کنترل ارتعاشات به کمک میراگر ضربه‌ای

سید مهدی زهرائی[1]*، امیر فرج‌اللهی راد[2]

[1] دانشیار قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساختهای عمرانی، دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

[2] دانشجوی دکترای سازه، دانشکده عمران دانشگاه تهران

*mzahrai@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۶/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۰۴

چکیده

مطالعات بسیاری بر روی سیستم‌های پیوسته و ناپیوسته انجام شده است، اما سیستم‌های ارتعاشی در مدهای بالا به هنگام تشدید کمتر مورد مطالعه دقیق قرار گرفته‌اند. یکی از روش‌های مورد استفاده در سیستم‌های کنترلی، استفاده از کنترل کننده‌های جرمی غیرفعال است و این کنترل‌کننده‌ها طوری تنظیم شده‌اند تا فرکانس آن در حالت تشدید با سازه نوسانگر یکسان باشد.

تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی نشان می‌دهد که گروهی از میراگرهای غیرخطی به نام میراگر ضربه‌ای، عملکرد بهتری نسبت به خنثی‌کننده‌های ارتعاشی خطی، در کاهش نوسانات سازه‌ها دارند. فاکتور اصلی تأثیرگذار در این نوع میراگرها جهت کنترل نوسانات، این است که نیروهای کوچک ایجاد شده توسط جرم‌های کمکی، با ایجاد اغتشاش در دامنه نوسانات سازه، موجب کاهش نوسانات شدید می‌گردند. در این تحقیق پارامترهای کلیدی میراگر ضربه‌ای مشخص شده است. توده جرمی میراگر، طول مسافت حرکت، مقادیر ماکزیمم دامنه، از نکات مهم و قابل بررسی در تأثیر نقش میراگر ضربه‌ای می‌باشد و طراحی پارامترهای بهینه مدنظر قرار گرفته‌است.

واژه‌های کلیدی: میراگر ضربه‌ای، کنترل غیرفعال، کاهش ارتعاشات، نیروهای اینرسی، دامنه نوسانات، میراگر جرمی تنظیم‌شده

۱. مقدمه

امروزه استفاده از سیستم‌های کنترل فعال و غیرفعال در سازه‌های مهم مهندسی به امری اجتناب ناپذیر تبدیل شده است. افزایش روزافزون جمعیت و کمبود زمین در فضای شهری، موجب افزایش ارتفاع سازه‌ها شده است و از طرف دیگر با پیشرفت فناوری و استفاده مهندسین سازه از مصالح با مقاومت بیشتر سبب شده سختی سیستم‌های سازه‌ای به مقدار قابل توجهی کاهش یابد. این امر، خود باعث افزایش جابه‌جایی و شتاب در هنگام اِعمال بارهای دینامیکی برای سیستم‌های سازه‌ای گشته است.

تحقیقات زیادی در زمینه کنترل ارتعاشات نامطلوب سازه‌ها توسط محققین انجام پذیرفته و روش‌های جدیدی در این راستا پیشنهاد و آزمایش شده اند. در روش‌های قدیمی‌تر، ساختمان با توجه به ویژگی‌های ذاتی خود به گونه‌ای طراحی شده که در بارگذاری‌های سنگین جانبی همچون زلزله با رفتار غیرخطی اعضای خود شرایط میرا شدن انرژی را فراهم آورد تا بتواند به این شکل پایداری خود را حفظ کند. این مسأله موجب مشکلاتی می‌شود که در زیر به آنها اشاره شده است [۱]:

۱. هنگامی که از اعضای اصلی یک سیستم برای جذب انرژی استفاده می‌شود احتمال فروپاشی و ناپایداری سیستم افزایش می‌یابد به این شکل که با از بین رفتن یک یا چند عضو اصلی که شرایط بحرانی‌تری دارند و این خود ناشی از عدم توانایی، در توزیع یکنواخت نیرو می‌باشد، پیشروی گسیختگی در اعضا با سرعت بیشتری انجام می‌شود و در نهایت موجبات فروپاشی سیستم فراهم می‌گردد.

۲. اجزای اصلی سازه‌ای معمولاً برای انجام وظایفی طراحی می‌شوند و این در حالی است که ترکیب نیروهای مختلف و طراحی مناسب آنها برای انجام وظایف دیگر سخت و پیچیده است. به بیان ساده‌تر، اعضایی که موظف به تحمل بارهای قائم می‌باشند هنگامی که در معرض بارهای جانبی قرار می‌گیرند از عهده وظایف خود به خوبی بر نمی‌آیند. این در حالی است که در صورت گسیختگی اعضایی که دارای وظایف مختلفی هستند سیستم از چند ناحیه آسیب می‌بیند از طرف دیگر امکان تحلیل و طراحی صحیح نیز بسیار سخت و دشوار می‌شود.

۳. در زمان بعد از زلزله، به علت ایجاد تغییرشکل‌های غیرخطی برای اعضای اصلی سازه، امکان استفاده مجدد از آن و ترمیم اعضای اصلی از بین می‌رود و این باعث هدر رفتن زمان و سرمایه‌های مالی می‌شود، که در صورت استفاده از اعضای اصلی سازه برای کنترل ارتعاشات نمی‌توان در طول عمر مفید سازه این اعضا را ترمیم کرد.

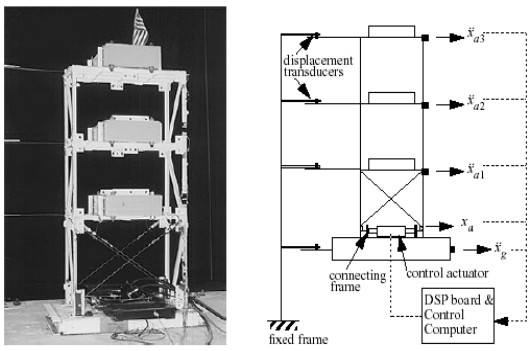
۴. عملکرد سیستم‌های سازه‌ای با رفتار غیرخطی محدود می‌باشد و امکان بهبود عملکرد سازه تحت بارهای ناگهانی وجود ندارد.

