بسمه تعالی

گروه مهندسین دریان

میراگرهای جرمی تنظیم شده

(TMD)

REV	شرح	تهیه	بررسی	تأیید	تصویب	تاریخ انتشار	محل ضرب مهرهای تحت کنترل- منسوخ
۰۰	**میراگرهای جرمی تنظیم شده (*TMD*)**	**وحید پاچیده**	**امیر ساعدی**				
۰۱							
۰۲							
۰۳							

www daryan-co

تهران - سعادت آباد - خیابان ریاضی بخشایش - بن بست قائم - پلاک ۴ - طبقه چهارم

تلفن : ۷-۲۲۱۳۷۰۸۶ فکس : ۲۲۱۳۷۰۸۴

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۳

۲- پیشینه تاریخی ۳

۳- طراحی، اجرا و ویژگیها ۴

۳-۱- نمونه های اجرا شده ۷

۴- میراگر جرمی پاندولی ۱۰

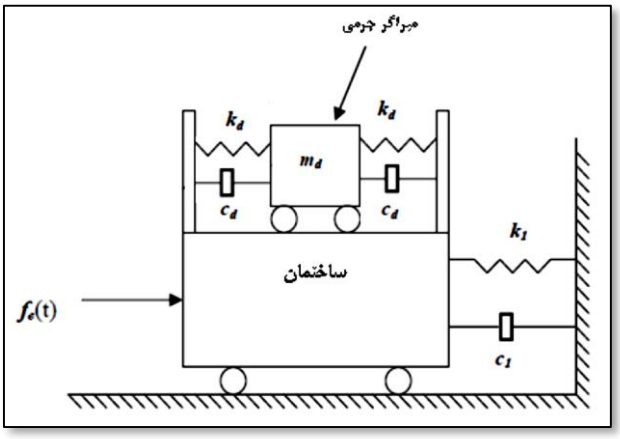
۴-۱- نمونه های اجرا شده میراگر پاندولی ۱۱

۱- مقدمه

میراگر جرمی تنظیم شده[۱] یکی از ابزارهای غیرفعال استهلاک انرژی است. این وسیله با جذب کردن مقداری از انرژی وارد شده از بار دینامیکی به سازه، میزان تقاضا برای استهلاک انرژی را در سازه اصلی کاهش می دهد.

۲- پیشینه تاریخی

ساده ترین شکل میراگر جرمی تنظیم شده، سیستمی شامل جرم، فنر و میراگر ویسکوز است که به سازه اصلی مهار می گردد (شکل ۱). ایده اولیه استفاده از این نوع میراگر در کارهای مهندسی به کارهایی که توسط *Frahm* در سال ۱۹۰۹ انجام شده است، برمی گردد. مطالعاتی که در سالهای بعد توسط *Den Hartog* انجام گردید باعث توسعه اصول پایه ای در مورد این نوع میراگرها و ارائه راه حلی برای انتخاب مناسب میراگرهای ویسکوز مورد استفاده در این میراگرها گردید. وی فرمولی را برای انتخاب خصوصیات بهینه این نوع میراگرها وقتی که سازه تحت اثر تحریک هارمونیک باشد ارائه نمود. *Mc Namara* در سال ۱۹۷۷ نشان داد که میراگر جرمی تنظیم شده برای بهبود پاسخ سازه‌ها تحت بارگذاری باد موثر می باشد. *Warburton* روابط بسته‌ای را برای خصوصیات بهینه میراگر مورد استفاده برای سازه یک درجه آزادی فاقد میرایی در شرایط بارگذاری سینوسی و اغتشاش سفید به صورت تحریک پایه و نیز بارگذاری بر روی سازه ارائه نمود.



شکل ۱: نماش ساده شماتیک از نحوه عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده

میراگرهای تنظیم شده عموماً برای کنترل ارتعاشات ناشی از باد در ساز ههای بلند به کار رفته اند و به دلیل محدودیتهایی همچون پهنای فرکانسی وسیعتر بارگذاری زلزله نسبت به بارگذاری باد و امکان تنظیم نوع ساده

---

[۱] *Tuned mass damper*

این نوع میراگر فقط با یک فرکانس، کارایی آنها تحت بارگذاری زلزله به خوبی کارایی آنها در مقابل بارگذاری باد نمی باشد. در عین حال تحقیقات فراوانی در زمینه استفاده از آنها در بهبود ارتعاشات ناشی از زلزله در دست انجام می باشد. استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده غیرخطی، جذب کننده های ارتعاشات ضرب های، میراگرهای جرمی تنظیم شده نیمه فعال و میراگرهای جرمی ترکیبی جزو راه حلهایی بوده اند که برای این مشکل ارائه شده اند.

Sadek و همکاران در سال ۱۹۹۷ خصوصیات بهینه میراگر را برای سازه ای که تحت تاثیر تحریک از پایه قرار می گیرد را ارائه نمودند.

