

# نقش میراگرهای جرمی در سازه ها در زلزله و باد

حسام آل بویه

دانشجوی کارشناسی عمران / دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان

## چکیده:

در این مقاله سعی شده است تا با معرفی سیستم های میراگر جرمی TMD و کاربرد آن در سازه ها، خصوصاً سازه های بلند مرتبه به نقش و اهمیت آن در پایداری سازه ها پرداخته شود. سیستم میراگرهای جرمی علیرغم استفاده روزافزون در طی سالیان گذشته در دنیا و عملکرد بسیار مناسب و موثر همچنان در کشور ما ناشناخته مانده و مورد استفاده و بهره برداری قرار نگرفته است. با بکارگیری سیستم میراگر جرمی در یک سازه می توان تا ۵۰ درصد ارتعاش ناشی از باد و زلزله را مستهلک نمود.

## مقدمه:

سیستم میراگر جرمی TMD یکی از پیشرفته ترین و کاراترین سیستم های نوین می باشد که امروزه با بکارگیری آن در برج ها و آسمان خراش ها باعث پایداری سازه در برابر نیروهای خارجی وارد بر سازه می گردد. اصولاً این سیستم با استهلاك نیروی وارده و کاهش اثر آن بر روی سازه موجب می شود که سازه حداقل نوسان و جابجایی در نوک سازه را داشته باشد، امروزه بهره برداری از سازه ها پس رخدادهای طبیعی به دلیل صرف هزینه های بسیار در ساخت و تجهیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می باشد از این رو می بایست در سازه های سیستمی تعبیه گردد تا پس از تحمل حوادث طبیعی همچنان قابلیت بهره برداری و استفاده وجود داشته باشد.

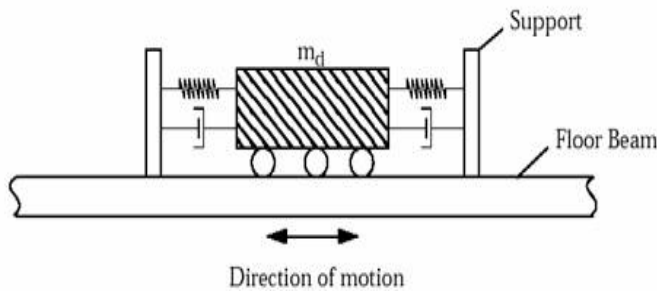
پس از گذشت ۶۰ سال از مطالعات اولیه و استفاده از ساده ترین سیستم میراگرهای جرمی و چاپ کتب و تحقیقات بین سال های ۱۹۰۹ تا ۱۹۴۰ که شامل تئوری TMD در سال ۱۹۲۸ و چاپ کتاب ارتعاشات دینامیکی در سال ۱۹۴۰ گردید. در تمامی این مباحث هدف استهلاك نیروهای خارجی بوده. به طور کلی سیستم میراگر جرمی جزو سیستم یکدرجه آزادی به حساب می آید.

میراگرهای دو نوع اند: ۱. میراگرهای جرمی تنظیم شبا جابجایی بر روی سطح

۲. میراگرهای جرمی پاندولی (آونگ)

## ۱. میراگرهای جرمی تنظیم شده

در این نوع از میراگرها جرم بر روی تکیه گاه های غلطکی قرار می گیرد و می تواند نسبت به طبقه جابجایی انجام دهد، فنرها و میراگرها بین جرم و تکیه گاه های ثابت عمودی قرار می گیرد، نیروی فاز مخالف میراگر را به تراز طبقه و در نتیجه به قاب سازه ای منتقل می کند.



معمولاً این نوع از میراگرهای جرمی در طبقات بالایی سازه بکار گرفته می شوند

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

این نوع سیستم میراگر دارای جرم زیاد، اختصاص فضای زیاد و پرهزینه و مکانیسم پیچیده ای بوده و در مواردی فقط امکان بکارگیری در یک جهت را دارا می باشد، با اصلاح این موارد نوع پیشرفته تری از میراگرهای جرمی تنظیم شده طراحی شد. با تغییر غلطک های لاستیکی به جای غلطک های مکانیکی به دلیل عملکرد در جهت های مختلف (مانند فنرهای برشی) و استفاده از مواد لاستیک های قیری (BRC) به جای میراگر که با سهولت نصب و ابعاد کوچکتر توانایی میراگرهای ویسکوالاستیک را نیز دارا می باشند باعث گردیده سیستم کاملتری طراحی و ساخته شود.

