

با توجه به مشکلات و محدودیت‌های روش‌های موجود کنترل ارتعاشات سازه‌ها و کاهش پاسخ لرزه‌ای آن‌ها، نیاز به توسعه سیستم‌های غیر فعال، سبک و ارزان و در عین حال دارای عملکرد مطلوب در بازه‌ی فرکانسی وسیع با ویژگی‌های متفاوت بیش از پیش احساس می‌شود. به نظر می‌رسد با توجه به اهمیت مسئله‌ی زلزله در کشور و خسارات ناشی از آن، باید موضوع کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها با روش‌هایی به غیر از تغییر طرح سازه بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. یکی از روش‌های جدیدی که در حال حاضر در سطح بین‌المللی توجه بسیاری را جلب کرده است، استفاده از سیستم جاذب انرژی غیر خطی ارتعاشی-ضربه‌ای می‌باشد. تحت شرایط معینی، انتقال انرژی هدفمند غیر فعال از سیستم خطی به جاذب انرژی غیر خطی ضربه‌ای یا به عبارت دیگر یک جریان انرژی یک طرفه و برگشت ناپذیر از سیستم اولیه (سیستمی که هدف کنترل ارتعاش آن است) به سیستم کنترلی اتفاق می‌افتد. در تقابل با جاذب ارتعاش خطی سنتی که عملکردی باریک باند دارد، تحت شرایط معینی، جاذب انرژی غیر خطی ضربه‌ای می‌تواند در وضعیتی پهن باند با سیستم خطی اندرکنش مودی داشته باشد. یعنی جاذب انرژی غیر خطی ضربه‌ای به صورت یک کنترل کننده‌ی غیر فعال، تطبیقی و پهن باند عمل می‌کند.

در پایان نامه‌ی حاضر جاذب انرژی ارتعاشی-ضربه‌ای¹ با زمان عکس‌العمل کوتاه با بهینه‌یابی پارامترهای آن شامل نسبت سختی و فضای آزاد حرکت مورد مطالعه قرار گرفته است. جستجوی هماهنگی² به عنوان یک روش فرا اکتشافی³ جدید به طور موثری اختصاصی شده است و برای مسئله‌ی بهینه‌یابی پیوسته‌ی فوق‌الذکر به کار گرفته شده است. نشان داده شده است که سیستم بهینه‌ی شده‌ی متصل به سازه قادر است که با سازه‌ی اولیه در بازه‌ی وسیع فرکانسی اندرکنش داشته باشد. پاسخ کنترل شده‌ی پهن باند مورد نظر در مجموعه‌ای از قاب‌های خمشی فولادی کوتاه و میان مرتبه از طریق تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. توانایی این نوع جاذب انرژی در اتلاف انرژی لرزه‌ای ورودی به سازه‌ها و توانایی آن‌ها در کاهش موثر پاسخ سازه‌ها از طریق ضربه‌های ارتعاشی بین جرم جاذب انرژی و جرم طبقه با استخراج شاخص‌های عملکردی متعدد و طیف‌های فوریه مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده بر روی مدل‌های سازه‌ای تعریف شده، سیستم کنترلی بهینه شده باعث باز توزیع انرژی از مودهای ارتعاشی پایین با فرکانس کم و دامنه‌ی ارتعاش زیاد به مودهای ارتعاشی بالاتر با فرکانس زیاد و دامنه‌ی ارتعاش کم می‌شود که منجر به کاهش مطلوب پاسخ‌های سازه‌ای گردیده است. کلیه‌ی تحلیل‌های انجام گرفته و نتایج به دست آمده از طریق برنامه نویسی در MATLAB بوده است.

کلمات کلیدی: کنترل غیر فعال، اندرکنش مودی، جستجوی هماهنگی، جاذب انرژی ضربه‌ای، سیستم انتقال انرژی.