به نظر می رسد اولین سازه ای که در آن از میراگر جرمی تنظیم شده استفاده شده است، برج *Centerpoint* در شهر سیدنی استرالیا باشد. این سازه در ابتدا دارای یک مخزن آب به جرم ۱۲۰ تن بود و با استفاده از یک جرم ۴۰ تنی ثانویه، میرایی مود اول از ۰,۷ درصد به ۱,۲ درصد و میرایی مود دوم از ۰,۴ درصد به ۱,۵ درصد رسیده است. اندازه گیریهای صورت گرفته نشان دهنده کاهش پاسخ شتاب این ساختمان به میزان ۴۰ تا ۵۰ درصد تحت بارگذاری باد می باشد.

مرکز *CitiCorp* و برج *John Hancok* در ایالات متحده، برج *Chiha*، سازه برج پل *Fuade* و دودکشهای فولادی شهر *Kimitsun* در ژاپن جزو سازه هایی هستند که در آنها از میراگر جرمی تنظیم شده برای بهبود پاسخ آنها در برابر بارگذاری باد استفاده شده است.

۳- طراحی، اجرا و ویژگی‌ها

یک سیستم میراگر جرمی فعال (*TMD*)، وسیله‌ای متشکل از یک جرم، فنر و یک میراگر است که به منظور کاهش پاسخ دینامیکی سازه، به آن متصل می‌گردد. فرکانس میراگر به میزان فرکانس سازه‌ای بخصوص تنظیم می‌گردد تا هنگامی که این فرکانس تحریک گردد، میراگر در فاز مقابل (مخالف) حرکت سازه مرتعش شود. انرژی توسط نیروی اینرسی میراگر که بر روی سازه اعمال می‌گردد، تلف می‌شود.

در این نوع از میراگرها جرم بر روی تکیه‌گاه‌های غلطکی قرار می‌گیرد و می‌تواند نسبت به طبقه جابجایی انجام دهد، فنرها ومیراگرها بین جرم و تکیه‌گاه‌های ثابت عمودی قرار می‌گیرد، نیروی فاز مخالف میراگر را به تراز طبقه و در نتیجه به قاب سازه‌ای منتقل می‌کند.

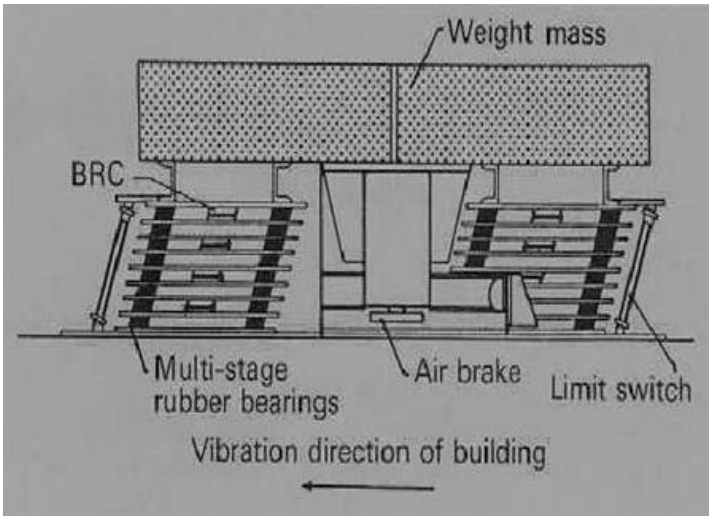
معمولاً این نوع از میراگرهای جرمی در طبقات بالایی سازه به کار گرفته می‌شوند و در صورتیکه سازه تحت اعمال بار قرار گیرد، با تعریف شتاب مشخص بسته به طراحی میراگر، به طور اتوماتیک سیستم شروع به فعالیت نموده و اثر ارتعاش نیروی زلزله را از بین می‌برد. معمولاً جنس جرم این سیستم از بتن، سرب یا فولاد است و به صورت مربع یا مستطیل و به صورت تک یا مجموعه به ابعاد ۵ تا ۱۰ متر ساخته و در طبقات بالایی سازه نصب می‌گردد.

این نوع سیستم میراگر، دارای جرم زیاد، اختصاص فضای زیاد و پرهزینه و مکانیزم پیچیده‌ای بوده و در مواردی فقط امکان بکارگیری در یک جهت را دارا می‌باشد. با اصلاح این موارد نوع پیشرفته‌تری از میراگرهای جرمی تنظیم شده طراحی شد. با تغییر غلطک‌های لاستیکی به جای غلتک‌های مکانیکی به دلیل عملکرد در جهت‌های مختلف (مانند فنرهای برشی) و استفاده از مواد لاستیک‌های قیری (*BRC*) به جای میراگر که با سهولت در نصب و کوچکی در ابعاد، توانایی میراگرهای ویسکوالاستیک را نیز دارا می‌باشند، باعث گردیده سیستم کامل‌تری طراحی و ساخته شود.

