

کنترل ارتعاشات سازه‌های بلندمرتبه با استفاده از سیستم جرم میراگر متوازن

دکتر محمدرضا بمانیان، دانشیار گروه معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
مهندس هانیه اخوت، کارشناسی ارشد رشته معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
مهندس محمدرضا اخوت، دانشجوی دوره دکتری رشته عمران، دانشگاه بین المللی توکیو، ژاپن

یکی از چالش‌های همیشگی در مهندسی یافتن ابزاری جدید و متمرکز برای حفاظت سازه‌ها و تجهیزات در برابر اثرات مخرب نیروهای طبیعی می‌باشد. در این بین زلزله یکی از رخدادهایی است که با وجود تحقیقات زیادی که در مورد آن صورت گرفته است، هنوز امکان پیش بینی زمان و مکان دقیق آن وجود ندارد. بنابراین به نظر می‌رسد، روش اصلی مقابله با زلزله ایمن سازی سازه‌ها در برابر آن است. یکی از روش‌هایی که در چند دهه اخیر موضوع مطالعات بسیاری بوده، ایده کنترل سازه هاست که برای افزایش کارایی و ایمنی آنها در برابر خطرات طبیعی به کار می‌رود. سیستم‌های جذب انرژی غیرفعال سازه‌ها، در سال‌های اخیر به طور وسیعی در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به طور کلی، این سیستم‌ها شامل وسایل و مصالحی می‌شوند که میرایی، سختی و مقاومت سازه را افزایش داده و می‌توانند به منظور کاهش خطرات طبیعی محتمل و نیز مقاوم سازی سازه‌های جدید یا ساخته شده، به کار روند. سیستم جرم میراگر متوازن یکی از راه‌حل‌های نسبتاً نوینی است که اخیراً در کشورهای پیشرفته جهت مقابله با نیروهای جانبی باد و زلزله در سازه‌های بلندمرتبه مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در حالی که هنوز در ایران تأکید خاصی برای شناخت و استفاده از این سیستم نشده است؛ این مقاله با هدف معرفی و شناخت این سیستم، بررسی نحوه عملکرد آن در کشورهای زلزله خیز و میزان کارایی مثبت این سیستم در برابر نیروهای باد و زلزله تنظیم گشته است و در نهایت مزایای استفاده از این سیستم در سازه‌های بلندمرتبه تأکید می‌گردد.

واژه‌های کلیدی:

سازه‌های بلندمرتبه، نیروهای جانبی، سیستم جرم میراگر، کنترل ارتعاشات سازه

سیستم های جرم میراگر متوازن (میراگر جرمی تنظیم شده) از جمله ابزارهای بکار رفته در کنترل لرزه در سازه ها می باشد که در سالهای اخیر، در بسیاری از پلها و سازه های بلند که اغلب از شکل پذیری بالایی برخوردارند، بکار رفته است. سازه های بلند تحت اثر نوسانهای ناشی از بار باد و زلزله قرار می گیرند. مطالعات نشان می دهد که این سازه ها معمولاً در فرکانسهای طبیعی خود ارتعاش می کنند که در مواقعی که فرکانسهای انتقالی و پیچشی نزدیک باشند، توسط حرکت پیچشی نیز تشدید می گردند (Chang, 1980). در سازه های بلند که خود دارای پیوند ارتعاشی بزرگی هستند، تغییر مکان جانبی در بالاترین طبقه یکی از پارامترهای مهم طراحی بوده که همواره سعی بر نگه داشتن آن در سطحی معقول می باشد. برجها و سازه هایی مانند برجهای مخابراتی، دکلهای بلند، برجهای بلند، فانوسهای دریایی و برجهای مراقبت فرودگاه ها نیز از سازه هایی هستند که در آنها، عموماً جرم اصلی در بالای سازه به صورت پاندول وارونه متمرکز بوده و لذا، تغییر مکان رأس از نظر کاربردی و عدم ایجاد اختلال در ارسال و دریافت پیامهای مخابراتی و همچنین راحتی استفاده کنندگان دارای اهمیت می باشد. میراگرهای دینامیکی، سیستم های ایجاد میرایی در سازه ها هستند که در دو دهه اخیر تحقیقات فراوانی بصورت تئوریک و تجربی بر نحوه عملکرد آنها انجام شده و در سازه های زیادی با موفقیت اجرا شده اند. جرم میراگر متوازن (TMD) و مایع میراگر متوازن (TLTD) در این گروه قرار می گیرند. پژوهش ذیل به معرفی و بررسی نحوه عملکرد سیستم جرم میراگر متوازن در سازه های بلند مرتبه می پردازد.

معرفی سیستم جرم میراگر متوازن

سیستم کنترلی TMD یک میراگر غیرفعال نسبتاً جدید بوده که مطالعات و کاربردهای آن در سالهای اخیر صورت گرفته است. این سیستم ابزاری است شامل یک جرم، یک فنر و یک میراگر که برای کاهش پاسخ دینامیکی سازه به آن نصب می شود و عملکرد آن، اساساً بر مبنای استهلاک انرژی ارتعاشی سازه بصورت حرکت نوسانی جرم میراگر می باشد؛ بدین ترتیب که فرکانس TMD متناسب با فرکانس یکی از مودهای غالب سازه ای (معمولاً مود اول) تنظیم می گردد. بنابراین زمانیکه این فرکانس تحریک می شود، حرکت TMD در فازی خارج از حرکت سازه تشدید شده و انرژی از طریق نیروی اینرسی ای که میراگر به سازه وارد می کند، مستهلک می شود.