¹ Vibro-Impact Nonlinear Energy Sink

² Harmoy search

³ Metaheuristic

فهرست مطالب

فصل اول	۱
کنترل ارتعاشات سازه‌ها	۱
۱.۱ مقدمه	۲
۱.۲ روش‌های کنترل ارتعاشات	۲
۱.۲.۱ سیستم‌های کنترل غیر فعال	۴
۱.۲.۱.۱ میراگر خطی لزج (Viscous)	۵
۱.۲.۱.۲ میراگر لزج غیر خطی	۵
۱.۲.۱.۳ میراگر ارتجاعی-لزج (Visco-Elastic)	۶
۱.۲.۱.۴ میراگر اصطکاکی کولمب	۷
۱.۲.۱.۵ میراگر اصطکاک سازه‌ای	۷
۱.۲.۱.۶ میراگر هیستریزیس	۸
۱.۲.۱.۷ میراگر غیر فعال با جرم تنظیم شده (متوازن)	۹
۱.۲.۱.۸ میراگر مایع تنظیم شده (متوازن)	۱۱
۱.۲.۱.۹ جداسازی ارتجاعی	۱۲
۱.۲.۲ سیستم‌های کنترل نیمه فعال	۱۵
۱.۲.۲.۱ میراگرهای روزنه-متغیر	۱۵
۱.۲.۲.۲ وسیله‌ی سختی-متغیر	۱۶
۱.۲.۲.۳ میراگرهای جرم تنظیم شده‌ی هوشمند STMD	۱۸
۱.۲.۲.۴ میراگرهای اصطکاک -متغیر	۱۸
۱.۲.۲.۵ میراگرهای مایع قابل کنترل	۱۸
۳.۱ خلاصه گام‌ها و روندهای طراحی کنترل ارتعاش	۲۱
۳.۱.۱ تغییر شکل استاتیکی	۲۱
۳.۱.۲ سختی جانبی	۲۱
۳.۱.۳ شرایط محیطی	۲۱
۳.۱.۴ خصوصیات میرایی	۲۲
۳.۱.۵ محدودیت‌های وزنی و فضایی	۲۲

۲۲	..... ۱.۳.۶. سختی دینامیکی
۲۲	..... ۱.۴. روند و هدف این مطالعه
۲۴	..... فصل دوم
۲۴	..... جاذب‌های انرژی غیر خطی
۲۵	..... ۱.۲. مقدمه
۲۸	..... ۲.۲. نوسانگرهای خطی با جاذب‌های انرژی غیر خطی یک درجه آزادی
۲۸	..... ۱.۲.۲. پیکربندی جاذب‌های انرژی غیر خطی یک درجه آزادی
۲۸	..... ۲.۲.۲. ملاک عددی از انتقال انرژی هدفمند در یک نوسانگر خطی یک درجه آزادی با جاذب انرژی غیر خطی
۲۹	..... یک درجه آزادی
۳۷	..... ۲.۳. جاذب‌های انرژی غیر خطی دارای سختی ناهموار
۳۷	..... ۱.۳.۲. جاذب‌های انرژی غیر خطی ارتعاشی - ضربه‌ای (VINES) به عنوان جاذب‌های شوک
۳۸	..... ۱.۳.۲.۱. مفهوم انتقال انرژی هدفمند غیر فعال در NES های ارتعاشی - ضربه‌ای (VINES)
۴۵	..... ۲.۳.۲.۱. جداسازی شوک
۴۹	..... فصل سوم
۴۹	..... پارامترهای عملکردی سیستم و زلزله‌ها
۵۰	..... ۱.۳. مقدمه
۵۱	..... ۲.۳. معیارهای ارزیابی تاریخی‌ی زمانی پاسخ جابجایی درجات آزادی
۵۲	..... ۳.۳. معیارهای ارزیابی انرژی
۵۳	..... ۱.۳.۳. انرژی لرزه‌ای ورودی به سیستم‌های چند درجه آزادی
۵۴	..... ۲.۳.۳. سیستم‌های اتلاف انرژی برای کاربردهای لرزه‌ای
۵۶	..... ۳.۴. ارزیابی پهن باند بودن پاسخ سازه
۵۷	..... ۱.۴.۳. تبدیل فوریه‌ی گسسته
۵۹	..... ۲.۴.۳. تبدیل فوریه‌ی سریع FFT
۶۰	..... ۳.۵. معیارهای ارزیابی زلزله‌های مورد استفاده
۶۲	..... ۱.۵.۳. محتوای فرکانسی حرکت زمین
۶۲	..... ۲.۵.۳. تابع چگالی طیفی توان حرکت زمین
۶۴	..... ۳.۵.۳. طیف پاسخ زلزله
۶۴	..... ۱.۳.۵. طیف‌های شتاب، سرعت و جابجایی

