مقاله

کاربردها، مزایا و معایب جاذب‌های پویای ارتعاشات

بهشاد نوری، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد
Behshad_noori@yahoo.com
انوشیروان فرشیدیان فر، استاد دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
Farshid@um.ac.ir

چکیده

عملکرد دینامیکی سازه‌ها در شرایط متنوع کاری از جمله پارامترهای مهم در طراحی سازه‌های مهندسی است. استفاده از سیستم جرم، فنر و میرگرا - که تحت عنوان جاذب پویای ارتعاشات[1] شناخته می‌شود - یکی از ساده‌ترین و مهم‌ترین وسائلی است که می‌تواند کارآیی دینامیکی سازه را بهبود بخشد. این جاذب‌ها در کنترل پدیده‌هایی همچون تشدید و خستگی نقش مهمی ایفا می‌کنند. همچنین با وجود عدم استفاده از منبع خارجی کارایی بالایی دارند. این دلائل آنها را به یکی از محبوب‌ترین راه‌های کنترل ارتعاشات در صنایع گوناگون مبدل کرده است. در این مقاله، نخست انواع گوناگون جاذب‌ها معرفی می‌شوند. در ادامه، کاربردهای متنوع آنها در پروژه‌های ساختمانی و پل‌ها بررسی می‌شود. در انتها، ضمن بیان خصوصیات ویژهٔ این جاذب‌ها جهت استفاده در صنعت هوافضا، انواع متداول آنها تشریح می‌شود.

واژگان کلیدی: غیرفعال ارتعاشات، جاذب ارتعاشی، عملکرد دینامیکی، میراگر جرمی

مقدمه

جلوگیری از ارتعاشات ناخواستهٔ سازه‌هایی چون پل‌ها، ساختمان‌های بلند، دودکش‌ها، ماشین‌ها و اجزاء به‌کار رفته در صنعت هوافضا از جمله مهم‌ترین دغدغه‌های مهندسان است؛ زیرا در حالت کلی، این ارتعاشات تأثیر گسترده‌ای بر کارآیی وسائل و سازه‌ها دارد و، در صورت تداوم، می‌تواند در اثر پدیدهٔ خستگی یا تشدید سبب فروپاشی سازه شوند، بنابراین پژوهش‌ها و تحقیقات گسترده‌ای در زمینهٔ کنترل و کاهش این دسته از ارتعاشات، چه در غالب مطالعات دانشگاهی و چه به‌صورت صنعتی، انجام شده است.

تحقیقات انجام‌شده منجر به تقسیم‌بندی روش‌های کنترل ارتعاشات به سه دستهٔ کلی شده است:

۱. میراکردن ارتعاشات[2]: در این روش با افزودن میرایی به سیستم و سازهٔ اصلی ارتعاشات را میرا می‌کنیم.
۲. ایزوله‌کردن ارتعاشات[3]: این روش برمبنای قطع مسیر انتشار ارتعاشات بین منبع و دریافت‌کننده استوار است.
۳. جاذب‌های پویای ارتعاشات[4]: روش معمول دیگر خنثی‌کردن ارتعاشات سیستم، انتقال انرژی سیستم اصلی به یک سیستم ثانویه می‌باشد که این سیستم شامل جرم، فنر و در صورت لزوم میراکننده است.

این روش کنترل را می‌توان به سه دستهٔ کلی غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال تقسیم‌بندی کرد، که نوع غیرفعال آن با توجه به سادگی، اثربخشی و عدم نیاز به منبع اضافه و نیز ویژگی‌های پایداری ذاتی به‌طور گسترده‌ای در کنترل ارتعاشات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تصویر کلی از یک جاذب ارتعاشی دینامیکی غیرفعال، در سال ۱۸۸۳، زمانی که به وسیله‌ای جهت جلوگیری از حرکات گردشی کشتی‌ها نیاز بود، توسط واتس[۵] بیان شد. اما طرح عملی این جاذب در سال ۱۹۱۱ توسط فرام[۶] مطرح شد. او یک مخزن سیال جهت جلوگیری از حرکت گردشی کشتی طراحی کرد، سپس توسط دن‌هارتوخ [۱] بهینه‌سازی شد. از مزایای این جاذب‌ها می‌توان به نصب آسان و طراحی ساده اشاره کرد. یک جاذب پویای ارتعاشی بدون میراکننده - که از آن تحت عنوان جاذب ارتعاشی تنظیم‌شده[۷] نام برده می‌شود - بهترین اثر خنثی‌کنندگی را برای یک فرکانس طراحی خاص و مشخص دارد، به‌عبارتی اگر فرکانس تحریک ثابت بماند، بسیار مؤثر است. از جمله معایب این جاذب آن است که دامنهٔ مؤثر بسیار کمی دارد و در صورت انتقال فرکانس تحریک، دامنهٔارتعاش سیستم از حالت بدون جاذب نیز بیشتر می‌شود. برای غلبه بر این مشکل میرایی را نیز به جاذب اضافه کردند. این نوع جاذب تحت عنوان میراگرای جرمی تنظیم‌شده[۸] نیز شناخته می‌شود [۲].

