

# میراکننده جرمی تنظیم شده و کاربرد آن در کاهش ارتعاشات سازه‌ها

نوشیروان فرشیدیان فر، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

farshid@ferdowsi.um.ac.ir

پوریا اولیازاده، دانشجوی کارشناسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

po\_ol648@stu-mail.um.ac.ir

## چکیده

در سال‌های اخیر تمایل به افزایش ارتفاع ساختمان‌ها بیشتر گشته است و در نتیجه آن سازه‌ها سبک تر و نسبت به تحریک‌های خارجی مانند باد و زلزله آسیب پذیرتر شده اند. یکی از روش‌های مناسب برای جلوگیری از لرزش‌های ساختمان و کاهش پاسخ‌های دینامیکی آن استفاده از میراکننده جرمی تنظیم شده می‌باشد که در این مقاله به بررسی اثرات آن بر روی ساختمان‌های مرتفع مانند برج‌ها و همچنین پل‌ها پرداخته شده است. با مطالعه نمونه‌های گوناگون و تحقیقاتی که در این زمینه صورت پذیرفته است، این نکته حاصل می‌گردد که میراکننده جرمی تنظیم شده می‌تواند پاسخ‌های دینامیکی ساختمان را ۴۰٪ تا ۵۰٪ کاهش دهد. همچنین با افزایش سرعت بحرانی پل کمک فراوانی در کاهش ارتعاشات ناشی از باد کرده است. بنابراین میراکننده جرمی تنظیم شده می‌تواند مکانیزم مناسب و مفیدی در کاهش پاسخ‌های دینامیکی ناشی از ارتعاشات در سازه‌های حساس به تحریک‌های خارجی مانند باد و زلزله محسوب گردد.

واژه‌های کلیدی: میراکننده جرمی تنظیم شده، ساختمان‌های مرتفع، پل، تحریک باد و زلزله

## مقدمه

سربلندی اولین انگیزه برای ساخت بناهای تاریخی

مانند برج قدیم بابل، اهرام ثلاثه مصر و فانوس دریایی اسکندریه بوده است (شکل ۱).

در سال ۱۸۸۵، یک مهندس آمریکایی به نام ویلیام لیبارون جنی<sup>۱</sup> به عنوان خالق آسمان خراش‌های مدرن شناخته شد. او دریافت که ساختمان‌های اداری را

ساختمان‌های مرتفع با توجه به طرح و معماری بکار رفته در آنها، نظر بیشتر انسان‌ها را به خود معطوف می‌کنند و با در نظر گرفتن تاریخچه ساختمان‌سازی، افزایش ارتفاع ساختمان‌ها همیشه یکی از خواسته‌ها و تمایلات بشر بوده است. به نظر می‌رسد که غرور و

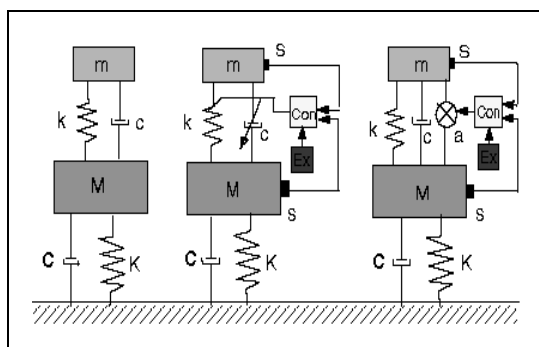
را به خود جلب کرده است. استفاده از میراکننده جرمی تنظیم شده با افزایش سرعت بحرانی و کاهش پاسخ‌های دینامیکی در پل‌ها همراه است و در نتیجه به افزایش امنیت پل می‌انجامد.



شکل (۱) - برج بابل [۱]

### میراکننده‌های کمکی

میزان میرایی یک سازه بر خلاف جرم و سختی آن به یک پدیده فیزیکی خاص وابسته نیست و تعیین میرایی ذاتی سازه با قطعیت امکان‌پذیر نمی‌باشد، با استفاده از سیستم‌های کمکی می‌توان کنترل بهتری بر میرایی سازه داشت. شکل (۲) سیستم‌های کمکی غیر فعال، شبه فعال



شکل (۲) - شماتیکی از مکانیزم‌های مختلف میراکننده‌های

کمکی [۲]

می‌توان با مواد متفاوتی ساخت و به جای استفاده از دیوارهای سنگی سنگین برای تحمل وزن طبقات فوقانی، از چارچوب فولادی استفاده کرد. او این طرح را در ساختمان ۱۰ طبقه بیمه در شهر شیکاگو به کار برد و دیوارهای سنگی را از اسکلت آن حذف کرد.

میل و علاقه در رسیدن به ارتفاع‌های بالاتر همواره با مشکلاتی روبرو بوده است. با پیشرفت آسانسورها و سازه‌های فلزی، برج‌ها و آسمان خراش‌ها مراحل تسخیر آسمان را ادامه می‌دهند. متأسفانه افزایش ارتفاع، اغلب با افزایش نرمی و کمبود میرایی سازه همراه است که در نتیجه باعث افزایش حساسیت سازه نسبت به باد می‌شود. نوآوری‌ها و اختراعات انجام شده کمک می‌کند تا سازه بتواند نیروهای بیشتری را تحمل کند ولی هنوز اثرات باد در کاهش آسایش و راحتی ساکنین ساختمان به چشم می‌خورد. نسل جدید تحقیقات درباره ساختمان‌های بلند به بررسی و حل مشکل اشاره شده، با استفاده از تغییر در طراحی سازه، آنرودینامیک ساختمان و استفاده از میراکننده‌های کمکی می‌پردازد (جدول ۱).

این مقاله به معرفی میراکننده جرمی تنظیم شده<sup>۲</sup> که یک مکانیزم کمکی غیرفعال بوده و روشی برای کاهش ارتعاشات سازه‌ها در برابر تحریک‌های ناشی از باد و زلزله به شمار می‌آید، می‌پردازد. همچنین، نمونه‌هایی از کاربرد این روش در برج‌ها و ساختمان‌های مرتفع و نتایج مفیدی که در بر داشته است نیز آورده شده است. علاوه بر این، کاربرد میراکننده جرمی تنظیم شده در پل‌ها نیز به طور گسترده مورد بحث قرار گرفته است. به دلیل استفاده از مواد سبک و مقاوم از سطح مقطع پل‌ها کاسته شده است و در نتیجه مطالعه دینامیک پل‌ها در وضعیت‌های مختلف مانند عبور قطارهای سریع‌السیر و همچنین بررسی اثرات باد، توجه محققان

جدول (۱) - وسایل و روش‌های کاهش ارتعاشات ناشی از باد [۲]