در طراحی سیستم میراگرهای جرمی جهت محاسبات باید با تعیین جرم، سختی و ضریب میرایی مناسب ترین سیستم میراگر را با توجه به وزن کل سازه طراحی نمود تا با یک نسبت ساده بتوان به میزان تاثیر سیستم میراگر طراحی شده پی برد. با فرض برابر بودن فرکانس با فرکانس سازه در راستای نزدیکی مقدار بهینه برای فرکانس میراگر این کار پیروی میراگر را با پیروی غالب سازه برابر می کند. پاسخ جرم تنظیم شده ۹۰ درجه با پاسخ جرم اولیه اختلاف فاز دارد. این اختلاف فاز، اتلاف انرژی را توسط نیروی اینرسی میراگر موجب می شود. 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 می توان میرایی را افزایش داد که برای این پارامتر نیز محدودیت وجود دارد. طرح نهایی با توجه به ترکیب این دو مقدار با توجه به اعمال محدودیت ها صورت می

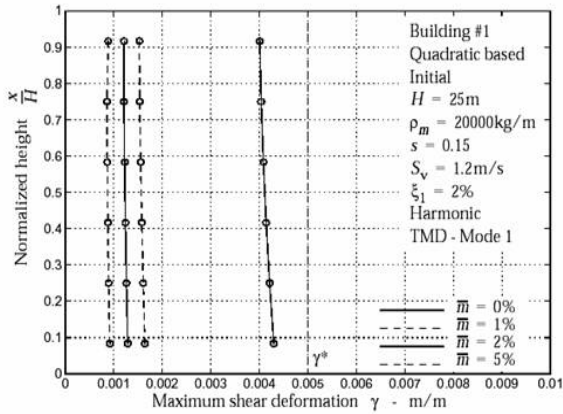
گیرد. همچنین باید به محل قرارگیری میراگر و فنر در تکیه گاه ثابت در سازه و مکانیسم دو جهته بودن سیستم نیز توجه نمود.

یک سیستم میراگر جرمی فعال (TMD)، وسیله ای متشکل از یک جرم، فنر و یک میراگراست که به منظور کاهش پاسخ دینامیکی سازه، به آن متصل می گردد. فرکانس میراگر به میزان فرکانس سازه ای بخصوصی تنظیم می گردد 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 می گردد، تلف می شود. ایده TMD، ابتدا توسط Farhm در سال ۱۹۹۰ به کار برده شد تا حرکت غلشی (گردشی) کشتی ها و ارتعاشات بدنه کشتی را کاهش دهد.

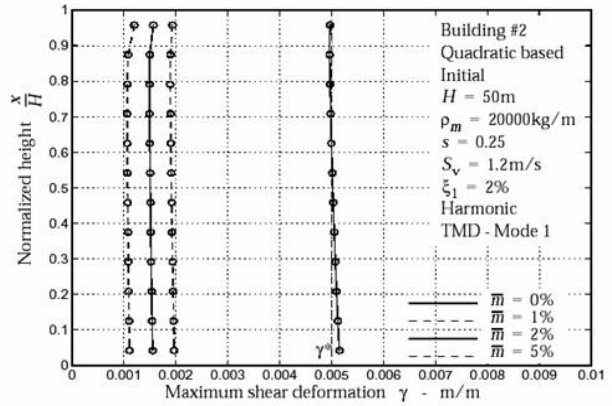
تئوری میراگر های جرمی برای سیستم های یک درجه آزادی که برای تحریک نیروی هارمونیک و حرکت هارمونیک زمین طرح می گردند از جمله سیستم TMD بدون میرایی که به یک سیستم یک درجه آزادی بدون میرایی متصل می گردد، همچنین یک سیستم TMD با میرایی که به یک سیستم یک درجه آزادی بدون میرایی ملحق می شود و یک سیستم TMD با میرایی که به یک سیستم یک درجه آزادی با میرایی وصل می شود، در این سیستم پاسخ های تاریخچه زمانی برای محدوده ای از سیستم های یک درجه آزادی که به TMD با تنظیم بهینه متصل شده اند و تحت تاثیر تحریک لرزه ای و هارمونیک واقع شده اند مواجهیم. تئوری مزبور برای سیستم های چند درجه آزادی (MDOF) تعمیم و توسعه می یابد. سیستم TMD برای میرا نمودن ارتعاشات یک مود خاص استفاده می شود، روش ارزیابی و تشخیص برای محل های قرارگیری بهینه TMD ها در سیستم های ساختمانی از اهمیت بالایی برخوردار است.