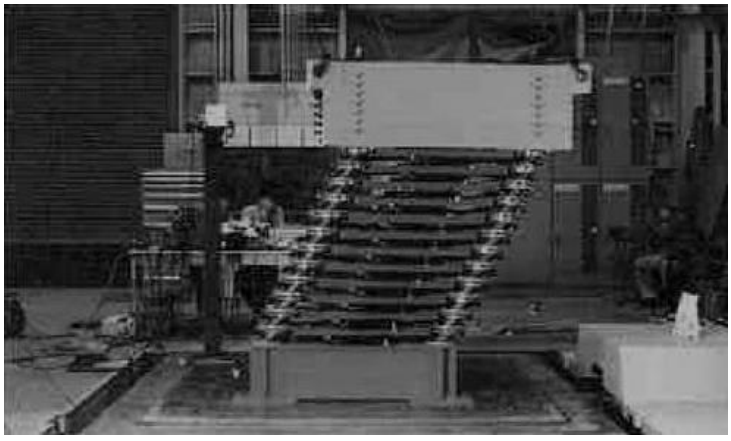
در طراحی سیستم میراگرهای جرمی جهت محاسبات باید با تعیین جرم، سختی و ضریب میرایی، مناسب‌ترین سیستم میراگر را با توجه به وزن کل سازه طراحی نمود تا با یک نسبت ساده بتوان به میزان تأثیر سیستم میراگر طراحی شده پی برد. با فرض برابر بودن فرکانس سازه در راستای نزدیکی مقدار بهینه برای فرکانس میراگر، این کار پریود میراگر را با پریود غالب سازه برابر می‌کند. پاسخ جرم تنظیم شده ۹۰ درجه با پاسخ جرم اولیه اختلاف فازی دارد. این اختلاف فاز، اتلاف انرژی را توسط نیروی اینرسی میراگر موجب می‌شود. افزایش نسبت جرم، افزایش میرایی را به دنبال دارد، اما باید توجه نمود که یک حد عملی برای افزایش جرم وجود دارد، همچنین با کاهش ضریب میرایی نیز می‌توان میرایی را افزایش داد که برای این پارامتر نیز محدودیت وجود دارد. طرح نهایی با توجه به ترکیب این دو مقدر باتوجه به اعمال محدودیت‌ها صورت می‌گیرد. همچنین باید به محل قرارگیری میراگر و فنر در تکیه‌گاه ثابت در سازه و مکانیسم دوجهته بودن سیستم نیز توجه نمود.

*TMD*های نخستین، ساز و کار (مکانیزم) پیچیده ای برای تکیه گاه ها و المان‌های میرایی داشتند همچنین به طور نسبی سنگین بوده و به طور قابل ملاحظه‌ای فضا اشغال می‌نمودند و نیز تا حدودی گران بودند. نسخه های اخیر آنها مثل طرح نشان داده شده در شکل ۲ برای کمینه نمودن این محدودیت‌ها طراحی شده اند. این طرح چند تکیه‌گاه لاستیکی الاستومریک روی هم سوار شونده دارد که به عنوان یک فنر برشی عمل می‌نماید و المان های «مواد لاستیکی قیری» *(BRC)* دارد که قابلیت میرایی ویسکوالاستیک را فراهم می‌آورند. وسیله مزبور

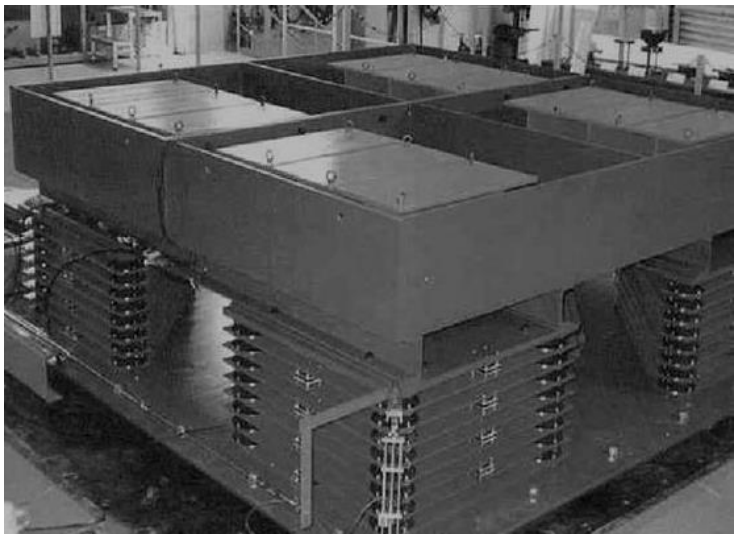
کوچک و فشرده است و نیاز به کنترل پیچیده ندارد. چند جهته می‌باشد و به آسانی روی هم سوار شده و به آسانی اصلاح و تعمیر می‌گردد. شکل ۳ یک میراگر با مقیاس کامل را نشان می‌دهد که توسط میز لرزان تحت تاثیر بار (تحریک) دینامیکی قرار گرفته است. یک نمونه واقعی دیگر در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲: *TMD* با میراگر و فنر