تمامی این نقطه ضعف‌ها باعث شده است تا فکر استفاده از سیستم‌های الحاقی به سرعت رشد و گسترش پیدا کند. در دهه‌های اخیر کاهش پاسخ سازه‌ای که به واسطه نیروهای دینامیکی به وجود آمده موضوع بسیاری از مقالات شده است و تعداد زیادی از مفاهیم کنترل به این منظور در سازه مورد توجه قرار گرفته است.

به طور کلی سیستم‌های کنترلی سازه‌ها را می‌توان با رویکرد روش عملکردی به چهار دسته عمده تقسیم کرد [۲]: کنترل فعال[۱]، کنترل نیمه‌فعال[۲] ، کنترل مرکب[۳] و کنترل غیرفعال[۴]. از کنترل غیرفعال در سازه‌ها بدون اعمال نیروی خارجی یا با اعمال انرژی برای کاهش ارتعاش سازه استفاده می‌شود. ولی در کنترل فعال جهت کاهش ارتعاش سازه از نیروهای خارجی عمدی نیز استفاده می‌شود. در کنترل نیمه‌فعال برای بهتر شدن عملکرد کنترل‌گر، در هر لحظه پارامترهای کنترل‌گر با توجه به میزان نیروی واردشده تغییر می‌کند. اما در کنترل‌های مرکب چند سیستم کنترل غیرفعال با سیستم فعال یا نیمه‌فعال به منظور هرچه بهترشدن رفتار سیستم و پوشش نقطه‌ضعف‌های هر روش با هم ترکیب می‌شوند [۳].

۲. کنترل فعال

کنترل فعال به واسطه انرژی خارجی که موجب مقابله با بارهای دینامیکی طبیعی می‌شود، بسیار کارامدتر از کنترل‌های غیرفعال در تحقیقات نشان داده شده است. همچنین کنترل فعال در پاسخ‌های غیرخطی از دیگر کنترل‌ها عملکرد بهتری داشته است. این شیوه کنترل با اندازه‌گیری پاسخ‌های وارد شده در سازه و عملیات بر روی آنها باعث محاسبه و تولید نیروی کنترل فعال می‌شود (شکل ۱). در نتیجه استراتژی کنترل فعال بسیار پیچیده‌تر از کنترل غیرفعال است، چون‌که نیاز به نصب حسگرهای گوناگون و ابزارآلات کنترلی دارد. ولی در عوض در تحقیقات نتایج خوبی در کاهش اثر بارهای با باند فرکانسی زیاد نشان داده است.



شکل ۱. کنترل توسط کابل‌های فعال

کنترل فعال در تئوری مدرن کنترل، به طور موفقیت‌آمیزی در دهه‌های اخیر در شاخه‌های مختلف مهندسی نظیر مکانیک، الکترونیک، هوافضا، سازه و غیره به کار گرفته شده است، و با وجود این که کنترل فعال در مهندسی سازه بسیار دیرتر از سایر علوم شروع شده است ولی کاربرد آن در این رشته توسعه بسیار یافته است. کنترل فعال سازه‌های مهندسی عمران از جهات مختلفی

با کاربرد آن در صنایع و سیستم‌های مکانیکی- الکتریکی تفاوت‌هایی دارد. این تفاوت‌ها به شرح زیر است [۴]:

الف. سازه‌ها در ابعاد بزرگ می‌باشند و عدم قطعیت‌های فراوان و قابل توجهی چه در ویژگی‌های سازه‌ای و چه در بارگذاری بر آنها حاکم است،

ب. سازه‌های مهندسی عمران عمدتاً دارای جرم زیاد بوده و بنابراین نیروی فعال لازم برای کنترل آنها بزرگ می‌باشد،

ج. این سازه‌ها قبل از اعمال نیروی دینامیکی خارجی نظیر نیروهای زلزله و باد، کاملاً ایستا مطمئن و پایدار می‌باشند،

د. هدف از کاربرد سیستم کنترل در این سازه‌ها، کنترل ارتعاش در مقابل نیروهای دینامیکی خارجی (عمدتاً ناشی از باد و زلزله) می‌باشد.

در روش کنترل فعال، سعی بر این است که با اعمال یک نیروی خارجی به سازه، بتوان عکس‌العمل‌های آن را در مقابل نیروی شدید خارجی کاهش داد. برای تعیین مقدار نیروی فعال فوق، محققین از روش‌های مختلفی استفاده کرده اند.

مفهوم کنترل فعال در سازه‌های مهندسی عمران از حدود سال ۱۹۷۰ شروع شد. برای نمونه امکان استفاده از یک ژیروسکوپ به منظور کاهش پاسخ پل‌های معلق و افزایش سرعت‌های شناورها[۵] توسط ماراتا[۶] و اتیو[۷] بررسی شد و امکان استفاده از سیستم‌های کنترل فعال برای افزایش مقاومت کشسان سازه‌ها توسط نوردل[۸] پیشنهاد گردید. همچنین مفهوم ارتعاش سازه‌ها توسط زاک[۹] و دیگران بحث شد [۵].

مفهوم کنترل فعال در سازه‌ها در مهندسی عمران مورد توجه یائو[۱۰] قرار گرفت. در واقع یائو اساس کنترل مدرن در عمران را پایه‌ریزی کرد و همچنین باعث شروع یک سری کاوش‌های سیستماتیک و کاربردی در این زمینه شد. به موجب این تأثیر، موضوعات زیادی در این زمینه در مقالات و سخنرانی‌ها بین سال‌های ۱۹۷۴ تا ۱۹۷۶ مطرح شد. بعد از ۱۹۷۶ کاوش‌های سیستم‌های کنترل فعال در دیگر فازها وارد شد و این تحقیقات پژوهشی باعث ایجاد امکانات و توانایی‌هایی در این بخش شد.