از جمله عوامل مهم و تأثیرگذار در تعیین کارایی این روش کنترل ارتعاشات، فرکانس و میرایی جاذب است. تحقیقات گسترده‌ای به‌منظور یافتن پارامترهای بهینهٔ جاذب‌ها، که نهایتاً منجر به افزایش دامنهٔ مؤثر آنها می‌شود، نجام شده است. مطالعات چونگ[۹] [۳] از جمله تحقیقات شاخص در این زمینه است. از جمله دیگر پژوهش‌های مطرح در این زمینه می‌توان به پژوهش زیلتی و همکاران[۱۰] [۴] اشاره کرد. آنها بر این مبنا که انرژی جنبشی سیستم کمینه شود یا میزان اتلاف توان توسط جاذب بیشینه گردد، پارامترهای بهینهٔ جاذب را به‌دست آورده‌اند. با توجه به محدودهٔ فرکانسی که باید خنثی شود، این جاذب‌ها در ابعاد گوناگون ساخته می‌شوند. برای کنترل ارتعاشات سازه‌هایی چون پل‌ها و ساختمان‌ها و دودکش‌ها از انواع بزرگ‌تر آن و برای کاهش ارتعاشات ماشین‌ها، اجزاء مختلف به‌کار رفته در هواپیماها و صنایع هوافضا نوع کوچک‌تر آن به‌کار می‌رود. در ادامه کاربردهای این نوع جاذب‌ها را به‌همراه انواع گوناگون آن بیان می‌کنیم.

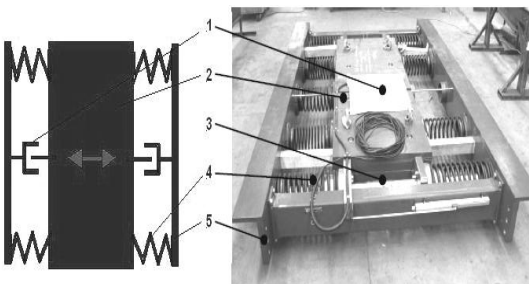
به‌طور کلی جاذب‌های به‌کار رفته در صنایع ساختمان‌سازی و پل‌سازی را می‌توان به سه دستهٔ عمده تقسیم کرد:

۱. میراگرهای جرمی افقی
۲. میراگرهای جرمی عمودی
۳. میراگرهای پاندولی

هر کدام از این میراگرها دارای ویژگی‌های خاصی می‌باشند و به‌منظور کنترل ارتعاشات حالتی خاص می‌توانند به‌تنهایی یا در کنار سایر این جاذب‌ها استفاده شوند [۵]. در ادامه به بررسی ارکان هر کدام از این جاذب‌ها و کاربردهایشان در سازه‌های گوناگون خواهیم پرداخت.

میراگری جرمی تنظیم‌شدهٔ افقی

این میراگرها عمدتاً به‌منظور کنترل ارتعاشات عرضی سازه‌ها استفاده و عموماً در قسمتی از سازه که دارای بیشترین دامنهٔ حرکت است، نصب می‌شوند. نحوهٔ اتصال آنها به سازه‌ها و اجسام گوناگون عمدتاً توسط پیچ و مهره است. شکل ۱ نوعی متداول از این جاذب‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ افقی و طرح کلی آن [۶]

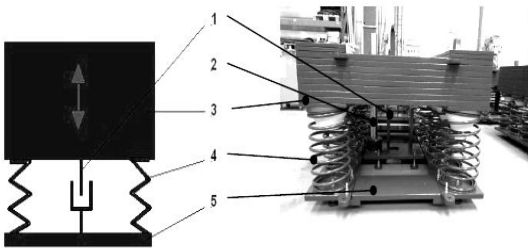
این میراگرها با توجه به نحوهٔ استفاده در سازه‌های گوناگون، می‌توانند بین ۲۵۰ تا ۳۰۰۰۰ کیلوگرم جرم داشته

باشند. ابعاد آنها نیز کاملاً قابل انطباق با سازهٔ مورد استفاده است. اجزای اصلی این سازه عبارت‌اند از:

۱. میراگر قابل تنظیم
۲. جرم فولادی قابل تنظیم
۳. سیستم هدایت‌کنندهٔ جرم در جهت افقی
۴. فنر فولادی عمل‌کننده به‌صورت افقی
۵. پایهٔ صفحهٔ قابل تنظیم جهت اتصال به سازهٔ اصلی

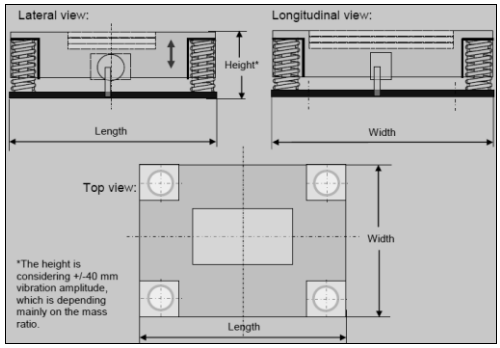
میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ عمودی

این نوع میراگرها نیز عموماً جهت کنترل ارتعاشات عمودی سازه‌ها استفاده و در قسمتی از سازه که دارای بیشترین دامنهٔ حرکت است، نصب می‌شوند. نحوهٔ اتصال آنها به سازه‌ها و اجسام گوناگون عمدتاً توسط پیچ و مهره است. چون محل قرارگیری این نوع جاذب‌ها همواره با محدودیت‌های متعدد طراحی روبرو می‌شود، می‌توانند به‌گونه‌ای نصب شوند که اجزاء در حالت کشش یا فشار قرار گیرند. اجزای اصلی این سازه مشابه جاذب افقی است، با این تفاوت که تمامی حرکات اجزاء عمودی است. شکل ۲ این نوع جاذب را همراه با اجزای آن نمایش می‌دهد.