### مطالعات موردی در سیستم MDOF

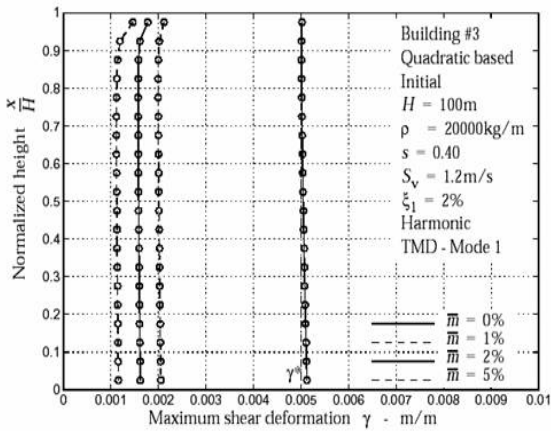
یک سیستم TMD واحد در طبقه بالا قرار داده می شود و به مود اول یا دوم تنظیم می شود. سازه ها با شتاب هارمونیک زمین طرح می گردند که فرکانس معادل، مساوی فرکانس مبنای ساختمان ها می باشد، همچنین تحت نسخه های مختلف شتاب های زمین مربوط به ال سترو و تافت که مقیاس گشته اند، واقع می شوند. همانطور که انتظار می رود، کاهش اساسی در پاسخ، برای تحریکات هارمونیک مشاهده می شود (اشکال ۴ تا ۱۴). میراگر، عموماً برای تحریک لرزه ای نسبت به تحریک هارمونیک کمتر موثر می باشد. (اشکال ۵ تا ۱۶) نتایج مربوط به سازه های با دوره تناوب کم، تاثیر بیشتر میراگر را نشان می دهند که مورد انتظار است، چون پاسخ در وهله نخست به مود اول مربوط می شود. این اطلاعات نشان می دهند که TMD برای کنترل حرکت مربوط به تحریک لرزه ای راه حل بهینه ای نیست.



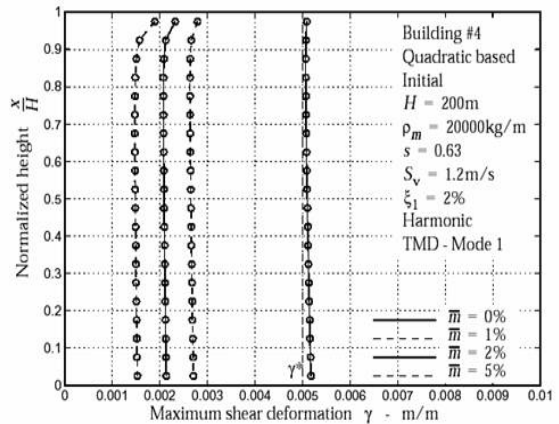
(۲) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۲



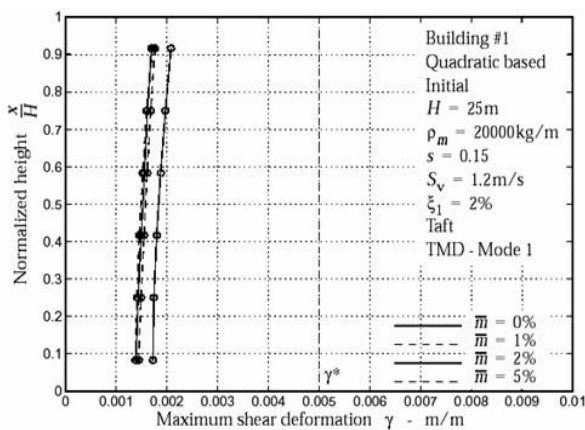
(۱) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۱