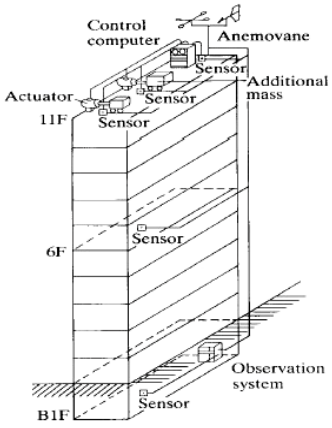
به طور کلی، فرق عمده بین کنترل فعال و کنترل غیرفعال وجود نیرو یا انرژی خارجی مستهلک کننده است. از این رو جهت ایجاد یک سیستم کنترل فعال یک سری امکانات و مراحل باید برقرار شود (شکل ۲) که شامل موارد زیر است [۵]:

الف. حسگرهای نصب شده در مکان‌های مناسب سازه جهت اندازه‌گیری اندازه تحریک‌های خارجی یا پاسخ سازه یا هر دوی آنها به کار رود،

ب. حالت‌های سیستم بر اساس اطلاعات دریافتی از حسگرها تخمین زده شوند،

ج. طرح روند اندازه‌گیری اطلاعات و محاسبه نیروهای کنترلی روی الگوریتم‌های کنترلی ریخته شود،

د. جک‌های وارد کننده نیرو بتوانند نیروهای کنترلی مورد نیاز را تولید کنند.



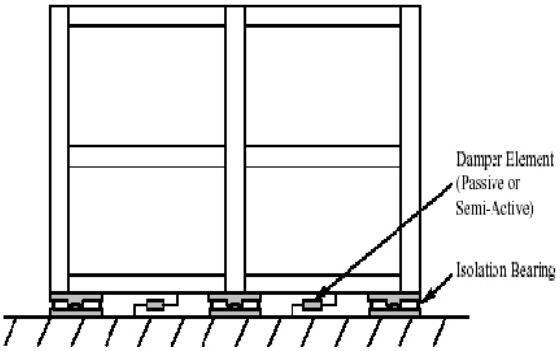
(الف)

(ب)

شکل ۲. (الف) و (ب) شماتیک و تصویری از یک ساختمان بلند به همراه سیستم کنترل فعال

۳. کنترل نیمه فعال

در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال، سیستم مانند کنترل فعال نیاز به دریافت پاسخ سازه دارد. این سیستم کنترل با تغییر لحظه‌به‌لحظه پارامترهای سیستم مکانیکی الحاقی که بر روی سازه نصب شده است عملکرد سیستم کنترلی را بهبود می‌بخشد (شکل ۳). یکی از مشکلات عمده این سیستم‌ها تجهیزات نسبتاً گران و پیچیده‌است.



شکل ۳. نمای شماتیک جداساز نیمه‌فعال

از مشکلات دیگر، تعمیر و نگهداری این سیستم‌ها می‌باشد. از مزایای آن می‌توان نیاز به اعمال نیروی کم و عملکرد مناسب آن با توجه به پایداری سیستم را نام برد [۲].

۴. کنترل مرکب

کنترل مرکب، سیستم کنترلی است که از ترکیب دو یا چند سیستم‌کنترلی غیرفعال، نیمه‌فعال و یا فعال ساخته می‌شود و از مزایای هر یک استفاده می‌کند تا نقطه‌ضعف‌های هر سیستم کنترل به تنهایی را کاهش دهد (شکل ۴).

(الف)

(ب)

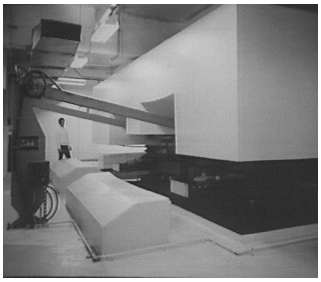
شکل ۴. (الف) نمای بیرونی، (ب) داخل ساختمان موتوماشی مجهز به سیستم کنترل مرکب

۵. کنترل غیرفعال

روش‌های کنترل غیرفعال از نظر عملکردی به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند:

الف. گروه اول روش‌های کنترل غیرفعالی هستند که انرژی ورودی را به صورت جذب آن در رفتارهای رفت و برگشتی مستهلک می‌کنند و امکان ورود عمده آن را به اجزای اصلی سازه نمی‌دهند یا کنترل‌گر از نظر فرکانسی به گونه‌ای تنظیم و هماهنگ شده که مسیر حرکت انرژی را عوض می‌کند و خصوصیات دینامیکی سیستم پس از الحاق را به شکلی تغییر می‌دهد که امکان تشدید پاسخ سازه در اثر بارهای هارمونیک به حداقل برسد. در این خصوص می‌توان به میراگرهای جرمی تنظیم شده تک و چندگانه (شکل ۵) اشاره کرد [۱].

ب. گروه دوم سیستم‌های کنترلی هستند که باعث کاهش انرژی ورودی به سازه می‌شود سیستم‌های جداسازی پایه جزو این دسته می‌باشند.



