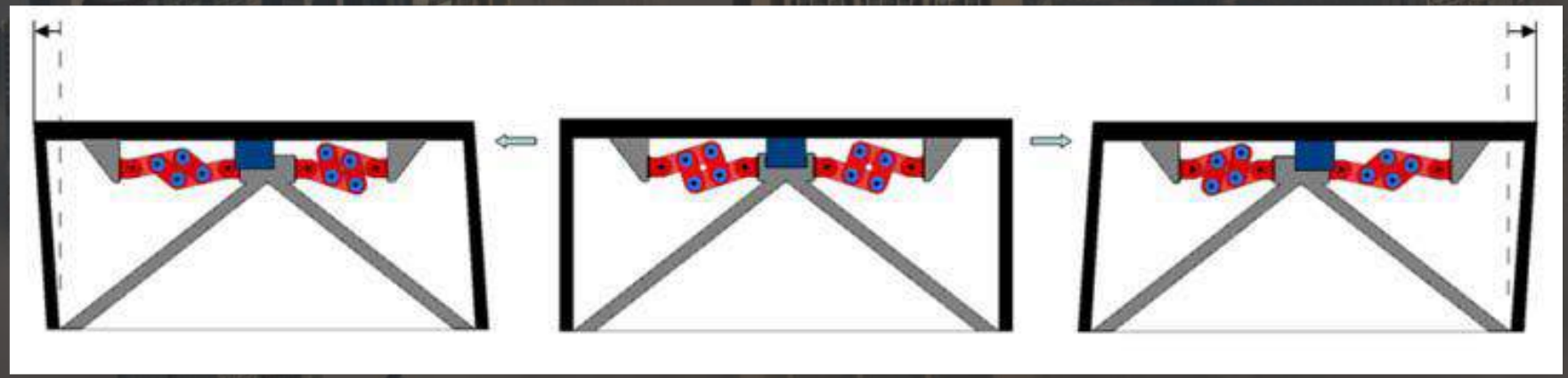
بادبند معمولی

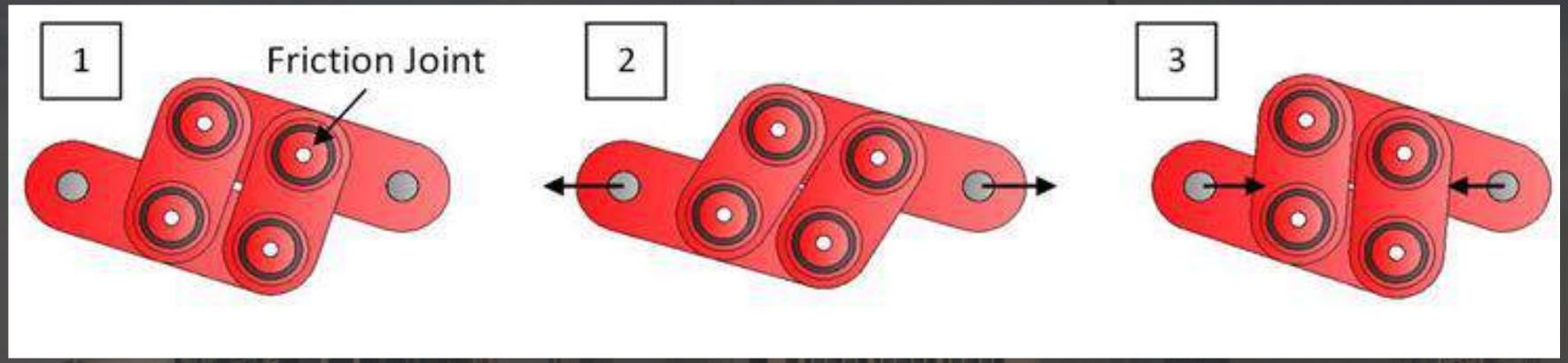
بادبند کمانش ناپذیر

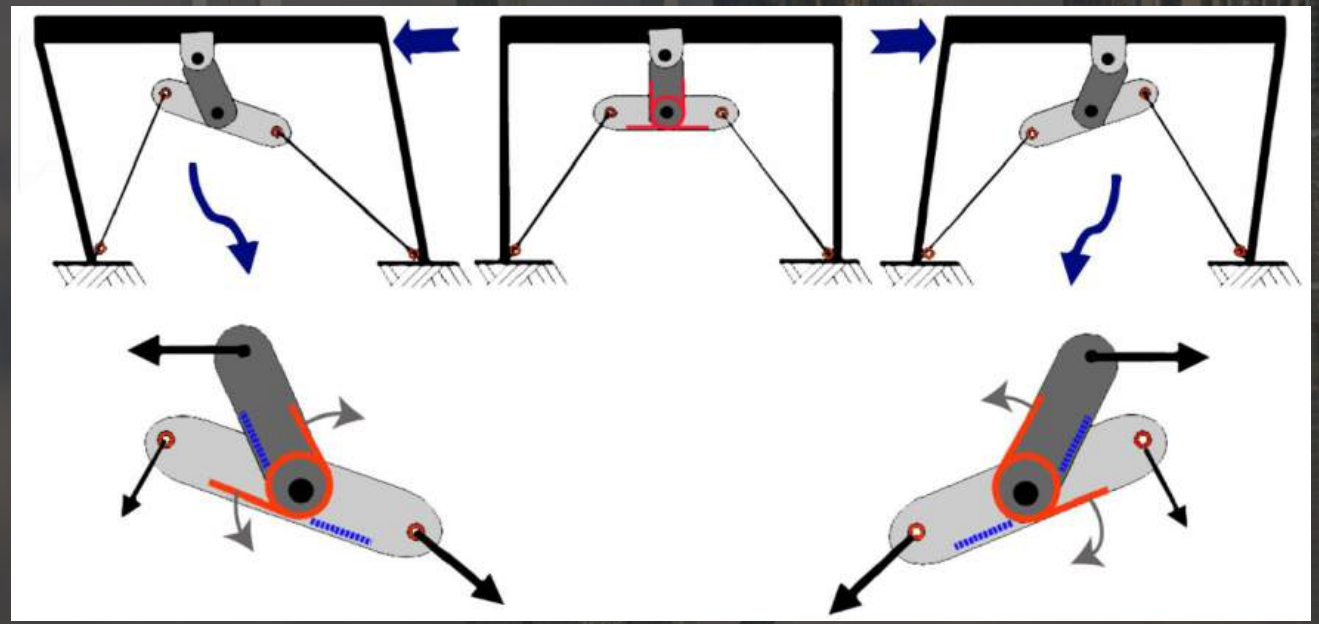
میراگر اصطکاکی (Friction Damper):

میراگرهای اصطکاکی از جمله اولین وسایل استهلاک انرژی هستند که توسط مهندسان در جهت کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای بکار گرفته شده‌اند. با پیشرفت تکنولوژی و تجربیات بدست آمده از رخدادهای طبیعی و همچنین آزمایش‌های متعدد انجام شده، نسل‌های جدیدی از میراگرهایی که اساس عملکرد آن‌ها بر پایهٔ استفاده از اصطکاک می‌باشند، توسعه یافته‌اند. اطمینان از عملکرد قابل پیشبینی و پایدار در کوتاه مدت و بلند مدت (مطابق آنچه در طراحی سازه مجهز به سیستم میرایی فرض می‌شود)، مهمترین مسئله در بکارگیری هر نوع سیستم میرایی است. در مورد میراگرهای اصطکاکی، مکانیک تماس دو سطح و اصطکاک قبل و در حین لغزش، مهمترین مسئله در این خصوص بوده و مهندسان و دانشمندان زیادی روی این موضوع، مطالعه نموده‌اند.

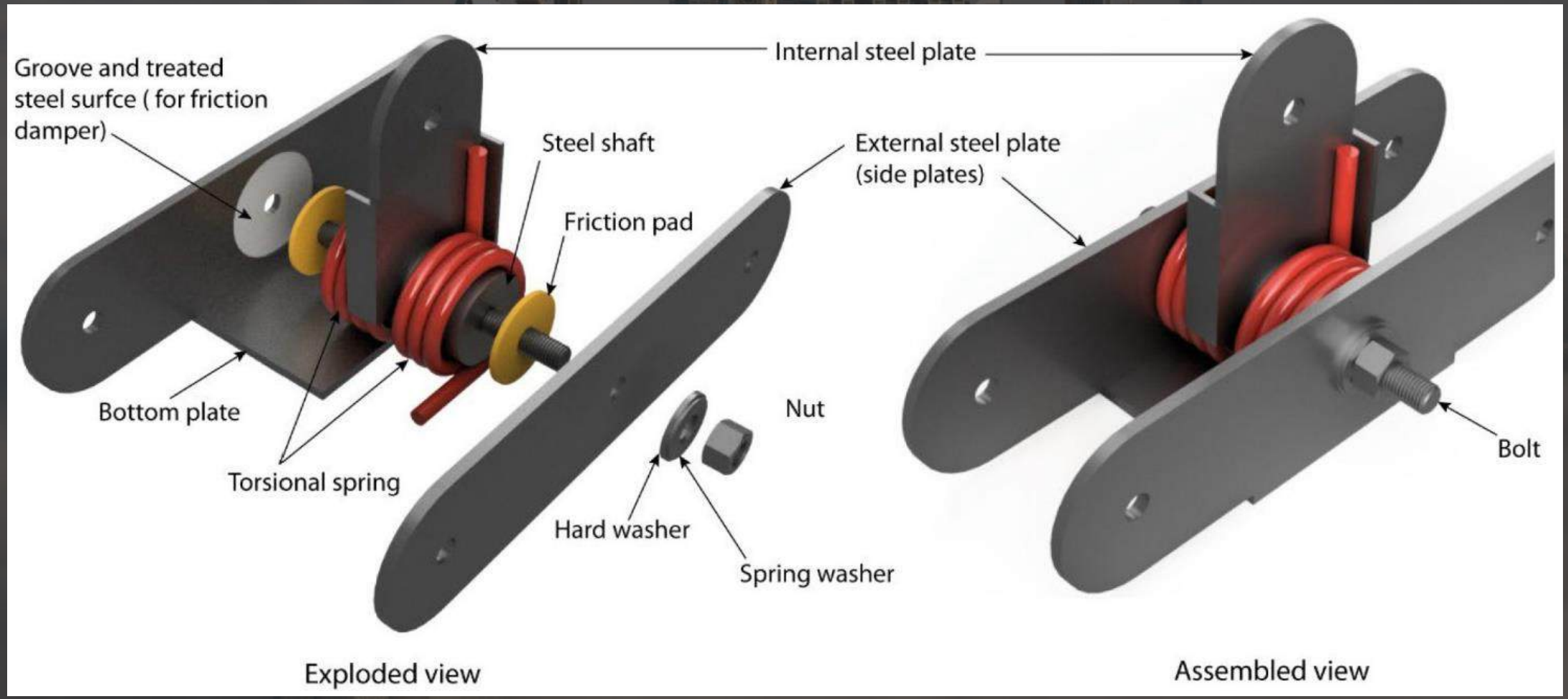
در میراگرهای اصطکاکی، در اثر اصطکاک ناشی از لغزش دو جسم جامد نسبت به یکدیگر انرژی قابل توجهی مستهلک می‌شود. در طول یک زمین‌لرزهٔ شدید، میراگرهای اصطکاکی تحت یک نیروی از پیش تعیین شده، قبل از آن که اعضاء سازه‌ای تسلیم شوند، شروع به لغزش کرده و بخش زیادی از انرژی وارد بر سازه را مستهلک می‌کنند.




1
Friction Joint
2
3



در سال 1982، Pall و Marsh میراگرهای اصطکاکی غیرفعال بر اساس ترمزهای اصطکاکی را ابداع نمودند. پس از آن، پیشرفت‌های چشمگیری در زمینهٔ میراگرهای اصطکاکی حاصل گردید و رفتار آن‌ها به‌صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفت. در میراگرهای اصطکاکی، عدم تغییر تأثیرگذار در مشخصات رفتار اصطکاکی از جمله ضریب اصطکاک و نیروی پیش‌تنیدگی در تعداد چرخه‌های بارگذاری زیاد تحت نیروهایی نظیر باد و همچنین در بلند مدت، از جمله عوامل مهم در عملکرد مطلوب میراگر می‌باشند. از این رو عدم بروز پدیده‌هایی از قبیل جوش سرد سطوح لغزش، وادادگی (Relaxation) در ادوات پیش‌تنیدگی یا در سطوح لغزشی تحت فشار و تغییر خواص فیزیکی سطوح لغزش در اثر عوامل محیطی از جمله مواردی است که در این میراگرها باید مورد توجه قرار گیرد. وجود پد اصطکاکی غیر فلزی در میراگرها، از وقوع عوارض ناشی از اصطکاک سطوح فلز روی فلز (Bi-Metallic Interfaces) جلوگیری خواهد کرد.


Internal steel plate
Groove and treated steel surfce (for friction damper)
Steel shaft
External steel plate (side plates)
Friction pad
Bottom plate
Nut
Bolt
Torsional spring
Hard washer
Spring washer
Exploded view
Assembled view

میراگرهای اصطکاکی بر اساس اصل ایجاد پیش‌تنیدگی در سطح اصطکاک عمل می‌کنند. دو موضوع مهم در خصوص این وسایل وجود دارد:

1: ممکن است در نیروی پیش‌تنیدگی کاهش رخ دهد که دلایل آن می‌تواند خزش در مصالح سطح لغزش یا ادوات ایجاد پیش‌تنیدگی، سایش در سطح لغزش در صورت وجود بارهای قابل توجه سطح سرویس مرتبط با حرکت یا سایش رخ داده پس از بارهای لرزه‌ای با سرعت زیاد باشد. ممکن است تشخیص دقیق سطح نیروی پیش‌تنیدگی در طول عمر سازه امکان‌پذیر نباشد، اما کاهش سطح نیروی پیش‌تنیدگی می‌تواند با بکارگیری پیچ‌های با مقاومت بالا و مصالح با مقاومت بالا با نرخ خزش پایین در سطح لغزش به کمترین مقدار برسد.