پیشینه تاریخی

مفهوم TMD اولین بار توسط فرام (۱) در سال ۱۹۰۹ (Frahm, 1909) برای کاهش حرکات قائم و نوسان بدنه کشتیها مطرح شد. کمی بعد در سال ۱۹۲۸ اورماندروید (۲) و دن هارتوگ (۳) نظریه ای در مورد TMD ارائه دادند که در سال ۱۹۴۰ به بحثی مفصل در مورد تنظیم بهینه پارامترهای میرایی در کتاب دن هارتوگ در زمینه ارتعاشات مکانیکی انجامید (Connor, 2001) تئوری اولیه فقط برای سیستم های نامیرایی یک درجه آزادی که تحت تأثیر یک تحریک سینوسی قرار دارند، قابل کاربرد بود. محققین زیادی سعی کردند این تئوری را به سیستم های میرایی یک درجه آزادی بسط دهند. مهمترین تلاشها توسط راندال (۴) و همکارانش در ۱۹۸۱ (Randall, 1981) و واربرتون (۵) در سالهای ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۲ (Warburton, 1982) صورت گرفت.

سپس این مطالعات برای سیستم های چند درجه آزادی ادامه یافت. محققین زیادی از جمله کاواگوچی (۶) و همکاران (Kawaguchi et al, 1992)، لین (۷) و همکاران (Lin et al, 1995) و بسیاری از محققین دیگر به بررسی تأثیر جرم میراگر متوازن در پاسخ دینامیکی سیستم های چند درجه آزادی پرداختند. برخی از پژوهشگران تلاش خود را به یافتن پارامترهای بهینه جرم میراگر متوازن برای این سیستمها معطوف ساختند که از آن بین می توان به تسای (۸) و لین (Tsai, Lin, 1993)، فوجینو (۹) و آبه (Fujino, Abe, 1993)، رانا (۱۰) و سونگ (Rana, Soong, 1998) (۱۲) و سادک (۱۳) و همکاران (Sadek et al, 1997) اشاره کرد. همچنین مطالعات زیادی با موضوع بررسی تأثیر عوامل مختلف بر روی عملکرد جرم میراگر متوازن صورت گرفته است (McNamara, 1977).

عملکرد جرم میراگر متوازن در سازه های بلند مرتبه نتیجه برخی از پژوهشها نشان می دهد که عملکرد جرم میراگر متوازن در برابر تحریک زلزله که محدوده فرکانسی وسیعتری را نسبت به باد می پوشاند، به مشخصات زلزله بستگی زیادی دارد (Connor, 2001) تعدادی از محققین معتقدند که جرم میراگر متوازن تنها زمانی در کاهش پاسخ زلزله موثر است که زلزله وارد بر سازه دارای محدوده فرکانسی کوچک و مدت زمان طولانی باشد (Pinkaw et al, 2003). به عبارت دیگر، از آنجا که پهنای باند فرکانسی نوسانات لرزه ای پهن تر از حالت باد بوده و بعلاوه در فرکانسهای بالاتر نیز ارتعاشات قویتر است لذا مودهای بالاتر نیز تحریک می شوند و در نتیجه در نظر گرفتن تنها مود غالب ارتعاشی کافی نخواهد بود (زهرایی، ۱۳۸۵) با توجه به عدم قطعیت موجود در پیش بینی زمین لرزه و همچنین مشخصات دینامیکی سازه مثل فرکانسهای طبیعی و نسبت استهلاک مودهای مختلف ارتعاشی، مفیدتر آن است که از تعداد میراگرهای بیشتر استفاده شود به نحوی که این میراگرها دارای فرکانس ارتعاشی با اندک اختلافی نسبت به هم باشند تا بتوان محدوده بیشتری از فرکانسها را پوشش داد که به این گونه سیستمها، میراگرهای چندگانه (۱۴) یا MTMD اطلاق می شود. (Jangid, 1999) در این حالت حساسیت سیستم کنترلی به پارامترهایی مثل تحریک ورودی کاهش می یابد. به منظور بهبود عملکرد TMD می توان از مواد ویسکوالاستیک در اتصال جرم آن به سازه اصلی بهره برد تا پاسخ لرزه ای سازه با استهلاک انرژی به روشهای دیگر نیز صورت بگیرد. (زهرایی، ۱۳۸۵). یکی دیگر از مشکلات TMD آن است که نقطه اوج اول در پاسخ ارتعاشی را به سادگی نمی توان کاهش داد؛ چراکه TMD بصورت غیرفعال با فرکانس سازه اصلی تنظیم شده و به خاطر ارتعاشی با اختلاف فاز باعث کاهش لرزه می شود. از این رو، در لحظات اولیه وقوع زمین لرزه که اغلب دارای نوسانات قوی لرزه ای هم هستند، عملکرد TMD چندان موثر نیست. برای حل این مشکل نیز می توان از کنترل فعال یا نیمه فعال استفاده نمود. (زهرایی، ۱۳۸۵) با وجود اینکه هنوز یک روال متعارف و یک استاندارد مشخص برای طراحی یک سیستم میراگر در یک سازه وجود ندارد، این سیستم به سرعت به یک جزء متعارف در سازه های بلند برای کنترل ارتعاشات ناشی از باد تبدیل شده و عملکرد آن نیز رضایتبخش ارزیابی شده است. در جدول زیر تعدادی از ساختمانهایی که TMD در آنها مورد استفاده قرار گرفته است، نام برده شده اند.