شکل ۵. یک سیستم کنترل غیرفعال در برج سیتی کارپنتر واقع در نیویورک

۶. سیستم‌های جاذب انرژی

همانگونه که گفته شد در گروه اول سیستم‌های کنترل غیرفعال، اصل بر افزودن جاذب‌های انرژی به ساختمان است. بدینصورت که این وسایل قسمتی از انرژی ورودی را به تنهایی جذب و مستهلک می‌نمایند. برای روشن شدن این موضوع، رابطه انرژی ورودی سیستم با انرژی سایر قسمت‌ها به صورت زیر نمایش داده می‌شود [۱]:

$$E = E_k + E_s + E_n + E_d \qquad (۱)$$

در این رابطه، E قدرمطلق انرژی ورودی، E_k قدرمطلق انرژی جنبشی، E_s انرژی کرنشی قابل بازگشت در محدوده کشسان، E_n مقدار غیرقابل بازگشت انرژی به واسطه تغییرشکل غیرکشسان و نهایتاً E_d مقدار انرژی مستهلک‌شده توسط سیستم الحاقی می‌باشد. مقدار انرژی ورودی، نمایانگر کار انجام‌شده توسط کل نیروی برشی پایه در فونداسیون، تحت بارهای دینامیکی و همچنین شامل اثر نیروهای اینرسی سازه می‌باشد.

در روش‌های مرسوم طراحی، برای اتلاف بهینه انرژی، از رفتار غیرکشسان سازه استفاده می‌گردد. بدینصورت که به سازه اجازه داده می‌شود از محدوده کشسان خود خارج شده و به واسطه تغییرشکل به وجود آمده مقداری از انرژی آن مستهلک گردد. این امر به معنی افزایش مقدار E_n در رابطه (۱) است و اثر غیرمستقیمی بر افزایش شکل‌پذیری سازه دارد، از این رو به‌منظور افزایش هر یک از جملات طرف راست رابطه (۱)، روش مشخصی به منظور کنترل غیرفعال طراحی می‌گردد. به طور کلی گروه جاذب‌های انرژی به چند دسته مهم تقسیم می‌شوند [۱]: سیستم‌های جاری‌شونده و اصطکاکی، که متناسب با تغییرمکان هستند و سیستم‌های لزج و لزج-کشسان که متناسب با سرعت کار می‌کنند.

۷. سیستم‌های تغییردهنده مشخصات دینامیکی سازه

سیستم‌های تغییردهنده مشخصات دینامیکی را می‌توان به چند دسته تقسیم کرد: جداگرهای پایه‌ای[۱۱]، میراگر ستون مایع تنظیم شونده[۱۲]، میراگر جرمی تنظیم شونده[۱۳] و میراگر ضربه‌ای[۱۴].در ادامه به تشریح بیشتر میراگر ضربه‌ای می‌پردازیم.

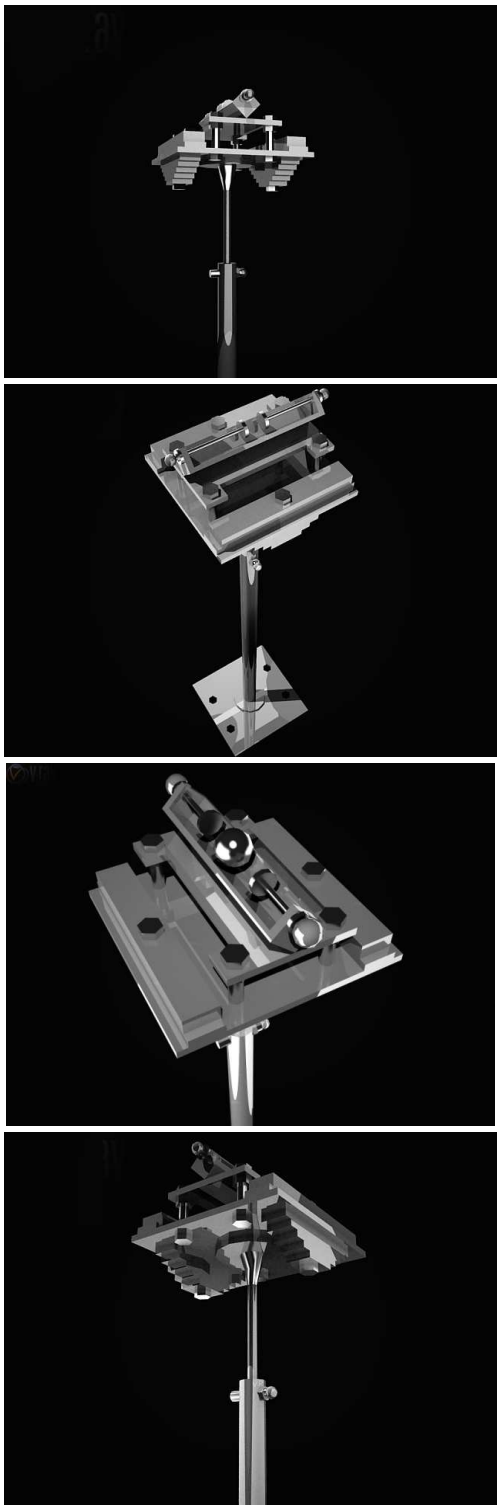
۸. میراگر ضربه‌ای

میراگر ضربه‌ای جزو کنترل‌کننده‌های غیرفعال محسوب می‌شود. تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی نشان می‌دهد که این گروه از میراگرهای غیرخطی جهت کاهش نوسانات سازه‌ها عملکرد بهتری نسبت به خنثی‌کننده‌های ارتعاشی خطی دارند. عامل اصلی تأثیرگذار در این نوع میراگرها جهت کنترل نوسانات، این است که نیروهای کوچک ایجاد شده توسط جرم‌های کمکی، با ایجاد بی‌نظمی در دامنه نوسانات سازه، موجب کاهش این نوسانات شدید می‌گردد (شکل ۶).