2: ممکن است در گذر زمان، تغییرات اساسی در ضریب اصطکاک در سطح لغزش رخ دهد. در این زمینه Constantinou و همکاران (2007) مطالعاتی در زمینهٔ طبیعت اصطکاک برخی سطوح لغزش در کوتاه مدت و بلند مدت انجام داده‌اند. بطور کلی، رفتار قابل اطمینان و قابل پیش‌بینی در بلند مدت می‌تواند با استفاده از یک سطح فلزی ایجاد شود که دارای پرداخت عالی بوده (بطور معمول، فولاد ضد زنگ) و در تماس با یک مصالح غیر فلزی نرم‌تری است که تحت فشار زیاد در شرایط محصورشدگی می‌باشد و باعث اتمام پدیدهٔ خزش در کوتاه مدت می‌شود. با این حال، چنین سطوحی دارای اصطکاک کمتر خواهد بود. اگرچه ممکن است ایجاد اصطکاک بیشتر با استفاده از سطح لغزش فلز روی فلز بدست بیاید، اما برخی از این سطوح بدلیل آن که پتانسیل ایجاد خوردگی شدید مضاعف را ایجاد می‌نمایند، بطور کامل غیر قابل اعتماد می‌باشند و به هیچ وجه نباید استفاده شوند.

در سایر طول با لغزش فلز روی فلز نیز در زمان سکون تمایل به ایجاد ترکیب صلب بین دو سطح تماس یا آمیختگی دو سطح فلزی وجود دارد. این موضوع باعث ایجاد جوش‌های سرد (با چسبندگی خیلی زیاد یا اصطکاک خیلی زیاد) خواهد بود.

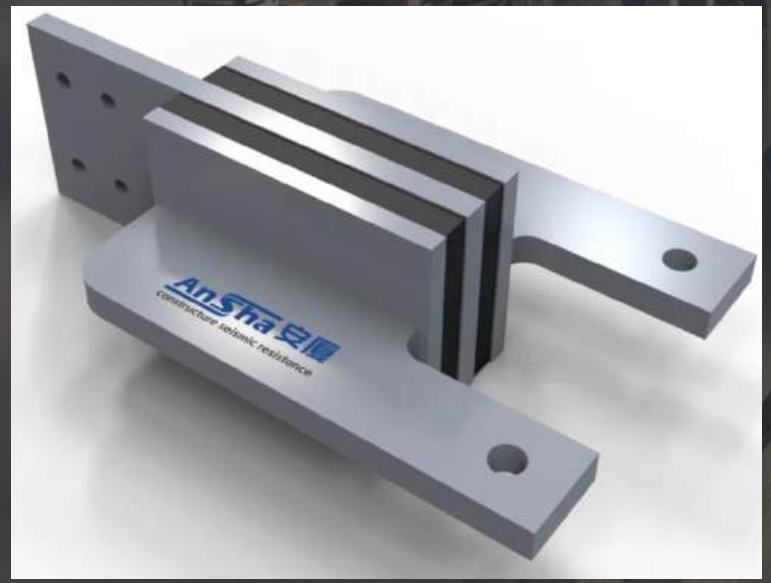
این قبیل مصالح با نمودارهای همسازی (Compatibility) مشخص شده‌اند. نمودارهای همسازی اولیهٔ پیشنهادی Rabinowicz در سال 1995، فلزات را به گروه‌های دوتایی غیر همساز (Incompatible) با چسبندگی کم و همساز و مشابه (Compatible) با چسبندگی بالا طبقه‌بندی می‌کنند. بر اساس این طبقه‌بندی، فلزات همسان و اغلب سطوح تماس فلز روی فلز نباید در سطوح لغزشی استفاده شوند. بجز سطوح شامل سرب (که بسیار نرم است)، مولیبدن (Molybdenum)، نقره و طلا (که بسیار گران قیمت هستند)، تنها در سطوح قلع - کروم، کادمیوم - آلومینیوم و مس - کروم تمایل به چسبندگی کمی وجود دارد. مواد این سطوح نیز سختی مشابهی دارند و در نتیجه انتظار آن است که مخاطرات وابسته به خزش، جدی بوده و باعث افزایش سطوح واقعی تماس و در نتیجه افزایش نیروی اصطکاک طی زمان خواهند شد.

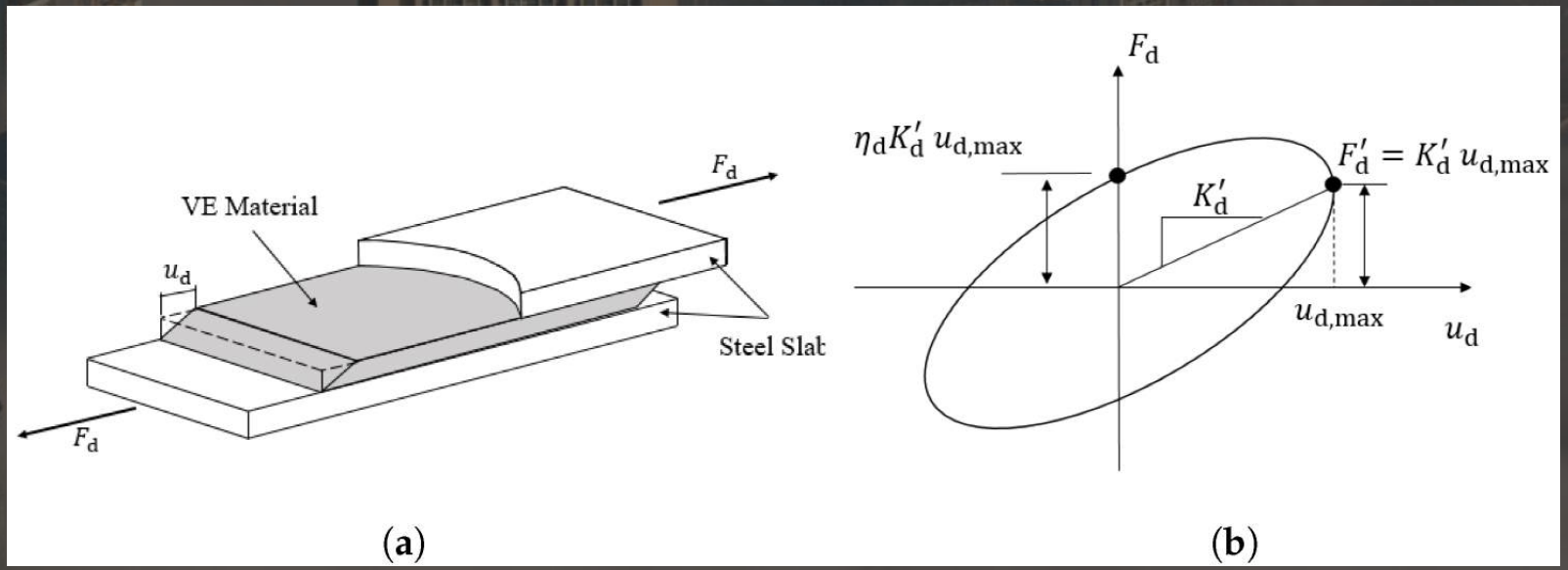
به عنوان جمع‌بندی اینکه تمامی سطوح اصطکاک فلز روی فلز باعث ایجاد تغییرات جدی در نیروی اصطکاک طی گذر زمان می‌شوند که تأثیر آن غیر قابل پیش‌بینی می‌باشند و در نتیجه آن که سطوح اصطکاک فلز روی فلز نباید استفاده شوند.

میراگر ویسکوالاستیک (Viscoelastic Damper یا به اختصار VE):

مصالح ویسکوالاستیکی که به منظور جذب و اتلاف انرژی در سازه‌ها بکار می‌روند، معمولا مواد شیشه‌ای یا پلیمری هستند که در برابر تغییر شکل از خود مقاومت نشان می‌دهند. این مقاومت یکی از مشخصه‌های ماده است و در واقع با بکارگیری این ماده در سازه، سختی سیستم سازه‌ای افزایش خواهد یافت. از طرف دیگر همزمان با اعمال تغییر شکل به این ماده، بر حسب دما و فرکانس بارگذاری، برخی از پیوندهای بین مولکولی شکسته شده و در این میان، مقداری انرژی صرف شکسته شدن پیوندها می‌شود. در واقع، میرایی این مواد به علت شکسته شدن پیوند بین مولکولی می‌باشد.

یک تیپ متداول میراگرهای ویسکوالاستیک، از لایه‌های ویسکوالاستیکی تشکیل شده که توسط ورق‌های فلزی احاطه گردیده است. در این حالت به هنگام ارتعاش ساختمان، بین بال‌های فلزی خارجی و ورقهٔ مرکزی میراگر، حرکت نسبی ایجاد می‌شود. این مکانیزم سبب تغییر شکل برشی و در نتیجه استهلاک انرژی خواهد شد.