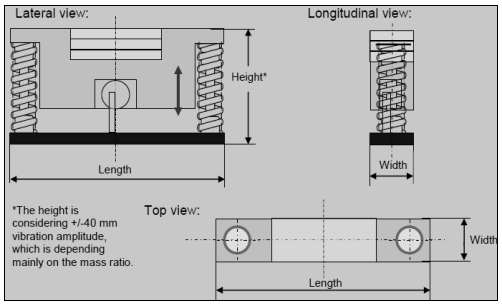


شکل ۲. میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ عمودی و طرح کلی آن [۶]

علاوه بر این، میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ عمودی به دو صورت طراحی می‌شود: یکی تحت عنوان میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ صاف[۱۱]، که نماهای گوناگون آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود، و دیگری میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ بلند[۱۲]. در شکل ۴ درک خوبی از این نوع جاذب و تفاوت‌های موجود نمایش داده شده است.



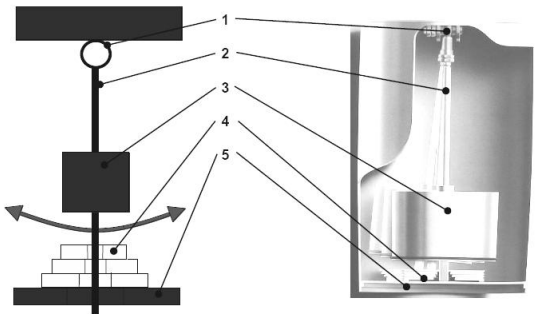
شکل ۳. میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ صاف [۶]



شکل ۴. میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ بلند [۶]

میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ پاندولی

این نوع میراگر عمدتاً در قسمت‌هایی از سازه که دارای بیشترین جابه‌جایی ارتعاشی ناشی از فرکانس‌های طبیعی شعاعی و افقی می‌باشند، نصب می‌شود. این نوع جاذب‌ها نیز معمولاً توسط پیچ و مهره به سازهٔ اصلی متصل می‌شوند. میراگر این جاذب نیز به‌صورت صفحات اصطکاکی[۱۳] و یا وسائل میراگر ویسکوز تأمین می‌شود. در شکل ۵ مدلی از این نوع جاذب همراه با اجزاء آن نمایش داده شده است.



شکل ۵. میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ پاندولی و طرح کلی آن [۶]

اجزای اصلی این سازه عبارت‌اند از:

۱. حلقه‌ای دایروی که قابلیت حرکت شعاعی در تمام جهات را به پاندول می‌دهد
۲. میلهٔ پاندول
۳. جرم جاذب، تشکیل‌شده از صفحات فولادی
۴. میرایی جاذب، صفحات اصطکاکی و یا وسائل میراگر ویسکوز
۵. پایهٔ صفحهٔ قابل تنظیم جهت اتصال به سازهٔ اصلی

کاربردها

سازه‌هایی چون پل‌ها، برج‌ها و دودکش‌ها عموماً دارای میرایی کم و فرکانس‌های طبیعی پایین‌اند و در نتیجه به‌راحتی توسط باد، زلزله و عبور و مرور تحریک می‌شوند. بنابراین استفاده از جاذب‌های ارتعاشی در این سازه‌ها بسیار متداول است. در ادامه به برخی از کاربردهای این جاذب‌ها اشاره می‌شود.

کاربرد در پل‌ها

از جمله بهترین مثال‌ها از کاربرد جاذب‌ها، کاربرد این قطعات روی پل هزارهٔ لندن[۱۴] است. در سال ۲۰۰۰، تنها سه روز پس از افتتاح با مشاهدهٔ سطوح بالای ارتعاشی ایجادشده در اثر عبور و مرور عابرین پیاده پل بسته شد. در واقع عابران پیاده، که قصد عبور از پل را داشتند، با هر گام دامنهٔ نوسانات را افزایش می‌دادند. دامنهٔ این نوسانات به یکصد میلی‌متر نیز رسید. پس از محاسبات انجام‌شده مسئولان برآن شدند برای کنترل ارتعاشات افقی و عمودی این پل هشت جاذب افقی و ۲۴ جفت جاذب عمومی روی آن به‌کار برند تا بدین ترتیب مودهای خمشی و پیچشی تحریک‌شده را کنترل کنند.

هر کدام از جاذب‌های افقی در حدود ۲/۵ تن وزن دارند. همچنین دارای فرکانس طبیعی ۰/۸ می‌باشند. وزن جاذب‌های عمودی نیز بین ۱ تا ۲ تن و فرکانس طبیعی آنها بسته به محل نصب و فرکانس طبیعی مورد نیاز بین ۱/۲ تا ۲/۲ متغیر است.

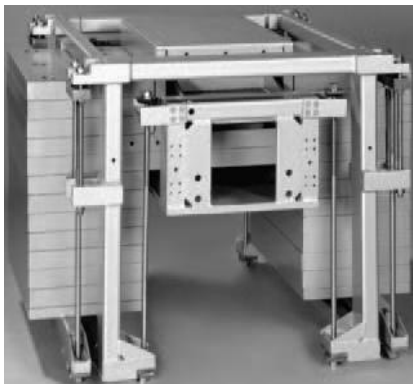
شکل ۶. نمایی از پل هزارهٔ لندن [۷]

نهایتاً با صرف هزینه‌ای بالغ بر پنج میلیون پوند و هجده ماه کار اجرایی و علمی، این پل در سال ۲۰۰۲ مجدداً راه‌اندازی شد. شکل ۷ جاذب‌های عمودی و شکل ۸ جاذب‌های افقی به‌کار رفته در پل را نشان می‌دهند [۷].