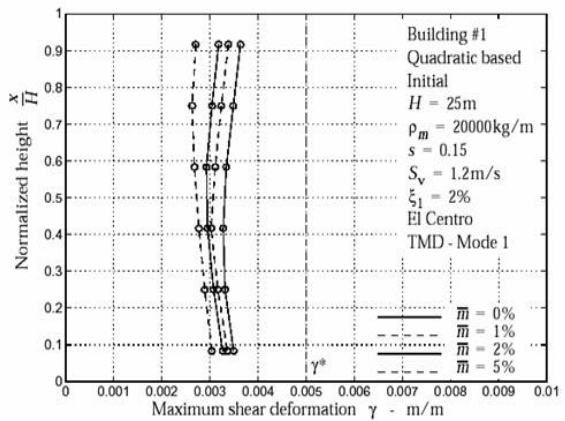
(۴) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۴



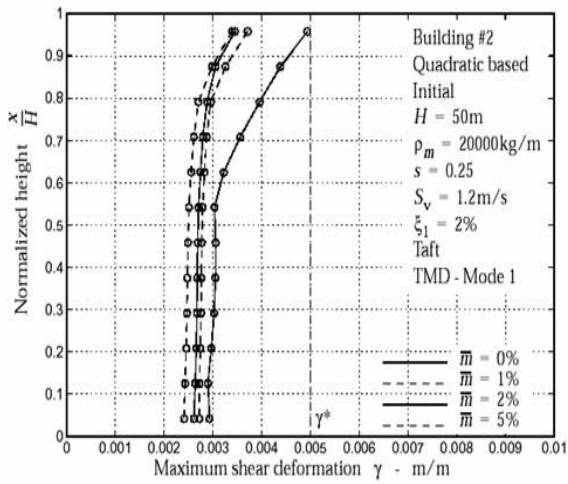
(۳) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۳



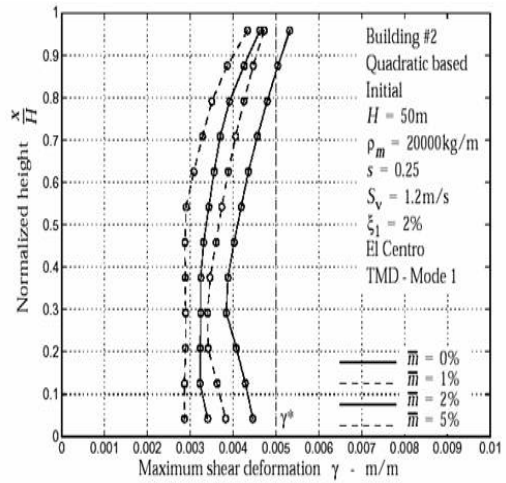
(۶) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۱



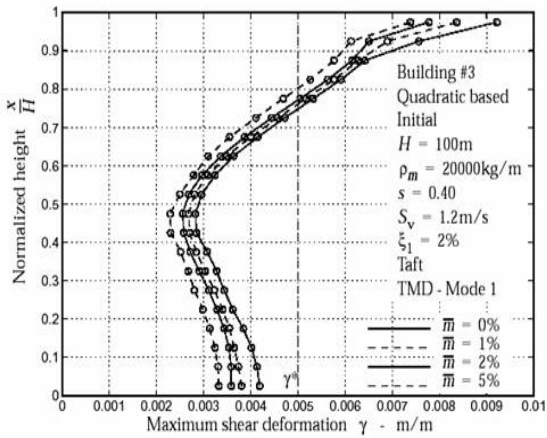
(۵) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۱



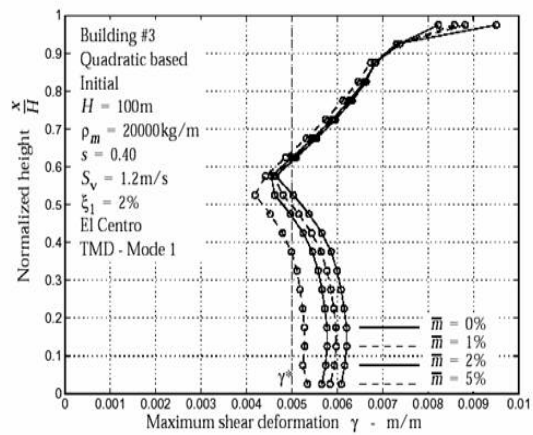
(۸) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۲