میراگر ضربه‌ای در آن دسته از وسایل لرزشی غیرفعال قرار دارد که جهت کاهش لرزه در سیستم‌های پیوسته و ناپیوسته به کار برده می‌شوند. در حالت صحیح و ایده‌ال، لرزش سیستمی که به میراگر ضربه‌ای مجهز شده است باعث کاهش ارتعاش به وسیله توده جرم داخل میراگر خواهد شد. میراگر ضربه‌ای معمولاً شامل یک توده جرم است که امکان حرکت به صورت آزاد بین دو ایستگاه تعریف شده را دارد و بین مرزهای یک محفظه صلب محصور است [۸]. وقتی که این میراگر متصل به یک سیستم نوسانی باشد امکان کاهش دامنه لرزش را از طریق انتقال حرکت دارد. کاهش مؤثر در نوسانات سیستم پیوسته و کاهش دامنه فرکانس پاسخ از مطالعات تجربی در پارامترهای خاص قابل اثبات می‌باشد [۹].

یک سیستم پیوسته قابلیت مدل شدن به وسیله توده‌های جرمی را دارد. ضروری است که حرکات توده جرمی در تغییر پارامترها در زمانی که بین دیواره‌های محفظه در حرکت می‌باشد مورد بررسی قرار گیرد که نقش موثر و بالقوه میراگر ضربه‌ای به خوبی مشخص گردد. اگر فاصله

بین توده جرمی و ایستگاه آخری کاملاً تنظیم شود، برخورد جرم با ایستگاه‌ها باعث کاهندگی در دامنه نوسانی سیستم اصلی خواهد شد.



شکل ۶. تصاویر گرافیکی میراگر ضربه‌ای از زوایای مختلف

این، دستاوردِ استهلاک انرژی در برخوردها و همچنین نتیجه عمل در تقابل با تحریک خارجی نیروها می‌باشد.

در عمل، اصطکاک با هوا، اصطکاک بین اجزای سیستم یا اتصالات، گسیختگی مصالح و غیره باعث اتلاف انرژی می‌شوند به طوری که ارتعاش سیستم پس از تعدادی نوسان مستهلک می‌شود. مهم این است که با استفاده از سیستم میراگر ضربه‌ای این نوسانات به حداقل برسند. نمونه‌های مورد نظر در سرعت‌های پایین را می‌توان در ارتعاشات آزاد و یا ارتعاشات به‌وجودآمده در اثر وقوع یک زلزله و یا باد روی سازه بررسی نمود [۱۰].

میراگر ضربه‌ای در ساختارهای متعددی به کار برده شده است از جمله در پره‌های توربین، بال‌های هواپیما، روبات‌های قابل انعطاف، پایه‌های چراغ‌های برق، آنتن‌های رادار و غیره که ممکن است به عنوان یک تیر ساده طره-ای مدل گردند. یکی دیگر از موارد کاربرد میراگر ضربه‌ای کاهش لرزش و افزایش ظرفیت خستگی در توربوماشین‌ها و سانتریفوژها می‌باشد. در تحقیقات مشترک توسط سازمان هوایی- فضایی آمریکا[۱۵] و دانشگاه تگزاس و مؤسسه فضایی اوهایو بر اساس تحلیل عددی و نتایج تجربی نتایج مهمی به دست آمده است. کاهندگی ارتعاش یکی از مهم‌ترین موارد طراحی سازه می‌باشد و در سازه-هایی که نگهداری و استفاده از آنها نیز با هزینه‌های زیادی مواجه خواهد شد، مثل اپراتورها و سازه‌های مورد استفاده در فضا (دستگاه‌ها و تجهیزاتی که در کارهای تحقیقاتی فضایی به کار برده می‌شوند) از میراگر ضربه‌ای استفاده شده است.

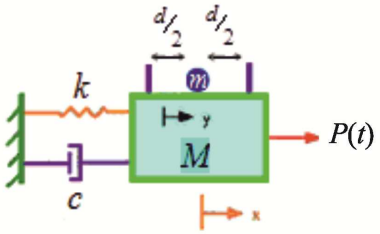
استفاده از میراگر ضربه‌ای جهت جلوگیری از حالت تشدید نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا می‌توان به چالمرز[۱۶] و سمرشیجیل[۱۷] اشاره کرد که از این تکنیک برای کنترل حالت تشدید در یک تیر طُره‌ای در مود دوم استفاده کرده‌اند، که از ۲ میراگر ضربه‌ای استفاده شده است. ایده اتصال یک جرم ناپیوسته به یک ورقِ در حال نوسان با هدف کاهش ارتعاش ورق به حدود ۷۰ سال پیش بر می‌گردد که لیبر[۱۸]مطالعات تجربی و تحلیلی خود را جهت کنترل هواپیما در قطعات ناپیوسته مرتبط با بال، که قابلیت نوسان به صورت آزاد را داشتند انجام داد.

در سال ۱۹۷۴ تحقیقی توسط مسری و کاهیای[۱۹] انجام شد، که تئوری ارتعاش ورق با استفاده از جرم ناپیوسته غیرخطی متصل شده در نقاط دلخواه را مطرح نمود و قابل تعمیم به نمونه‌هایی از سیستم‌های پیوسته مثل پوسته‌ها و تیرها می‌باشد. مدل‌های زنجیره‌ای میراگر ضربه‌ای روش ساده و قابل اطمینانی برای کاهش لرزش در اثر باد در سازه‌های بلند مثل آنتن‌ها و دودکش‌ها را ارائه می‌دهند، در تئوری مطرح شده توسط مسری به تاثیر پارامترهای مهم میراگر لرزه‌ای در سیستم‌های چنددرجه‌آزادی پرداخته و نتایج این تحقیق با مطالعات تجربی و مدل‌های مکانیکی مقایسه شده و نتایج خوبی از آن استنتاج شده است. از دیگر نمونه‌های بررسی شده می‌توان به کاهش مقدار ارتعاش در اثر برخورد جرم میراگر ضربه‌ای هنگامی که به یک سیستم ارتعاشی مکانیکی متصل باشد اشاره کرد، که در سال ۱۹۷۵ توسط روی و راک و فاستر مورد بررسی قرار گرفته است.