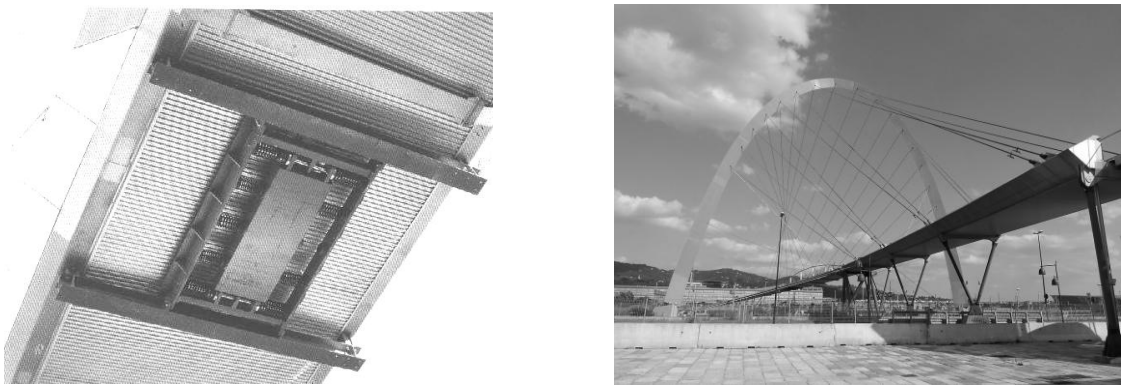
شکل ۷. میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ عمودی به‌کار رفته در پل هزارهٔ لندن [۷]

جالب است بدانیم که مدت‌ها پس از افتتاح مجدد پل، محققان همچنان در پی یافتن علت حادثه بودند. نتایج

مطالعات آنها نشان داد که همگام‌شدن تعداد محدودی از عابران پیاده، با یکی از فرکانس‌های طبیعی پل، که حدود ۱ هرتز بوده، سبب ایجاد پدیدهٔ تشدید شده است. در شکل ۹ نیز پل المپیک[15] در تورین[16] ایتالیا و کاربرد جاذب‌های افقی در آن نمایش داده شده است. در این پل از دو جاذب افقی استفاده شده است که هر کدام ۴ تن وزن دارند و میرایی معادل آنها ۳۸۷۶ نیوتن ثانیه بر متر است. فرکانس طبیعی یکی از آنها ۰/۵۵ و دیگری ۰/۹۵ است [۶].



شکل ۸ میراگر جرمی تنظیم‌شده افقیِ به‌کار رفته در پل هزارهٔ لندن [۷]



(الف) (ب)

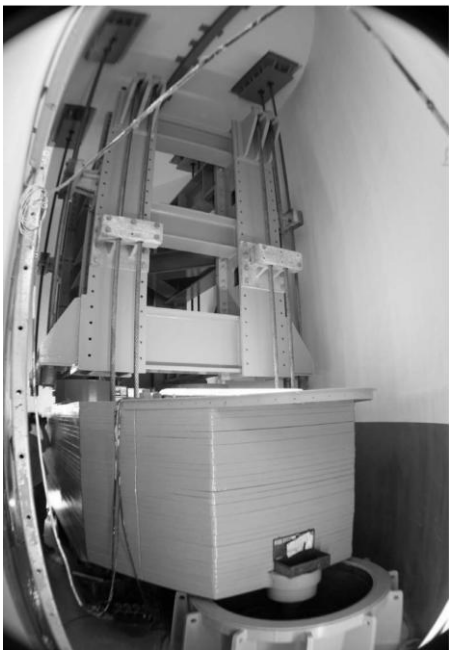
شکل ۹. الف) پل المپیک واقع در تورین ایتالیا، ب) میراگر جرمی تنظیم‌شده افقی در پل المپیک [٦]

کاربرد روی ساختمان‌ها و برج‌ها

برج مشعل[17]، واقع در دوحهٔ قَـطر، از جمله نمونه‌های مثال‌زدنی از کاربرد جاذب‌های ارتعاشی برای کنترل ارتعاشات است. این برج، که به شکل مشعل است، در سال ۲۰۰۶ با هزینه‌ای بالغ بر ۱۴۰میلیون دلار برای بازی‌های آسیایی ساخته شد. این برج ۳۰۰ متری می‌تواند به‌شدت تحت تأثیر بادهایی که از طرف خلیج فارس می‌وزد، قرار گیرد که در این صورت بالاترین قسمت برج می‌تواند تا ۴۵ سانتی‌متر منحرف شود که این امر مطمئناً علاوه بر خطرات احتمالی، آرامش ساکنان این برج را نیز مختل می‌کند، لذا نیاز به جاذب ارتعاشی به‌شدت احساس می‌شود. بهترین شکل جاذب ارتعاشی که می‌تواند ارتعاشات این ساختمان‌ها را کنترل کند، میراگرای جرمی پاندولی است. با توجه به محاسبات انجام‌شده توسط شرکت سازنده مناسب‌ترین مکان برای این جاذب طبقهٔ ۴۷ در ارتفاع ۲۳۵ متری است، این در حالی است که ضخامت هستهٔ مرکزی برج، که محل قرارگیری این جاذب است، در آن ارتفاع تنها ۱۱ متر است. از طرفی طراحی ظریف و باریک این برج نیز کار را

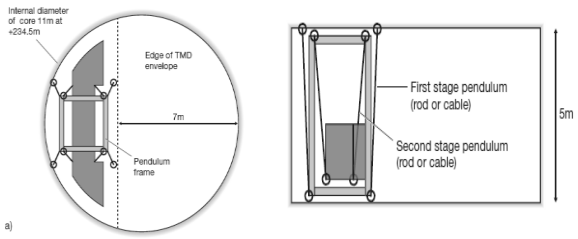
برای طراحان دشوار کرده بود تا نهایتاً جهت رفع این مشکل جرم این جاذب پاندولی را به‌شکل یک قایق ساختند (شکل ۱۱).