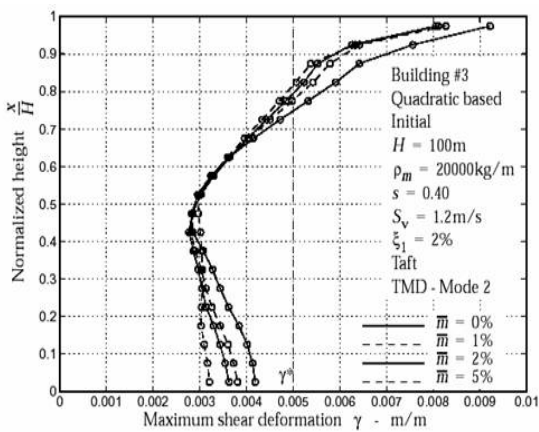
(۷) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۲



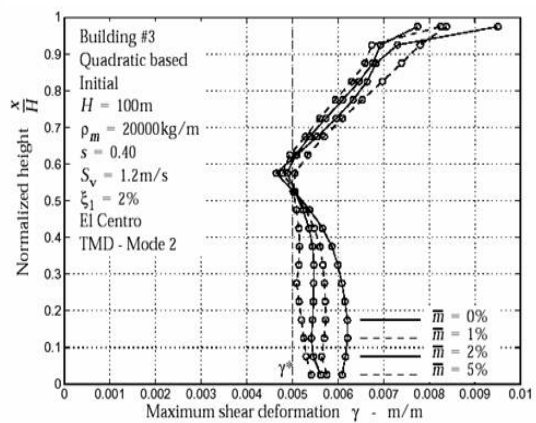
(۱۰) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۳



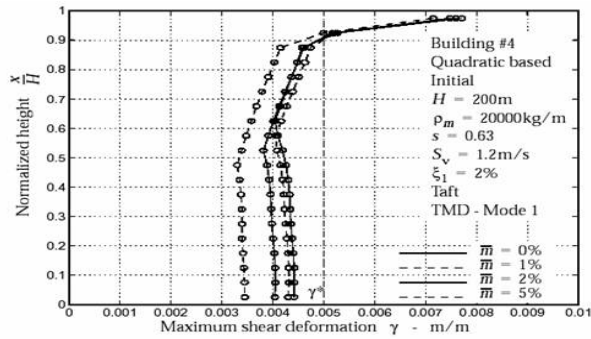
(۹) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۳



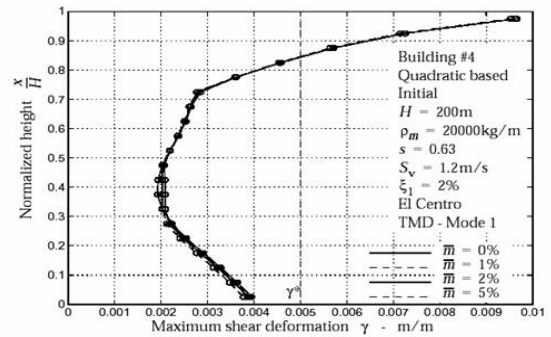
(۱۲) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۳



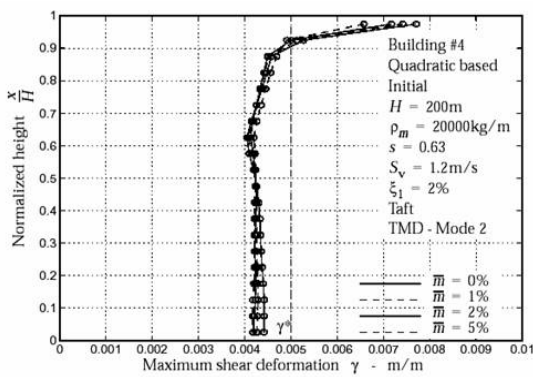
(۱۱) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۳



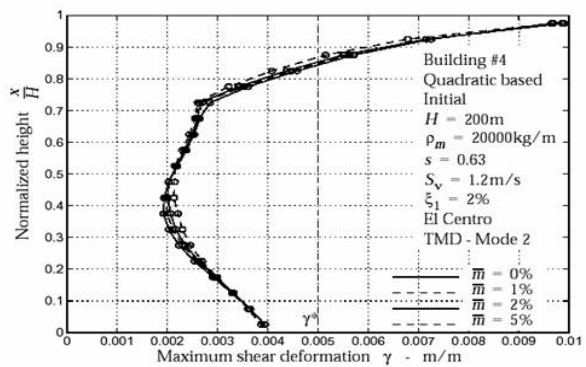
(۱۴) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۴