وسيله	نوع	شیوه و هدف	ملاحظات
طراحی آئرو دینامیکی	غیر فعال	بهبود خواص آئرو دینامیکی به منظور کاهش ضریب نیروی باد	گوشه‌های پخ خورده و ایجاد روزنه در ساختمان
طراحی سازه	غیر فعال	افزایش جرم ساختمان و در نتیجه کاهش نسبت جرمی هوا به ساختمان	افزایش هزینه
		افزایش سختی یا فرکانس طبیعی برای کاهش اندازه بی بعد سرعت باد	اجزای با ضخامت کم
میراکننده‌های کمکی	غیر فعال	افزودن موادی با خاصیت اتلاف انرژی، افزایش نسبت میرایی ساختمان	میراکننده فلزی، میراکننده مفاصل فلزی، میراکننده هادی، میراکننده اصطکاکی، میراکننده ویسکو الاستیک، میراکننده ویسکوز، میراکننده روغنی
		افزافه کردن سیستم‌های جرمی به منظور افزایش میزان میرایی	میراکننده جرمی تنظیم شده، میراکننده سیالی تنظیم شده
	فعال	کنترل نیرو از طریق اثرات اینرسی به هدف حداقل کردن پاسخ سازه	میراکننده جرمی فعال، میراکننده جرمی هیبریدی، پایدارکننده فعال ژيروسکوپ
		کنترل نیروهای آئرو دینامیکی برای کاهش ضریب نیرو یا حداقل کردن پاسخ سازه	روتور، جت، دستگاه‌های فرعی آئرو دینامیکی
		تغییر سختی برای اجتناب از تشدید	تغییر دهنده فعال سختی

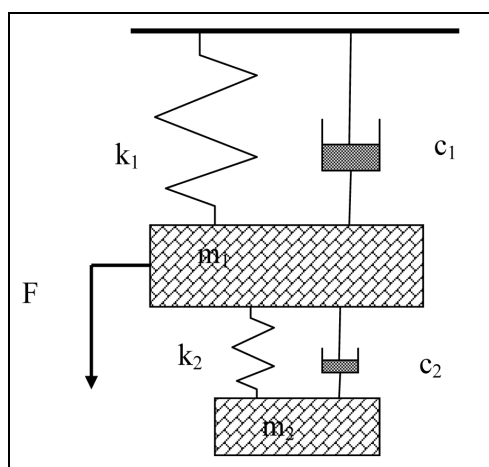
سازه مورد پذیرش قرار گرفته است. از میان میراکننده‌های غیر فعال که از طریق تغییر خصوصیات سیستم، کار میرا کردن ارتعاشات را به طور غیرمستقیم انجام می‌دهند، پرکاربردترین ایده افزودن یک جرم ثانویه می‌باشد که بوسیله تغییر پاسخ فرکانسی سازه، وظیفه خود را انجام می‌دهد.

#### میراکننده جرمی تنظیم شده (TMD)

میراکننده جرمی تنظیم شده دستگاهی است متشکل از جرم، فنر و میراکننده که برای کاهش پاسخ دینامیکی

و فعال را نشان می‌دهد که می‌توان با در نظرگیری جهت تغییر مکان در سیستم میراکنندگی اصلی سازه، از آنها استفاده کرد. کاربرد چنین سیستم‌هایی رو به افزایش است، به خصوص در کشور ژاپن که برای کاستن حرکات ناشی از باد و در بعضی موارد زلزله کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. میراکننده‌های کمکی معمولاً از یک سیستم فرعی که توانایی اتلاف انرژی را دارد، تشکیل شده‌اند. برای مثال افزودن یک جرم فرعی به سازه بوسیله فنر و میراکننده تا بدین طریق حرکات ساختمان خشی شود. چنین سیستمی بدلیل سادگی و قابلیت کاهش پاسخ‌های

سازه به آن وصل شده است (شکل ۳). فرکانس میراکننده با فرکانس خاصی از سازه تنظیم شده است و هنگامی که این فرکانس تحریک شود، میراکننده با حرکت سازه در حالت خارج از فاز رزونانس می‌کند. انرژی توسط نیروی اینرسی میراکننده که بر سازه اعمال می‌گردد، پراکنده می‌شود. جرم میراکننده نیروی اینرسی را در جهت مخالف حرکت سازه به آن منتقل می‌کند و در نتیجه نوسانات ساختمان را کاهش می‌دهد.



شکل (۳) - شماتیکی از یک سیستم میراکننده ساده

جرم میراکننده کسر کوچکی از کل وزن ساختمان است (۰/۲۵٪ الی ۰/۷٪) که حدود ۱٪ تا ۲٪ جرم اولین مد می‌باشد [۳]. علاوه بر تنظیم اولیه میراکننده در هنگام نصب، می‌توان آن را با تغییرات دوره تناوب ساختمان به دلیل اضافه کردن اجسام گوناگون و تغییرات در تعداد ساکنین، به روزرسانی کرد.

خلق ایده میراکننده جرمی تنظیم شده به عنوان یک جاذب ارتعاشی توسط فرام<sup>۳</sup> در سال ۱۹۰۹ صورت گرفت. بعدها این تئوری توسط پروفیسور امریتوس<sup>۴</sup> و پس از او مدیر گروه دپارتمان مهندسی مکانیک دانشگاه ام.آی.تی<sup>۵</sup>، آقای جاکب دن هارتوگ<sup>۶</sup> در کتاب

معروفش به نام ارتعاشات مکانیکی در سال ۱۹۴۰ بسط و توسعه داده شد. تئوری اولیه، برای سیستم یک درجه آزادی نامیرا که تحریک آن یک نیروی سینوسی است، قابل اجرا بود. به دلیل آن که رابطه بین نیروی باد و زمان هارمونیک نبود، تغییراتی در این تفکر توسط دن هارتوگ برای کاربردهای ساختمانی داده شد. تغییرات عمده و مهمی نیز توسط رانندال<sup>۷</sup> در سال ۱۹۸۱، و رابرتون<sup>۸</sup> در سال‌های ۱۹۸۰، ۱۹۸۱ و ۱۹۸۲ و تسای و لین<sup>۹</sup> در سال ۱۹۹۳ داده شده است [۳].

کارایی مکانیزم بوسیله خصوصیات دینامیکی، ضربه و مقدار جرم اضافه شده سنجیده می‌شود و همچنین به نسبت جرم میراکننده به جرم مؤثر ساختمان در مد مربوطه نیز بستگی دارد. در اغلب موارد محدودیت فضا اجازه نمی‌دهد تا میراکننده جرمی تنظیم شده به شکل مرسوم آن کاربرد چندانی داشته باشد، بنابراین از ترکیب‌های جایگزین مانند آونگ چند مرحله‌ای، آونگ معکوس، یاتاقان‌های هیدرواستاتیکی و یاتاقان‌های لاستیکی استفاده می‌کنند. فنرهای مارپیچی یا فنرهای پنوماتیکی با سختی متغیر معمولاً سختی لازم برای تنظیم میراکننده جرمی تنظیم شده را فراهم می‌کنند. گرچه این مکانیزم در اغلب موارد موثر بوده است، ولی می‌توان با استفاده از میراکننده‌های متعدد که عبارتست از تعدادی میراکننده با فرکانس‌های طبیعی در محدوده فرکانس کنترل که به صورت موازی به هم متصل اند، پاسخ بهتری دریافت کرد. برای یک جرم یکسان یک میراکننده مضاعف می‌تواند ضریب میرایی بیشتری را فراهم کند. در یک طوفان شدید، جرم میراکننده جرمی تنظیم شده متناسب با ساختمان حدود ۰/۶m - ۱/۵m حرکت می‌کند که بوسیله سنسورهایی (شتاب سنج) در ساختمان مانیتور می‌شود. در حال حاضر در کشورهای



جدول (۲) - میراکننده‌ها و مکانیزم‌های جرمی برای میراکننده جرمی تنظیم شده در کشور ژاپن (۱۱ ساختمان) [۲]

میراکننده‌های متصل به TMD		مکانیزم تقویت کننده جرمی	
۸	٪۷۳	۵	٪۴۶
میراکننده‌های روغنی		آونگ‌های چندگانه	
۲	٪۱۸	۴	٪۳۶
میراکننده‌های ویسکوالاستیک		یاتاقان‌های لاستیکی	
۱	٪۹	۲	٪۱۸
میراکننده‌های ویسکوز		یاتاقان‌های غلتکی و فنرهای مارپیچ	

دارد، همچنین می‌توان از آن در طولانی کردن عمر خستگی سازه اولیه استفاده کرد [۵].