۶۶	..... طیف انرژی و طیف فوریه
۶۸	..... فصل چهارم
۶۸	..... بهینه یابی
۶۹	..... ۱. مقدمه
۷۰	..... ۲. الگوریتم ژنتیک
۷۱	..... ۱. ۲. ۴. وجوه تمایز الگوریتم ژنتیک و بیان اجمالی آن
۷۳	..... ۲. ۲. ۴. پارامترها در جستجوی ژنتیک
۷۳	..... ۳. ۲. ۴. استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک در بهینه یابی سازه‌ای
۷۳	..... ۳. ۴. الگوریتم جستجوی هماهنگی
۷۶	..... ۴. ۴. فرمول بندی بهینه یابی در این پایان نامه
۷۸	..... فصل پنجم
۷۸	..... صحت سنجی
۸۳	..... فصل ششم
۸۳	..... معرفی مدل‌ها و نتایج شبیه سازی‌های عددی
۸۴	..... ۱. ۶. معرفی مدل‌ها
۸۷	..... ۲. ۶. معرفی و ارزیابی زلزله‌های مورد استفاده برای تحلیل دینامیکی
۹۳	..... ۳. ۶. معادلات حاکم بر حرکت سیستم خطی اولیه و جاذب انرژی غیر خطی
۹۴	..... ۴. ۶. نتایج شبیه سازی‌های عددی انجام شده
۱۰۵	..... ۱. ۴. ۶. بررسی میزان تاثیر VINES در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ی کوتاه مرتبه
۱۰۶	..... ۲. ۴. ۶. بررسی میزان تاثیر VINES در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های میان مرتبه
۱۰۸	..... ۳. ۴. ۶. بررسی نحوه‌ی تأثیر VINES در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها
۱۱۴	..... فصل هفتم
۱۱۴	..... جمع بندی و نتیجه گیری
۱۱۹	..... مراجع

فهرست شکل‌ها و جدول‌ها

- شکل ۱.۱ میراگر لزج ۴۵۰ کیلو نیوتنی ۶
- شکل ۲.۱ ساز و کار میرایی لزج ۶
- شکل ۳.۱ نمونه‌ای از میراگر ارتجاعی لزج ۷
- شکل ۴.۱ میرایی هیستریزیس: (a) رابطه‌ی تنش کرنش، (b) رفتار واقعی میراگر هیستریزیس، (c) رفتار ایده آل شده‌ی میراگر هیستریزیس ۸
- شکل ۵.۱ میراگر ورق X ۹
- شکل ۶.۱ اجرای معمول یک TMD برای کاهش ارتعاش عمودی پل‌ها ۱۰
- شکل ۷.۱ مدل یک سازه‌ی یک درجه آزادی دارای TMD. سمت چپ: نیروی تحریک $f(t)$ اعمالی بر روی جرم سازه‌ی اصلی. سمت راست: تحریک به وسیله‌ی شتاب پایه $\ddot{u}_g(t)$ ۱۰
- شکل ۸.۱ توصیف طرح کلی یک حرکت رفت و برگشتی سطح آزاد مایع (a) و یک میراگر ستون مایع تنظیم شده (b) درگیر با سازه‌ی اولیه ۱۲
- شکل ۹.۱ پارامترهای اصلی حرکات رفت و برگشتی سطح آزاد مایع و TLD ستونی ۱۲
- شکل ۱۰.۱ نمای طرح کلی سیستم‌های جداسازی ارتعاش. چپ: جداسازی آثار نیروی تحریک بر سازه را کاهش می‌دهد. راست: جداسازی آثار تحریک پایه را کاهش می‌دهد ۱۳
- شکل ۱۱.۱ قابلیت انتقال نیرو برای یک جداساز شامل فنر خطی و ضربه گیر موازی با آن به ازای نسبت‌های میرایی مختلف ... ۱۴
- شکل ۱۲.۱ طرح کلی میراگر روزنه-متغیر ۱۶
- شکل ۱۳.۱ وسیله‌ی SAIVS (a) اجرا شده به صورت STMD؛ (b) وسیله‌ی SAIVS کوچک مقیاس ۱۷
- شکل ۱۴.۱ حلقه‌های نیرو-جابجایی اندازه گیری شده‌ی وسیله‌ی SAIVS ۱۷
- شکل ۱۵.۱ طرح کلی میراگر مایع قابل کنترل ۱۹
- شکل ۱۶.۱ طرح کلی میراگر مایع MR ۲۰ تنی بزرگ مقیاس ۲۰
- شکل ۱۷.۱ برپایی آزمایشگاهی میراگر مایع MR ۲۰ تنی بزرگ مقیاس ۲۰
- شکل ۱۸.۱ حلقه‌های نیرو-جابجایی اندازه گیری شده در $5/4 \text{ cm/s}$ ۲۰
- شکل ۱.۲ تغییرات نسبت انرژی K به ازای میزان ضربه‌ی $A = 0.5$ ۲۷
- شکل ۲.۲ تغییرات نسبت انرژی K به ازای میزان ضربه‌ی $A = 0.7$ ۲۷
- شکل ۳.۲ سیستم دو درجه آزادی با رفتار سختی اساساً غیر خطی ۲۹
- شکل ۴.۲ درصد انرژی ضربه‌ای که نهایتاً در NES تلف می‌شود به صورت تابعی از بزرگی ضربه ۳۰
- شکل ۵.۲ دینامیک گذرای سیستم دو درجه آزادی (تراز انرژی پایین، $X = 0.05$): (a) جابجایی نوسانگر خطی؛ (b) جابجایی جاذب انرژی غیر خطی (NES) و (c) درصد انرژی کل لحظه‌ای در NES ۳۲
- شکل ۶.۲ دینامیک گذرای سیستم دو درجه آزادی (تراز انرژی متوسط، $X = 0.12$): (a) جابجایی نوسانگر خطی؛ (b) جابجایی جاذب انرژی غیر خطی (NES)؛ (c) درصد انرژی کل لحظه‌ای در NES و (d) نمای نزدیک پاسخ NES ۳۳