(۱۳) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۴

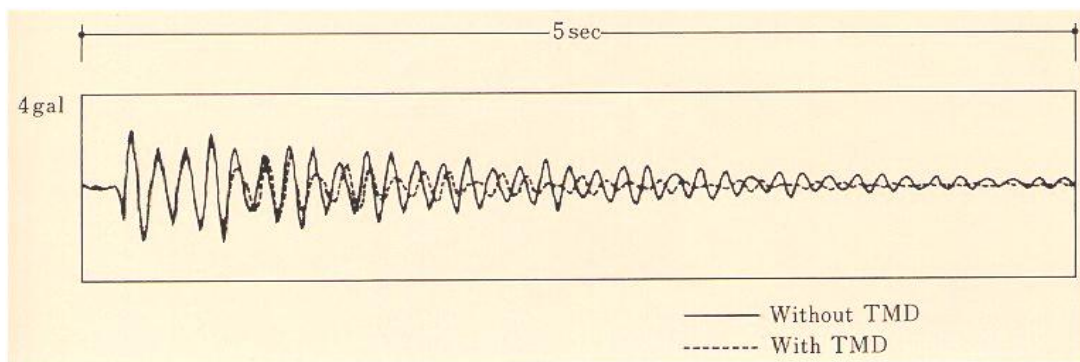


(۱۶) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۴



(۱۵) تغییر شکل برشی حداکثر برای ساختمان ۴

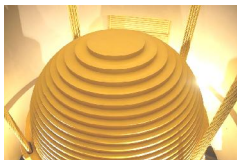
تاثیر میراگر جرمی تنظیم شده را می توان با اتصال یک جرم کمکی و یک ACUATOR به جر تنظیمی و جابجایی جرم کمکی به همراه ACUATOR به گونه ای که پاسخ آن در فاز مخالف با پاسخ جرم تنظیم شده باشد. از جابجایی جرم کمکی ایجاد یک نیروی اضافی که متمم نیروی ایجاد شده توسط جرم تنظیم شده است و بنابراین میرایی معادل سیستم TMD را افزایش خواهد داد. ACUATOR را می توان مستقیماً به جرم تنظیم شده متصل نمود که در این حالت جرم کمکی حذف می شود، از آنجایی که ACUATOR نیاز به یک انرژی خارجی دارد به این سیستم «میراگر جرمی تنظیم شده فعال» گفته می شود.



در ادامه نمونه هایی از بکارگیری میراگرهای جرمی تنظیم شده ارائه می گردد:

۱. برج مانهاتان، ارتفاع برج ۲۷۹ متر، پریود غالب ۶/۵ ثانیه و میرایی یک درصد در هر جهت، میراگر در تاج سازه در طبقه ۶۳ به وزن ۳۶۵ KN، جرم بلوک از جنس بتن به ابعاد ۲/۶\*۹/۱\*۹/۱، 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 بلبرینگ ها به قطر ۶۰ سانتیمتر با فشار هیدرولیکی قرار گرفته است.

۲. برج هانکوک، ارتفاع برج ۲۰۰ متر، دو میراگر هرکدام به وزن ۲۷۰۰ KN به ابعاد ۵/۲\*۵/۲\*۱ از جنس سرب (جعبه فلزی) در دو انتهای طبقه ۵۸ به فاصله ۶۷ متر از یکدیگر نصب شده اند، با شتاب  $g \cdot 0.03$  به صورت اتوماتیک عمل کرده و قابلیت کاهش اثر جابجایی بین ۴۰ تا ۵۰ درصد را دارد.