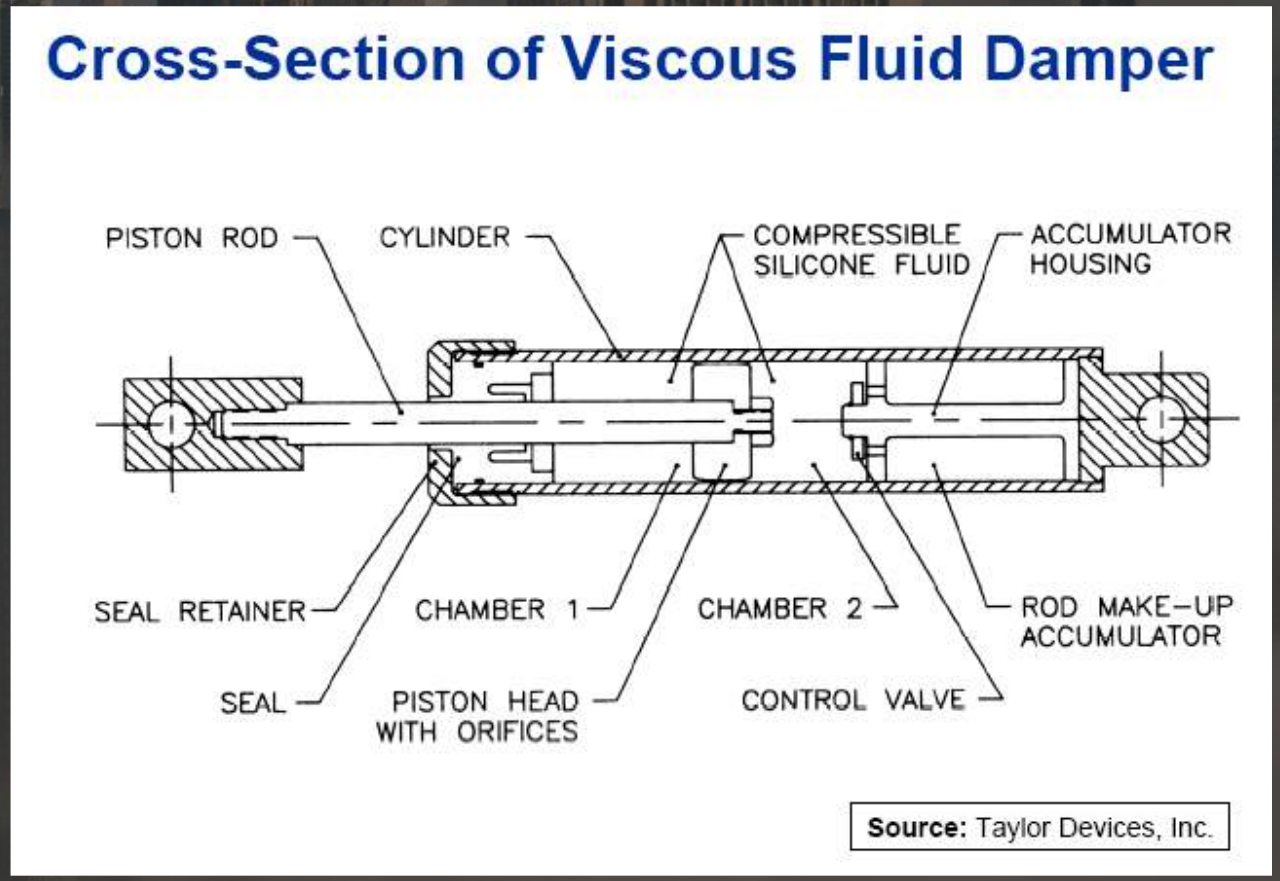


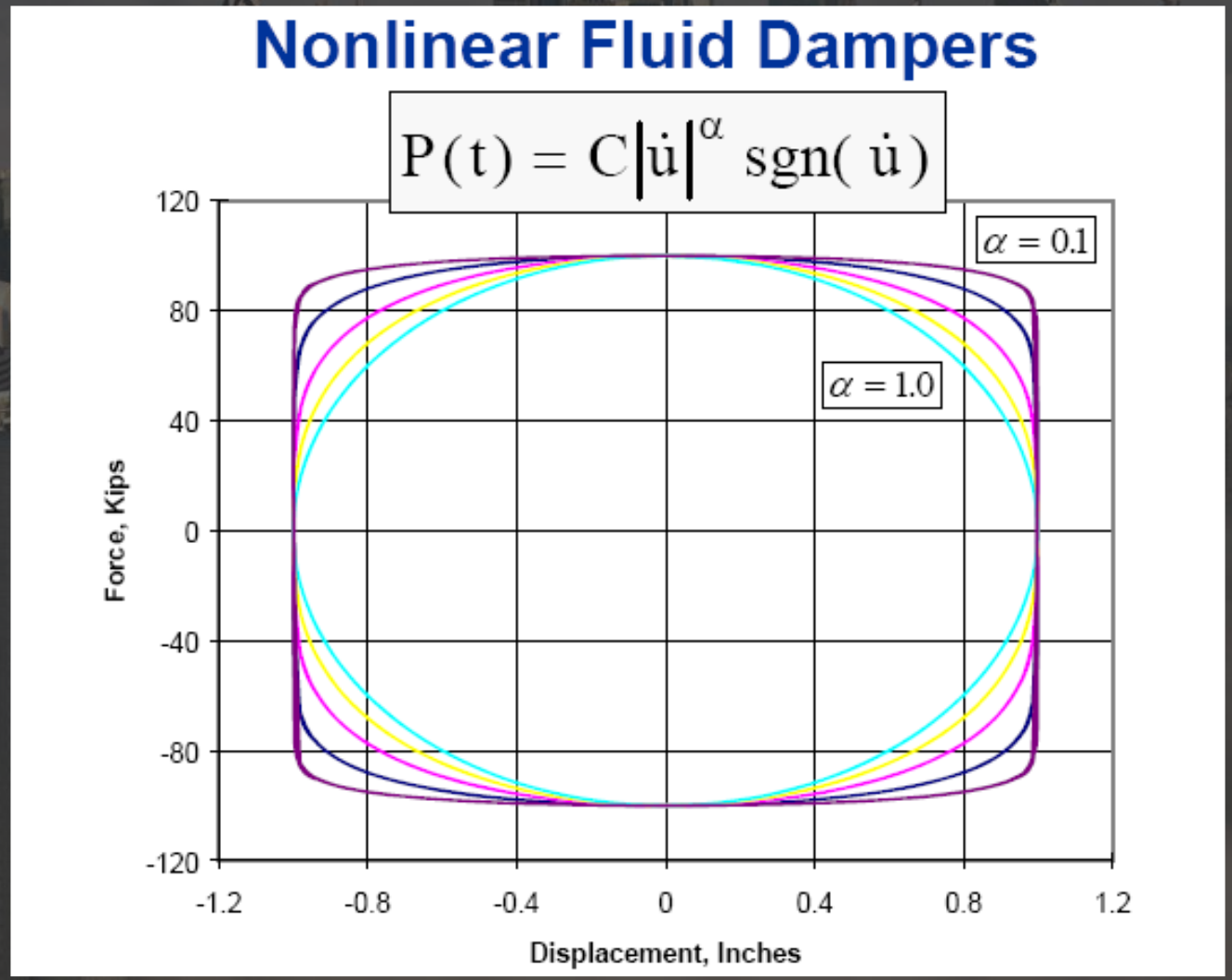


میراگر با سیال ویسکوز (Viscous Fluid Damper یا به اختصار VF):

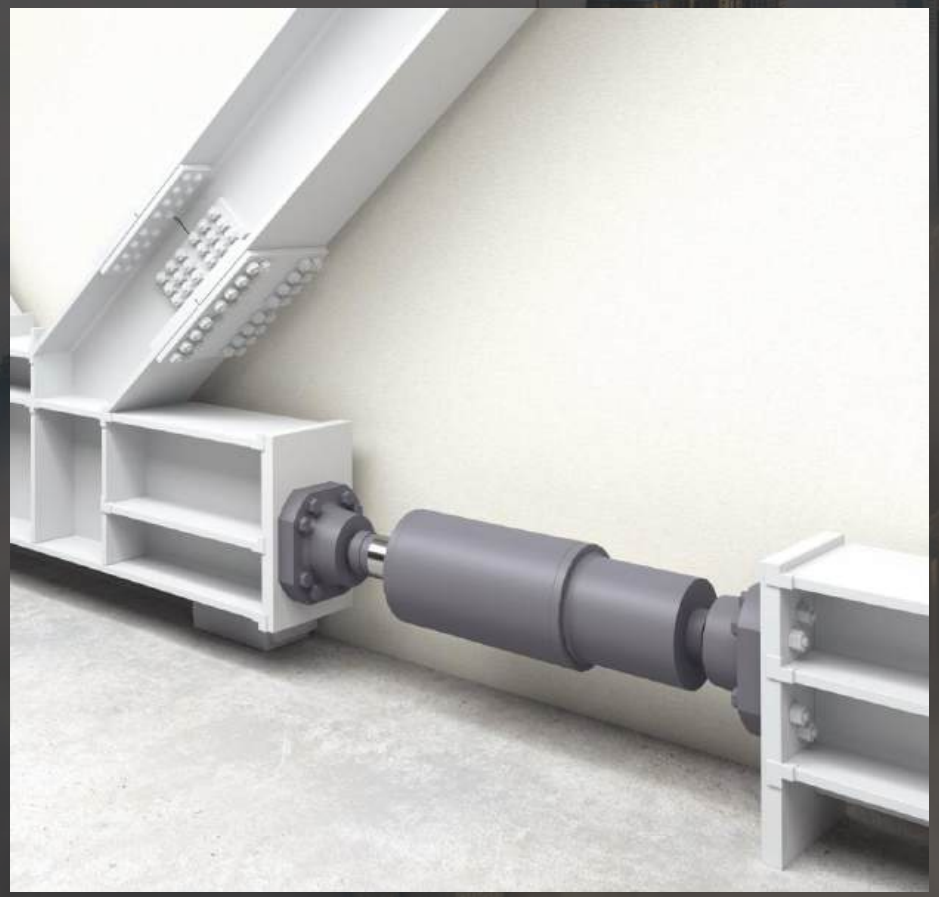
این میراگرها، بیشتر در صنایع هوایی و نظامی کاربرد داشته‌اند. در سال‌های اخیر، تلاش‌های زیادی برای توسعهٔ کاربرد این نوع میراگر جهت مقاصد سازه‌ای انجام شده است. یک میراگر با سیال ویسکوز دارای یک پیستون درون محفظهٔ میراگر بوده و با یک ترکیب ژل سیلیکون یا انواع مشابه روغن پر شده است. در اثر حرکت پیستون در این سیال ویسکوز، انرژی مکانیکی به گرما تبدیل شده و از این طریق سبب استهلاک انرژی می‌گردد.

سر این پیستون دارای تکنولوژی پیشرفته‌ای است که مانند ترموستات عمل نموده و از تغییرات دمای داخل پیستون جلوگیری می‌نماید، به نحوی‌که این میراگر در دمای 40- الی 70+ درجهٔ سانتی‌گراد عملکرد یکنواختی ارائه می‌کند. به علاوه انباره‌ای نیز در آن تعبیه شده تا از تغییرات حجم درون مخزن جلوگیری نماید.



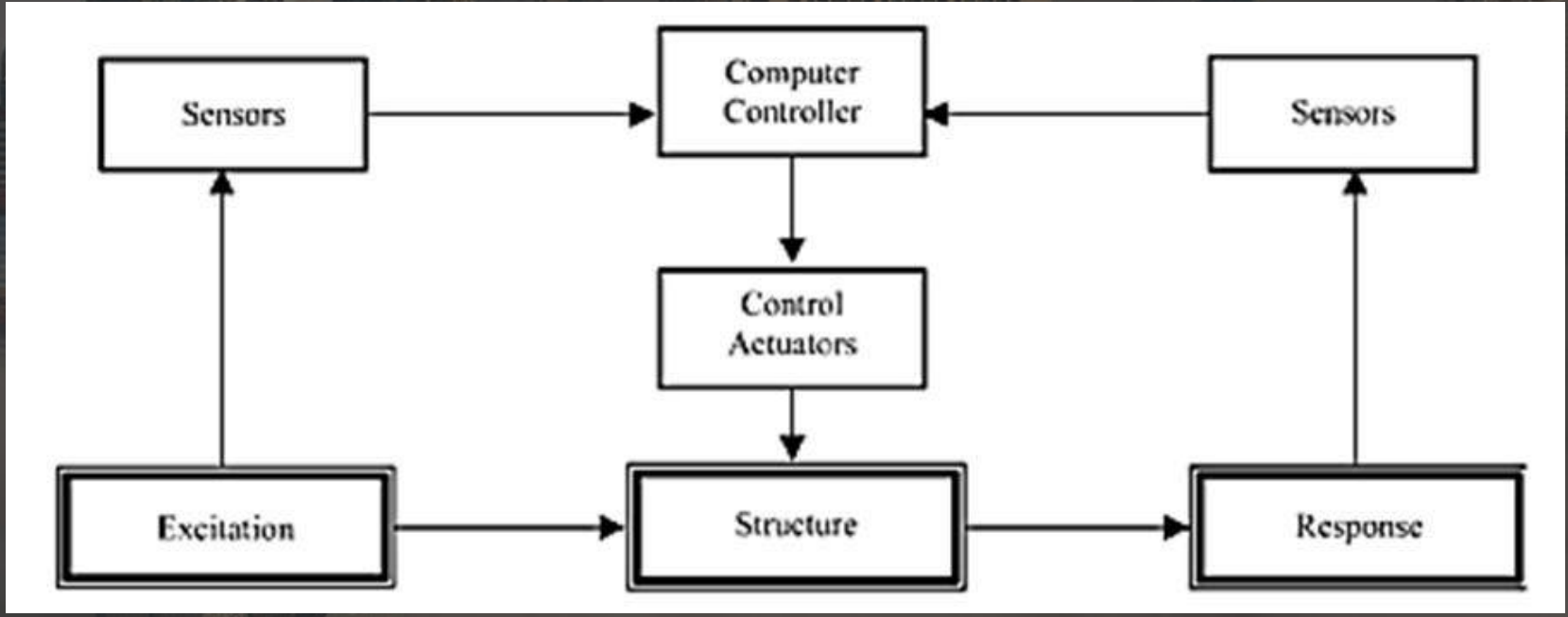

Nonlinear Fluid Dampers
$P(t) = C|\dot{u}|^{\alpha} \operatorname{sgn}(\dot{u})$
$\alpha = 0.1$
$\alpha = 1.0$
Force, Kips
120
80
40
0
-40
-80
-120
-1.2
-0.8
-0.4
0
0.4
0.8
1.2
Displacement, Inches

در شکل‌های زیر، نمونه‌هایی از میراگرهای هیدرولیکی قابل مشاهده است که در دستهٔ میراگر با سیال ویسکوز قرار دارند:



کنترل فعال سازه‌ها (Active Control of Structures):

شماتیک عملکرد سیستم‌های کنترل فعال در شکل زیر، نشان داده شده است:



این سیستم از موارد زیر تشکیل شده است:

1: سنسورها (Sensors) که جهت اندازه‌گیری تحریک‌های خارجی، پاسخ‌های سازه یا هر دو در سازه قرار داده می‌شوند.

2: ابزارهایی جهت پردازش اطلاعات اندازه‌گیری شده و محاسبهٔ نیروهای کنترل لازم بر اساس الگوریتم کنترل مقتضی.

3: عملگرها (Actuators) که معمولاً جهت تولید نیروهای کنترل مورد نیاز از منابع خارجی، انرژی دریافت می‌کنند.

4: سیستم کنترل پس‌خور (Feed Back Control Systems) به سیستمی گفته می‌شود که تنها از پاسخ‌های سازه‌ای اندازه‌گیری شده در هر لحظه، جهت تعیین نیروی کنترل اعمالی استفاده نماید. در مقابل، اگر نیروهای کنترل فقط توسط تحریک اندازه‌گیری شده تنظیم شوند، سیستم کنترل از نوع پیش‌خور (Feed Forward Control Systems) نامیده می‌شود.

در حالتی‌که اندازه‌گیری‌های مربوط به پاسخ سازه و تحریک وارد بر آن جهت تعیین نیروی کنترل بکار رود، سیستم کنترل را پس‌خور - پیش‌خور (Feed Back – Feed Forward Control Systems) می‌نامند.

اینگونه سیستم‌ها با اعمال نیروی خارجی در خلاف جهت نیروی لرزه‌ای وارد بر ساختمان، سعی بر کنترل رفتار آن در هنگام بروز زلزله دارند. همچنین سیستم‌های مذکور قابلیت این را دارند که خود را با شرایط بارگذاری مختلف تطبیق دهند. بدین منظور از پاسخ‌های سازه‌ای اندازه‌گیری شده، جهت تعیین نیروی کنترل اعمالی به سازه استفاده می‌کنند. به همین دلیل نیاز به استفاده از سیستم‌های پیچیده و کنترل هوشمند برای اعمال نیروهای مورد نیاز و نیز الگوریتم‌های مناسب تعیین بهینهٔ این نیروها می‌باشد. از مشکلات عمدهٔ سیستم‌های کنترل فعال این است که جهت عملکرد مناسب به میزان انرژی خارجی زیادی نیاز دارند و از آن‌جا که این سیستم‌ها انرژی خارجی قابل توجهی جهت کنترل سازه به آن وارد می‌کنند، امکان ناپایدار شدن سازه بر اثر سیستم‌های مذکور وجود دارد.

انواع سیستم‌های میراگر فعال عبارتند از:

1: سیستم میراگر با جرم فعال.

2: سیستم تاندون فعال.

3: سیستم مهاربند فعال.

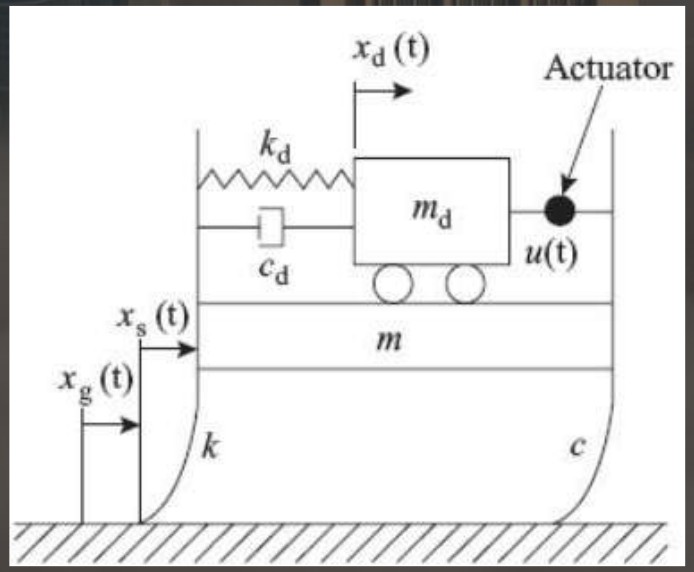
4: سیستم مولد پالس.