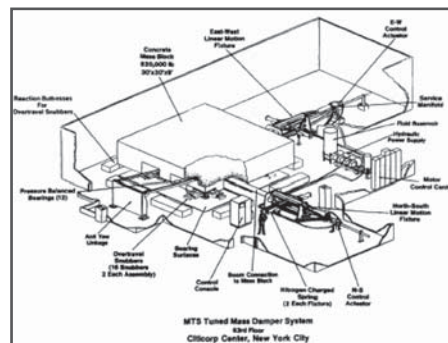
ملاحظات عملی جرم میراگر متوازن

بعضی از فاکتورهایی که انتخاب سیستم های کنترل لرزه برجه ها را تحت تاثیر قرار می دهند عبارتند از: کارایی، اندازه، هزینه ساخت، هزینه عملیات، هزینه نگهداری و تعمیرات و امنیت. در طراحی سیستم میراگر جرمی، مقدار کاهش پاسخ دینامیکی که به طور اقتصادی قابل دستیابی می باشد، در طراحیهای متعددی مورد توجه قرار می گیرد. اولین عامل در طراحی اقتصادی، مقدار جرم اضافی می باشد. این جرم حدود ۱ الی ۵ درصد جرم ساختمان می باشد که معمولاً در بالای سازه قرار می گیرد. جرمهای بزرگتر از ۴۰۰ تن نیز در این شرایط غیر متعارف نیستند. جرم میراگر معمولاً از فلز یا بتن ساخته می شود و TMD باید در فضای مشخص شده برای عملیات قرار گیرد. مخازن ذخیره آب که از اجزاء اجباری تأسیسات ساختمانی می باشند می توانند جایگزین خوبی برای این جرمها باشند که در این صورت در فضا و تجهیزات تقویتی اضافی صرفه جویی قابل ملاحظه ای می شود (Kwok, Samali, 1995).

بررسی انواع مختلف جرم میراگر متوازن

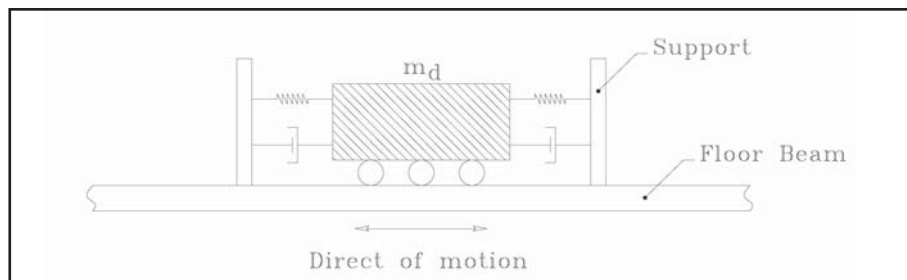
در شکل ۱ شکلی شماتیک از جزئیات یک جرم میراگر متوازن که در سال ۱۹۷۸ در ساختمان سیتی کورپ سنتر مورد استفاده قرار گرفته نشان داده شده است. این TMD برای کاهش پاسخ ساختمان در برابر باد تعبیه شده و با جرمی حدود ۴۰۰ تن، در عمل کاهش تا حدود ۴۰٪ را در پاسخ سیستم سازه ای موجب شده است. این جرم میراگر متوازن در هر دو جهت عمل می کند و بسته به اینکه تحریک خروجی در کدام جهت باشد، در آن جهت حرکت کرده و باعث کاهش پاسخ می گردد (Kwok, Samali, 1995). به این نوع TMD، میراگر انتقالی گفته می شود که ترکیب ساده آن در شکل ۲ نشان داده شده است. در این حالت جرم، بر