## ۲. میراگرهای جرمی پاندولی (آونگی)

نوع جدید میراگرهای جرمی که امروزه قابلیت بکارگیری در سازه های بلندمرتبه را داشته، به دلیل مشکلات غلتک ها در میراگرهای جرمی تنظیم شده به کمک تقویت های کابلی جرم اجازه رفتار آونگی را داشته که این مشکل را حل نموده. با طراحی این نوع از میراگرهای جرمی با توجه به وزن کل سازه و منطقه قرارگیری با توجه به نوع آب و هوا می توان از این سیستم استفاده بهینه نمود. محدودیت استفاده از این سیستم را می توان به پریود که خود بستگی به طول  $L$ ، طول مورد نیاز برای  $T$  بزرگ که ممکن است از ارتفاع طبقه بیشتر شود و با توجه به اینکه طول مورد نیاز برای سایر پریودها (۵ ثانیه) ۶.۵ متر است که می توان با اتصال صلب داخلی طول موثر پاندول را  $2L$  نمود. جابجایی نسبی پاندول یک نیروی افقی در جهت خلاف حرکت طبقه ایجاد می نماید که میتوان این حرکت را مانند سیستم یکدرجه آزادی معادل نشان داد. طراحی سیستم TMD برای مقابله با نیروهایی که به شدت در سازه ایجاد جابجایی می کنند می باشد. با پیش بینی اولین دوره لرزش طبیعی در بالاترین قسمت سازه و تعیین مهمترین نقطه، با استفاده از ضوابط و آیین نامه ها به طور صحیحی به اجرا درآید. قبل از اجرای طرح بایستی آزمایش تونل سرپوشیده انجام شود، با انجام آزمایشات مختلف و بررسی اثرات بادهای محلی وابسته به محیط و با کمک نتایج این آزمایشات طراحی برای پوشش سیستم و سازه انجام می گیرد. نکته قابل توجه در طراحی، کنترل بارگذاری های کلی بر روی سازه برای بارهای وارده، لنگرهای خمشی اصلی و بارهای ناشی از باد به وسیله تنش های لرزشی صورت می گیرد. نتایج آزمایشات به صورت اندکی تغییر و بهینه شده و برای نقشه های اجرایی پیشنهاد می گردد. مهمترین بخش در این سیستم جذب انرژی در طبقات بالا و انتقال آن به طبقات پایین است، با این کار می توان شتاب در طبقات را از  $7/9 \text{ Milli-g}$  به  $5 \text{ Milli-g}$  کاهش داد (هر  $\text{Milli-g}$ ،  $1/1000$  شتاب استاندارد ثقل زمین است). این نوع سازه در

اثر بادهای قوی با دوره ۱۰۰ ساله رفتار بسیار مناسبی دارند. در ساخت، نصب و استفاده از تجهیزات (VDD) که توانایی پراکنده سازی حرارتی را که به وسیله حرکت سازه ایجاد شده از اهمیت بالایی برخوردار می باشد.

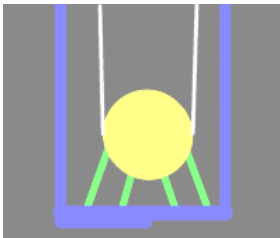
راس برج که در بالاترین نقطه در معرض بار قرار گرفته انرژی بسیار زیادی بر سازه اعمال می نماید، این دسته از ممان های خمشی ممکن است تا چندین ساعت به طول بینجامد که به کمک قسمت VIO کاهش یافته و باید تمام انرژی توسط سیستم های VDD به شکل حرارت پراکنده گردد.



به کمک جریان سیال روان خارجی (سرد کننده) در لوله های هیدرولیکی (VDDs) نیروی لازم (هوا/ روغن) جهت تبادل حرارتی به وجود می آید.

۱. در پروژه ساخت تایپه ۱۰۱ (Taipe ۱۰۱) که جزو بلندترین آسمانخراش های دنیا می باشد از مدرنترین تکنولوژی ساخت میراگرهای جرمی آونگی استفاده شده است. ارتفاع این برج در نوک تاج آن به ۵۰۸ متر میرسد. این سازه مشتمل بر ۹۵۰۰۰ تن فولاد بسیار قوی (SM ۵۷۰) و ۲۳۹۰۰ متر مکعب بتن پر مقاومت (۷۰ مگا پاسکال) می باشد.