شکل ۱۰. برج مشعل، واقع در دوحهٔ قطر [۸]



شکل ۱۱. میراگر جرمی پاندولی به‌کار رفته در برج مشعل [۸]

شکل ۱۲ نیز طرحی کلی از این جاذب را در دو نمای گوناگون نمایش می‌دهد. محاسبات نشان می‌داد، جهت کارایی بالا این جاذب باید وزنی در حدود ۱۴۰ تن داشته باشد، در حالی‌که جرثقیل حمل بار تنها توانایی بالابردن ۵ تن بار را داشت. لذا جرم جاذب به ۳۷ قطعهٔ پنج تنی تقسیم شده و در طبقهٔ ۴۷ نصب و راه‌اندازی شد. فرکانس طبیعی این جاذب نیز ۰/۲۳ در نظر گرفته شده است [۸].



شکل ۱۲. نمایی کلی از طرح جاذب به‌کار رفته در برج مشعل [۸]

از دیگر کاربردهای جاذب‌ها می‌توان به استفاده در برج کنترل ترافیک هوایی در ادینبرو[۱۸]، پایتخت اسکاتلند، اشاره کرد (شکل ۱۳). به‌منظور میراکردن اغلب مودها جاذب باید در بالاترین نقطهٔ این برج هشتاد متری قرار می‌گرفت. جرم ۱۶ تنی این جاذب روی فنرهای حلزونی قرار گرفته است. چون این سازه در معرض ورزش بادهایی است که در فصول مختلف سال می‌تواند فرکانس‌های متفاوتی از سازه را تحریک کند، فرکانس جاذب می‌تواند با اضافه یا کم‌کردن صفحات فلزی کم یا زیاد شود و محدوده‌ای بین ۱/۵ تا ۲ هرتز را پوشش دهد [۵].

کاربرد در صنایع هوایی

با توجه به اثربخشی بالا و عدم نیاز به یک منبع اضافی این‌گونه جاذب‌ها در صنایع هوافضا به‌منظور کنترل ارتعاشات اجزاء گوناگون سازه‌های هوایی بسیار به‌کار می‌روند. جاذب‌های به‌کار رفته در صنایع هوافضا از نظر اجزاء و نوع عملکرد کاملاً مشابه جاذب‌های به‌کار رفته در سازه‌هایی می‌باشند که در قسمت قبل بدان‌ها اشاره شد؛ با این تفاوت که چون در صنایع هوایی اولاً جرم سازه بسیار قابل اهمیت است، در ابعاد بسیار کوچک‌تر ساخته می‌شوند؛ ثانیاً در این صنعت محدودهٔ فرکانسی بالایی مورد نیاز

است، که این‌گونه جاذب‌ها به‌خوبی می‌توانند این محدودهٔ فرکانسی را تأمین کنند.

(الف)

(ب)

شکل ۱۳. الف) برج کنترل ترافیک هوایی در ادینبرو
ب) میراگر جرمی تنظیم‌شدهٔ عمودی به‌کار رفته در این برج [۵]

این جاذب‌ها ویژگی‌های قابل توجهی دارند؛ از جمله اینکه به‌دلیل فشردگی، با یک اتصال ساده به سازه اصلی متصل می‌شوند و به صورت آماده می‌توانند روی سازه قرار گیرند. مقاومت استاتیکی[۱۹] و نیز سختی سازه را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند و این توانایی را دارند که با وزنی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ گرم، دامنهٔ فرکانسی بین ۵۰ تا ۳۵۰ هرتز را پوشش دهند.

در صنعت هوافضا نخستین قدم در کنترل ارتعاشات با استفاده از جاذب‌های پویای ارتعاشی آن است که تشخیص دهیم این ارتعاشات ناخواسته باید با یک جاذب ارتعاشی تنظیم‌شده کنترل شود یا از طریق میراگر جرمی تنظیم‌شده؟

اگر در پاسخ ارتعاشی یک فرکانس واحد چیره باشد که نزدیک به فرکانس منبع ایجادکنندهٔ اغتشاش است، می‌توان تنها از جاذب ارتعاشی تنظیم‌شده استفاده کرد، اما در صورتی‌که این فرکانس مرتبط با مودهای سازه باشد، بهتر است از میراگر جرمی تنظیم‌شده استفاده کرد که با توجه به محدودهٔ فرکانسی مؤثر، می‌تواند پاسخ کل را کاهش دهد [۲]. پارامترهای مهم در طراحی این جاذب‌ها عبارت‌اند از:

۱. فرکانس ارتعاشی غالب
۲. هندسه و وزن تقریبی سازهٔ مرتعش
۳. فضا و جرم در دسترس برای جاذب
۴. محدودیت‌های محیطی از جمله شرایط دمایی
۵. هر بار اضافی دینامیکی یا شبه استاتیکی که به سازه وارد می‌شود. مثلاً در حال چرخش‌بودن سازه
۶. محدودیت‌ها در استفاده از موادی خاص