- شکل ۷.۲ دینامیک گذرای سیستم دو درجه آزادی (تراز انرژی متوسط، $X = 0.2$): (a) جابجایی نوسانگر خطی؛ (b) جابجایی جاذب انرژی غیر خطی (NES)؛ (c) درصد انرژی کل لحظه‌ای در NES و (d) جمع آثار هر دو جابجایی در حین انتقال انرژی هدفمند غیر خطی ۳۴
- شکل ۸.۲ دینامیک گذرای سیستم دو درجه آزادی (تراز انرژی بالا، $X = 0.5$): (a) جابجایی نوسانگر خطی؛ (b) جابجایی جاذب انرژی غیر خطی (NES) و (c) درصد انرژی کل لحظه‌ای در NES ۳۴
- شکل ۹.۲ مقایسه‌ی وسایل جذب انرژی خطی و غیر خطی: (a) TMD درگیر با یک نوسانگر خطی؛ (b) NES درگیر با یک نوسانگر خطی ۳۵
- شکل ۱۰.۲ عملکرد TMD ۳۶
- شکل ۱۱.۲ عملکرد NES ۳۶
- شکل ۱۲.۲ سیستم دو درجه آزادی شامل نوسانگر خطی درگیر با یک NES ($\omega_0 = 2.3N/m$, $X = 0.31 m/s$): (a) پاسخ سیستم و (b) نمای نزدیک ۳۷
- شکل ۱۳.۲ نوسانگر خطی یک درجه آزادی با NES ارتعاشی - ضربه‌ای (VINES) ۳۹
- شکل ۱۴.۲ نمودارهای نمای کرانی مقیاس اتلاف انرژی $E_{VINES, t \gg 1}$ به ازای Ω^2 و نسبت جرم ε متغیر: ۴۲
- شکل ۱۵.۲ نمودارهای نمای کرانی مقیاس اتلاف انرژی $E_{VINES, t \gg 1}$ برای سیستم خطی (بدون ضربه‌های ارتعاشی، $\varepsilon \approx 2$) به ازای Ω^2 و نسبت جرم ε متغیر ۴۲
- شکل ۱۶.۲ اختلاف نمودارهای نمای کرانی مقیاس اتلاف انرژی مجانبی بین سیستم‌های خطی و ارتعاشی - ضربه‌ای و تعداد ضربه‌های ارتعاشی متناظر: (a) $e = 0.5$ ؛ مقادیر مثبت (یا منفی) متناظر با بیشتر بودن (یا کمتر بودن) انرژی تلف شده توسط VI NES است ۴۳
- شکل ۱۶.۲ اختلاف نمودارهای نمای کرانی اتلاف انرژی مجانبی بین سیستم‌های خطی و ارتعاشی - ضربه‌ای و تعداد ضربه‌های ارتعاشی متناظر: (b) $e = 1$ ؛ مقادیر مثبت (یا منفی) متناظر با بیشتر بودن (یا کمتر بودن) انرژی تلف شده توسط VI NES است ۴۳
- شکل ۱۶.۲ اختلاف نمودارهای نمای کرانی اتلاف انرژی مجانبی بین سیستم‌های خطی و ارتعاشی - ضربه‌ای و تعداد ضربه‌های ارتعاشی متناظر: (c) $e = 1.5$ ؛ مقادیر مثبت (یا منفی) متناظر با بیشتر بودن (یا کمتر بودن) انرژی تلف شده توسط VI NES است ۴۴
- شکل ۱۷.۲ سازه‌ی اولیه بر شالوده با NES ارتعاشی - ضربه‌ای متصل به آن: (a) پیکربندی سیستم؛ (b) طیف‌های نشان دهنده‌ی نیروی نرمال شده‌ی حداکثر انتقال یافته به زمین به صورت تابعی از نسبت فرکانس نرمال شده ۴۶
- شکل ۱۸.۲ پاسخ گذرای x_3 شالوده تحت تشدید، $\omega_3 / \omega_n = 1$ ۴۶
- شکل ۱۹.۲ سازه‌ی اولیه با جزء حساس و VINES: (a) پیکربندی سیستم؛ (b) طیف‌های شتاب نرمال شده‌ی حداکثر جزء حساس به صورت تابعی از نسبت فرکانس بدون بعد شده ۴۷
- شکل ۱۹.۲ سازه‌ی اولیه با جزء حساس و VINES: (c) پاسخ گذرای جزء حساس x_3 در حالت تشدید خطی، $\omega_3 / \omega_n = 1$ ۴۸