شکل ۱: سیستم جرم میراگر متوازن برج سیتی کورپ



نام و نوع سازه	ارتفاع سازه (m)	شهر / کشور	تعداد میراگرها	تاریخ نصب	اطلاعات دیگر (فرکانس طبیعی و جرم میراگر)
آنتن تلویزیونی (CN Tower)	۵۵۳	تورنتو/ کانادا	۱	۱۹۷۳	۲*۲۰ ton
ساختمان John Hancock	۲۴۴	بوستون/ آمریکا	۲	۱۹۷۷	۲*۳۰۰ ton , ۰.۱۴ Hz
آسمانخراش Citicorp Center	۲۷۸	نیویورک/ آمریکا	۱	۱۹۷۸	۳۷۳ ton , ۰.۱۶ Hz
برج سیدنی	۳۰۵	سیدنی/ استرالیا	۱	۱۹۸۱	۲۲۰ ton , ۰.۵ Hz
al Khobar (دو دودکش)	۱۲۰	عربستان سعودی	۱	۱۹۸۲	۷ ton , ۰.۴۴ Hz
Ruwais (دودکش)	-	ابوظبی/ امارات متحده عربی	۱	۱۹۸۲	۱۰ ton , ۰.۴۹ Hz
Deutsche Bundespost (برج خنک‌کننده)	۲۷۸	نورنبرگ/ آلمان	۱	۱۹۸۲	۱.۵ ton , ۰.۶۷ Hz
دودکش کارخانه سیمان یانبو	۸۱	عربستان سعودی	۱	۱۹۸۴	۱۰ ton , ۰.۴۹ Hz
ژنراتور بادی Hydro-Quebec	-	کانادا	۱	۱۹۸۵	۱۸ ton , ۰.۷-۱.۲ Hz
برج بندر چیبا	۱۲۵	چیبا/ ژاپن	۲	۱۹۸۶	۱۵ و ۱۰ ton , ۰.۴۳ Hz
پل کابلی آراتسو	-	ژاپن	۱	۱۹۸۷	-
پل کابلی خلیج یوکوهاما	-	ژاپن	۱	۱۹۸۸	-
نیروگاه حرارتی بن قاسم	۷۰	پاکستان	۱	۱۹۸۸	۴.۵ ton , ۰.۹۹ Hz
دودکش Twest Rutile Plant	۴۳	استرالیا	۱	۱۹۸۹	۰.۵ ton , ۰.۹۲ Hz
برج فاکوکا (Fakuoka)	۱۵۱	فاکوکا/ ژاپن	۲	۱۹۸۹	۳۰ و ۲۵ ton , ۰.۳۳-۰.۳۱ Hz
آسمانخراش هیگاشیاما (Higashiyama)	۱۳۴	ناگویا/ ژاپن	۱	۱۹۸۹	۲۰ ton , ۰.۴۸-۰.۵۴ Hz
پل کابلی باناگور (Bannaguru)	-	ژاپن	۱	۱۹۹۰	-
برج کریستال	۱۵۷	اوساکا/ ژاپن	۲	۱۹۹۰	۳۶۰ و ۱۸۰ ton , ۰.۲۴-۰.۲۸ Hz
Huis Ten Bosch Domtoren	-	ناگاساکی/ ژاپن	۱	۱۹۹۰	۷.۸ ton , ۰.۶۵-۰.۶۷ Hz
آسمانخراش Hibikiyokuchi	۱۳۵	ژاپن	۱	۱۹۹۱	-
دودکش HKW	۱۲۰	فرانکفورت/ آلمان	۱	۱۹۹۲	۱۰ ton , ۰.۸۶ Hz
دودکش BASF	۱۰۰	بلژیک	۱	۱۹۹۲	۸.۵ ton , ۰.۳۴ Hz
نیروگاه سیمنس	۷۰	انگلستان	۱	۱۹۹۲	۷ ton , ۰.۸۸ Hz
P&G جزیره روکو	۱۱۷	کوبه/ ژاپن	۱	۱۹۹۳	۲۷۰ ton , ۰.۳۳-۰.۶۲ Hz
برج Chifley	۲۰۹	سیدنی/ استرالیا	۱	۱۹۹۳	۴۰۰ ton
دودکش ال تویه (Al Taweeiah)	۷۰	ابوظبی/ امارات متحده عربی	۱	۱۹۹۳	۱.۳۵ ton , ۱.۴۴ Hz
برج آکیتا	۱۱۲	آکیتا/ ژاپن	۱	۱۹۹۴	۰.۴۱ Hz

روی غلطک هایی که حرکت نسبت به کف را در یک جهت ممکن می سازند، قرار می گیرند. فنرها که می توانند از نوع مارپیچ یا فنرهای بادی (۱۵) باشند و کمک فنرها (۱۶) بین جرم و دیواره های تکیه گاهی که نیروی حاصل از حرکت میراگر را به سازه منتقل می کنند، نهاده می شوند و سپس این سیستم بر روی سازه (ترجیحاً یکی از تیرهای کف که جهت تحمل وزن و حرکات میراگر طرح شده باشد) نصب می شود. در صورتی که میراگر مانند شکل ۱ دو جهته باشد، عیناً همین سیستم در جهت دیگر نیز برقرار می گردد. میراگرهایی که در برج جان هنکاک (۱۷) در بوستون، برج CN در تورنتو و برج بندر چیبیا (۱۸) در ژاپن استفاده شده اند از این نوع هستند (Connor, 2001)

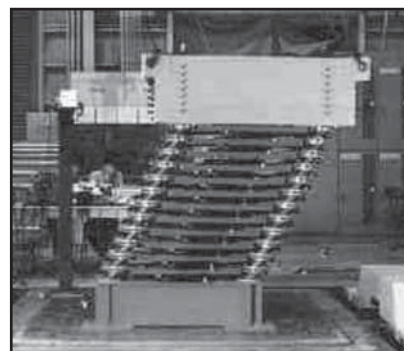


▲ شکل ۲: نمای شماتیک یک جرم میراگر متوازن انتقالی

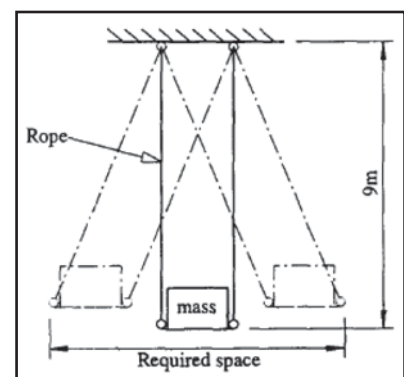
اولین TMDها از مکانیسم های بسیار پیچیده ای به عنوان نشیمنگاه و عناصر میراگر بهره می بردند که منجر به جرم، حجم و هزینه زیاد سیستم می شد، به نحوی که طرح سازه برای تحمل وزن میراگر و همچنین یافتن فضای مناسب برای نصب آن خود به مشکلی بزرگ تبدیل شده بود. برای حل این مشکل، طرحهای جدیدی پیشنهاد شدند. میراگر پیشنهادی از نشیمنگاه های پلاستیکی الاستومری چند لایه که به صورت فنرهای برشی کار می کنند و نیز ترکیبات پلاستیکی چسبنده (BRC) (۱۹) به عنوان میراگر و بسکوالاستیک، بهره می برد، (شکل ۳) در این حالت میراگر فضای کمی احتیاج داشته و به کنترل خاصی نیاز ندارد، در چند جهت کار می کند و به راحتی نصب و اصلاح می گردد. میراگر برج هویس تن بُش (۲۰) در ناگاساکی از این نوع است (Connor, 2001). مشکل تکیه گاه جرمهای میراگری و مشکل بزرگ دیگری که چگونه به جرم TMD اجازه هماهنگی با ساختمان و نیز اجازه حرکت حتی در جابجایی های کوچک ساختمان داده شود، با استفاده از نوع پاندولی میراگر قابل رفع است. در این روش، جرم توسط کابل به سازه متصل می گردد. (شکل ۴) حرکت نسبی پاندول در کابل نیرویی ایجاد می کند که