• ارتعاشات ناشی از باد

طراحی سازه‌های خاص نیازمند سیستمی است که بار و نیروی وارده به آن را در طول عمر پیش‌بینی شده به خوبی تحمل کند. در این حالت ممکن است سازه برای هدف معینی طراحی شده باشد و وضعیت انسان را به عنوان یک اصل اساسی در نظر نگرفته باشد، در حالی که این اصل در ساختمان‌های مرتفع از اهمیت خاصی برخوردار است. با افزایش ارتفاع که معمولاً با افزایش نرمی و کاهش میرایی همراه است، سازه نسبت به نیروی باد حساس می‌شود. امکان دارد طراحی انجام شده تمامی نیروها را تحمل کند، حال آنکه هنوز حرکات اندکی وجود داشته که سبب ناراحتی و سلب آرامش ساکنین می‌شود. بنابراین تغییرات بسیار زیادی در طرح صورت می‌پذیرد تا عملکرد سازه بهبود یافته و قابلیت استفاده آن افزایش یابد. یک نمونه از کارهایی که در این باره صورت پذیرفته است، مدل کردن ساختمان به عنوان یک تیر عمودی اوایلر - برنولی<sup>۱۱</sup> و استفاده از میراکننده جرمی تنظیم شده به شکل یک سیستم جرم - فنر - میراکننده در بالای تیر برای جذب ارتعاشات در راستای افقی می‌باشد (شکل ۴) [۶].

ژاپن، آمریکا، استرالیا و کانادا از انواع میراکننده جرمی تنظیم شده استفاده می‌شود. برای نمونه در ژاپن ساختمان‌های متعددی از میراکننده‌های روغنی و تعداد کمتری از میراکننده‌های ویسکوز و ویسکوالاستیک استفاده کرده‌اند. در جدول (۲) میراکننده‌ها و مکانیزم‌های به کار رفته در ۱۱ ساختمان در کشور ژاپن آورده شده است، همانگونه که ملاحظه می‌گردد ۸ ساختمان (٪۷۳) از میراکننده روغنی استفاده کرده‌اند.

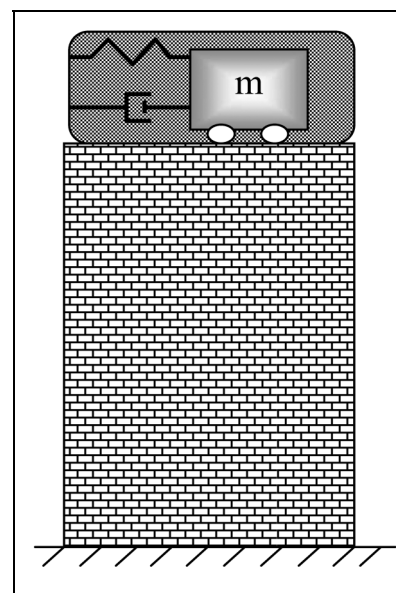
اثرات میراکننده جرمی تنظیم شده بر سازه‌ها

(۱) برج‌ها

پاسخ ساختمان به تحریک باد به عواملی همچون چگالی باد، اندازه ساختمان، شکل، جرم، سختی و توانایی سازه در اتلاف و پراکندن انرژی بستگی دارد. برج سیدنی یکی از اولین ساختمان‌هایی است که به مکانیزم میراکننده جرمی تنظیم شده مجهز شده است. این برج به ارتفاع ۲۵۰m از یک مخزن آب دونات شکل با عمق ۲/۱m و شعاع ۲/۱m و وزن ۱۸۰ تن برای افزایش میرایی مد اول و سیستمی مشابه به عنوان میراکننده جرمی تنظیم شده ثانویه به وزن ۴۰ تن برای افزایش میرایی مد دوم بهره برده است [۴]. یک میراکننده جرمی تنظیم شده بایستی به یک سازه که در حال نوسان است، متصل گردد که برای مقاصدی همچون کاهش ارتعاشات در برابر باد و زلزله کاربرد



پاسخ‌های دینامیکی یک ساختمان مرتفع بنا شده بر روی خاک منعطف متفاوت از ساخت نمونه مشابه بر روی پایه ثابت می‌باشد. هنگامی که سختی خاک در نظر گرفته شود، انرژی ارتعاشی سازه توسط فونداسیون به خاک منتقل می‌شود. به این پدیده تداخل خاک و سازه گفته می‌شود و هرچه سختی خاک بیشتر شود، تأثیر میراکننده جرمی تنظیم شده نیز افزایش می‌یابد [۷].



شکل (۴) - شماتیکی از یک سیستم جرم-فنر-میراکننده به کار رفته در بالای ساختمان

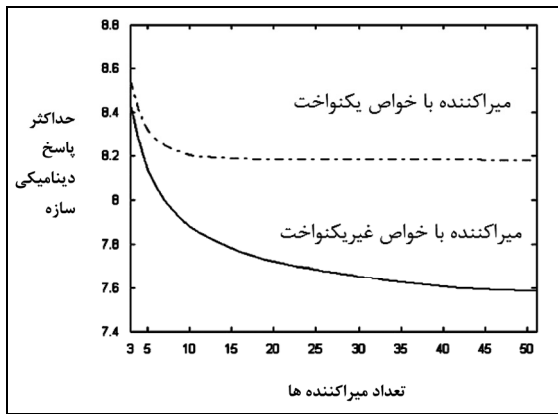
#### • ارتعاشات ناشی از زلزله

میراکننده‌های جرمی تنظیم شده غیرفعال با موفقیت در ساختمان‌های مرتفع برای کاهش ارتعاشات ناشی از باد بکار گرفته شده‌اند ولی هنوز توافق عمومی در کارا بودن میراکننده‌های جرمی تنظیم شده در کاهش پاسخ‌های ساختمان نسبت به ارتعاشات زلزله وجود ندارد. دلایل گوناگونی برای این موضوع بیان شده است. یکی از دلایل این است که میراکننده جرمی تنظیم شده یک دستگاه