- شکل ۴.۱. گردش نمای الگوریتم بهینه یابی جستجوی هماهنگی ۷۵
- شکل ۵.۱. نتایج شبیه سازی های نوسرا و همکاران برای زلزله ی ال سترو: (a) جابجایی طبقه اول سازه، (b) جابجایی طبقه دوم سازه، (c) جابجایی نسبی جرم VINES و جرم طبقه ی دوم و (d) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخورد ها ۸۰
- شکل ۵.۲. نتایج شبیه سازی های پایان نامه ی حاضر برای زلزله ی ال سترو: (a) جابجایی طبقه اول سازه، (b) جابجایی طبقه دوم سازه، (c) جابجایی نسبی جرم VINES و جرم طبقه ی دوم و (d) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخورد ها ۸۰
- شکل ۵.۳. نتایج شبیه سازی های نوسرا و همکاران برای زلزله ی کوبه: (a) جابجایی طبقه اول سازه، (b) جابجایی طبقه دوم سازه، (c) جابجایی نسبی جرم VINES و جرم طبقه ی دوم و (d) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخورد ها ۸۱
- شکل ۵.۴. نتایج شبیه سازی های پایان نامه حاضر برای زلزله ی کوبه: (a) جابجایی طبقه اول سازه، (b) جابجایی طبقه دوم سازه، (c) جابجایی نسبی جرم VINES و جرم طبقه ی دوم و (d) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخورد ها ۸۱
- شکل ۵.۵. نتایج شبیه سازی های نوسرا و همکاران برای زلزله ی نورث ریچ: (a) جابجایی طبقه اول سازه، (b) جابجایی طبقه دوم سازه، (c) جابجایی نسبی جرم VINES و جرم طبقه ی دوم و (d) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخورد ها ۸۱
- شکل ۵.۶. نتایج شبیه سازی های پایان نامه حاضر برای زلزله ی نورث ریچ: (a) جابجایی طبقه اول سازه، (b) جابجایی طبقه دوم سازه، (c) جابجایی نسبی جرم VINES و جرم طبقه ی دوم و (d) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخورد ها ۸۱
- شکل ۶.۱. (a) قاب n طبقه ی خطی با میرایی لزج و جاذب انرژی ارتعاشی - ضربه ای (VINES) متصل به طبقه ی آخر آن، (b) مدل مکانیکی سیستم ۸۴
- شکل ۶.۲. شتاب نگاشت های زلزله های مورد استفاده برای تحلیل دینامیکی سازه ها: (a) زلزله ی کوبه، (b) زلزله ی طبس، (c) زلزله ی نورث ریچ ۸۸
- جدول ۶.۱. زمان تناوب، فرکانس و جرم موثر مودی مودهای سازه ی خطی اصلی ۸۹
- جدول ۶.۲. مقیاس های شدت و شاخص های ارزیابی نگاشت های لرزه ای مورد استفاده (دسته ی اول) ۸۹
- جدول ۶.۳. دیگر مقیاس های شدت رکوردهای لرزه ای مورد استفاده ۸۹
- شکل ۶.۳. طیف دامنه ی فوریه برای سه زلزله ی کوبه، نورث ریچ و طبس ۹۰
- شکل ۶.۴. تابع چگالی طیفی توان برای سه زلزله ی کوبه، نورث ریچ و طبس ۹۰
- شکل ۶.۵. (a) طیف پاسخ جابجایی برای زلزله های کوبه، نورث ریچ و طبس؛ (b) طیف پاسخ شبه سرعت برای زلزله های کوبه، نورث ریچ و طبس؛ (c) طیف پاسخ شبه شتاب برای زلزله های کوبه، نورث ریچ و طبس ۹۱
- شکل ۶.۶. طیف پاسخ انرژی برای زلزله های کوبه، نورث ریچ و طبس ۹۲
- جدول ۶.۴. مقادیر بهینه ی نسبت سختی و فضای آزاد حرکت برای سازه ی چهار درجه آزادی ۹۴
- شکل ۶.۷. نمودار همگرایی بهینه یابی پارامترهای VINES برای سازه ی چهار درجه آزادی با نسبت جرم ۵ درصد تحت تحریک لرزه ای طبس ۹۵
- شکل ۶.۸. سازه ی چهار درجه آزادی، زلزله ی طبس - نسبت جرم ۰/۰۵ - فضای آزاد حرکت ۰/۲۳۸۵ - نسبت سختی ۰/۰۰۵۴ : (a) جابجایی طبقه سوم، (b) جابجایی طبقه چهارم، (c) جابجایی نسبی NES و طبقه چهارم و (d) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخوردها ۹۶