5: سیستم میراگر فعال با سختی متغیر.

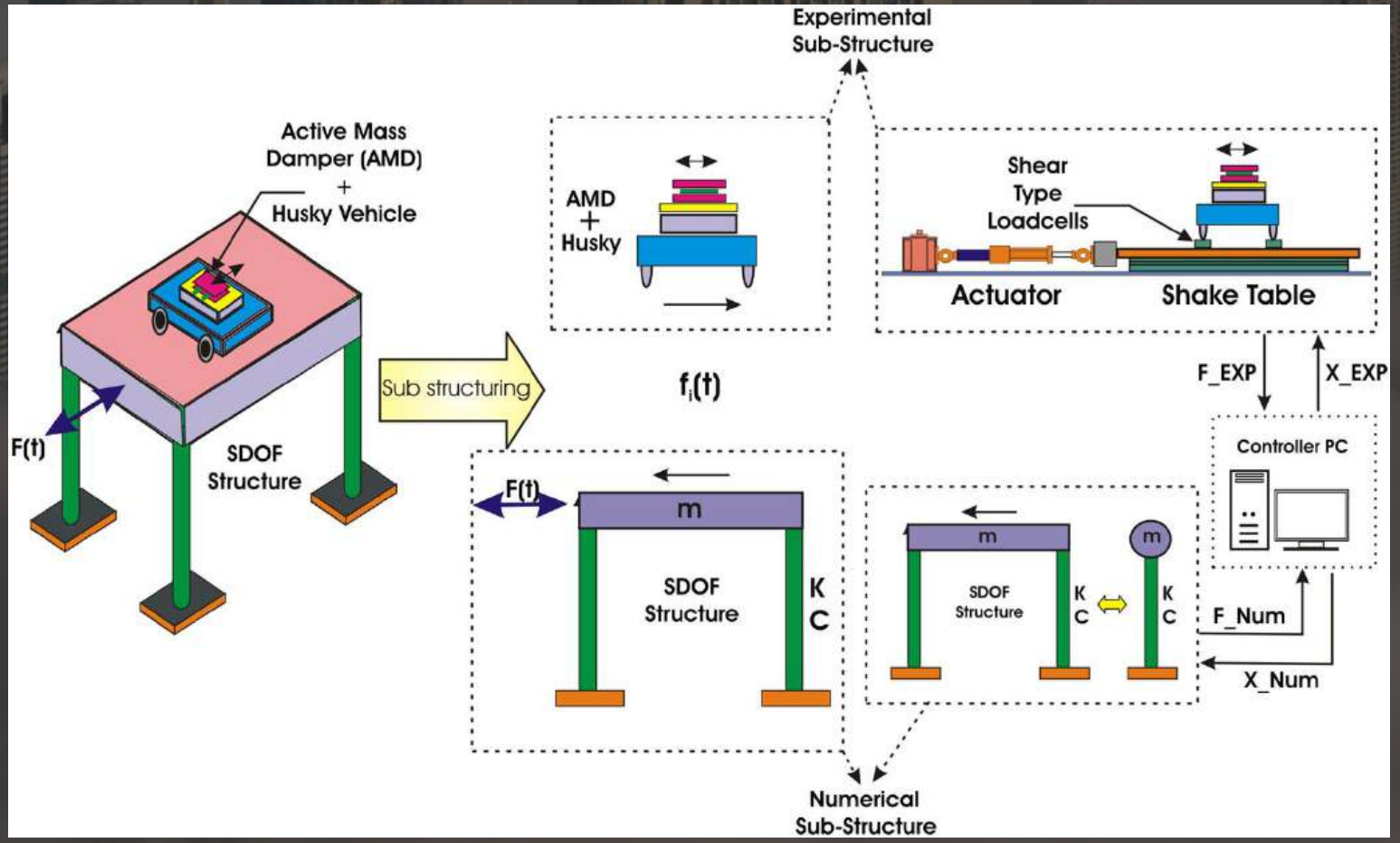
سیستم میراگر با جرم فعال (Active Mass Damper System یا به اختصار AMD):

این سیستم میراگر، شکل اصلاح شده‌ای از TMD است که در آن، یک جرم اضافی به همراه یک عملگر به سیستم اولیه متصل شده که می‌تواند میزان میرایی و محدوده‌های فرکانس قابل استفاده در دستگاه را افزایش دهد.

با تحریک جرم اضافی توسط عملگر، یک نیروی مضاعف در سیستم به وجود می‌آید که مکمل نیروی تولید شده توسط جرم هماهنگ شده بوده و در نتیجه، سبب افزایش میرایی معادل TMD می‌شود. از آن‌جایی‌که برای تحریک جرم اضافی، نیاز به نیروی خارجی می‌باشد، این سیستم در ردهٔ سیستم‌های کنترل فعال قرار می‌گیرد.

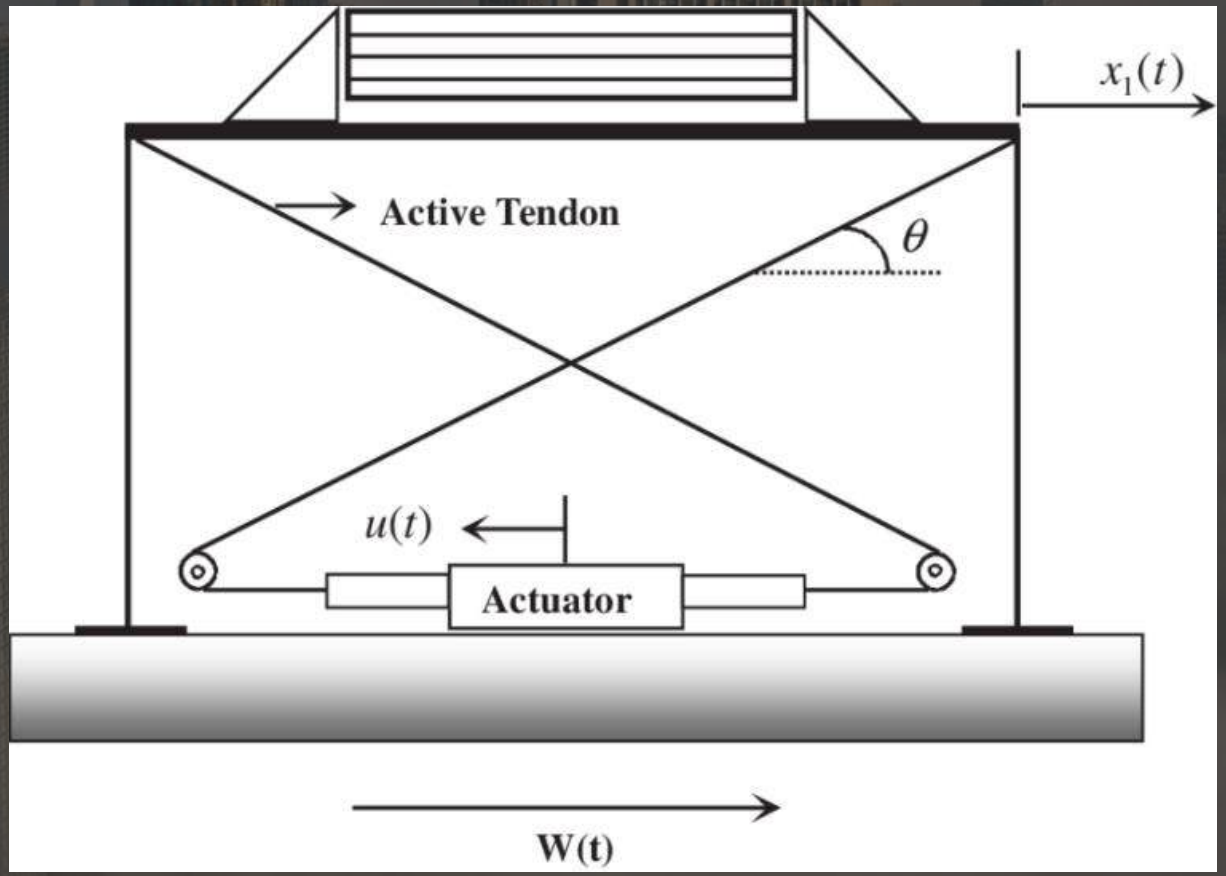


با توجه به شکل بالا، یک عملگر (فعال کننده) در میان سازه و سیستم کمکی نصب شده است. حرکت سیستم کمکی توسط عملگر کنترل می‌شود تا اثربخشی سیستم کمکی بهبود یابد. سیستم AMD از لحاظ اقتصادی، مقرون به صرفه است؛ زیرا با توجه به سیستم‌های فعال دیگر، نیاز به یک عملگر کوچک و نیروی کنترلی کم دارد.



سیستم تاندون فعال (Active Tendon System):

این سیستم میراگر شامل تاندون‌های پیش‌تنیده می‌باشد که کشش آن‌ها توسط سیستم مکانیزم فرمانبر برق کنترل می‌شود.



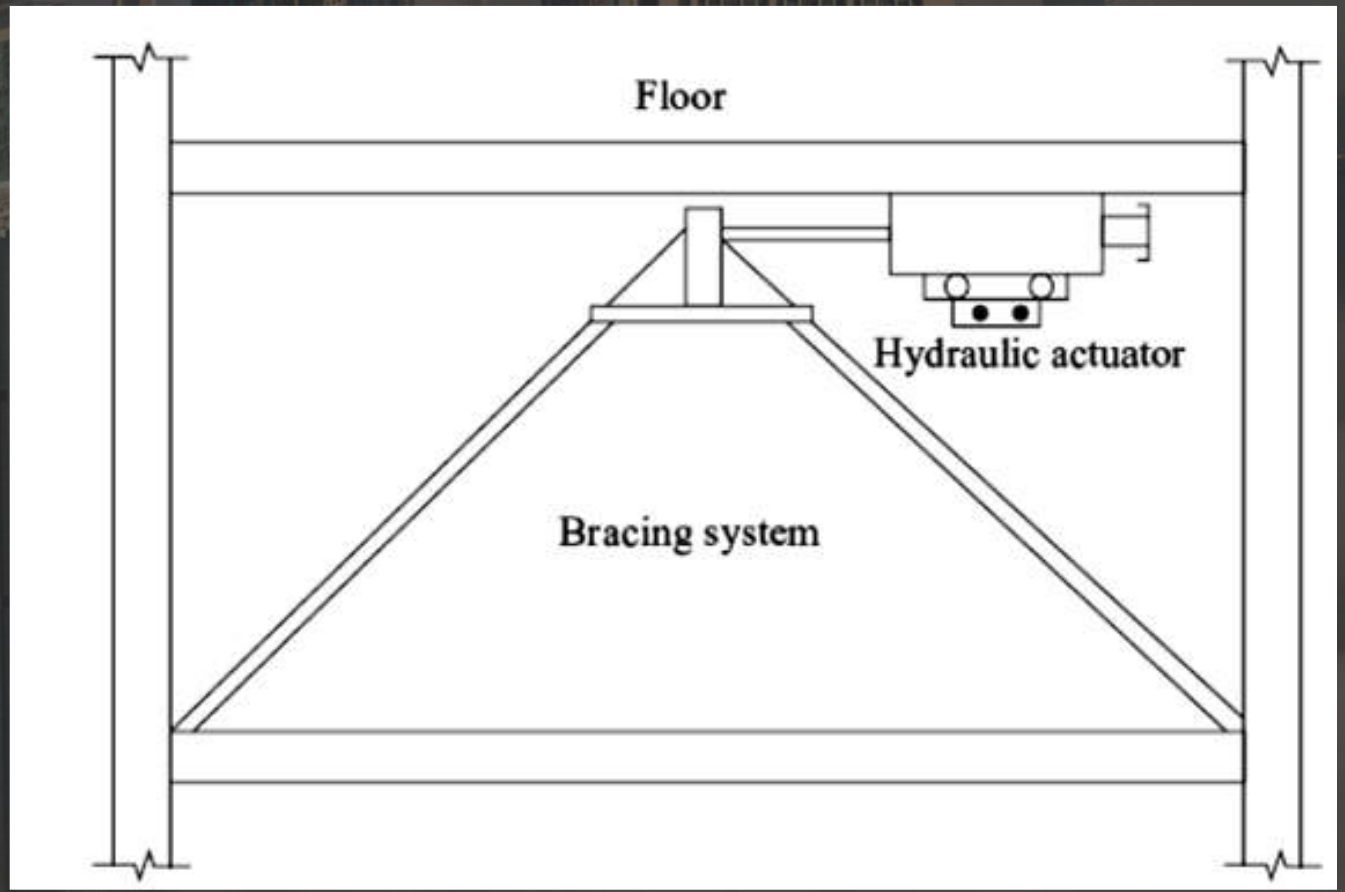
تاندون‌های فشاری در میان دو طبقهٔ سازه و عملگر در کف نصب می‌شود. یک سر تاندون به طبقهٔ بالا و سر دیگر آن به عملگر وصل می‌شود. جابجایی نسبی ایجاد شده در اثر ارتعاش سازه در طول زلزله، باعث حرکت پیستون عملگر می‌شود. این حرکت نسبی باعث تغییر میزان کشش تاندون پیش‌تنیده شده و نیروی کنترلی u باعث کاهش پاسخ لرزه‌ای می‌شود. این سیستم میرایی در هر دو صورت آزمایشگاهی و تحلیلی مطالعه شده است. نمونهٔ اجرایی این سیستم میرایی در یک ساختمان 6 طبقهٔ بتنی در شهر توکیو ژاپن به وزن 600 تن بکار رفته است. هر دو نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی، حاکی از کاهش مؤثر پاسخ لرزه‌ای در این سیستم می‌باشد. از مزایای این سیستم آن است که اولا این سیستم قابلیت استفاده در سازه‌های موجود را داشته و سازه جهت مقاوم‌سازی نیاز به اصلاح زیادی ندارد. ثانیا در هر دو حالت مودهای پالسی و مداوم، قابلیت کارکرد دارد.