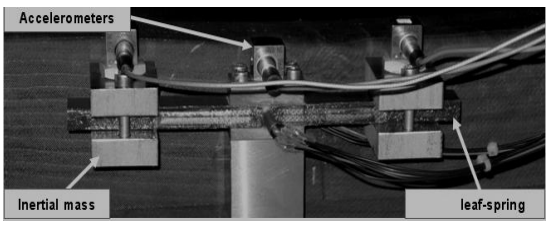
عمده‌ترین چالش در طراحی میراگرهای جرمی تنظیم‌شده برای استفاده در این صنعت قسمتی از جاذب است که باید انرژی مکانیکی سیستم را میرا و آن را به حرارت تبدیل کند. میراگرهای جرمی تنظیم‌شده عمدتاً با میراگرهایی برمبنای فناوری‌های متعدد طراحی می‌شوند. مواد ویسکوالاستیک، مغناطیسی، لزج، پیزوالکتریک و یا مواد الاستومتریک از آن جمله‌اند. شکل ۱۴ یک جاذب ارتعاشی تنظیم‌شده را نشان می‌دهد که در یک بازهٔ فرکانسی وسیع می‌تواند برای هر فرکانس مجزایی عمل کند. این ویژگی، این جاذب را به یک راه‌حل مناسب برای کنترل سروصداهای مزاحم و ارتعاشات در بالگردها، هواپیماهای

توربین‌دار و جت‌های تجاری مبدل کرده است. از جمله ویژگی‌های آن عبارت‌اند از:

۱. طراحی با حجم و وزن کم
۲. کارایی پایدار در شرایط عملیاتی متنوع
۳. طول عمر زیاد
۴. محدودهٔ دمایی بالا بین ۶۵- تا ۳۰۰+ درجهٔ فارنهایت [۹]

شکل ۱۴. نمونه‌ای از یک جاذب ارتعاشی تنظیم‌شده [۹]

علاوه بر جاذب فوق، استفاده از نوع دیگری از جاذب‌های ارتعاشی تنظیم‌شده که در آنها از یک نوع فنر صفحه‌ای بهره گرفته شده است (شکل ۱۵)، در صنعت هوافضا متداول است. از جمله کابردهای آن نیز می‌توان به استفاده در هواپیماهای توربین‌دار اشاره کرد. این هواپیماها عمدتاً دارای یک چالش اساسی‌اند و آن سطح صداهای مزاحم بالاست که در اثر ارتعاشات پروانه ایجاد می‌شود. در این نوع هواپیماها سرعت‌های مختلف پروانه‌ها، فرکانس‌های گذر تیغه[۲۰] متفاوتی ایجاد می‌کنند، اما چون در صداهای مزاحم تولیدی فرکانس اول فرکانس غالب است می‌توان از این جاذب ارتعاشی استفاده کرد [۱۰].

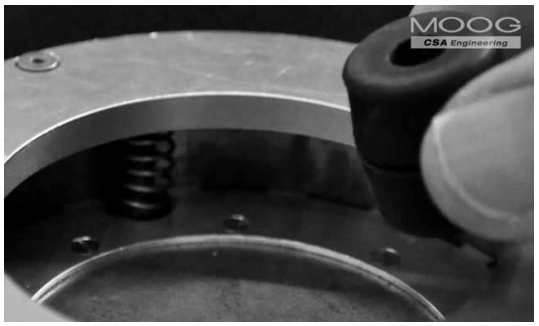


شکل ۱۵. جاذب ارتعاشی تنظیم‌شده با یک نوع فنر صفحه‌ای [۱۰]

علاوه بر جاذب‌های ارتعاشی تنظیم‌شده، میراگرهای جرمی تنظیم‌شده (شکل ۱۶) نیز کاربرد گسترده‌ای در صنعت هوافضا دارند. این دسته از جاذب‌ها با توجه به مورد نیاز می‌توانند در قسمت میراگر، از موادی همچون مواد مغناطیسی، لزج و قابل ارتجاع بهره ببرند. در ادامه دو نوع از این میراگرها را معرفی می‌کنیم.

شکل ۱۶. میراگر جرمی تنظیم‌شده در صنایع هوافضا [۹]

شکل ۱۷ نوعی متداول و ساده از میراگرهای جرمی را، که در آن از مواد الاستومتریک به‌عنوان میراگر استفاده می‌شود، نشان می‌دهد.



شکل ۱۷. نمایی از میراگر جرمی [۹]

این جاذب‌ها به‌منظور خنثی‌کردن ارتعاشات در امتداد محور اصلی مقطع استوانه‌ای به‌کار می‌روند و می‌توانند با توجه به مشخصات موردنظر، محدودهٔ فرکانسی بین ۳۰ تا ۲۵۰ هرتز را پوشش دهند؛ علاوه بر این، قادر به عملکرد پایدار در دماهایی بین ۳۰- تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد هستند، به‌گونه‌ای که مشخصات قطعه دچار تغییرات بسیار اندک شود. هر کدام از این جاذب‌ها برای نصب دارای یک اتصال

میله و مهره می‌باشند. تنظیمات فرکانسی این جاذب‌ها قبل از نصب انجام می‌شود، اما در صورت نیاز با یک بستهٔ لوازم ساده می‌توان تغییرات مورد نیاز را اعمال کرد. در جدول ۱ مشخصات این نوع جاذب‌ها ذکر شده است [۹].