غیرفعال است و برای عمل کردن نیاز به حرکت سازه اولیه دارد. در تحریک زلزله که مدت زمان آن از تحریک باد کمتر است، میراکننده زمان کافی برای اثربخشی قابل قبول ندارد و اگر پاسخ بیشینه در ثانیه‌های ابتدایی زمین لرزه رخ دهد، میراکننده جرمی تنظیم شده هیچ اثری نخواهد داشت. شتاب دادن حرکت میراکننده در آغاز تحریک سبب می‌شود تا میراکننده جرمی تنظیم شده در تحریک زلزله سریعتر عمل کند [۸]. مدل کردن ساختمان‌های مرتفع با تحریک زلزله از اهمیت خاصی برخوردار است و تحقیقات فراوانی صورت گرفته تا بتوان مدل دقیق‌تری از سیستم ارائه کرد. در نظر گرفتن ساختمان به عنوان یک سیستم پیوسته راهکاری متفاوت است که می‌تواند حل‌های دقیق‌تری را موجب شود. یک نمونه از روش‌هایی که در این زمینه بکار رفته است، استفاده از تئوری غیرخطی تیر اوپلر<sup>۱۱</sup> برای مدل کردن ساختمان‌های مرتفع با تعداد طبقات زیاد و یک میراکننده جرمی تنظیم شده در بالای آن می‌باشد [۹].

همانگونه که ملاحظه شد، در اکثر موارد از یک میراکننده جرمی تنظیم شده برای کنترل ارتعاشات سازه استفاده شده است و در این وضعیت مکانیزم حساسیت زیادی به نسبت فرکانسی بین میراکننده و سازه و نسبت میرایی میراکننده جرمی تنظیم شده خواهد داشت و در نتیجه در صورت عدم تنظیم مناسب، تأثیرات آن به شکل قابل توجهی کاهش خواهد یافت، بنابراین استفاده از چند میراکننده جرمی تنظیم شده با خواص دینامیکی مختلف می‌تواند این مشکل را برطرف کند. تحقیقات گسترده‌ای بر روی میراکننده‌های جرمی تنظیم شده چندگانه با خواص معین مانند نسبت میرایی مشخص، توزیع فرکانسی ثابت، توزیع جرمی ثابت و سختی ثابت صورت پذیرفته است. در ادامه محققین اندکی توجه خود را بر روی اثرات میراکننده جرمی تنظیم





شکل (۵) - حداکثر پاسخ دینامیکی سازه با سیستم میراکننده جرمی تنظیم شده چندگانه [۱۰]

یکی از مهمترین پروژه‌های عمرانی در کشور تایوان طراحی و ساخت خطوط راه‌آهن با سرعت بالا در مسیری به مسافت ۳۴۵ km می‌باشد. به دلیل صرفه‌جویی در زمین و زمان ساخت، بیشتر مسافت به شکل پل ساخته شده است. چهار معیار در پاسخ دینامیکی پل‌ها و قطارها در نظر گرفته شده است:

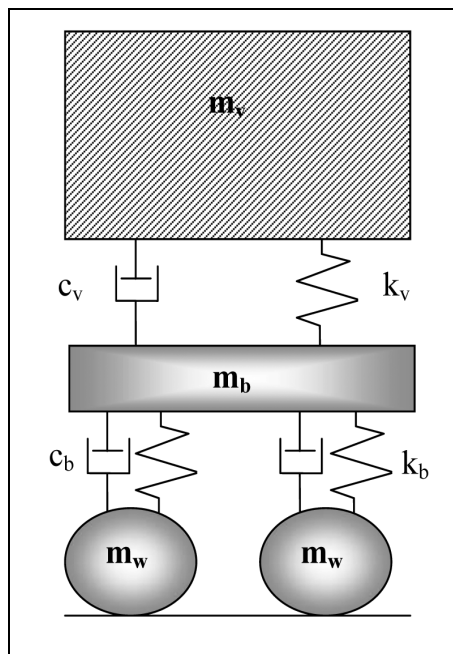
(۱) جابه‌جایی عمودی پل، (۲) شتاب عمودی پل، (۳) چرخش انتهای پل (پیچش عرض پل) و (۴) شتاب عمودی قطار. به منظور دستیابی به این اهداف اثرات میراکننده جرمی تنظیم شده بر پل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مدل‌هایی از قطار، پل و نیروی وارد بر پل ساخته شد. شکل (۶) نمونه‌ای از مدل نیروی قطار را نشان می‌دهد که شامل سیستم جرم-فنر-ضربه‌گیر، یک سیستم واگن با دو درجه آزادی و دو جفت چرخ می‌باشد. که در آن  $m_v$ ،  $m_b$  و  $m_w$  به ترتیب نیمی از جرم واگن قطار، واگن ویژه و جفت چرخ‌ها هستند.  $c_v$  و  $c_b$  به ترتیب ضریب میرایی فنر بالشتک عمودی و فنر محور هستند.  $k_v$  و  $k_b$  نیز به ترتیب ضریب سختی فنر بالشتک عمودی و فنر محور می‌باشند.

شده با خواص غیریکنواخت معطوف کرده‌اند. اثرات میراکننده جرمی تنظیم شده چندگانه به تعداد میراکننده‌های بکار رفته در آن وابسته است، به طوری که با نسبت جرمی ثابت، سودمندی میراکننده جرمی تنظیم شده چندگانه با افزایش تعداد میراکننده‌ها بهتر می‌گردد. یکی از مزایای میراکننده جرمی تنظیم شده چندگانه با خواص غیریکنواخت که در شکل (۵) نشان داده شده، این است که می‌تواند با تعداد میراکننده کمتر، کاهش پاسخ دینامیکی یکسانی در مقایسه با میراکننده با خواص یکنواخت داشته باشد [۱۰] که امتیاز بسیار خوبی در اشغال کمتر فضا محسوب می‌شود. البته همان طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد میراکننده‌ها از مقدار معینی، تأثیری در کاهش پاسخ دینامیکی دیده نمی‌شود و باید مقدار بهینه آن محاسبه شود.

## (۲) پل‌ها

به دلیل محدودیت و کمبود زمین، بیشتر سازه‌های ترابری و حمل‌ونقل مانند بزرگراه‌ها و خطوط راه‌آهن، در نواحی شهری به شکل پل ساخته شده‌اند. با پیشرفت‌هایی که در زمینه مواد با کارایی بالا و تکنیک‌های ساخت و ساز صورت گرفته است، پل‌ها افزایش طول یافته‌اند که سبب افزایش نرمی آنها می‌شود. هنگامی که نیروهای خارجی شدیدی بر آنها اعمال شود، تغییر شکل زیادی پیدا می‌کنند که می‌تواند نیروهای خستگی را افزایش داده و از عمر پل بکاهد. در این زمینه سیستم‌های کنترل ارتعاشات گوناگونی برای کاهش پاسخ دینامیکی بکار رفته است. یکی از این مکانیزمها، میراکننده جرمی تنظیم شده می‌باشد که می‌توان آن را در سازه‌های موجود به کار برد که نسبت به دستگاه‌های کنترلی دیگر اختلالات کمتری در سازه ایجاد می‌کند.