مؤلفه افقی آن باعث کاهش حرکت جانبی کف می شود (Kwok, Samali, 1995). در شکل ۵ یک نمونه میراگر پاندولی که در ساختمان تایپه ۱۰۱ (۲۱) در تایپند نصب شده است، ملاحظه می شود. می توان دید که ترکیب بدیع و ظاهر جالب توجه میراگر، نقش سازه ای و کنترلی آن را با کارکردی معمارانه همراه کرده است. میراگر نصب شده در برج کریستال در اوساکی نیز از این نوع می باشد. (Connor, 2001)

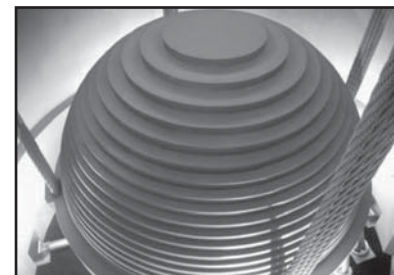
در این حالت طول پاندول باید به اندازه کافی بلند باشد تا فرکانس لازم برای میراگر تامین شود که در این صورت فضای بزرگی برای TMD لازم می باشد. یک راه حل دیگر برای اجتناب از فضای بزرگ برای TMD استفاده از پاندولهای چندمرحله ای می باشد. (شکل ۶) (Kwok, Samali, 1995). پاندولهای معکوس هم که در آنها از فنرهای مارپیچ برای تأمین پایداری و سختی لازم بکار رفته نیز مورد استفاده قرار می گیرد (شکل ۷). از آنجا که فرکانسهای طبیعی ساختمانها نسبت به تغییرات اعمالی در طراحی حساس بوده و معمولاً پیشگویی آن بدرستی ممکن نیست، فرکانس تنظیمی معمولاً بعد از ساخت سازه و با اندازه گیری فرکانسهای طبیعی سازه اصلی انجام می گیرد. اکثراً TMDهای مدل پاندولی مدرن طوری طراحی می شوند که در محل قابل تنظیم باشند. طول آویزان سیستم با قیدهای متحرک تنظیم می شود که هماهنگی بهتر با فرکانس دلخواه بدست آید. گاهی اوقات TMDهای مدل پاندولی را با افزودن فنرهای مارپیچ تقویت می کنند تا هماهنگی بهتر با سازه اصلی حاصل گردد (Kwok, Samali, 1995). نوع اصلاح شده میراگر پاندولی، میراگری است که بر روی یک سطح منحنی حرکت می کند (شکل ۸). نیروی افقی ناشی از کابل با اصطکاک بین جرم و سطح جایگزین می شود، همچنین حرکت قائم جرم نیاز به انرژی ورودی دارد. این نوع میراگر را پاندول راکر می نامند. (Connor, 2001)



▲ شکل ۳: میراگر با نشیمنگاه الاستومریک در حالت تغییر شکل یافته

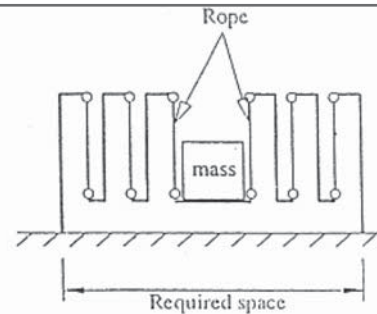


▲ شکل ۴: سیستم پاندولی برای جرم میراگر



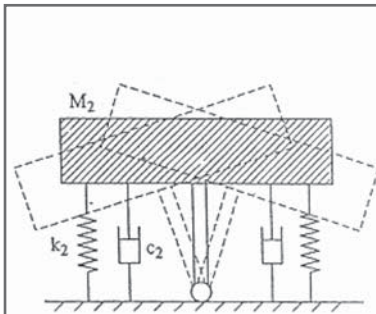
▲ شکل ۵: جرم میراگر متوازن پاندولی در ساختمان تایپه ۱۰۱ در تایپند.