۹. تحلیل عددی سیستم یک درجه آزادی با میراگر ضربه‌ای تحت بار ضربه

در این قسمت، سیستم یک‌درجه‌آزادی تحت بارگذاری ضربه‌ای مثلثی قرار می‌گیرد (شکل ۷). مشخصات جرم و سختی سازه و میراگر چنان در نظر گرفته شده که پارامترهای اصلی دینامیکی سازه منعکس شود. واحدهای مورد استفاده می‌توانند مطابق با هر سیستمی سازگار شوند. سیستم واحد مورد نظر در این بخش سیستم متریک می‌باشد. بار ضربه‌ای از مقدار اولیه F_0 در لحظه صفر شروع می‌شود و با تغییرات خطی در زمان t_d به صفر می‌رسد (شکل ۸). پاسخ سازه در دو حالت با میراگر و بدون میراگر ضربه‌ای مورد مقایسه قرار گرفته است. جرم سازه $m=1$ با سختی $k=10$ در نظر گرفته شده و میرایی سیستم تحت بارگذاری انتقالی $\xi=0$ می‌باشد. با توجه به این که حین بارگذاری ضربه‌ای میرایی لزجی سازه بسیج نمی‌شود فرض میرایی صفر توجیه شده است. در عین حال با توجه به این که برای پاسخ سازه به بارگذاری ضربه‌ای از جواب‌های بسته دینامیک سازه استفاده شده است و این نتایج برای بار مثلثی فقط در حالت $\xi=0$ موجود است، از میرایی لزجی در تحلیل اثر میراگر ضربه‌ای، در پاسخ سازه یک‌درجه‌آزادی صرف‌نظر شده است. معادله بار ضربه بر سیستم بدینصورت است [۱۱]:

$$P(t)=F_0\left(1-\frac{t}{t_d}\right) \qquad (۲)$$

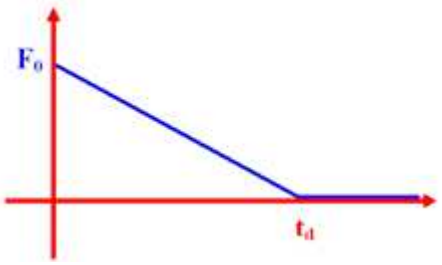


شکل ۷. موقعیت میراگر ضربه‌ای در وسط محفظه

در رابطه (۲)، F_0 حداکثر نیروی ضربه و t_d مدت زمان تحریک می‌باشد. موقعیت جرم آزاد در وسط محفظه بوده و به هیچ‌کدام از دو جداره نچسبیده است. این حالت بهتر از موقعیتی است که قبل از اعمال نیرو به یکی از دو جداره چسبیده باشد. در این موقعیت، نیرو از هر جهتی که وارد شود جرم آزاد بلافاصله شروع به حرکت خواهد کرد و بعد از طی مسیری، اولین ضربه را وارد می‌نماید. در غیر این صورت، در حالتی که توده جرمی به یکی از دو دیواره محفظه چسبیده باشد اثر میراگر بستگی به جهت نیرو دارد و ممکن است تا زمان تغییر جهت نیرو، توده همچنان به دیواره چسبیده باشد و آزاد نشود. بنا به دلیل فوق موقعیت اولیه میراگر ضربه‌ای در وسط قرار داده شده است (شکل ۷).

در تحلیل انجام شده در این قسمت در هر گام ابتدا پاسخ سیستم یک‌درجه‌آزادی به تحریک ضربه‌ای رابطه (۳) از فرم بسته زیر به دست می‌آید:

$$x(t)=\begin{cases}\frac{F_0}{k}(1-\cos\omega t)+\frac{F_0}{kt_d}\left(\frac{\sin\omega t}{\omega}-t\right), & t\le t_d\\ \frac{F_0}{k\omega t_d}[\sin\omega t-\sin\omega(t-t_d)]-\frac{F_0}{k}\cos\omega t, & t>t_d\end{cases} \qquad (۳)$$



شکل ۸. بار ضربه‌ای مثلثی اعمال شده

با توجه به این که نیروی بین میراگر و محفظه قبل از ضربه در اثر حرکت سازه یک‌درجه‌آزادی موجود نیست، موقعیت مطلق میراگر ثابت بوده و بنابراین موقعیت نسبی میراگر نسبت به محفظه از رابطه $y = Y - x$ به دست می‌آید. سپس کنترل می‌شود که مقدار y، داخل بازه $[0, d]$ قرار گرفته باشد. در غیر این صورت، اثر ضربه به صورت تبادل اندازه‌حرکت خطی بر سازه یک‌درجه‌آزادی و میراگر اعمال می‌شود.

در این بخش در مدلسازی رفتار میراگر ضربه‌ای، اثر میرایی فقط در ضربه‌های وارده دیده شده، لذا حرکت جرم آزاد در فاصله بین دو ضربه هیچ تأثیری بر سیستم ندارد که با مدلسازی آزمایشگاهی کمی متفاوت است. برای صرفنظر از اصطکاک مسیر، افت انرژی ناشی از برخورد اصطکاکی و غیرخطی در انتهای مسیر به صورت رابطه ساده زیر دیده شده است:

$$\dot{y}^{+} = -e\dot{y}^{-} \qquad 0 < e < 1 \qquad (۴)$$

همانگونه که مشاهده خواهیم کرد، هر اندازه که مقدار e کوچکتر باشد دامنه نوسانات سازه زودتر میرا خواهد شد. رابطه بقای اندازه‌حرکت بین سازه یک درجه آزادی و میراگر بدین شکل است:

(۵)