تاندون فعال

سیستم مهاربند فعال (Active Bracing System):

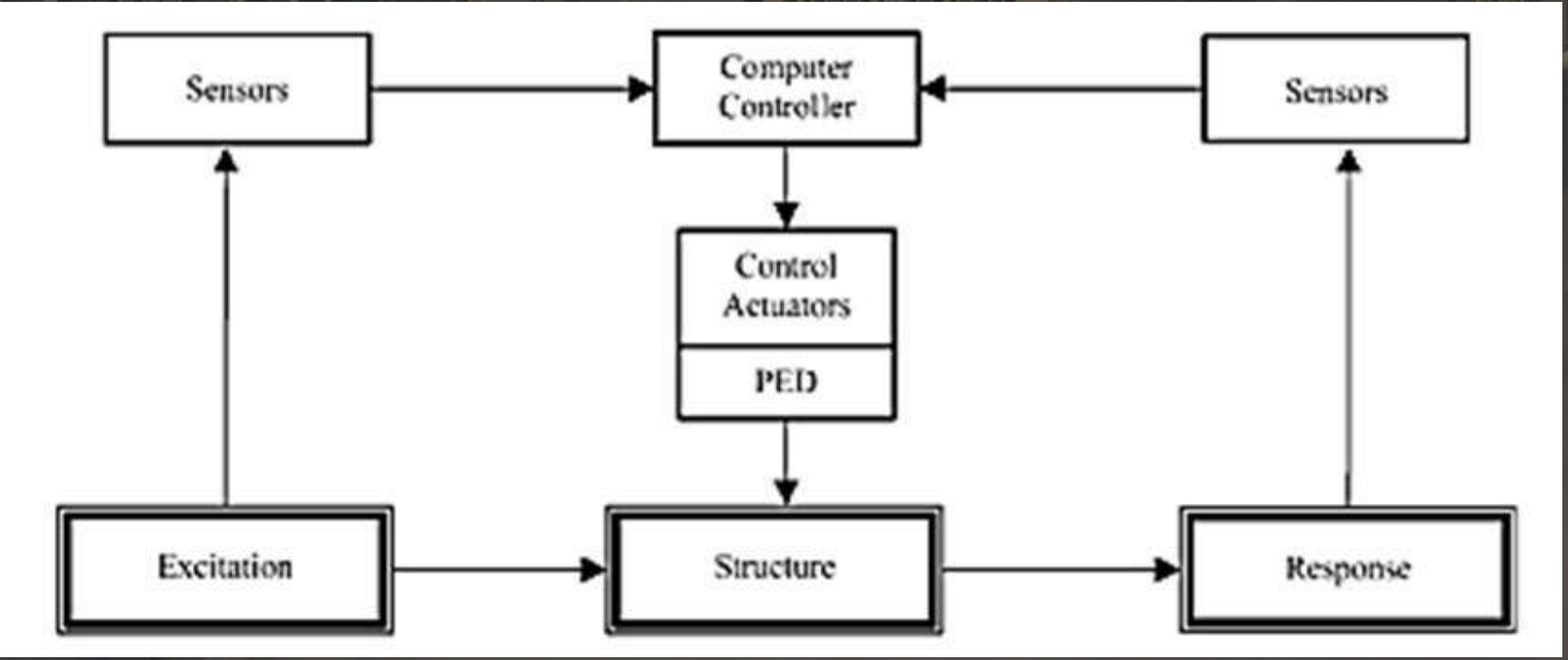
این سیستم، جهت نصب وسیلهٔ عملگر بر روی سازه از مهاربند موجود در سازه استفاده می‌شود. این سیستم در سه نوع مهاربند قطری، X شکل و K شکل قابلیت نصب دارد. عملگر، در کف سازه پیچ شده و سیلندر عملگر به مهاربند وصل می‌شود. این سیستم شامل یک شیر سرویس (Servo-valve)، کنترل‌کنندهٔ شیر سرویس، فعال‌کنندهٔ هیدرولیکی، منبع تغذیهٔ هیدرولیک، سنسور و یک رایانهٔ کنترل‌کننده است. سنسورها حرکات سازهٔ ناشی از تحریکات لرزه‌ای را ثبت می‌کنند. رایانهٔ کنترل‌کننده، این اطلاعات را دریافت کرده و سیگنالی کنترلی را تولید می‌کند. شیر سرویس با استفاده از این سیگنال، اختلاف فشار در دو محفظهٔ عملگر ایجاد کرده و نیروی کنترلی به وجود آمده از این اختلاف فشار، برای مقابله با نیروهای لرزه‌ای سازه استفاده می‌شود.

مزایای این سیستم همانند سیستم تاندون فعال آن است که اولا این سیستم قابلیت استفاده در سازه‌های موجود را دارد و سازه جهت مقاوم‌سازی نیاز به اصلاح زیادی ندارد. ثانیا در هر دو حالت مودهای پالسی و مداوم، قابلیت کارکرد دارد.



کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها (Semi-Active Control of Structures):

این سیستم‌ها مشابه سیستم‌های کنترل فعال عمل می‌کنند، با این تفاوت که در آن‌ها عملگر، مستقیما جهت اعمال انرژی مکانیکی به سازه بکار نمی‌رود.



سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال که می‌توان آن‌ها سیستم‌های کنترل غیرفعال قابل تنظیم نیز نامید، مجهز به میراگرهایی هستند که در هر لحظه قابل کنترل بوده، اما قادر به اعمال انرژی به سازه نمی‌باشند. میزان تغییر در خصوصیات مکانیکی سیستم، بر اساس بازخورد (Feedback) پاسخ‌های اندازه‌گیری شدهٔ سازه در لحظه‌ای قبل از تحریک زمین، تعیین می‌شود. در این سیستم‌ها از انرژی خارجی جهت تغییر خصوصیات دستگاه مانند میرایی یا سختی استفاده می‌شود؛ در نتیجه نیاز این سیستم‌ها به انرژی بسیار ناچیز است. در حالی‌که در سیستم‌های فعال به علت اینکه از انرژی خارجی جهت تولید نیروی کنترل استفاده می‌گردد، نیاز به انرژی نسبت به این روش بسیار بالا می‌باشد.

کنترل نیمه‌فعال

مزایای این نوع سیستم‌های کنترل عبارت است از:

1: عملکرد آن‌ها از سیستم‌های کنترل غیرفعال بهتر است.

2: دارای خاصیت سازگاری لحظه به لحظه سیستم‌های کنترل فعال هستند، بدون آن که به انرژی زیادی نیاز داشته باشند.

3: چون انرژی خارجی به سیستم وارد نمی‌کنند، باعث ناپایداری سازهٔ کنترل شده نمی‌شوند.

4: مانند ابزارهای کنترل غیرفعال، قابل اعتماد هستند.

5: اگر منبع انرژی خارجی در طول زلزله آسیب ببیند، همانند یک سیستم غیرفعال به فعالیت خود ادامه می‌دهند.

انواع مختلف سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال عبارت است از:

1: میراگر با دریچهٔ متغیر (Variable Orifice Damper).

2: میراگر با سختی متغیر (Variable Stiffness Damper).

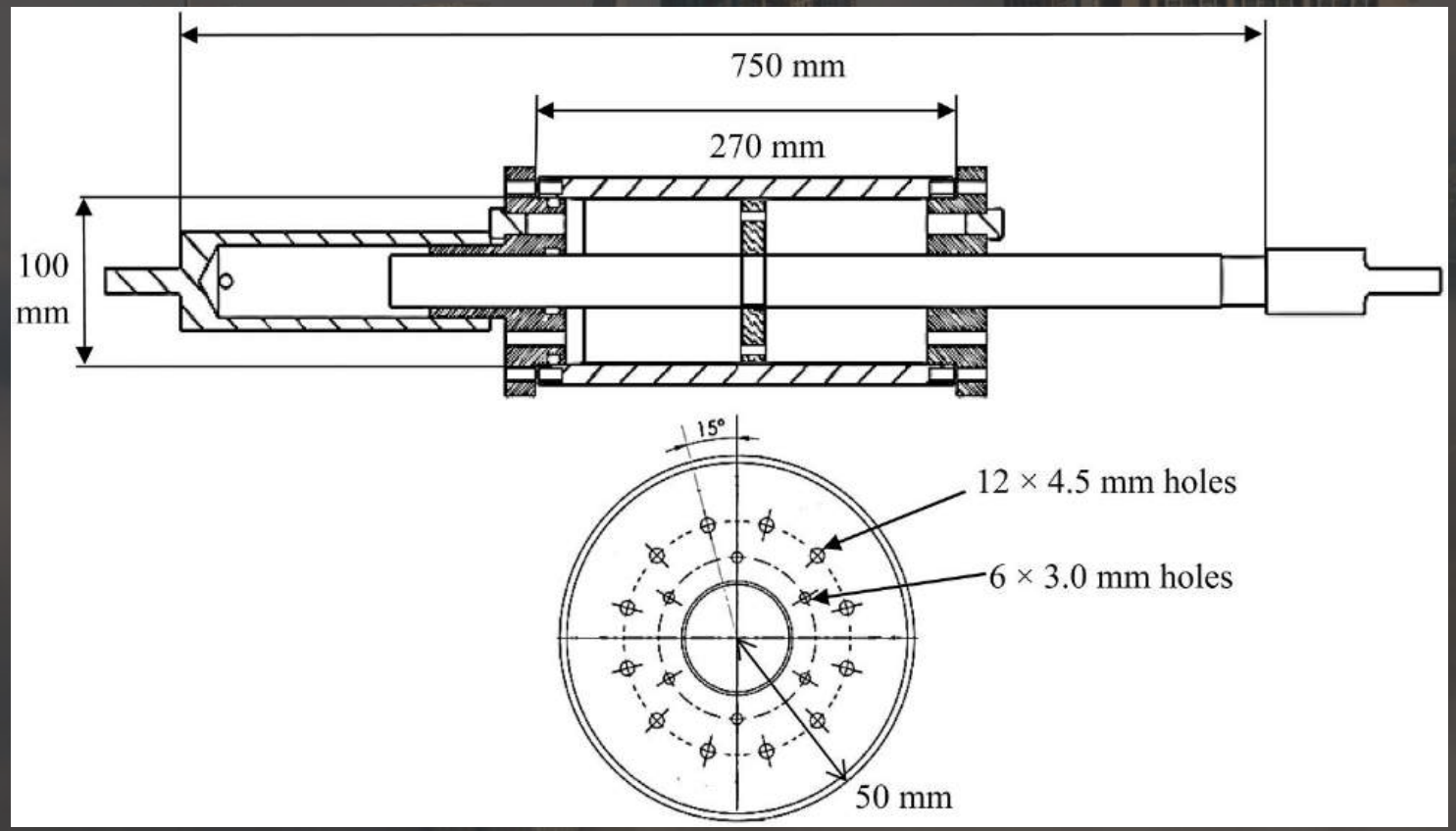
3: میراگر با جرم متوازن نیمه‌فعال (Semi-Active Stiffness Damper).

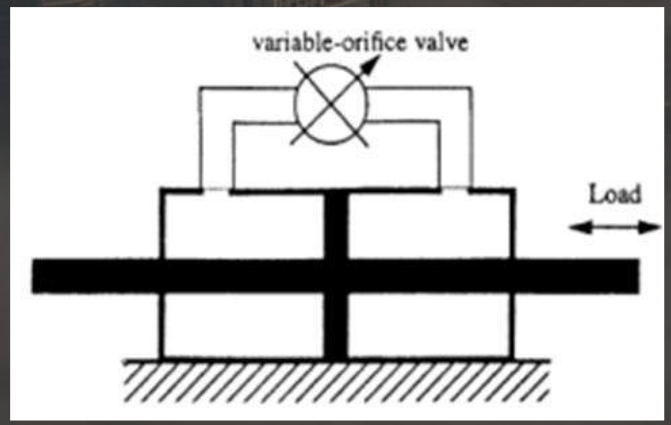
4: میراگر با ستون مایع کنترل‌شونده (Adjustable / Semi-Active Tuned Liquid Column Damper).

5: میراگر با سیال کنترل‌شونده (Controllable Fluid Damper).

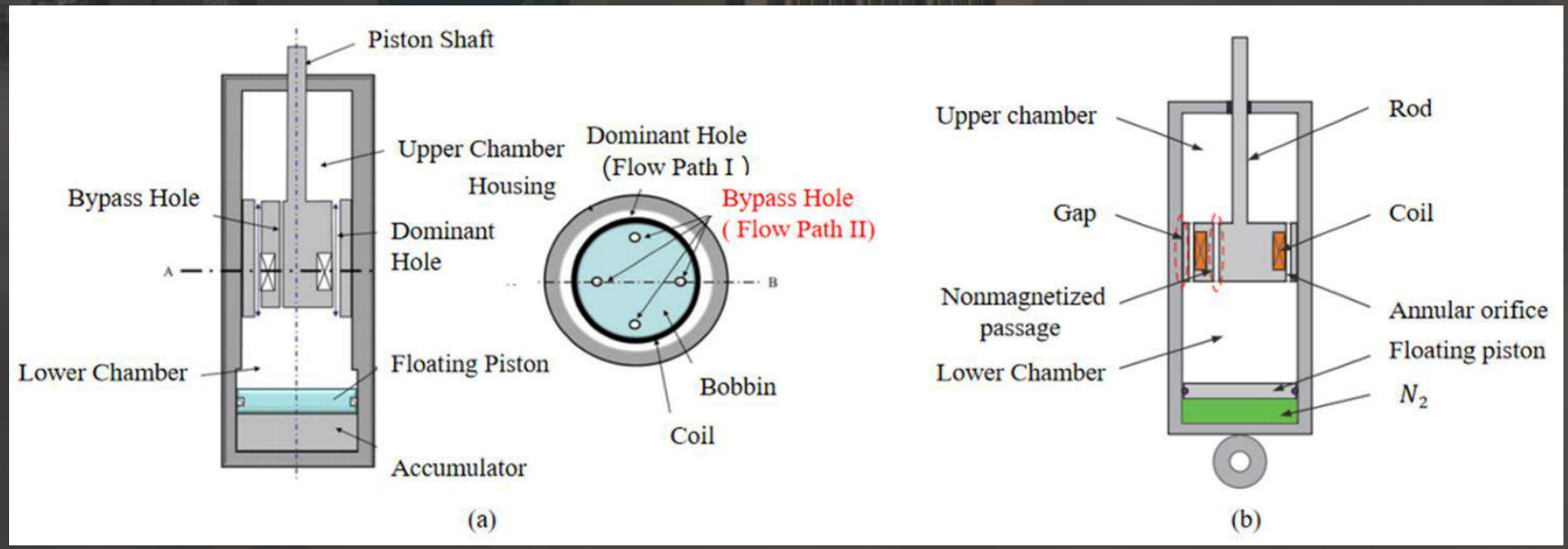
میراگر با دریچهٔ متغیر (Variable Orifice Damper):

این نمونه از سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال، از قدیمی‌ترین انواع این سیستم‌ها می‌باشد و همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد.