جدول ۱. مشخصات میراگر جرمی نشان داده‌شده در شکل ۱۶

مدل جاذب	تی ام دی۵۰	تی ام دی۱	تی ام دی۲
جرم مؤثر (گرم)	۲۲۷	۴۴۵	۹۷۰
جرم کل (گرم)	۲۴۰	۴۸۵	۱۰۵۰
قطر (میلی‌متر)	۴۴/۵	۶۲/۰	۸۲/۶
ارتفاع جاذب (میلی‌متر)	۳۶/۶	۳۵/۰	۴۵/۳
محدودهٔ فرکانس (هرتز)	۳۰ تا ۲۵۰		
میرایی جاذب به میرایی بحرانی	۸ تا ۱۲ درصد		

نوع دیگر از این جاذب‌ها سری ام می‌باشند (شکل ۱۸). در واقع در این جاذب‌ها با جایگزینی مواد مغناطیسی ساخته‌شده از عناصر شیمیایی خاص[۲۱] به‌جای فناوری‌های سنتی الاستومتریک و میرایی سیال، توانسته است خصوصیات بهتری به جاذب ببخشد، اما به‌طور حتم استفاده از این جاذب‌ها نیاز به فناوری پیشرفته‌تر و صرف هزینه‌های بالاتری دارد. از معایب دیگر این جاذب‌ها این است که علاوه بر وزن بیشتر به فضای بیشتری جهت نصب نیاز دارند. از جمله خصوصیات این جاذب‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۹]:

۱. تنظیم سریع فرکانس جاذب با تنظیمات مکانیکی
۲. میرایی قابل تنظیم با اصلاح وسائل پیچک صدا[۲۲]
۳. قابلیت تبدیل به جاذب ارتعاش دینامیکی فعال
۴. قابلیت عملکرد پایدار در محدودهٔ دمایی بالاتر

در جدول ۲ مشخصات فیزیکی این نوع جاذب‌ها ذکر شده است [۹]. این نوع میراگر جرمی غیرفعال به دو صورت به‌کار می‌رود: یکی استفاده از میراگر پیچک صدای قابل تنظیم که در این‌صورت قابلیت میزان‌شدن برای فرکانس‌ها و میرایی‌های متفاوت را دارد و یا استفاده از آن در حالی‌که دارای یک میراگری ثابت و غیرقابل تغییر است که این نوع استفاده بالاترین سطح میرایی را دارد و برای کاربردهای فرکانس بالا مناسب است.

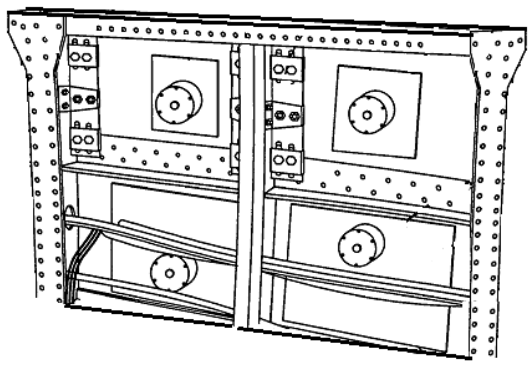
شکل ۱۸. میراگر جرمی سری ام [۹]

جدول ۲. مشخصات فیزیکی جاذب‌های سری ام [۹]

مدل جاذب	ام ۵۰	ام ۱	ام ۲
جرم مؤثر (گرم)	۲۳۰	۴۸۰	۹۵۰
جرم کل (گرم)	۲۸۰	۶۲۰	۱۲۱۰
قطر (میلی‌متر)	۴۸/۳	۶۸/۳	۸۴/۳
ارتفاع جاذب (میلی‌متر)	۴۳/۹	۵۴/۶	۷۱/۴
محدودهٔ فرکانس (هرتز)	۹ تا۲۵۰		
میرایی جاذب به میرایی بحرانی	۱ تا ۹ درصد		

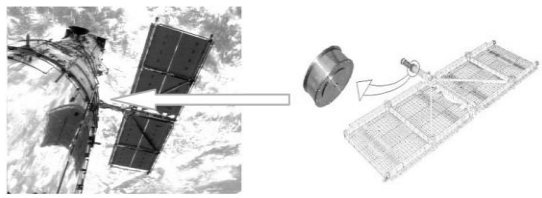
از جمله متداول‌ترین کاربردهای میراگرهای تنظیم‌شده، کنترل ارتعاشات بالگردها و هواپیماهای مسافربری است. زیرا عدم کنترل ارتعاشات این دسته از وسائل نه تنها می‌تواند خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری در پی داشته باشد، بلکه صدای مزاحم ناشی از آن علاوه بر مختل‌کردن آرامش مسافران، می‌تواند با ایجاد آلودگی‌های صوتی سبب ناراحتی ساکنان مناطق مسکونی را نیز به‌همراه داشته باشد.

شکل ۱۹ طرحی کلی از کاربرد این جاذب‌ها در بدنهٔ هواپیما را نمایش می‌دهد [۱۱].



شکل ۱۹. طرح کلی کاربرد جاذب‌های کنترل و کاهش ارتعاشات بدنهٔ هواپیماها [۱۱]

از دیگر کاربردهای حائز اهمیت این جاذب‌ها می‌توان به کاربردشان در تلسکوپ فضایی هابل اشاره کرد. بدنهٔ اصلی تلسکوپ اگرچه سفت است، اما نسبت به ارتعاشات صفحات خورشیدی متصل‌شده به آن، که ناشی از تغییر دمای صفحات است، واکنش نشان می‌دهد. این ارتعاشات سبب ایجاد اختلال در ابزارهای تصویربرداری تلسکوپ می‌شود، لذا به‌منظور کنترل ارتعاشات از میرگرهای جرمی تنظیم‌شده استفاده شده است [۱۲].



شکل ۲۰. کاربرد جاذب‌ها در تلسکوپ فضایی هابل [۱۲]

یکی دیگر از کاربردهای این جاذب‌ها، کاربردشان در پروژه آریز ۱[۲۳] ناسا است (شکل ۲۴). این پروژه در واقع راکتی جهت انتقال بار به فضای خارج از کره زمین است و به‌منظور کنترل نوسانات ناشی از پیش‌رانش از ۱۶ عدد جاذب جرمی تنظیم‌شده در قسمت انتهایی فضانورد استفاده شده است [۱۳].