شکل ۶: پاندول چند مرحله ای



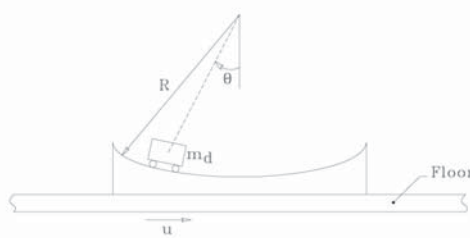
شکل ۶: پاندول چند مرحله ای

شکل ۷: پاندول معکوس

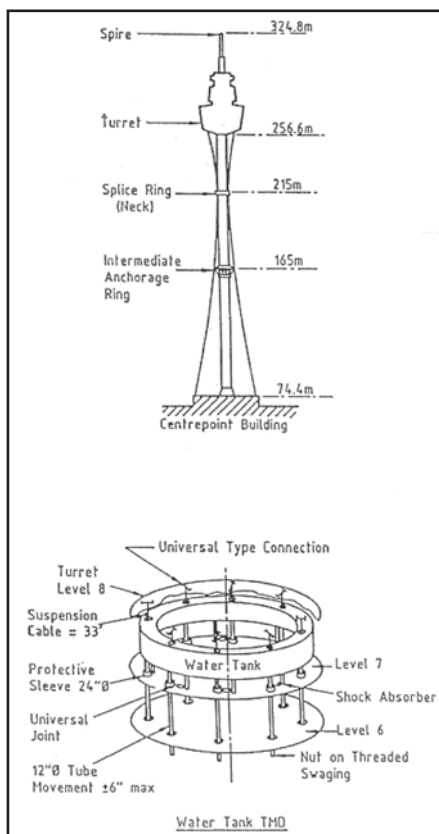


شکل ۷: پاندول معکوس

شکل ۸: پاندول راک



شکل ۹: سیستم میراگر جرمی برج سیدنی



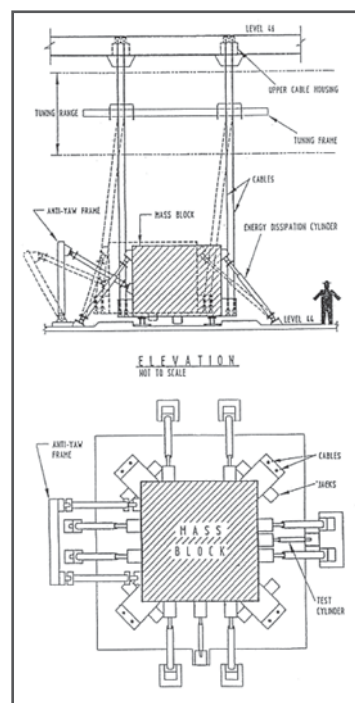
هنگامی که سیستم TMD بر روی سازه مستقر شد، کارایی و حیطة عملیات لازم برای حصول کاهش پاسخ مورد نظر معین می شود. جهت تامین مقدار میرایی بالاتر و هماهنگی خوب، جابجایی نسبی زیادی لازم می باشد که جابجایی نسبی را می توان با در نظر گرفتن میرایی بیشتر، کاهش داد. به طور کلی، جابجایی نسبی زیادی برای جرم TMD باید در نظر گرفته شده و وسایل امنیتی مانند ترمزهای مکانیکی یا سیستمهای نگهدارنده دیگری به منظور محدود کردن حرکت بیش از حد جرم باید نصب شود. ابزارهای قفل کننده مانند پینهای معمولی یا اتوماتیک باید به کار رود تا در مواقعی که جابجایی سازه یا میراگر از حد معینی تجاوز کرد، جرم را در جای خود قفل کند. (Kwok, Samali, 1995)

بررسی سازه های مجهز به سیستم جرم میراگر متوازن

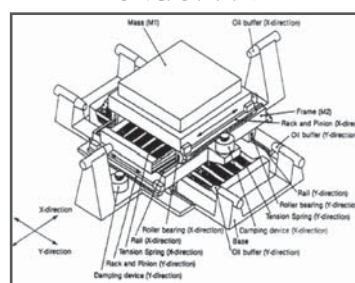
امروزه در بسیاری از دودکشها و دکلهای آنتن، جرم میراگر متوازن از نوع پاندولی نصب شده است. یکی از نمونه های معروف در این زمینه آنتن ۱۰۲ متری نصب شده بر فراز برج ۵۵۳ متری CN در تورنتوی کانادا می باشد. این میراگرها به منظور کاهش اثرات مود دوم و چهارم به هنگام ارتعاش کار گذاشته شده اند. هر میراگر در گره های مرکزی توسط سه تیر فلزی به دکل آنتن بسته شده است که اجازه حرکت در تمام جهات را به میراگر می دهند. ضربه گیرها به منظور جذب انرژی در اطراف دکل کار گذاشته شده و به مرکز گره ها بسته شده اند. (Kwok, Samali, 1995)

برج ۳۰۵ متری سیدنی که یک سازه کابلی با یک رستوران در بالای برج می باشد نیز از میراگرهای جرمی نوع پاندولی بهره می برد. تانکر حلقه ای ۱۸۰ تنی که در نزدیکی برج گردان کار گذاشته شده و معمولاً به عنوان تانکر آب و مخزن آتش نشانی مورد استفاده قرار می گیرد، به منظور جرم TMD بکار گرفته شده است (شکل ۹). انرژی بوجود آمده در حرکت نسبی بین برج و تانکر آب، توسط هشت ضربه گیر که به طور مماس با تانکر در کف قرار داده شده اند جذب می شود. جابجایی حداکثر تانکر آب به ۱۵۰ میلیمتر محدود شده است. میراگر دوم که بصورت یک رینگ فلزی بوده و جرمی برابر ۴۰ تن دارد، در زیر حد وسط سازه نگهدارنده برج نصب شده است. این میراگر برای افزایش میرایی بخصوص میرایی مود دوم (با توجه به اینکه این مود، مود اصلی احساس شده توسط انسانهاست)