سپس معادلات حرکت به همراه میراکننده جرمی تنظیم شده را بدست آورده و آنها را حل کردند. برای بررسی نتایج بدست آمده مکانیزم میراکننده جرمی تنظیم شده را برای پلی به طول ۴۰ m شده (مشخصات میراکننده در جدول (۳) آورده شده است). مورد آزمایش قرار داده و نمودارهای جابه‌جایی و شتاب پل بر حسب زمان را رسم کردند و مشاهده شد که کاهش قابل توجهی در پاسخ‌ها پس از نصب میراکننده جرمی تنظیم شده رخ داده است. جدول (۴) این اثرات را برای سه نوع قطار نشان می‌دهد که در آن S.K.S, I.C.E و T.G.V به ترتیب قطارهای آلمانی، ژاپنی و فرانسوی می‌باشند.



شکل (۶) - مدل نیروی وارد بر پل

جدول (۳) - پارامترهای بهینه میراکننده جرمی تنظیم شده [۱۱]

جرم (kg)	میرایی (Ns/m)	سختی (N/m)
۷۶۴۸	۱۶۹۷۸	$۳/۷۷ \times ۱۰^۶$

جدول (۴) - پاسخ‌های بیشینه قطار و پل با میراکننده جرمی تنظیم شده و بدون آن [۱۲]

نوع قطار	وضعیت میراکننده جرمی تنظیم شده	بیشترین تغییر مکان عمودی در مرکز (cm)	بیشترین شتاب عمودی در مرکز (g)	بیشترین چرخش در انتهای سمت راست (۴-۱۰ رادیان)	بیشترین شتاب عمودی در واگن (g)
I.C.E	بدون میراکننده	۰/۲۵۵	۰/۰۴۵	۲/۰۲	۰/۰۰۶
	با میراکننده	۰/۲۴۷	۰/۰۴۱	۲/۰۵	۰/۰۰۶
S.K.S	بدون میراکننده	۰/۲۲۷	۰/۰۵۲	۱/۷۸	۰/۰۱۲
	با میراکننده	۰/۱۸۹	۰/۰۳۴	۱/۵۰	۰/۰۰۸
T.G.V	بدون میراکننده	۰/۳۶۲	۰/۰۹۵	۲/۹۷	۰/۰۱۷
	با میراکننده	۰/۲۸۱	۰/۰۵۵	۲/۳۲	۰/۰۱۱





در بیشتر موارد از یک عدد میراکننده جرمی تنظیم شده و برای یک فرکانس معین استفاده می‌شود. خطا در تعیین فرکانس سازه یا در ساخت میراکننده جرمی تنظیم شده می‌تواند سبب عدم تنظیم آن با فرکانس اصلی سازه شود. از سوی دیگر افزایش سرعت قطار احتمال رخ دادن پدیده تشدید را افزایش داده، این در حالی است که در اکثر موارد به کاهش اولین پاسخ تشدید توجه می‌شود که برای پل‌های متوالی مناسب نیست، زیرا ممکن است بیشتر از یک قله اصلی تشدید وجود داشته باشد که به مسئله مدهای چندگانه ارتعاشی معروف می‌باشد. برای کاهش قله‌های چندگانه تشدید از سیستمی شامل چند واحد میراکننده جرمی تنظیم شده استفاده می‌گردد که هر کدام برای یک فرکانس تشدید تنظیم می‌شود [۱۱]. بدین طریق که با صرف نظر کردن از اثرات میرایی پل و استفاده از معیار بهینه‌گی دن‌هارتوگ برای کمینه کردن هر قله و سپس با برابر قرار دادن دامنه پاسخ‌های قله‌های مورد نظر، جرم هر میراکننده جرمی تنظیم شده بدست می‌آید. در ادامه می‌توان با کمک روش کمینه - بیشینه<sup>۱۲</sup> پارامترهای بهینه هر میراکننده جرمی تنظیم شده را محاسبه کرد [۱۲].

### ۳) پل‌های با دهانه بزرگ

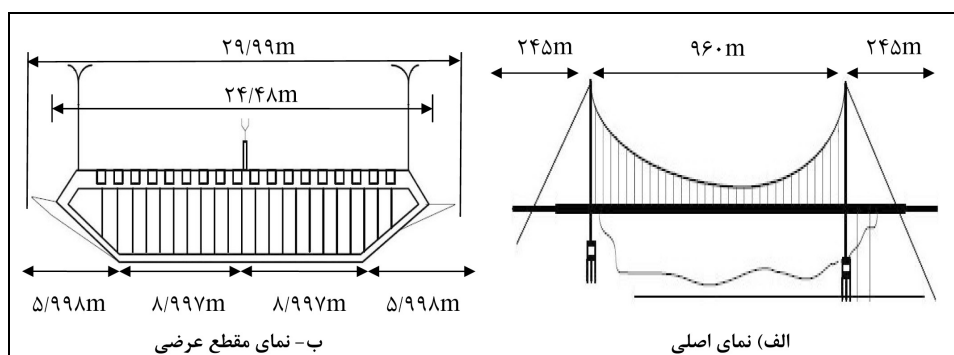
پل‌های با دهانه بزرگ هنگامی که تحت تحریک باد قرار می‌گیرند، رفتار دینامیکی پیچیده‌ای را از خود نشان می‌دهند. ارتعاشات شلاقی<sup>۱۳</sup> ناشی از آشوب‌ناکی باد در بازه وسیعی از سرعت باد رخ می‌دهد. با افزایش سرعت باد، ناپایداری‌های آئرو دینامیکی مانند لرزش<sup>۱۴</sup> در سرعت‌های بالا می‌تواند به وقوع بپیوندد. لرزش یک پدیده آئرو دینامیکی ناپایدار و از نوع ارتعاشات خود

برانگیخته است که به دلیل تداخل بین باد و حرکت سازه به وقوع می‌پیوندد و می‌تواند سبب نوسان پیوسته پل، افزایش دامنه و در نهایت به فروپاشی کامل آن بیانجامد؛ در نتیجه یکی از معیارهای مهم طراحی پل‌های با دهانه بزرگ به شمار می‌آید. با افزایش طول دهانه پل، کنترل پاسخ آنها به یک نگرانی بدل شده است، در نتیجه تحقیقات بسیاری برای کاهش ارتعاشات شلاقی و بهبود پایداری آئرو دینامیکی پل‌های با دهانه بزرگ در حین ساخت و پس از آن، انجام شده است. در میان تمامی روش‌های کنترل، مطالعات وسیعی بر روی جاذب‌های دینامیکی مانند میراکننده‌های جرمی تنظیم شده در فرونشاندن دینامیک ضربه‌ها و بالا بردن پایداری لرزشی پل‌ها انجام گردیده است. همانند دستگاه‌های کنترلی قدیمی، جاذب‌های دینامیکی انرژی خارجی را توسط فراهم کردن میرایی مورد نیاز در مدهای مورد نظر، تلف می‌کنند. در طراحی یک میراکننده جرمی تنظیم شده متعارف، فرکانس آن را با فرکانس مدال مد اصلی تنظیم می‌کنند تا تشدید را کم کند. هنگامی که جفت‌شدگی مدی ضعیف باشد، پل را می‌توان ترکیب ساده‌ای از چندین سیستم یک درجه آزادی در نظر گرفت که تحلیل تک مدی برای آن قابل قبول است. در چنین حالتی نسبت میرایی معادل را برای کنترل مؤثر هر مد می‌توان تنظیم کرد.