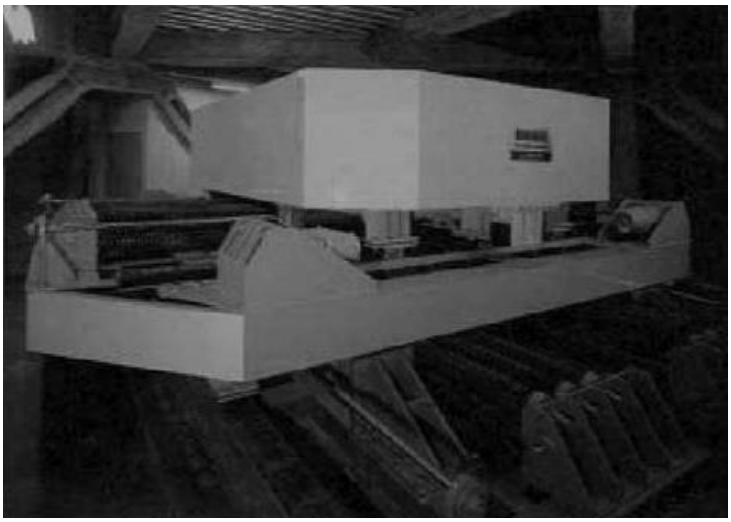
شکل ۳: موقعیت تغییر شکل یافته *TMD*



شکل ۴: *TMD* برج *Huis Ten Bosch*

۳-۱- نمونه های اجرا شده

۱- برج *Chiba Port*: این برج که در سال ۱۹۸۶ تکمیل شد و اولین برج در ژاپن بود که با *TMD* مجهز گردید. این برج یک سازه فولادی با ارتفاع ۱۲۵ متر و وزن ۱۹۵۰ تن می‌باشد که پلان لوزی شکل با طول ضلع ۱۵ متر دارد. پریدهای مود اول و دوم ۲/۲۵ و ۰/۵۱ ثانیه برای جهت X و ۲/۷ و ۰/۵۷ ثانیه برای جهت Y می‌باشند. میرایی مود اصلی ٪۰/۵ تخمین زده می‌شود. نسبت‌های میرایی متناسب با فرکانس‌ها برای مودهایی بالاتر در تحلیل فرض شدند. هدف از کاربرد *TMD* افزایش میرایی مود اول برای هر دو جهت X و Y است. شکل ۵ سیستم میراگر را نشان می‌دهد. این *TMD* توسط شرکت تولیدی *Mitsubishi* ساخته شد، میراگر، نسبت جرمی (با توجه به جرم مودی مود اول) حدود ۱/۲۰ در جهت X و ۱/۸۰ در جهت Y دارد، پرید در جهات X و Y به ترتیب ۲/۲۴ و ۲/۷۲ ثانیه است و نسبت میرایی ٪۱۵ است. حداکثر تغییر مکان نسبی میرگر نسبت به برج حدود ۱± در هر جهت می‌باشد. کاهش حدود ۳۰ تا ٪۴۰ در تغییر مکان تلف بالایی و کاهش ٪۳۰ در ممان بیشینه خمشی مورد انتظار است.



شکل ۵: میراگر جرمی تنظیم شده برای برج*Chiha-Port*

۲- *برج مانهاتان:* ارتفاع برج ۲۷۹ متر- پریود غالب ۶,۵ ثانیه و میرایی یک درصد در هر جهت- میراگر در تاج سازه در طبقه‌ی ۶۳ به وزن ۳۶۵*KN* – جرم بلوک از جنس بتن به ابعاد ۹,۱*۹,۱*۲,۶- افزایش میرایی ذاتی سیستم به میزان ۴ درصد با کاهش جابجایی به میزان ۵۰ درصد و نسبت میرایی یک با حداکثر جابجایی نسبی ۱,۴ متر- جرم بتنی بر روی سری ۱۲ تایی بلبرینگ‌ها به قطر ۶۰ سانتیمتر با فشار هیدرولیکی

۳- *برج هانکوک:* دومیراگر به برج ۶۰ طبقه جان هنکوک به ارتفاع ۲۰۰ متر در بوستون اضافه شدند تا پاسخ (سازه‌ای) در برابر بارگذاری ناگهانی باد کاهش یابد. میراگرها در دو انتهای (مقابل هم) طبقه پنجاه و هشتم که به اندازه ۶۷ متر جدا شده اند، قرار گرفته‌اند که با حرکت خود، حرکت جانبی و پیچشی ناشی از شکل ساختمان راخنثی می کنند. هر میراگر ۲۷۰۰ کیلونیوتن وزن و دارد و شامل یک جعبه فولادی پرشده با سرب به ابعاد*m*۲,۵ (طول و عرض) و عمق ۱متر می‌باشند که روی یک صفحه فولادی با طول ۹ متر قرار گرفته است. وزن پرشده با سرب، به طور جانبی توسط فنرهای سختی محدود می‌شود که این فنرها نیز به ستون های درونی ساختمانی مهار می گردند و توسط «استوانه های سروو – هیدرولیک *(Servo-hydraulic)*کنترل می‌گردند و روی یک تکیه گاه هیدرواستاتیکی به جلو و عقب می‌لغزد که این تکیه گاه از یک لایه نازک روغن که به حفرات یک صفحه فولادی تزریق شده تشکیل یافته است. هر وقت که شتاب افقی برای دو سیکل متوالی از*g* ۰,۰۰۳تجاوز کند، سیستم به طور خودکار فعال می گردد. این سیستم توسط *Lemessurier Associates/Sci* با همکاری *MTS System Corp* با هزینه حدود ۳ میلیون دلار طراحی و ساخته شد و انتظار می رود که حرکت جانبی ساختمان را به اندازه ۴۰ تا ٪۵۰ کاهش دهد.