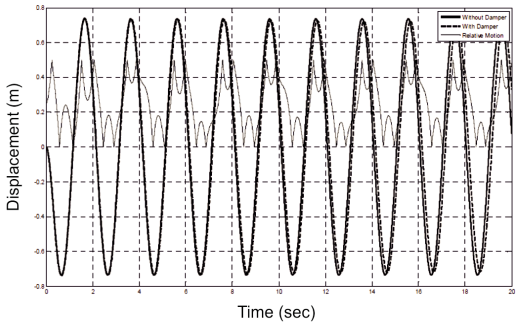
$$m\left(\dot{y}^{-} + \dot{x}^{-}\right) + M\left(\dot{x}^{-}\right) = m\left(\dot{y}^{+} + \dot{x}^{+}\right) + M\left(\dot{x}^{+}\right)$$

با استفاده از رابطه (۴) و جایگزینی آن در رابطه (۵) خواهیم داشت:

$$(m+M)\dot{x}^{-} + m(1+e)\dot{y}^{-} = (M+m)\dot{x}^{+} \qquad (۶)$$

طبق رابطه (۶) تبادل اندازه‌حرکت خطی یک ضربه زمانی به کاهش نوسانات سازه کمک می‌کند که در هنگام وقوع آن علامت $\dot{y}^{-}$ و $\dot{x}^{-}$ مخالف هم باشند. لذا اگر d بسیار کوچک گرفته شود ناگزیر تعداد برخوردهای نامطلوب افزایش خواهد یافت. بهترین انتخاب برای d مقداری است که فقط اندکی از دامنه نوسانات سازه تحت بارگذاری داده شده کمتر باشد. در این صورت تعداد کل ضربات کاهش یافته و تعداد ضربات مطلوب افزایش خواهد یافت. در این شرایط هر چقدر e را کاهش دهیم میرایی نوسانات به دو دلیل باز هم افزایش پیدا خواهد کرد. اول آن که، اگر e را نزدیک به صفر انتخاب کنیم، اگر ضربه میراگر با سازه در جهت نامطلوب باشد (یعنی $\dot{x}^{-}$ و $\dot{y}^{-}$ هم علامت باشند) میزان افزایش اندازه‌حرکت سازه یعنی ترم $m(1+e)\dot{y}^{-}$ کمتر خواهد بود و دلیل دوم این که، اگر ضربه میراگر با سازه در جهت مطلوب باشد، در این صورت کاهش سرعت میراگر همراه با تغییر جهت حرکت آن، ضربه بعدی را در جهت مطلوب ایجاد خواهد کرد. در این حالت بهترین انتخاب برای e با توجه به مطالب و تحلیل فوق، حدوداً $e = 0.5$ است. مدل مورد نظر برای بارهای ضربه‌ای غیر هارمونیک با زمان اثر کوتاه اطلاعات جامعی در مورد تأثیر میراگر ارائه نمی‌دهد، به دلیل این که از اثر اصطکاک مسیر صرف‌نظر شده است و میرایی منوط به اولین ضربه است و آن هم به شرط آن که این اولین ضربه در جهت مطلوب باشد.

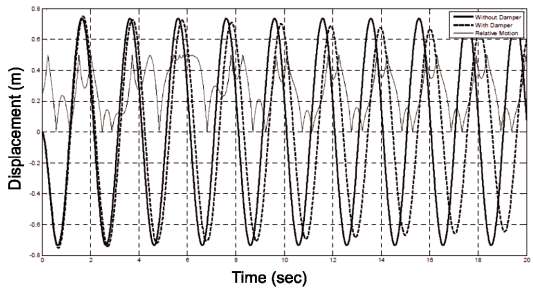
تأثیر پارامترهای مهم در رفتار سازه یک‌درجه‌آزادی با میراگر ضربه‌ای بر پاسخ سیستم تحت بار ضربه مورد بررسی قرار گرفته است. پاسخ سیستم بدون میراگر ضربه-ای و در حالتی که مجهز به میراگر می‌باشد برای $\mu = 0.01, e = 0.8, d = 0.5m$ در شکل (۹) نشان داده شده است. حرکت نسبی جرم آزاد، نمایانگر ضربه-های وارد به دو دیواره محفظه می‌باشد و می‌توان به خوبی حرکت جرم آزاد و تعداد ضربه‌ها را مورد بررسی قرار داد.



شکل ۹. پاسخ سیستم ارتعاشی یک درجه آزادی تحت بار ضربه با پارامترهای $\mu = 0.01, e = 0.8, d = 0.5m$

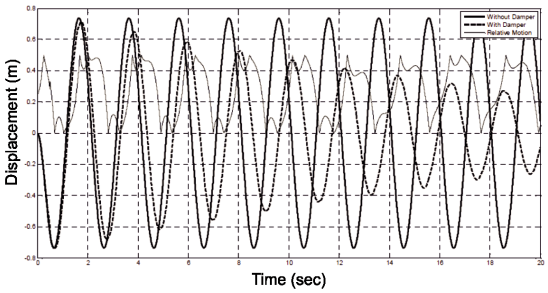
در شکل (۹) دوره تحریک‌های لرزه‌ای (t_d) برابر ۰٫۵ ثانیه و درصد جرم میراگر ۰٫۰۱ در نظر گرفته شده است. پاسخ سیستم در حالت با میراگر، به خصوص در ثانیه‌های نخست تفاوت چندانی با سیستم بدون میراگر ندارد و منحنی‌های جابه‌جایی در هر دو حالت تقریباً بر روی هم منطبق هستند. منحنی حرکت نسبی میراگر نسبت به محفظه در نزدیکی $d = 0.5m$ و $d = 0.0m$ شکسته شده است. شکستگی‌های این منحنی موقعیت ضربه را نشان می‌دهند. ضربه‌هایی که در شاخه نزولی منحنی پاسخ با میراگر اعمال شده اند، انرژی جنبشی سازه مبنا را کاهش می‌دهند (ضربات مفید).