شکل ۲۴. راکت آریز ۱ [۱۳]

جمع‌بندی

چون عملکرد دینامیکی سازه‌ها پارامتری مهم در طراحی است، لذا در این مقاله جاذب‌های پویای ارتعاشات، که به‌عنوان ابزاری کارآمد جهت بهبود عملکرد دینامیکی سازه‌ها شناخته می‌شوند، معرفی شد. کارآیی خوب این جاذب‌ها در کنترل ارتعاشات پل‌ها که به‌راحتی توسط باد یا عبور و مرور عابران پیاده و خودروها تحریک می‌شوند، با ارائهٔ چند نمونهٔ کاربردی نشان داده شد. سپس ضمن بررسی مشکلات و ملزومات استفاده از جاذب‌ها در آسمان خراش‌ها، راه‌حل‌های مهندسی ارائه‌شده جهت بهره‌گرفتن از انواع گوناگون جاذب‌های پویای ارتعاشات در ساختمان‌ها بررسی شد که اثربخشی بالای این روش کنترل ارتعاشات در بهبود عملکرد دینامیکی سازه‌های بلند را نشان داد. ویژگی‌های منحصر به‌فرد این جاذب‌ها که سبب کاربرد وسیع‌شان در صنایع هوایی شده است، نیز بیان گردید و دو نوع پرکاربرد از این جاذب‌ها معرفی شد. به‌منظور نشان‌دادن عملکرد مثبت این جاذب‌ها در کنترل ارتعاشات سازه‌های هوایی، کاربردشان در پروژه‌های برجستهٔ هوافضایی نیز ذکر گردید.

مآخذ

[1] Den Hartog, J., *Mechanical Vibration*, Mac Grew-Hill, 1965.

[2] Huang, Y.M., and Chen, C.C., "Optimal Design of Dynamic Absorbers on the Vibration and Noise Control of a Fuselage", *Journal of Computer and Structures*, 2000, pp. 691-702.

[3] Cheung, Y.L., "H-infinity and H_2 Optimizations of Dynamic Vibration Absorber for Suppressing Vibration in Plates", *Journal of Sound and Vibration*, 2009, pp. 29-42.

[4] Zilletti, M., Elliott, S.J., Rustighi, E., "Optimization of Dynamic Vibration Absorber to Minimize Kinetic Energy and Maximize Internal Power Dissipation", *Journal of Sound and Vibration*, 2012, pp. 4093-4100.

[5] Nawrotzki, P., "Tuned Mass Systems for the Dynamic Upgrade of Buildings and Other Structures", 11th East Asia-Pacific *Conference on Structural Engineering & Construction*, Taipei, Taiwan, 2008, pp. 1-9.

[6] Maurer Sohne Group, "Tuned Mass and Viscous Damper", Structural Protection Systems, 2011, pp. 1-32.

[7] Dallard, P., Fitzpatrik, A.J., "The London Millennium Footbridge", *Structural Engineering Journal*, 2002, pp. 17-33.

[8] Chikaher, G., Hirst, J., "Aspire Tower, Doha, Qatar", *the Arup Journal*, 2007, pp. 3-13.

[9] Moog CSA Engineering, "Tuned Mass Dampers", CSA Report No. 09.10, 2012, pp. 500-768.

[10] Konstanzer, P., Grunwaled, M., and Janker, P., "Aircraft Interior Noise Reduction through Tunable Vibration Absorber System", *25th International Congress of the Aeronautical science*, Hamburg, Germany, 2006, pp. 35-45.

[11] Dandaroy, I., Lewis, T. M., Czechow, H. J., Hardison, P. S., Parin, M., "Tuned Vibration Absorbers Mountable to Aircraft Skin Panel", U.S. Patent Application, US2011/0079477 , 2011.

[12] Johnson, C., "Design and Application of Vibration Suppression", *Exploring Structural Dynamics*, 2008, pp. 1-14.

[13] Bergin C., "Ares I Thrust Oscillation Meetings Conclude with Encouraging Data, Changes", NASA Publications, 2008.

پی‌نوشت

1. Dynamic Vibration Absorbers (DVA)
2. Vibration Damping
3. Vibration Isolation
4. Dynamic Vibration Absorber
5. Watts
6. Frahm
7. Tuned Vibration Absorber-(TVA)
8. Tuned Mass Damper-(TMD)
9. Cheung
10. Zilletti *et.al*
11. Flat TMD
12. Tall TMD
13. Friction Plates

۱۴. پل هزارهٔ لندن (Millennium Bridge) یک پل معلق در پایتخت بریتانیا، لندن، است. این پل بر روی رود تیمز قرار دارد. در طرف شمالی این پل کلیسای جامع سنت پل و در طرف جنوبی آن موزهٔ تیت مدرن قراردارند [ویراستار].

15. Olympic Bridge
16. Turin
17. Aspire Tower, also known as Torch Tower
18. Edinburg
19. Static Strength
20. Blade Passage Frequency
21. Rare Element
22. Voice Coil

۲۳. آریـز ۱ یا اِریـز ۱ (Ares I) نام پرتابهٔ سرنشین‌دار ایالات متحدهٔ امریکا و بخشی از برنامهٔ پیکر آسمانی بود. طراحی این پرتابه زیر نظر ناسا در حال پیشرفت بود که، در سال ۲۰۱۰ م، به‌دستور رئیس جمهور وقت امریکا، باراک اوباما، متوقف شد [ویراستار].