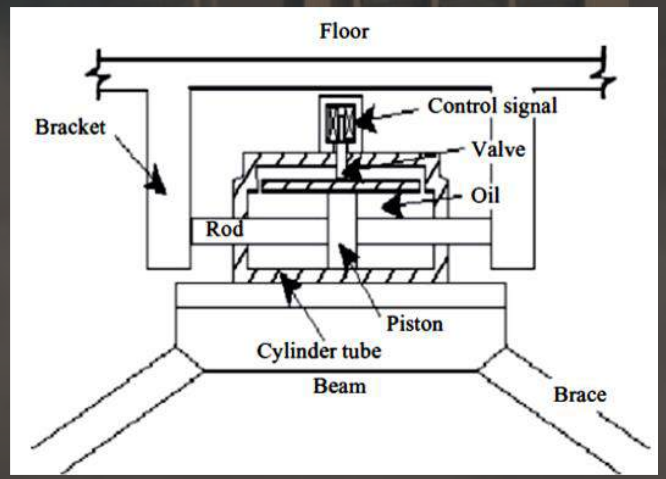


این دستگاه شامل یک پیستون هیدرولیکی بوده و سیال در آن می‌تواند از یک محفظه به محفظهٔ دیگر عبور کند، به نحوی‌که بین دو محفظه، روزنه‌ای وجود. اگر مقطع این روزنه همواره ثابت باشد، این دستگاه یک میراگر ویسکوز غیرفعال است، اما اگر دستگاه به نحوی باشد که بتوان شدت سیال عبوری از روزنه را توسط شیر سرویس به‌صورت لحظه‌ای کنترل نمود، این دستگاه در واقع طبیعت نیمه‌فعال پیدا می‌کند. اولین نمونهٔ تکمیل یافتهٔ این دستگاه کنترل سازه‌ای در ایالات متحدهٔ آمریکا استفاده شد که روی پل بین ایالتی 35، در نزدیکی Oklahoma نصب شده است.



میراگر با سختی متغیر (Variable Stiffness Damper):

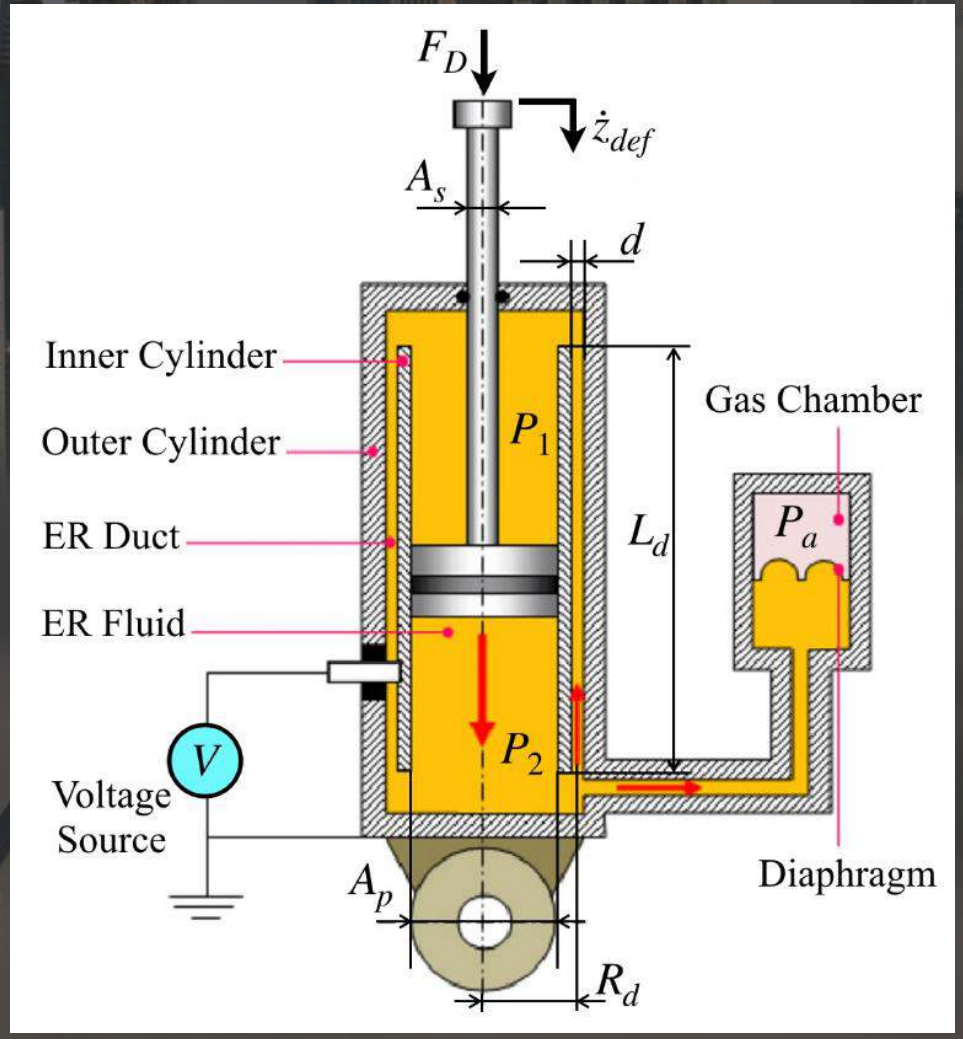
این سیستم نیمه‌فعال قابلیت آن را دارد که سختی سازه و در نتیجه فرکانس طبیعی آن را اصلاح کند و بدین ترتیب از بروز شرایط رزونانس جلوگیری نماید. این سیستم شامل سیلندر هیدرولیکی تعادل، دو میلهٔ پیستون، شیر کنترل و یک لوله است که دو محفظهٔ سیلندر را بهم وصل می‌کند. شیر می‌تواند باز یا بسته باشد. هنگامی‌که شیر باز است، مایع آزادانه جریان می‌یابد و اتصال تیر به مهاربند را برقرار می‌سازد. هنگامی‌که شیر بسته است، مایع جریان نداشته و مهاربند را به تیر متصل می‌کند و سختی سازه را افزایش می‌دهد. این ابزارها در سیستم مهاربندی سازه نصب شده و در هنگام لزوم، درگیر یا آزاد می‌شوند تا بدین صورت، سختی سازه را تغییر دهند.



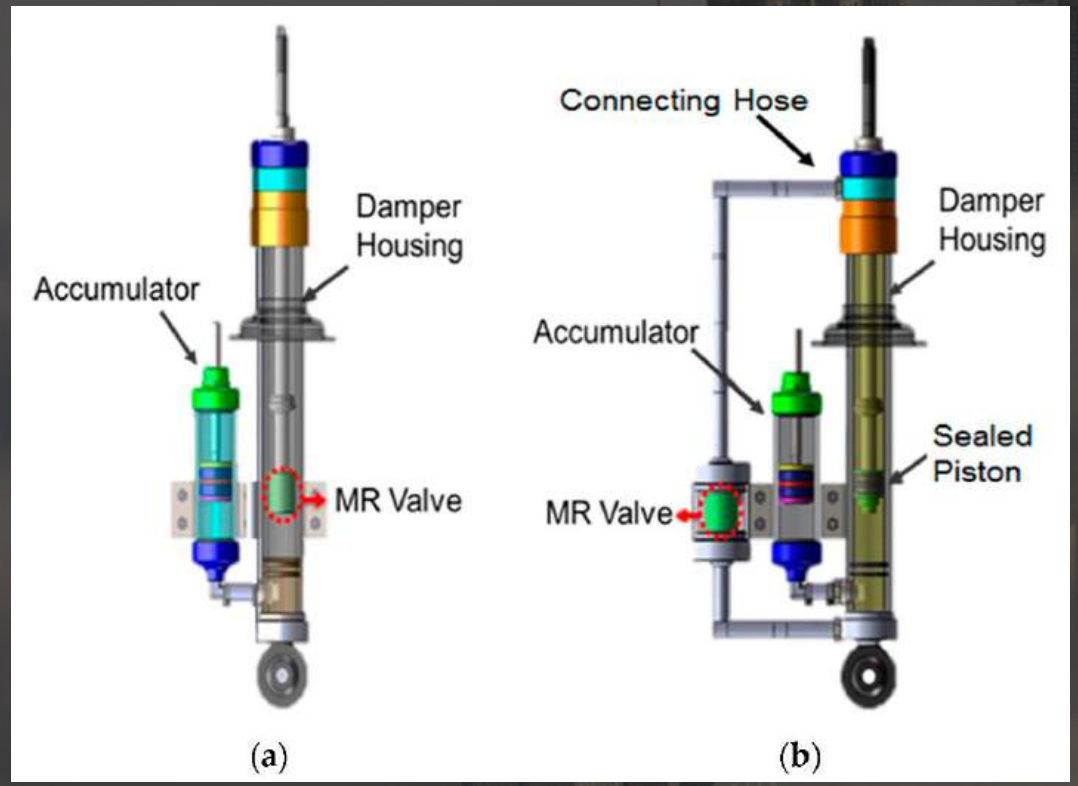
میراگر با سیال کنترل‌شونده (Controllable Fluid Damper):

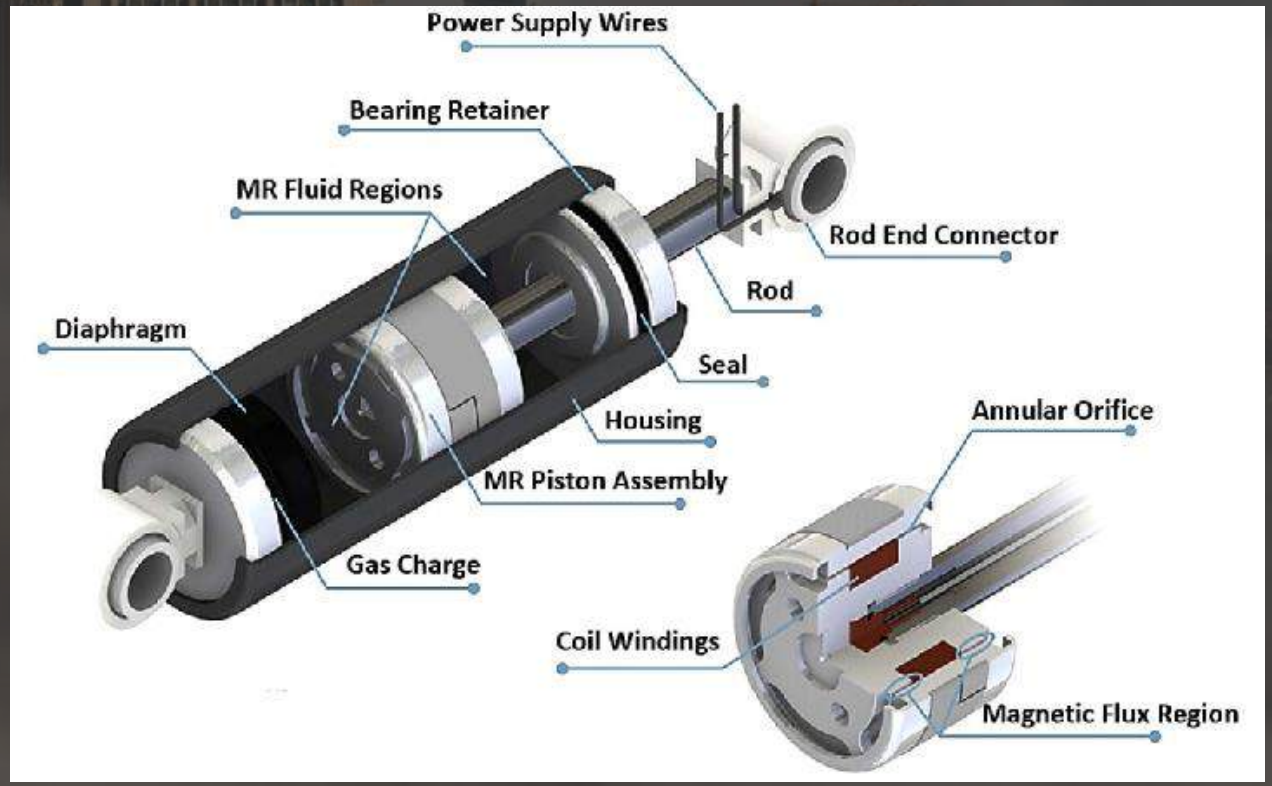
این دسته از دستگاه‌ها، شامل میراگرهایی می‌باشند که ویسکوزیتهٔ سیال درون آن‌ها قابل تغییر است. این تغییر در ویسکوزیته باعث تغییر سختی و تنش تسلیم این میراگرها شده و میزان جذب انرژی آن‌ها را در هر لحظه، کم یا زیاد می‌کند. دو نوع عمدهٔ میراگرهای با سیال کنترل‌شونده عبارتند از:

میراگرهای Electro-Rheological یا به اختصار ER:



میراگرهای Magneto-Rheological یا به اختصار MR:





این میراگرها شامل ذرات پلاریزه شدهٔ مغناطیسی یا الکترونیکی معلق در روغن هستند که قابل تغییر از حالت سیال ویسکوز روان به مادهٔ نیمه‌جامد با مقاومت تسلیم قابل کنترل در چند میلی‌ثانیه یا برعکس می‌باشند. این تغییر که با افزایش یا کاهش در شدت میدان مغناطیسی یا الکترونیکی صورت می‌گیرد، آن‌ها به میراگرهای قابل کنترل تبدیل کرده است.