۴- *مرکزسیتی کورپ(Center Citycorp)*: *TMD* مربوط به سیتی کورپ (در مانهاتان) توسط همان شرکت قبلی طراحی و ساخته شد. ارتفاع این ساختمان ۲۷۹ متر میباشد که دارای پرید (دروه تناوب) اصلی حدود ۶/۵ ثانیه با نسبت میرایی ٪۱ حول هر محور می‌باشد *TMD* .به کار رفته در سیتی کورپ که در کف (طبقه) ۶۳ در نوک سازه قرار گرفته، جرم ۳۶۶ مگاگرم دارد و جرم مودال موثر مود اول آن ٪۲ می‌باشد و در ضمن ۲۵۰ بار از *TMD* های موجود در زمان نصب بزرگتر می باشد. این *TMD* بدین منظور طراحی گردد که به صورت دو محوری در سازه ساختمان با پرید کارکردی متغیر ٪۲۰± ۲۵,۶ ثانیه نوسان نماید و میرایی خطی قابل تنظیم از ۸ تا ٪۱۴ و تغییر مکان نسبی حداکثر ۱/۴± متر داشته باشد، در ضمن انتظار می‌رود که میراگر دامنه حرکتی ساختمان را حدود ٪۵۰ کاهش دهد. این کاهش به افزایش میرایی پایه سازه به ٪۴ مربوط می‌شود . بلوک جرم بتنی حدود ۲/۶ متر ارتفاع دارد و مقطع آن*m* ۱,۹ × ۱,۹است و توسط یک سری دوازده تایی از تکیه گاه های هیدرولیکی *Pressure-balanced* با قطر ۶۰ سانتی متر نگه داشته می‌شود. در طول کارکرد، تکیه گاه ها روغن را از یک پمپ هیدرولیک جداگانه که قادر است به اندازه ۲ سانتیمتر آن را در بلوک جرمی در مدت زمان کارکردی ۳ دقیقه افزایش دهد، دریافت می‌دارند.

هر وقت که شتاب افقی در دو سیکل متوالی از*g* ۰,۰۰۳تجاوز کند سیستم میراگر به طور خودکار فعال می‌شود و هر وقت که شتاب ساختمان در هر محور در فاصله زمانی ۳۰ دقیقه از*g* ۰,۰۰۷ تجاوز نماید به طور خودکار خاموش می گردد. با تخمین *Lemessurier* هزینه *TMD* این ساختمان حدود ۱/۵ میلیون دلار است که موجب ذخیره و صرفه جویی ۳/۵ تا ۴ میلیون دلار شده است. این هزینه ها به ۲۸۰۰ تن فولاد سازه‌ای مربوط می شود که برای محدود نمودن تغییر شکل ها (در صورت عدم استفاده از*TMD*) مورد نیاز خواهند بود.

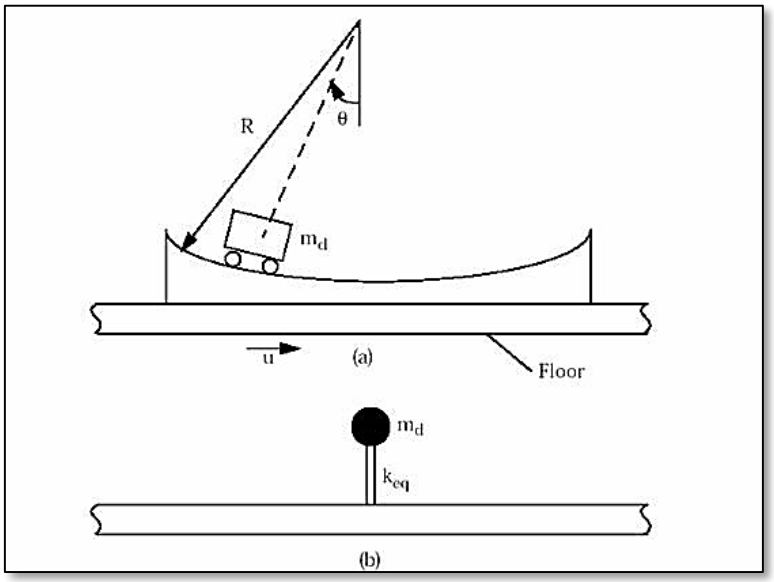
۵- برج ملی کانادا*(Canadian National Tower)* : دکل مخابراتی فولادی ۱۰۲ متری در بالای برج ملی کانادا در تورنتو (با ارتفاع ۵۵۳ متر با آنتن مخابراتی) نیازمند دومیراگر سربی بود که از حرکات اضافی آنتن در برابر تحریک باد جلوگیری بعمل آورد. سیستم میراگر شامل دو حلقه فولادی به شکل دونات با عرض ۳۵ سانتی متر و عمق ۳۰ سانتی متر و قطر ۲/۴ و ۳ متر می‌باشد که در ارتفاع ۴۸۸ و ۵۰۳ متری قرار گرفته است. هر حلقه ۹ تن سرب را نگهداری می‌نماید که با ۳ تیر فولادی که به کناره های آنتن متصل شده‌اند حمایت و نگهداری می‌گردد. ۴ اتصال تکیه گاهی که در همه جهات می‌چرخند حلقه ها را به