در نظر گرفته شده است. نتایج اندازه گیریهای عملی انجام شده بر روی این برج نشان داده است که با نصب این میراگرها، میرایی سازه در مود دوم از ۰/۴٪ در صد به ۱/۵٪ درصد میرایی بحرانی افزایش و پاسخ سازه به بار باد حدود ۴۰٪ الی ۵۰٪ کاهش یافته است. (Kwok, Samali, 1995) برج چیپلی (۲۲) در سیدنی یک ساختمان اداری ۵۲ طبقه با اسکلت یک جرم میراگر متوازن از نوع پاندولی که در نوع خود یکی از بزرگترین میراگرها می باشد، مجهز شده است. یک بلوک مکعب به ابعاد ۴*۴ متر از آهن به وزن ۴۰۰ تن که ۲ درصد از وزن کلی ساختمان می باشد، جرم میراگر را تشکیل می دهد. این جرم توسط کابل های فلزی بصورت معلق نگهداشته شده و حرکت جانبی جرم که توسط سیلندرهای هیدرولیکی انجام می گیرد باعث استهلاک انرژی می شود. این سیلندرها در دو جهت شمال - جنوب و شرق - غرب همانند شکل ۱۰ قرار گرفته اند. حداکثر جابجایی سازه به ۹۱۰ میلی متر محدود شده است که این مقدار همچنین حداکثر مقدار جابجایی سیلندرهای می باشد. فرکانس طبیعی نوسان و میرایی برج با آزمایشهای ارتعاش آزاد که در آن سازه توسط نوسان جرم میراگر که بوسیله دو عدد از عملگرها به حرکت درآمده بود، اندازه گیری شد. در این آزمایشها میرایی سازه زیر ۰/۱٪ میرایی بحرانی محاسبه شد. به هنگام کار، TMD بسته به شدت



شکل ۱۰: سیستم میراگر جرمی برج چیپلی



شکل ۱۱: سیستم میراگر جرمی برج بندر چیپا

لرزه برج میرایی بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ میرایی بحرانی از خود نشان داد (Kwok, Samali, 1995) یک مدل TMD بصورت پاندول معکوس (شکل ۷) ، در ارتفاع ۱۰۰ متری برج ۱۳۴ متری هیگاشیما (۲۳) در ناگویای ژاپن نصب شده است. یک مکعب مستطیل به ابعاد ۲/۵ متر در ۳ متر ارتفاع که جرمی معادل ۱۹/۸ تن دارد برای میراگر در نظر گرفته شده است. اولین مود فرکانسهای طبیعی سازه برابر ۰/۴۸ و ۰/۵۴ هرتز در دو راستای عمود بر هم می باشد که فنرهای مارپیچی سختی میراگر را متناظر با این مودها تنظیم می کنند. حداکثر جابجایی جرم میراگر به ۱۵۰ میلی متر محدود شده و ضریب میرایی سیستم TMD، که توسط ضربه گیرها تامین می شود به ۱۰٪ تنظیم شده است. نتایج تحریکهای متعارف خارجی نشان داده است که میرایی ساختمان بدون میراگر تقریباً ۵/۰٪ میرایی بحرانی می باشد که این ضریب توسط میراگر جرمی به ۳٪ میرایی بحرانی افزایش می یابد. این TMD پاسخ سازه به بارهای ناشی از باد را به مقدار ۳۰٪ تا ۵۰٪ کاهش می دهد (Kwok, Samali, 1995)

در برج ۶۰ طبقه جان هنگام در بوستون ، دو سیستم TMD در فاصل ۶۷ متری از همدیگر در طبقه ۵۸ قرار گرفته اند. هر TMD از یک جرم ۳۰۰ تنی سربی که توسط جکهای هیدرواستاتیک بر روی یک صفحه فلزی که از سوراخهای موجود در آن با یک لایه نازک روغن، روغنکاری می شوند، حرکت می کند. این TMDها توسط فنرهای سختی که به ستونهای داخلی برج تکیه داده شده اند، مهار می شوند. میراگرها فقط برای حرکت در راستای شرق - غرب طراحی شده اند و می توانند برای خنثی کردن حرکت نوسانی سازه با هم حرکت کرده و یا برای حذف حرکت پیچشی در خلاف جهت هم حرکت کنند. (Kwok, Samali, 1995) کارایی این سیستم کار گذاشته شده، از نتایج عملکرد آن در اواسط دهه ۱۹۷۰ به اثبات رسیده است. (Connor, ۲۰۰۱) برج بندر چیپا در ژاپن که یک سازه اسکلت فلزی به شکل لوزی و با ارتفاع ۱۲۵ متر می باشد و به عنوان یک برج مشاهده مورد استفاده قرار می گیرد. از یک سیستم TMD مسطح همانند شکل ۱۱ استفاده می کند. این سیستم در این برج برای کاهش ارتعاشات ناشی از بار باد و زلزله بکار می رود . جرم میراگر بر روی یک سطح صاف لغزان قرار گرفته که بر روی ریلها در دو راستای عمود بر هم X و Y حرکت می کند. جرم مؤثر در راستای X برابر ۱۰ تن و در راستای Y برابر ۱۵ تن می باشد که به ترتیب برابر ۰/۹٪ و ۳/۱٪ جرم سازه در مود اول ارتعاش می باشد. حداکثر جابجایی جرم به ۱ متر محدود شده است. فنرهای مارپیچی سختی لازم برای سیستم میراگر را فراهم می کنند تا فرکانس سیستم با فرکانس طبیعی مود اول سازه که برابر ۰/۴۳ هرتز می باشد، تنظیم شود. جابجایی جرم توسط چرخ دنده ها صورت می گیرد. دستگاههای میراگر با روغن سیلیکون پر شده اند از این رو میرایی آنها قابل تنظیم می باشد. میرایی سازه با آزمایشهای لرزه که توسط روش آزادسازی کابل انجام گرفته و نیز رفتار ساختمان در زلزله های کوچک محاسبه شده است. میرایی سازه حدود ۵/۰٪ میرایی بحرانی بدون TMD محاسبه شده است که این مقدار در صورت استفاده از TMD به ۳/۷٪ میرایی بحرانی افزایش می یابد.