شکل (۷) دو نما از پل معلق بیچانگ<sup>۱۵</sup> در جنوب چین را نشان می‌دهد. طول دهانه اصلی این پل ۹۶۰ m و دو دهانه جانبی آن ۲۴۵ m است و ارتفاع عرشه برج از سطح آب ۵۰ m می‌باشد. پارامترهای اصلی پل در جدول (۵) آورده شده است. تحلیل‌های انجام شده به کمک تونل باد نشان می‌دهد که مد اول خمشی و مد اول پیچشی، دو مد اصلی برای ارتعاشات شلاقی و

مدال، بدست آورد. یک میراکننده جرمی تنظیم شده زمانی موثر است که با سازه اصلی تنظیم شده باشد. در مورد پدیده لرزش، استفاده از میراکننده جرمی تنظیم شده مرسوم روش مناسبی نمی باشد، زیرا فرکانس سازه اصلی تغییرات زیادی دارد. روش پیشنهاد شده توسط وون<sup>۱۱</sup> از مکانیزم میراکننده جرمی تنظیم شده برای ایجاد اثرات آئرو دینامیکی بهره می برد. این مکانیزم صفحات کنترل را فعال کرده و در نتیجه جریان هوا اطراف عرشه پل را تغییر می دهد. علاوه بر این، دامنه صفحات کنترل اثر کمی بر سرعت حمله دارد و زاویه فاز بین عرشه و صفحه کنترل پهنای باند وسیعی برای تنظیم شدن دارد. بنابراین، سیستم پیشنهادی، مشکل میراکننده جرمی تنظیم شده مرسوم را ندارد [۱۴].

لرزشی هستند. در ضمن، جفت شدگی مدی شدیدی بین این دو مد در سرعت های بالا به دلیل اثرات آئرولاستیک مشاهده شده است. برای مطالعه کارایی میراکننده جرمی تنظیم شده، جرم تمامی میراکننده ها ۱٪ مد خمشی پل فرض شده است. ۱۲ میراکننده جرمی تنظیم شده در دو طرف در ناحیه وسط دهانه اصلی نصب شده است که وزن هریک ۱۱ تن می باشد؛ مشاهده شد هنگامی که اثرات جفت شدگی آئرو دینامیکی شدیدی وجود دارد، طراحی مرسوم میراکننده های جرمی تنظیم شده که فقط ارتعاشات تشدید را در نظر بگیرد برای کنترل مناسب نمی باشد و متغیرهای بهینه میراکننده جرمی تنظیم شده را بایستی در بازه کاملی از مدها نه فقط نزدیک فرکانس های

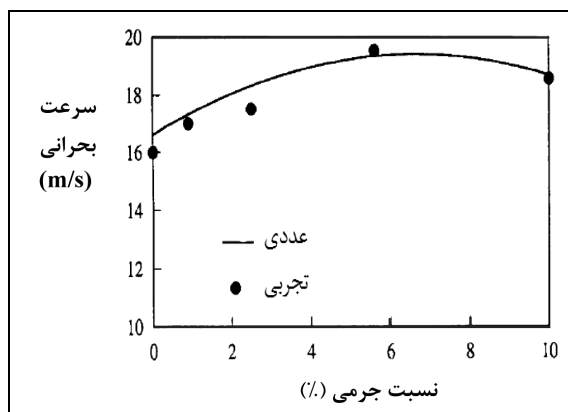


شکل (۷) - پل معلق بیجانگ [۱۳]

جدول (۵) - پارامترهای اصلی پل معلق بیجانگ [۱۳]

اندازه	پارامتر	اندازه	پارامتر
$15/07 \times 10^3 \text{ Kg/m}$	جرم معادل به ازای واحد طول	۹۶۰m	دهانه اصلی
$1111 \times 10^3 \text{ Kg/m}$	گشتاور جرمی اینرسی معادل به ازای واحد طول	۳۰m	عرض عرشه
-۰/۱۲	ضریب نیروی بالابرنده	۵۰m	فاصله از سطح آب
۰/۸۵۸	ضریب نیروی بازدارنده	۲۹m/s	سرعت باد
۰/۰۲۳	ضریب نوسانی	۰/۰۰۵	نسبت میرایی سازه

با ازدیاد تعداد میراکننده جرمی تنظیم شده بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد، بنابراین، انتخاب صحیح و مناسب تعداد میراکننده جرمی تنظیم شده بسیار حائز اهمیت است. برای نمونه شکل (۹) نتایج محاسبات انجام شده بر روی پل یانگ پو<sup>۲۰</sup> در شهر شانگهای چین را نشان می‌دهد. این پل با طول دهانه مرکزی ۶۰۲ m و عرشه کامپوزیتی حتی در برابر بادهای معمولی دچار ارتعاشات شدیدی می‌شود. ملاحظه می‌گردد که نسبت کاهش با افزایش تعداد میراکننده‌های جرمی تنظیم شده به بیش از ۱۴ عدد، همگرا می‌گردد. در نتیجه تعداد ۱۴ میراکننده جرمی تنظیم شده انتخابی مناسب برای مکانیزم میراکننده است [۱۸].



شکل (۸) - بررسی تاثیرات نسبت جرمی [۱۷]

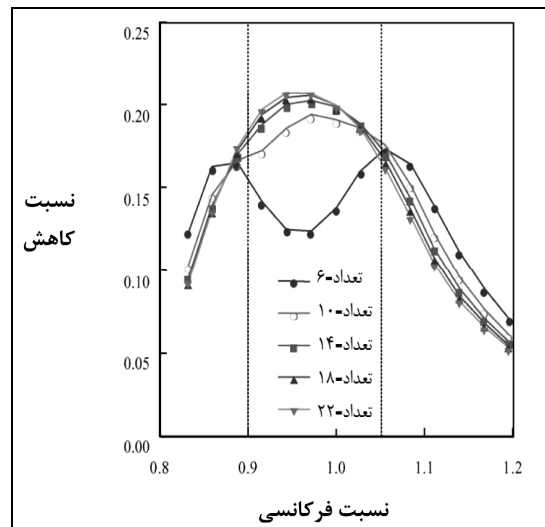
در اکثر موارد هنگامی که از میراکننده جرمی تنظیم شده چندگانه استفاده می‌شود، فرکانس هر یک از میراکننده‌ها با هم برابر می‌باشد. مدل جدیدی از میراکننده‌ها به نام میراکننده جرمی تنظیم شده چندگانه بی قاعده<sup>۲۱</sup> توسط وون پیشنهاد شده، که در آن هر میراکننده جرمی تنظیم شده، فرکانس و نسبت میرایی متفاوتی با میراکننده‌های دیگر دارد که این موضوع می‌تواند طراحی‌های متعدد و گوناگونی را سبب شود که نتایج خوبی را در بر خواهد داشت. در این حالت فرض می‌شود که هر میراکننده جرمی تنظیم شده،