مزیت دیگر این میراگرها علاوه بر نیاز به انرژی کم، سادگی آن‌ها به لحاظ مکانیکی است. از آنجا که تنها جزء حرکت‌کنندهٔ آن‌ها پیستون می‌باشد، دستگاه‌های مطمئنی بوده و نگهداری‌شان ساده است. استفادهٔ تجاری و اقتصادی ER به دلایل زیر، محدود است:

1: میراگرهای ER نمی‌توانند به تنش‌های تسلیم بالا دست یابند.

2: ظرفیت و توانایی سیال ER با ورود ناخالصی‌هایی مانند رطوبت در طول ساخت یا نگهداری، کاهش می‌یابد.

MR

3: ولتاژی که هنگام عملکرد نیاز دارند، نسبتا بالا می‌باشد (تقریبا 4000 ولت). بنابر این، همواره در دسترس نبوده و پر هزینه هستند.

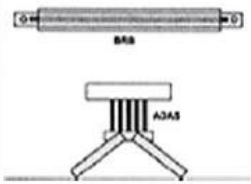
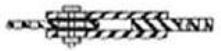
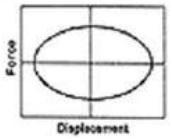
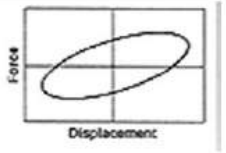
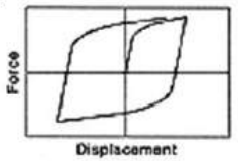
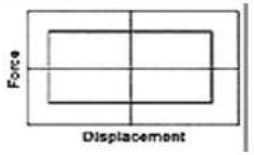
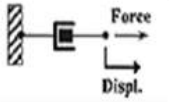
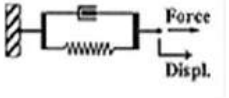
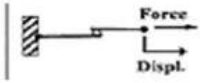
در مقابل، میراگرهای MR فاقد این مشکلات هستند. این میراگر از یک مایع هوشمند استفاده می‌کند که یک آنالوگ مغناطیسی مایع ER است. این میراگر معمولا شامل ذرات پلاریزه شدهٔ مغناطیسی است که در یک مایع ویسکوز همچون روغن سیلیکون پراکنده شده است. هنگامی‌که مایع MR در جریان مایع مغناطیسی قرار می‌گیرد، ذرات درون مایع، پلاریزه شده و مایع، رفتار ویسکوپلاستیک از خود نشان می‌دهد و در نتیجه در مقابل جریان مایع، مقاومت می‌کنند.

ماکزیمم تنش تسلیم میراگر MR بالا است (حدود 50 الی 100 کیلو پاسکال)، ناخالصی‌ها روی عملکرد سیال آن‌ها تأثیر نمی‌گذارد و به ولتاژ بسیار کمتری (حدود 12 الی 24 ولت و توان کمتر از 50 وات) نیاز دارند.

جمع‌بندی:

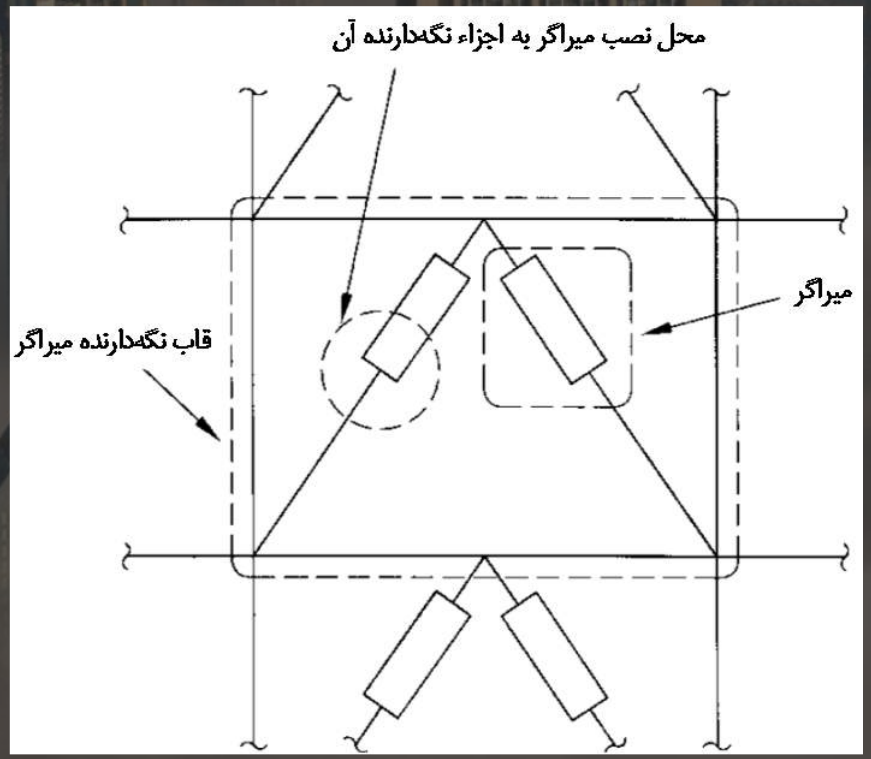
Structure / Disturbance		Energy absorbing mechanisms			Mass control	Active control	
		Hysteresis damper	Viscous damper	Friction damper	TMD	AMD	Tendon system
		Low-yield-point steel	Viscous polymer	Steel surface treatment			
Superhigh-rise building	Earthquake	○	○	○			
	Wind		○		○	○	
Observation tower & lattice tower	Earthquake	○			○		
	Wind				○		
Long-span structure	Earthquake	○	○				○
	Traffic vibration				○	○	
Bridge	Earthquake	○	○				
	Wind				○		○
	Traffic vibration				○		○

جمع‌بندی:

نوع میراگر	سیال ویسکوز	وسیکوالاستیک	جاری شونده فلزی	اصطکاکی
شکل شماتیک				
رفتار هیسترتیک ایده آل				
مدل فیزیکی ایده آل			وجود ندارد	
محاسن	موثر در جابجایی‌های کوچک، نیروی بازگرداننده حداقل، ساده سازی مدل میراگر برای میراگرهای خطی، عدم وابستگی خصوصیات به فرکانس بارگذاری و دما،	موثر در جابجایی‌های کوچک، وجود نیروی بازگرداننده، رفتار خطی و مدلسازی ساده میراگر، رفتار پایدار، جابجایی ماندگار کوچک	رفتار چرخه‌ای پایدار، قابلیت اعتماد در دراز مدت، عدم حساسیت به دمای بهره برداری، آشنا بودن رفتار ماده برای مهندسین	استهلاک انرژی بالا در هر چرخه، عدم حساسیت به دمای بهره‌برداری
معایب	احتمال نشت سیال (مشکل قابلیت اعتماد)	ظرفیت تغییرشکل محدود، خصوصیات وابسته به فرکانس بارگذاری و دما، احتمال جداشدگی و پارگی ماده ویسکوالاستیک (مشکل قابلیت اعتماد)	آسیب دیدگی میراگر پس از زلزله (احتمال نیاز به تعویض)، رفتار غیرخطی (احتمال نیاز به تحلیل غیرخطی)	امکان تغییر شرایط سطح لغزش در طول زمان (مشکل قابلیت اعتماد)، رفتار شدیداً غیرخطی، امکان تحریک مدهای بالاتر و نیاز به تحلیل های غیرخطی، جابجایی ماندگار در صورت عدم تامین مکانیزم بازگرداننده

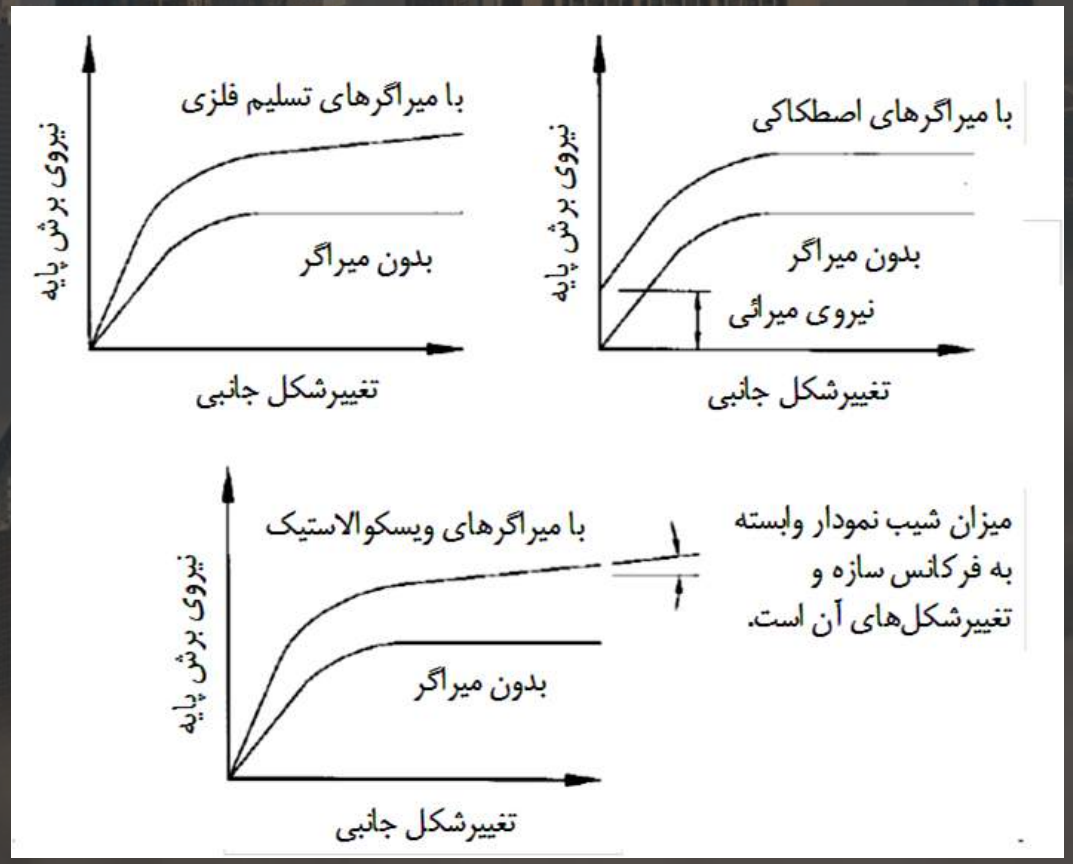
ضوابط عمومی:

اجزاء و قطعات ساختمانی باید برای نیرو و تغییر شکل محاسباتی کنترل شده و ضوابط حدی مقاومت و تغییر شکل را برآورده نمایند. این مسئله در سازه‌های دارای ابزارهای اتلاف انرژی نیز صادق است. در این دسته از سازه‌ها، اجزائی که در ترکیب با ابزارهای اتلاف انرژی قرار می‌گیرند، باعث ایجاد قاب نگهدارندهٔ ابزارهای اتلاف انرژی و نقاط اتصال خواهند شد.



اصلی‌ترین دلیل استفاده از ابزارهای اتلاف انرژی در قابهای ساختمانی کاهش تغییر مکان و خرابی در قاب است که این کاهش، با افزایش میزان سختی قاب یا افزودن میرایی (قدرت استهلاک انرژی) به آن میسر می‌شود. از جمله ابزارهای اتلاف انرژی که دارای مشخصات سختی و میرایی بطور همزمان هستند، می‌توان به میراگرهای تسلیم فلزی، اصطکاکی و ویسکو - الاستیک اشاره نمود. در طرف دیگر، میراگرهای ویسکوز که اغلب دارای مشخصه‌های میرایی بوده و از سختی قابل توجهی برخوردار نیستند نیز، توان قابل توجهی در بالا بردن قدرت استهلاک انرژی قاب خواهند داشت.

در شکل زیر، بطور شماتیک تأثیر هر یک از انواع میراگرها بر پاسخ نیرو - تغییر مکان یک ساختمان نشان داده شده است. آنچه از این شکل بر می‌آید، مؤید این مطلب است که افزودن میراگرهای ویسکوز، رابطهٔ نیرو - تغییر مکان را تغییر نمی‌دهد. به عبارت دیگر، منحنی پاسخ برای شرایط با و بدون میراگر از نظر کلی مشابه است.