تیرها متصل می‌کنند . به علاوه، ۴ میراگر سیال جداگانه فعال شده هیدرولیکی که به کناره دکل سوار شده‌اند و به مرکز هر کدام از اتصالات متصل شده‌اند انرژی را تلف می‌نماید . به محض اینکه حلقه‌های سربی به سمت جلو و عقب حرکت می‌کنند سیستم میراگر هیدرولیکی انرژی ورودی را تلف می‌نماید و پاسخ برج را کاهش می‌دهد. سیستم میراگر توسط *Dressel, Carrier , Nicolet* با همکاری *Vibron Acoustics* طراحی شد. میراگرها نسبت به مود دوم و چهارم ارتعاشی تنظیم شده اند تا بارهای خمشی آنتن را کمینه کنند، مود اول و سوم مشخصات مشابه دارند و سازه بتنی پیش تنیده از آنتن نگهداری می‌نماید و نیازی به میرایی اضافی ندارد.

٤- میراگر جرمی پاندولی

به دلیل مشکلات غلطک‌ها در میراگرهای جرمی تنظیم شده، نوع جدیدی از میراگرهای جرمی که امروزه قابلیت بکارگیری در سازه‌های بلندمرتبه را دارد، میراگرهای پاندولی هستند که شبیه آونگ رفتار می‌کنند. مشکل مربوط به تکیه گاه ها با استفاده از نگهداری جرم با یک سری کابل‌ها برطرف می‌شود که این کابل‌ها به سیستم اجازه می‌دهد که به صورت یک پاندول رفتار نماید. طراحی این سیستم‌ها براساس وزن کل سازه و وضعیت آب و هوایی منطقه انجام می‌شود.

یک نسخه اصلاح شده از میراگر پاندولی در شکل ۶ نشان داده شده است. نیروی دوباره ذخیره شونده که توسط کابل‌ها تامین می‌شود توسط انحنای سطح ساپورت (تکیه گاه) تولید می‌شود و همین انحنا به جرم اجازه می‌دهد که در این سطح بغلتد. حرکت قائم وزن به یک انرژی ورودی نیاز دارد. با فرض اینکه کوچک است ، معادلات برای حالتی که سطح دایروی است، مشابه معادلات پاندول متداول با طول کابل L می‌باشند که در آن با شعاع سطح R باید جایگزین شود.