پاسخ سازه در طوفان با سرعت 1/38 m/s اندازه گیری شده است که در این شرایط شتاب پاسخ سازه حدود نصف پاسخ به هنگام فقدان TMD می باشد. (Kwok, Samali, 1995)

در این پژوهش عملکرد انواع مختلف جرم متوازن میراگر که در کشورهای پیشرفته جهت مقابله با نیروهای جانبی، بر روی سازه های بلندمرتبه نصب می شود، مورد بررسی قرار گرفت. علی رغم وجود پیشرفت های بسیاری که در به کارگیری سیستم های جذب انرژی غیرفعال مانند جرم میراگر متوازن که بالاخص در مقابل بارهای لرزه ای یا باد بر روی ساختمان ها و پل ها صورت گرفته، متأسفانه در صنعت ساختمان کشورمان، این روشها چندان مورد توجه قرار نگرفته اند. اهمیت مقاوم سازی ساختمان ها و پل ها به ویژه در برابر زلزله، در کشور زلزله خیزی همچون ایران، بر کسی پوشیده نیست و شاید بتوان این کم توجهی را ناشی از ویژگی محافظه کاری صنعت ساختمان ایران، عدم تمایل نسبت به به کارگیری نوین و ارتباط ضعیف آن با پژوهش های علمی روز دنیا دانست. از سوی دیگر، اخیراً احداث ساختمان های بلند علی الخصوص در شهرهای بزرگ که با مشکل کمبود فضای لازم برای ساخت مسکن مواجهند، مورد توجه قرار گرفته است. توجه به این نکته نیز حائز اهمیت می باشد که عمدتاً در این ساختمان ها از مواد و مصالحی استفاده می شود که سبک بوده و از قابلیت انعطاف پذیری بالایی برخوردارند. کمبود نسبت میرایی و میزان جذب انرژی این سازه ها موجب ایجاد دامنه ارتعاشی بزرگ حتی در زلزله های با سطح متوسط می گردد. به علاوه سرمایه گذاری نسبتاً هنگفت ساخت این سازه ها و میزان درآمد حاصل، پرداخت هزینه نه چندان گزاف استفاده از سیستم های کنترلی را توجیه می نماید. سیستم جرم متوازن یکی از ابزارهای مناسب جهت کنترل سازه های بلند که اغلب از شکل پذیری بالایی برخوردارند، می باشد. از جمله مزایای این سیستم به بازده خوب آن در برابر بارهای با شدت کم و فرکانس نزدیک به فرکانس اصلی سازه مثل بار باد و زلزله های با شدت کم اشاره کرد. از دیگر محاسن این سیستم هزینه کم ساخت، نگهداری و عملیات آن به هنگام بروز ارتعاش می باشد. با توجه به وضعیت خاص کشور ایران از لحاظ بروز زلزله، جادارد که مطالعات بیشتری پیرامون کنترل ارتعاشات سازه ها و به خصوص سیستم جرم متوازن میراگر صورت گیرد.

for seismic applications, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26, 617-635
 12-Mcnamara, R.J., Tuned mass dampers for building, Journal of the Structural Divisions, ASCE, 1977, 103(ST9), 1785-1798
 13-Connor, J.J., An Introduction to Structural Motion Control, M.I.T University Press, 2001
 14-Pinkaew, T., Lukunaprasit, P., Chatopote, P., Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures, Journal of Engineering Structures, 2003, 25, 39-46
 15-Jangid, R.S., Optimum multiple tuned mass dampers for base-excited undamped system, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28, 1041-1049
 16-Kwok, K.C.S., Samali, B., Performance of tuned mass damper under wind loads, Journal of Engineering Structures, 1995, 17(9), 655-667

7-Lin, C.C., Ueng, J.M., Wang, J.F., Vibration control identification of MDOF Structures with tuned mass damper, Proceeding of international Conference on Structural Dynamics, Noise and Control, Hong Kong, 1995, 2, 887-894
 8-Tsai, K.C., Lin, G.C. Optimum tuned mass dampers for minimizing steady state response of support excited and damped systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1993, 22, 957-973
 9-Fujino, Y., Abe, M., Design formulas for tuned mass dampers based on a perturbation technique, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1993, 22, 833-854
 10-Rana, R., Soong, T.T., Parametric study and simplified design of TMDs, J. of Engineering Structures, 1998, 20, 193
 11-Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., and Chang R.M., A method of estimating the parameters of tuned mass dampers

فهرست منابع

۱- زهرایی، م، کنترل ارتعاشات سازه ها، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۵
 2-Chang, J. CH, Soong, T.T., Structural control using active tuned mass dampers, Journal of Engineering Mechanic Divisions, ASCE, 1980, 106(EM6), 1091-1098
 3-Frahm, H., Device for Damping Vibrations of Bodies, U.S. Patent, 1909
 4-Randhall, S.E., Halsted, D.M., Taylor, D.L., Optimum vibration absorbers for linear damped system, ASME, 1981, 103, 908-913
 5-Warburton, G.B., Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1982, 10, 381-401
 6-Kawaguchi, A., Taramura, A., Omote, Y., Time history response of a tall building with a tuned mass damper under wind force, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41-44, 1949-1990.

پی نوشت

1-Frahm
 13-Sladek
 2-Ormondroyd
 14-Multiple Tuned Mass Damper
 3-Den Hartog
 15-Pneumatic
 4-Randall
 16-Dash-pots
 5-Warburton
 17-John Hancock tower
 6-Kawaguchi
 18-Chiba port tower
 7-Lin
 19-Bitumen Rubber Compound
 8-Tsai
 20-Huis Ten Bosch
 9-Fujino
 21-Taipei 101
 10-Abe
 22-Chiffley
 11-Rana
 23-Higashiyama
 12-Soong