پیش بینی اولین دوره لرزش طبیعی ۶/۸ ثانیه بوده است. مرحله ابتدایی طراحی با توجه به قرارگیری این سازه در مرکز اقتصادی تایپه شامل تونل باد و آزمایشات مربوط به زلزله با دوره های بازگشت ۱۰۰-۲۵۰۰ سال بوده است. در حوادث لرزه ای قوی با دوره بازگشت ۱۰۰ سال پاسخ های (الاستیک) سیستم TMD در سازه و خصوصیات آن کاملاً مشخص و تحت کنترل است. اما محاسبه و کنترل حوادث با دوره بازگشت



طولانی تر (۱۰۰۰-۲۵۰۰ سال) که دارای رفتاری غیرخطی (با تغییر شکل پلاستیک) سازه می باشد، محدوده زمانی پاسخ ها در مورد چگونگی استفاده و ارزیابی در مجاورت طبقات متفاوت و پیچیده است. در طراحی در مقابل زمین لرزه در نوک برج تایپه ۱۰۱ پیش بینی اثر حرکت سریع به جلو و عقب به صورت ضربه ای در حداکثر شتاب ۱۴g (شتاب ثقل استاندارد زمین) شده است. تحت این شرایط وظیفه استهلاک این لرزه ها و کاهش انرژی آن توسط سیستم TMD در نظر گرفته شده است. آونگ این سیستم به وزن ۶۶۰ تن از جنس فولاد بین دهانه های ۵ طبقه به همراه کابل های بسیار قوی که توانایی تحمل این جرم را در تکان های شدید دارند نصب شده است. این در حالی است که در منطقه تایپه در طول نیمی از سال وقوع طوفان و بادهای شدید پیش بینی شده است. مجموعه حلقه های فولادی (حلقه کمک فنر) برای دمپرها سیستم ثانویه ای است جهت گیردار نمودن مجموعه TMD، با دامنه حرکت بالغ بر یک متر طراحی شده است. زمانی که کمک فنر به وسیله میله با حلقه کمک فنر درگیر می شود در قسمت پایینی سیستم TMD با کابلی بلند در طرف دیگر سیستم TMD با ایجاد مقاومت لازم مانع واژگونی آونگ می

شود. با مقاومت این کابل ها سیستم TMD بین چندین حلقه کمک فتر احاطه می گردد. از این بررسی در این نوع می توان به طراحی سلسله طناب های سیمی شکل به منظور پشتیبانی از کابل هایی که خود در حال حفاظت از دیگر بخش های سازه می باشند را دریافت.

۲. برج کریستال اوزاکا ژاپن، به ارتفاع ۱۵۷ متر، پرپود اصلی ۴ ثانیه (در جهت S-N)، ۳ ثانیه (در جهت W-N)، با استفاده از یونیت های تهویه هوا و تانک های ذخیره یخ هر کدام به وزن ۹۰ تن که از تیرهای اصلی سقف آویزان شده اند. تانک دارای طول پاندولی ۴ متر در جهت شمال جنوب، دو تانک دارای طول پاندولی ۳ متر در جهت شرق غرب با قابلیت لغزش، میراگر های روغنی که به پاندول متصل هستند انرژی پاندول را جذب می کنند

نتیجه:

در طراحی سیستم TMD، حوادث باد و زلزله باید به طور جداگانه از هم لحاظ گردند، همچنین باید میزان جابجایی ها در حد کنترل شده ای بوده تا از میزان پیش بینی شده فراتر نرود. تعیین محل قرارگیری سیستم نیز بسیار حائز اهمیت بوده. نکته قابل توجه دیگر در طراحی سیستم های TMD، طراحی برای حوادثی با دوره بازگشت ۲۵۰۰ سال می باشد که دارای رفتاری غیر خطی با پاسخ پلاستیک می باشد.

منابع:

۱. Tuned Mass Dampers Under Excessive Structural Excitation \T.Haskett, B.Breukelman, J. Robinson, J. Kottelenberg \Motiveering In, Guelph, Ontario, Canada NIK IB^ .
۲. Tuned Mass Damper Systems\ Con Ch ۰۴.fm Page ۲۱۷ Thursday, July ۱۱,۲۰۰۲ .
۳. Adjustable Tuned Mass Damper, Document Type And Number: United States ۶۶۸۱۹۰۸ .
۴. How Tuned Mass Dampers Work\ New York And Chicago City Towers \www.skyscraper picture.com .

۵. میراگرهای جرمی تنظیم شده، دینامیک سازه ها، مهدی وجودی، ۱۳۸۱