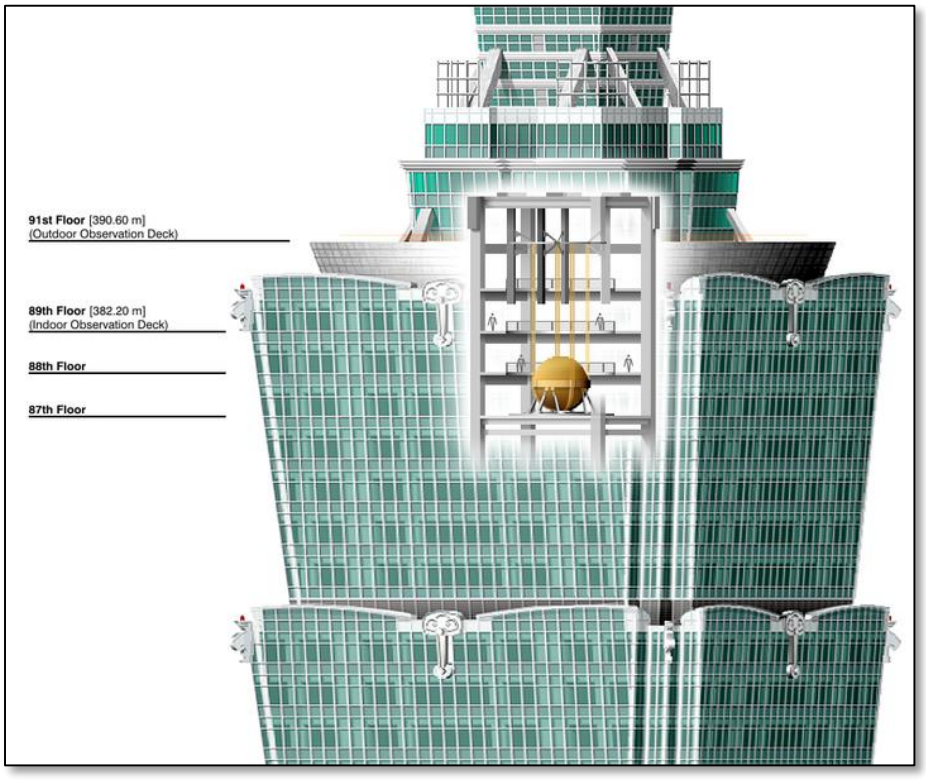
شکل ۶: پاندول *Rocker*

٤-۱- نمونه های اجرا شده میراگر پاندولی

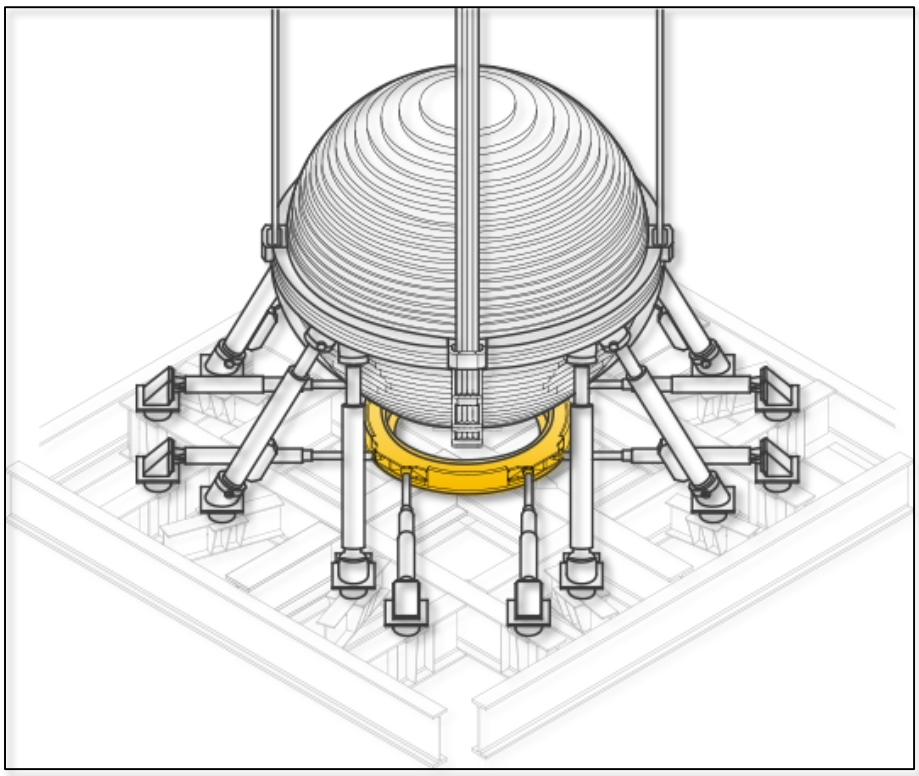
۱- *برج تایپه۱۰۱ در تایوان:* این برج با ارتفاع ۵۰۸ متر و در ۱۰۱ طبقه (شکل۷) دارای میراگر جرمی پاند ولی به شکل گوی و وزن تقریبی ۶۶۰ تن و ارتفاع ۵,۵ متر می‌باشد (شکل ۸). این گوی که در بین طبقات ۸۷ تا ۹۲ برج و به ۱۶ بازوی فولادی نصب شده است (شکل های ۹ و ۱۰) که می‌تواند حدود ۴۰ درصد از حرکات ساختمان را کاهش می‌دهد. هزینه ساخت این پاندول میراگر ۴ میلیون دلار آمریکا بوده است. این دمپر برای جلوگیری از تکان خوردن بیش از اندازه برج در زمان لرزهای ناشی از زلزله و باد در نظر گرفته شده است. همچنین دو میراگر کوچکتر هر کدام به وزن ۶ تن در بالای برج قرار داده شده اند. کل این کره می‌تواند هر هفت ثانیه به اندازه ۳۵ سانتی‌متر حرکت کند، اما در صورت وقوع گردبادهای شدید، قابلیت حرکتی به میزان ۱۵۰ سانتی‌متر نیز دارد.