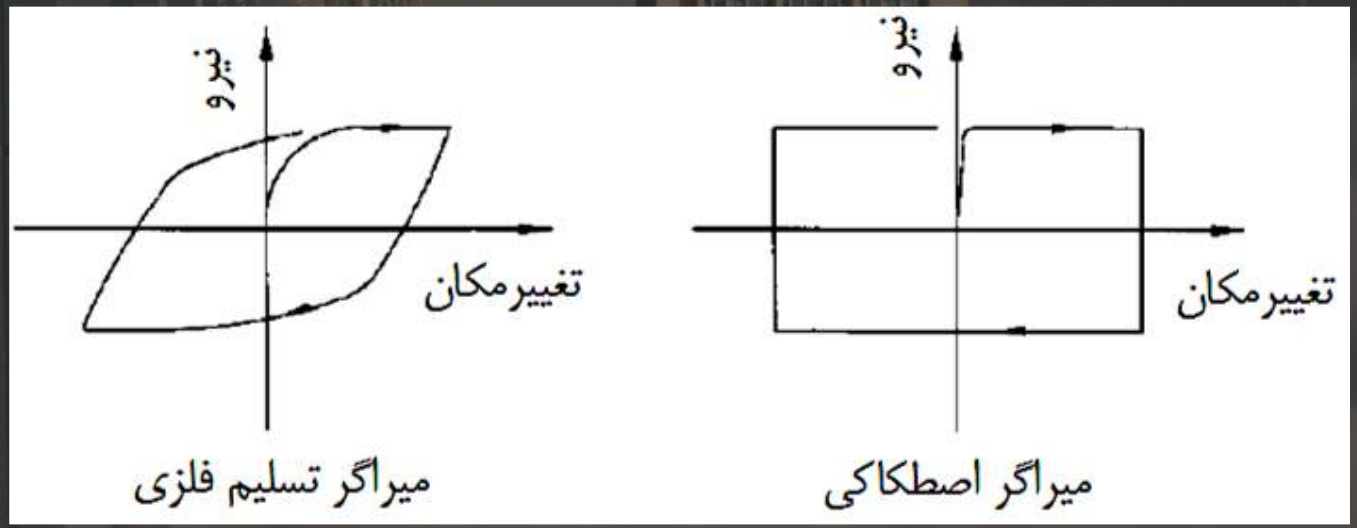


رابطهٔ نیرو - تغییر مکان برای انواع مختلف میراگرها ممکن است به شرایط محیطی (شامل باد، خستگی و دمای بهره‌برداری) و همچنین به شدت بار زلزله، تغییر شکل‌های ماندگار و تغییر شکل‌های دو جهته وابسته باشد. این وابستگی‌ها باید با توجه به مقادیر حدی، که مرتبط با مشخصات مصالح بکار رفته در میراگر است، در تحلیل و طراحی لرزه‌ای مدل در نظر گرفته شود. در نظر گرفتن سختی میراگرها و تکیه‌گاه‌های نگهدارندهٔ آن‌ها در مدل ریاضی از اهمیت بالایی برخوردار است؛ به نحوی‌که اگر از سختی تکیه‌گاه نگهدارندهٔ میراگر صرف‌نظر شود، ممکن است سختی جانبی ساختمان دست پایین تخمین زده شده و در نهایت، تغییر مکان هدف به‌صورت دست بالا محاسبه شود. در مقابل، اگر میراگر روی یک تکیه‌گاه نگهدارندهٔ انعطاف‌پذیر قرار گرفته باشد و این میراگر به‌صورت صلب مدل شود، میزان تأثیر میراگر در رفتار پاسخ دست بالا بوده و به نتایج غیر محافظه‌کارانه منجر خواهد شد.

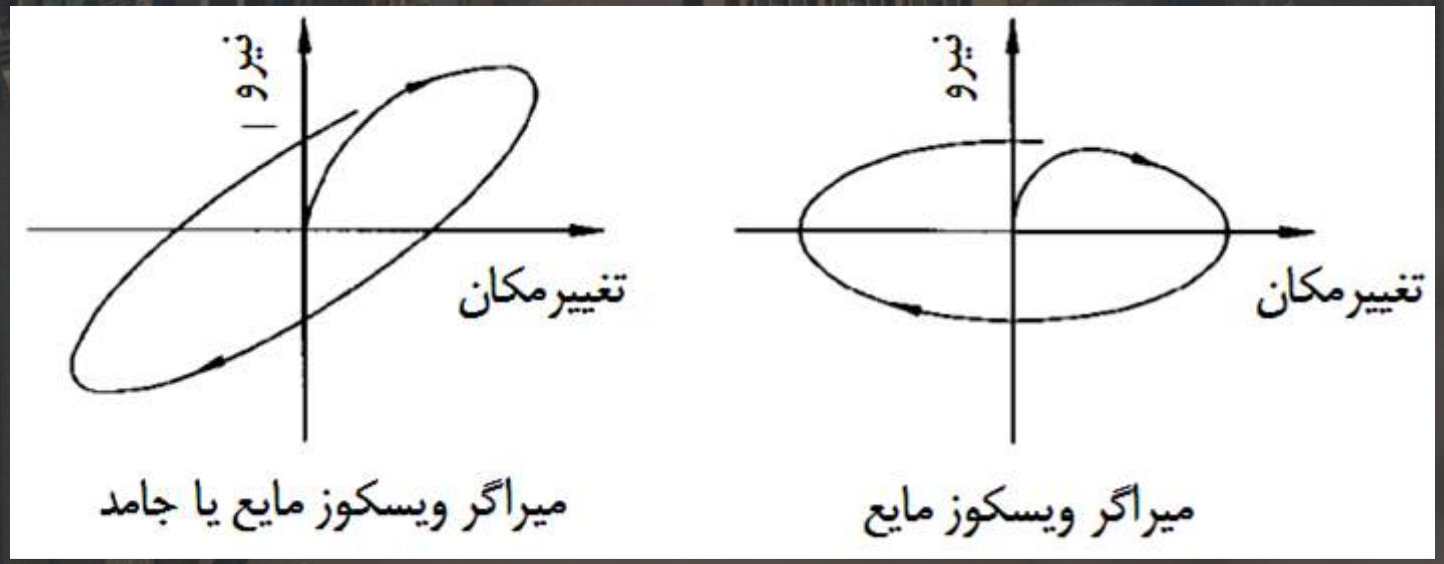
بکارگیری ابزارهای اتلاف انرژی در ساختمان‌ها، ضمن اینکه باید توجیه علمی و فنی داشته باشد، باید بطور دقیق مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان تأثیر حضور این ابزارها در رفتار ساختمان بررسی شده باشد. به همین دلیل، لازم است در ابتدا نسبت به انجام یک تحلیل یا طرح اولیه از ساختمان در شرایط تجهیز با ابزارهای اتلاف انرژی اقدام شود. این تحلیل، با توجه به نوع رفتار ابزارهای اتلاف انرژی و نیاز ساختمان از حیث طراحی یا بهسازی، می‌تواند به روشهای خطی و غیرخطی (تحلیل طیف پاسخ یا تاریخچهٔ زمانی) انجام شود.

تقسیم‌بندی انواع میراگر از نظر رفتار:

میراگرها را می‌توان به سه دستهٔ میراگرهای وابسته به تغییر مکان، میراگرهای وابسته به سرعت و سایر میراگرها تقسیم نمود. میراگرهای Metallic-yielding و میراگرهای اصطکاکی در ردهٔ میراگرهای وابسته به تغییر مکان قرار می‌گیرند. شکل زیر، نمایی از رابطهٔ نیرو - تغییر مکان برای این میراگرها ارائه شده‌است.



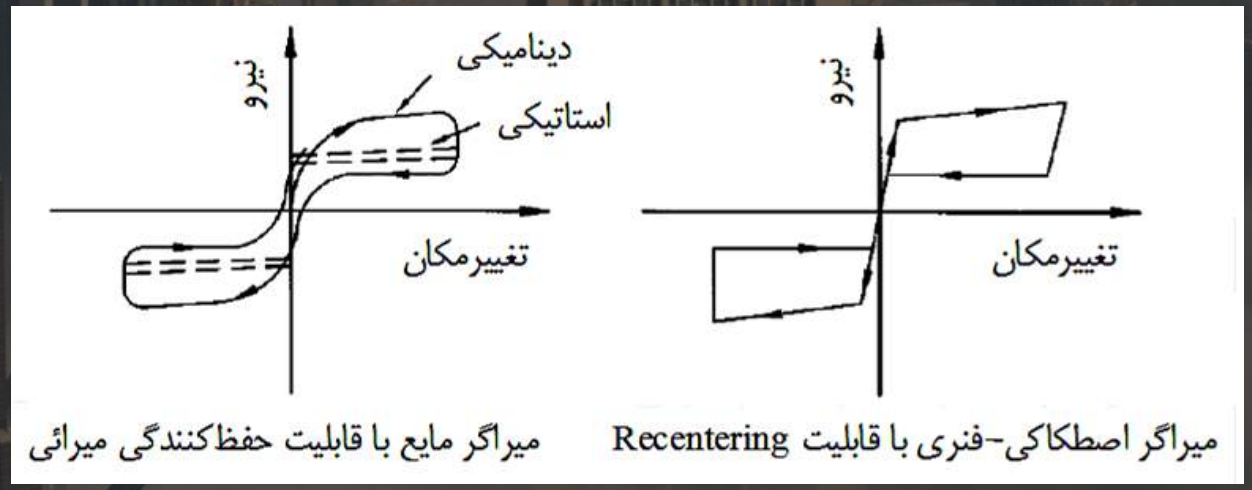
میراگرهای ویسکوالاستیک جامد و میراگرهای ویسکوز که با فشار سیال در یک پیستون کار می‌کنند را می‌توان در ردهٔ میراگرهای وابسته به سرعت دسته‌بندی کرد. در شکل زیر، نمودار ایده‌آلی از پاسخ چرخه‌ای بار - تغییر مکان این میراگرها ارائه شده است.



میراگر ویسکوز مایع یا جامد

میراگر ویسکوز مایع

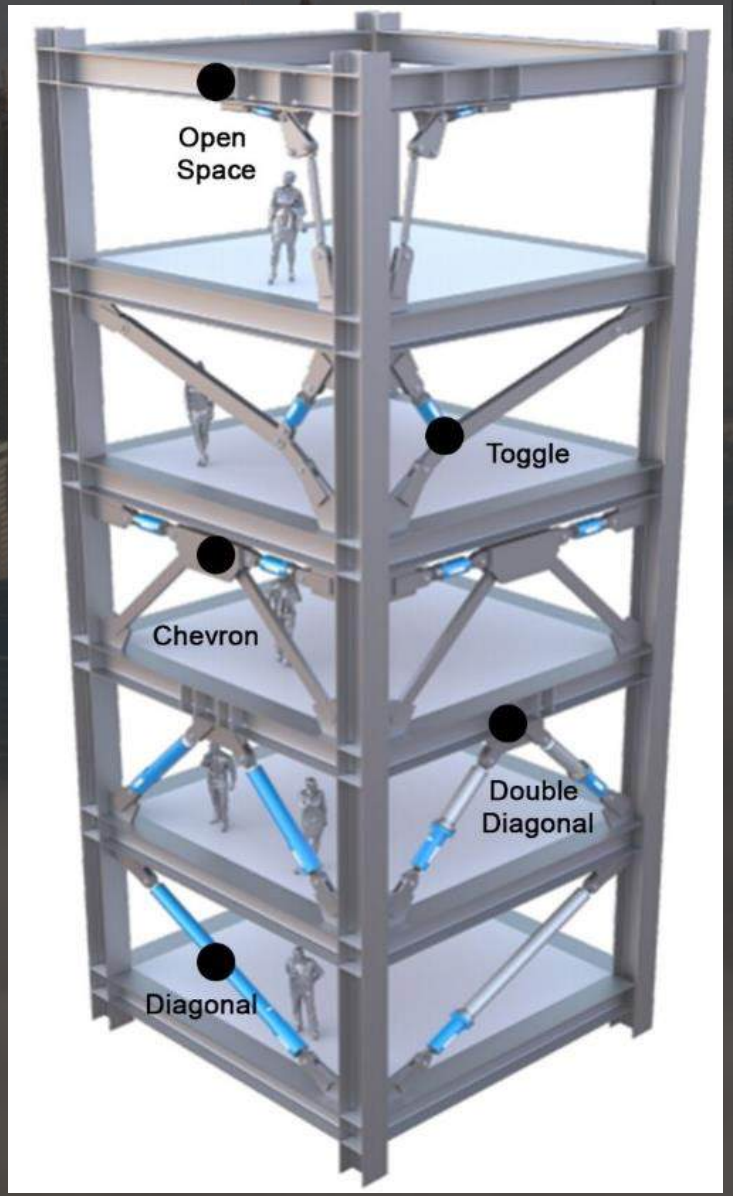
سایر میراگرها دارای مشخصه‌هایی هستند که نمی‌توان آن‌ها را در ردهٔ میراگرهای ذکر شده در شکل‌های بالا دانست. از این نمونه می‌توان به میراگرهای shape-memory alloy، friction-spring assemblies with recentering capability و fluid resorting force-damping devices اشاره نمود. در شکل زیر، نمایی از رفتار بار-تغییر مکان این میراگرها ارائه شده است:



میراگر مایع با قابلیت حفظ‌کنندگی میرائی میراگر اصطکاکی-فنری با قابلیت Recentering

لازم به ذکر است که میراگرهای shape-memory alloyمی‌توانند با اعمال تغییرات ساختاری، منحنی‌های پاسخ چرخه‌ای مشابه آنچه در میراگر اصطکاکی یا میراگر فلزی تسلیم‌شونده ارائه شده است، از خود نشان دهند.

نحوهٔ چینش میراگرها:



نحوهٔ چینش

منابع داخلی جهت مطالعهٔ بیشتر:

1: نشریهٔ 766 (ویرایش 1397): دستورالعمل استفاده از میراگرها در طراحی و بهسازی ساختمان‌ها.

2: راهنمای طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های مجهز به میراگرها و جداگرهای لرزه‌ای (ویرایش 1401).

3: نشریهٔ 360 (ویرایش 1392 – تجدید نظر اول): دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود.

4: نشریهٔ 523 (ویرایش 1389): راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها.

5: نشریهٔ 524 (ویرایش 1389): راهنمای روش‌ها و شیوه‌های بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود و جزئیات اجرایی.

منابع خارجی جهت مطالعهٔ بیشتر:

1: Introduction to Structural Motion Control - Jerome J. Connor - 2016.

2: Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering - T.T. Soong, M.C. Costantinou - 1994.

3: ASCE 7-22: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures - 2022.

4: FEMA 451B: NEHRP Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures: Training and Instructional Materials - 2007.

5: FEMA 450: NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures - 2003

منابع خارجی جهت مطالعهٔ بیشتر:

6: ASCE 41-23: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings - 2023.

7: FEMA P-2082-1: NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures - 2020.