در شکل (۱۰) ضریب جرمی μ میراگر از ۱٪ به ۵٪ افزایش داده شده است. مقایسه پاسخ سازه با شکل (۹) تأثیر افزایش ضریب جرمی μ را بر پاسخ سیستم به خوبی نشان می‌دهد. از ثانیه دوم به بعد میراگر ضربه‌ای نقش مؤثری در کاهش جابه‌جایی سیستم دارد به طوری که بعد از ۶ ثانیه این کاهش به خوبی مشهود است و هر چه زمان بیشتری طی می‌شود مقدار آن افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰. پاسخ سیستم ارتعاشی یک‌درجه‌آزادی تحت بار ضربه با پارامترهای $\mu = 0.05, e = 0.8, d = 0.5m$

در شکل (۱۱) اثر افزایش ضریب جرمی μ و کاهش ضریب بازگشت e به طور همزمان، در پاسخ سیستم با میراگر ضربه‌ای دیده شده است. کاهش ارتعاشات از ثانیه دوم شروع شده و سرعت بیشتری را به خود می‌گیرد به طوری که در ثانیه‌های آخر این کاهش به حداکثر مقدار خود می‌رسد.



شکل ۱۱. پاسخ سیستم ارتعاشی یک‌درجه‌آزادی تحت بار ضربه با پارامترهای $\mu = 0.1, e = 0.5, d = 0.5m$

همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش درصد جرمی میراگر و افت انرژی ناشی از ضربه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ سازه در مود مورد نظر دارد، به شرط آن که طول مسیر حرکت میراگر (d) برای دامنه نوسانات سازه در مود مورد نظر تنظیم شود.

بررسی‌ها نشان داده است که کاهش مقدار d نمی‌تواند بر پاسخ سیستم موثر باشد و صرفاً در محدوده خاصی بیشترین تأثیر را دارد. ضریب بازگشت e بین صفر و یک متغیر است و زمانی این ضریب برابر با یک است که سرعت جرم آزاد بعد از برخورد و قبل از آن برابر باشد و در حالتی که مساوی صفر می‌شود توده جرمی به یکی از دو دیواره‌ی محفظه چسبیده و امکان کنده شدن از آن را نخواهد داشت.

۱۰. نتیجه‌گیری

تحلیل سازه یک‌درجه‌آزادی تحت بارگذاری ضربه با پارامترهای μ و d و e نشان می‌دهد که با افزایش ضریب جرمی به عنوان مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده، نقش میراگر ضربه‌ای در کاهش دامنه ارتعاشات چشم‌گیر می‌شود. فرکانس‌های پائین ارتعاشات پاسخ تغییرمکان سازه،

به پارامترهای e و d خیلی حساس نیستند. در عین حال کاهش ضریب بازگشت، تعداد ضربات مفید میراگر را افزایش می‌دهد. با کاهش d از یک حد معین به پائین، تنها تعداد ضربات مفید و غیرمفید میراگر افزایش می‌یابد. نکته قابل ذکر دیگر در خصوص تأثیر میراگر ضربه‌ای بر روی سازه‌های تحت تأثیر نیروی ضربه‌ای این است که بر خلاف حالت بارگذاری هارمونیک که با توجه به شناختی که از مشخصات دینامیکی سازه (دوره تناوب مودهای غالب) داریم می‌توان جرم آزاد را برای تحریکی با فرکانس و دامنه مشخص تنظیم کرد، در ارتعاشات غیرهارمونیک پاسخ سیستم با میراگر به طور چشم‌گیری تصادفی بوده و استفاده از یک میراگر با پارامترهای e و d مشخص کافی نیست. برای کنترل این تحریک‌ها باید از چندین میراگر ضربه‌ای با ضرایب بازگشت و طول مسیر نوسان مختلف، در راستای مورد نظر استفاده کرد.

پی‌نوشت

1. Active Control
2. Semi-active Control
3. Hybrid Control
4. Passive Control
5. Flutter
6. Murata
7. Ito
8. Nordell
9. Zuk
10. Yao
11. Base Isolation
12. Tuned Liquid Column Damper
13. Tuned Mass Damper
14. Impact Damper
15. National Aeronautics and Space Administration (NASA)
16. Chalmers
17. Semercigil
18. Leiber
19. Kahyai

مراجع

[1] T. T. Soong, G. F. Dargush, *Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering*, John Wiley & Sons, 1997.

[2] B. F. Spencer, T. T. Soong, New application and development of active, semi-active and hybrid control techniques for seismic in the USA, *Proc. Int. post-SMIRT Conf. seismic Isolation*, 1999.

[3] F. Naeim, J. M. Kelly, *Design of seismic isolated structures: from theory of practice*, 1990.

[4] N. J. Yang, T. T. Soong, Recent Advances in active control of civil engineering structures, *Int. J. of probabilistic Eng. Mechanics*, 1989, 3, 4, 179-187.

[5] T. T. Soong, *Active structural control: Theory and practice*, Longman Scientific & Technical, 1989.

[6] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 4th ed., Prentice Hall, New Jersey, 2002.

[7] S. F. Masri, K. R. Miller, T. J. Dehghanyar, T. K. Caughey, Active Parameter Control of Nonlinear Vibrating Structures, *Journal of Applied Mechanics*, 1989, Vol. 56, pp 658.

[8] A. S. Butt, F. A. Akl, Experimental Analysis of Impact-Damped Flexible Beams, *Journal of Engineering Mechanics*, April 1997, pp 376-383.

[9] S. F. Masri, Steady-state Response of a Multi-degree System with an Impact Damper, *Journal of Applied Mechanics*, March 1973, pp 127-132.

[10] K. R. Ranjir, D. R. Richards, J. E. Foster, The Application of Impact Dampers to Continuous Systems, *Journal of engineering for Industry*, Nov. 1975, pp 1317- 1324.

[11] خ. برگی، *دینامیک سازه ها*، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۶۸