همچنین میراکننده جرمی تنظیم شده در افزایش سرعت بحرانی برای مشتقات گوناگون لرزش مفید می‌باشد. لین<sup>۱۷</sup> مدلی برای میراکننده جرمی تنظیم شده ارائه داده و عملکرد آن را در دو مثال بررسی کرده است. در نمونه اول، سرعت بحرانی پل بدون میراکننده ۶۸/۳ m/s و در صورت استفاده از مدل پیشنهادی به ۷۵/۴ m/s افزایش یافته است (۱۰/۴٪) و در نمونه دوم افزایش چشم‌گیر ۲۰/۵٪ را داشته است (از ۵۳/۶ m/s به ۶۴/۶ m/s) [۱۵]. نکته قابل توجه در این باره این است که سرعت بحرانی در هنگام ساخت بسیار کمتر از پل ساخته شده و کامل است [۱۶]، بنابراین بایستی تمهیدات لازم و ضروری را در زمان ساخت برای جلوگیری از وارد آمدن صدمات فروپاشی پل به کار برد.

اثرات استفاده از میراکننده جرمی تنظیم شده در کاهش ارتعاشات و افزایش سرعت بحرانی ملاحظه شد. پارامترهای متعددی در بهبود خواص میراکننده دخالت دارند که یکی از آنها نسبت جرم میراکننده به پل یا اینرسی گشتاور جرمی می‌باشد. شکل (۸) اثرات نسبت جرمی را بر سرعت بحرانی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که کارایی و کنترل با زیاد شدن نسبت جرمی افزایش می‌یابد. البته این نتایج که از روش حل عددی در مورد پل تایگر گیت<sup>۱۸</sup> بر روی رودخانه پیرل<sup>۱۹</sup> در جنوب چین به دست آمده و با آزمایشات تجربی نیز مطابقت دارند، نشان دهنده این مطلب هستند که با زیاد شدن نسبت جرمی و میل کردن آن به ۱۰٪، از کارایی میراکننده جرمی تنظیم شده کاسته می‌گردد [۱۷].

یکی از پارامترهای موثر دیگر، تعداد میراکننده‌ها می‌باشد. اگر از یک یا تعداد کمی میراکننده جرمی تنظیم شده استفاده شود، ممکن است نتواند تغییرات فرکانس ناشی از اثرات باد و ماشین را کنترل کند. از سوی دیگر هزینه این سیستم

جرم یکسانی داشته باشد و فرکانس و نسبت میرایی هر یک از میراکننده‌های جرمی تنظیم شده پارامترهای طراحی هستند که بایستی مقدار بهینه آن‌ها محاسبه شود. یکی از این نتایج افزایش کمینه سرعت لرزش است. محاسبات برای پل گلدن‌گیت<sup>۲۲</sup> نشان می‌دهند که در صورت بکارگیری میراکننده جرمی تنظیم شده چندگانه سرعت لرزش ۱۹٪ و در صورت استفاده از میراکننده جرمی تنظیم شده چندگانه بی قاعده ۳۷٪ نسبت به میراکننده جرمی تنظیم شده معمولی افزایش خواهد داشت [۱۹].



شکل (۹) - اثرات تعداد میراکننده جرمی تنظیم شده بر نسبت کاهش [۱۸]

به دلیل این واقعیت که پل‌های با دهانه بزرگ نسبت به باد بسیار حساس هستند، تحقیقات وسیعی برای بهبود عملکرد آئرودینامیکی پل‌ها صورت گرفته است که چند نمونه از آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. اما مطالعات اندکی بر روی طراحی و محاسبه عملکرد روش‌های کنترلی مختلف با در نظر گرفتن اثرات باد و وسایل نقلیه با هم، صورت گرفته است. تصادف وسایل نقلیه می‌تواند سبب ایجاد ترافیک سنگین بر روی پل و

وارد آوردن نیروهای زیادی بر آن شود. گرچه در سال‌های اخیر تدابیری از سوی کارخانجات ماشین‌سازی و همچنین سازمان ترافیک برای کاهش خطرات حاصل از ماشین‌ها در نظر گرفته شده است، ولی این سیستم در ماشین‌های جدید بکار رفته است و برای ماشین‌های سنگین استفاده نشده است. بدین منظور چن<sup>۲۳</sup> طرح استفاده از میراکننده جرمی تنظیم شده را برای کاهش اثرات ناشی از باد و وسایل نقلیه ارائه داده است. به منظور بررسی اثرات کنترلی این مکانیزم سه حالت در نظر گرفته شده: (۱) میراکننده‌ها فقط به پل متصل شوند، (۲) میراکننده‌ها فقط به کامیون متصل شوند و (۳) میراکننده‌ها هم به پل و هم به کامیون متصل گردند که در مورد اول به خوبی پاسخ‌های خمشی و عمودی پل را کنترل کرده و کارایی در حدود ۱۳٪ - ۱۵٪ دارد. در حالت دوم اگر میراکننده‌ها به خوبی تنظیم شده باشند، می‌توانند پاسخ کامیون را ۷٪ - ۱۰٪ کاهش دهند. البته اگر میراکننده جرمی تنظیم شده فقط بر روی پل نصب شده باشد (حالت اول) بر شتاب وسایل نقلیه اثرگذار خواهد بود و آن را کاهش می‌دهد ولی تأثیر زیادی ندارد؛ زیرا زمان عبور وسیله نقلیه از روی پل کم بوده و نمی‌تواند همانند زلزله حرکت میراکننده جرمی تنظیم شده را افزایش دهد [۲۰] و در وضعیتی که میراکننده‌ها هم بر روی پل و هم بر روی کامیون نصب شده باشند، هر یک به طور مستقل کار خواهند کرد و اثر جداگانه‌ای خواهند گذاشت [۲۱].

### نتیجه‌گیری

در حالی که بکارگیری تکنولوژی میراکننده جرمی تنظیم شده، راه را برای افزایش ارتفاع سازه‌ها هموار کرده است ولی همیشه سعی بر این می‌باشد تا با انجام مطالعات جدید،