شکل ۷: برج تایپه ۱۰۱ در تایوان

شکل ۸: گوی نصب شده در برج تایپه ۱۰۱



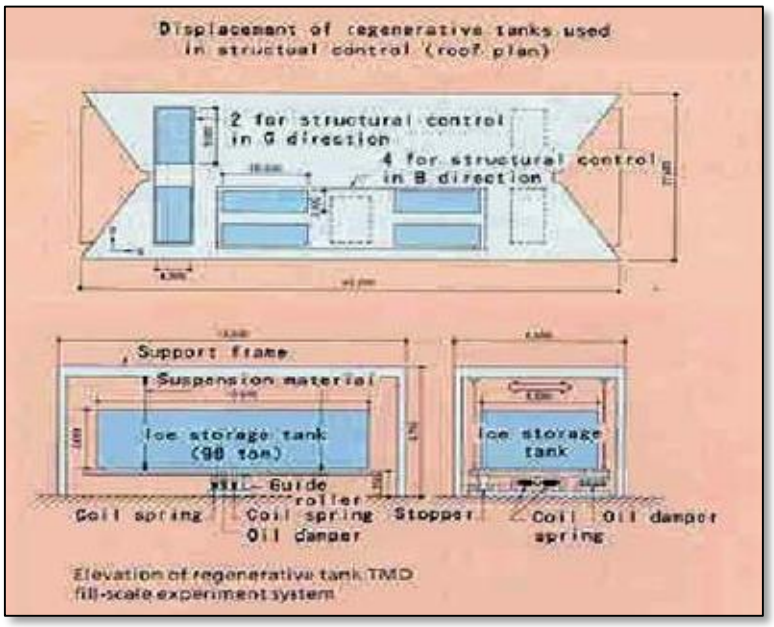
شکل ۹: محل نصب گوی در برج تایپه



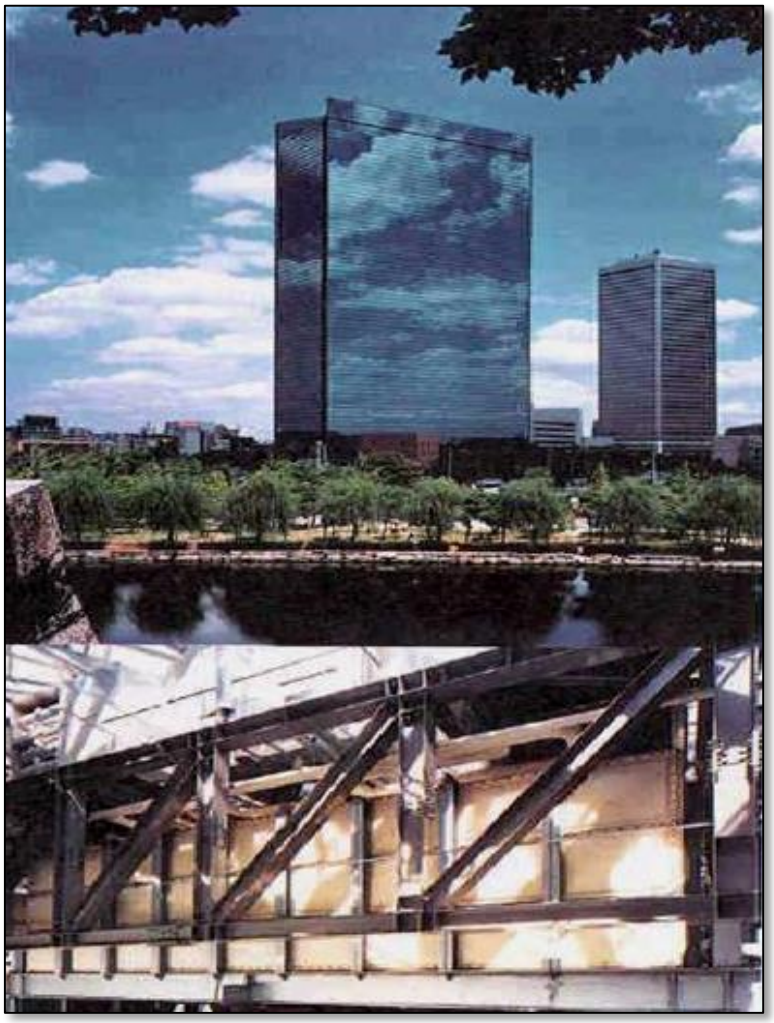
شکل ۱۰: اتصال گوی به میله های فولادی

۲- *برج Crystal:* برج در اساکای ژاپن واقع است بلندای آن ۱۵۷ متر است و در پلان ۶۷ متر در ۲۸ متر است. ۴۴۰۰۰ تن وزن دارد و پرید مبنای آن در جهت جنوبی – شمالی تقریباً ۴ ثانیه می‌باشد و در جهت شرقی– غربی ۳ ثانیه است .

یک میراگر جرمی پاندولی تنظیم شده در فاز اولیه طراحی چنان تنظیم شد که حرکات القایی باد در ساختمان را حدود ٪۵۰ کاهش دهد. ۶ عدد از ۹ عدد خنک کننده هوا و تانکرهای ذخیره گرمایی یخ (هرکدام به وزن ۹۰ تن) از تیرهای کف بالا آویخته می‌شوند و به عنوان جرم پاندول استفاده می‌گردند. ۴ تانکر طول پاندولی ۴ متر دارند و در جهت شمالی - جنوبی می‌لغزند. دو تانکر دیگر طول پاندولی حدود ۳ متر دارند و درجهت شرقی – غربی می‌لغزند. میراگرهای روغنی متصل شده به پاندول، انرژی پاندول را مستهلک می‌کنند. شکل۱۱ قرار گیری تانکرهای ذخیره یخ را نشان می‌دهد که به عنوان جرم‌های میراگرها استفاده شده‌اند. نماهایی از ساختمان واقعی و یکی از تانک (تانکر) ها در شکل۱۲ نشان داده شده‌اند. هزینه این سیستم *TMD* حدود ۳۵۰/۰۰۰ دلار بود که کمتر از ٪۰/۲ هزینه ساخت است.



شکل ۱۱: برج – *crystal* قرارگیری میراگرا پاندولی



شکل ۱۲: تانک (تانکر) ذخیره یخ-برج کریستال