- Top”, *Journal of Nonlinear Dyn*, Vol. 50, pp. 169–190, (2007).
- 7- Liu, M. Y.; Chiang, W. L.; Hwang, J. H.; and Chu, C. R.; “Wind-induced Vibration of High-rise Building with Tuned Mass Damper Including Soil–structure Interaction”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, pp. 1092–1102, (2008).
- 8- Tsai, H. C.; “The Effect of Tuned Mass Dampers on the Seismic Response of base Isolated Structures”, *Journal of Solids Structures*, Vol. 32, pp. 1195–1210, (1995).
- 9- Wang, A. P.; Fung, R. F.; and Huang, S. C.; “Dynamic Analysis of a Tall Building with a Tuned Mass Damper Device Subjected to Earthquake Excitations,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 244, pp. 123–136, (2001).
- 10- Li, H. N.; and Ni, X. L.; “Optimization of Non-uniformly Distributed Multiple Tuned Mass Damper”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 308, pp. 80–97, (2007).
- 11- Yau, J. D.; and Yang, Y. B.; “A Wideband MTMD System for Reducing the Dynamic Response of Continuous Truss Bridges to Moving Train Loads”, *Journal of Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 1795–1807, (2004).
- 12- Yau, J. D.; and Yang, Y. B.; “Vibration Reduction for Cable-stayed Bridges Traveled by High-speed Trains”, *Journal of Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, pp. 341–359, (2004).
- 13- Chen, S.; “Dynamic Performance of Bridges and Vehicles Under Strong Wind”, Thesis of Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering, (2004).
- 14- Kwon, S. D.; Jung, M. S. S.; and Chang, S. P.; “A New Passive Aerodynamic Control Method for Bridge Flutter”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 86, pp. 187–202, (2000).
- 15- Lin, Y. Y.; Cheng, C. M.; and Lee, C. H., “A Tuned Mass Damper for Suppressing the Coupled Flexural and Torsional Buffeting Response of Long-span Bridges”, *Journal of Engineering Structures*, Vol. 22, pp. 1195–1204, (2000).
- 16- Boonyapinyo, V.; Aksorn, A.; and Lukkunaprasit, P.; “Suppression of Aerodynamic Response of Suspension Bridges During Erection and After Completion by Using Tuned Mass Dampers”, *Journal of Wind and Structures*, Vol. 10, pp. 1–22, (2007).

نتایج دقیق‌تر و مطمئن‌تری در نحوه کاهش پاسخ دینامیکی سازه حاصل شود. در این مقاله شیوه میرایی غیرفعال میراکننده جرمی تنظیم شده با کاربردهای متفاوت در کنترل خرابی‌های ناشی از ارتعاشات در سازه‌ها معرفی شد. علاوه بر مباحث تئوری، تفاوت موجود بین شیوه‌های میرایی غیرفعال به ماده مورد استفاده، طراحی، اجزاء، شکل و نحوه عملکرد آن بر می‌گردد. هدف اصلی بکارگیری میراکننده جرمی تنظیم شده غیرفعال، کاهش انرژی ارتعاشی در سازه ناشی از زمین لرزه و بادهای شدید است که در نتیجه از تغییر شکل آن می‌کاهد. با توجه به بررسی صورت گرفته میراکننده جرمی تنظیم شده غیرفعال به عنوان یک راه‌حل مناسب برای کاهش حرکت سازه به دلیل ارتعاشات ناشی از بادهای قوی و زلزله شناخته شد. سودمندی این مکانیزم به پارامترهای متعددی وابسته است مانند نسبت میرایی، فرکانس طبیعی، تعداد میراکننده و غیره. میراکننده‌ها می‌توانند پاسخ سازه را با افزایش میزان میرایی کم کنند و از حرکت آن به میزان ۳۰٪ - ۳۵٪ بکاهند [۲].

## مراجع

- 1- <http://shepherdtheflock.com>
- 2- Kareem, A.; Kijewski, T.; and Tamura, Y.; “Mitigation of Motion of Tall Buildings with Recent Applications”, *Journal of Wind and Structures*, Vol. 2, pp 132-184.
- 3- Kourakis, I.; “Structural Systems and Tuned Mass Dampers of Super Tall Buildings Case Study of Taipei101”, Thesis of Master of Engineering in Civil and Environmental Engineering, (2007).
- 4- Kwok, K. C. S.; “Damping Increase in Building with Tuned Mass Damper”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 110, pp. 1645–1649, (1984).
- 5- Li, H. J.; and Hu, S. L. J.; “Tuned Mass Damper Design for Optimally Minimizing Fatigue Damage”, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, pp. 703–707, (2002).
- 6- Hijmissen, J. W.; and van Horssen, W. T.; “On Aspects of Damping for a Vertical Beam with a Tuned Mass Damper at the

## پی‌نوشت

- 1- LeBaron Jenny
- 2- Tuned Mass Damper (TMD)
- 3- Frahm
- 4- Professor Emeritus
- 5- M.I.T
- 6- Jacob Den Hartog
- 7- Randall
- 8- Warburton
- 9- Tsai & Lin
- 10- Euler- Bernoulli Beam
- 11- Non-Linear Euler-Beam Theory
- 12- Minimum-Maximum Approach
- 13- Buffeting
- 14- Flutter
- 15- Yichang Suspension Bridge
- 16- Kwon
- 17- Lin
- 18- Tiger Gate Bridge
- 19- Pearl River
- 20- Yangpu Bridge
- 21- Irregular Multiple Tuned Mass Damper (IMTMD)
- 22- Golden Gate Bridge
- 23- Chen

\* \* \*

- 17- Gu, M.; Chang, C. C.; Wu, W.; and Xiang, H. F.; "Increase of Critical Flutter Wind Speed of Long-span Bridges Using Tuned Mass Dampers", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 73, pp. 111-123, (1998).
- 18- Gu, M.; Chen, S. R.; and Chang, C. C.; "Parametric Study on Multiple Tuned Mass Dampers for Buffeting Control of Yangpu Bridge", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 89, pp. 987-1000, (2001).
- 19- Kwon, S. D.; and Park, K. S.; "Suppression of Bridge Flutter Using Tuned Mass Dampers Based on Robust Performance Design," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 92, pp. 919-924, (2004).
- 20- Kwon, H. C.; Kim, M. C.; and Lee, I. V.; "Vibration Control of Bridges Under Moving Loads", Journal of Computers and Structures, Vol. 66, pp. 473-480, (1998).
- 21- Chen, S. R.; and Wu, J.; "Performance Enhancement of Bridge Infrastructure Systems Long-span Bridge, Moving Trucks and Wind with Tuned Mass Dampers," Journal of Engineering Structures, Vol. 30, pp. 3316-3324, (2008).

## مجتمع آموزشی نوآوران خلاق

برگزار کننده دوره ها و همایش های تخصصی فنی و مهندسی

- دوره ترانس گذاری هندسی و ابعادی (GD&T)

- دوره طراحی قیود و ابزارهای کنترل ابعادی و هندسی (Gage)

- دوره طراحی جیگ و فیکسچر

- دوره مهندسی معکوس

- دوره مهندسی و تدوین فرآیندهای ماشین کاری

- دوره تجهیزات اندازه گیری گاز و مایعات در صنعت نفت (Metering)

- دوره مدیریت پروژه (PMBOK ۲۰۰۸)

- دوره مهندسی ارزش

- دوره های تکنیک های کیفیتی (Sigma-APQP ۶ و ...)

تلفن تماس: ۷۷۴۵۳۷۵۸-۷۷۲۲۹۱۸۳

آدرس سایت: [www.norsico.com](http://www.norsico.com)

ایمیل: [info@norsico.com](mailto:info@norsico.com)

- نرم افزارهای تخصصی شامل:

- ABAQUS

- Catia

- Ansys

- Ansys WorkBench

- Solid Works

- Solid Edge

- Mechanical Desktop

- PDMS

- Primavera P3E

- Carrier

- Power Mill

- Auto Cad

کلید موفقیت در یادگیری علوم جدید و به روز رسانی دانش گذشته است.