- شکل ۹.۶. سازه‌ی چهار درجه آزادی، زلزله‌ی کوبه- نسبت جرم ۰/۰۷۵- فضای آزاد حرکت ۰/۶۱۸ - نسبت سختی ۰/۰۲۶۴:
- (a) جابجایی طبقه سوم، (b) جابجایی طبقه چهارم، (c) جابجایی نسبی NES و طبقه چهارم و (d) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخورد ها ۹۶
- شکل ۱۰.۶. سازه چهار درجه آزادی، زلزله نورث‌ریج- نسبت جرم ۰/۰۵- فضای آزاد حرکت ۰/۵۶۰۹- نسبت سختی ۰/۰۰۵۲:
- (a) جابجایی طبقه سوم، (b) جابجایی طبقه چهارم، (c) جابجایی نسبی NES و طبقه چهارم و (d) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخورد ها ۹۷
- جدول ۵.۶. معیارهای ارزیابی سازه‌ی چهار درجه آزادی، بهینه‌ی یابی برای یک زلزله و اعمال همان زلزله به سازه ۹۷
- جدول ۶.۶. معیارهای ارزیابی سازه‌ی چهار درجه آزادی، بهینه‌ی یابی برای زلزله‌ی نورث‌ریج با نسبت جرم ۰/۰۵ و اعمال سه زلزله برای همان بهینه‌ی یابی ۹۷
- جدول ۷.۶. معیارهای ارزیابی سازه‌ی چهار درجه آزادی، بهینه‌ی یابی برای زلزله‌ی کوبه با نسبت جرم ۰/۰۵ و اعمال سه زلزله برای همان بهینه‌ی یابی ۹۸
- جدول ۸.۶. معیارهای ارزیابی سازه‌ی چهار درجه آزادی، بهینه‌ی یابی برای زلزله‌ی طبس با نسبت جرم ۰/۰۵ و اعمال سه زلزله برای همان بهینه‌ی یابی ۹۸
- شکل ۱۱.۶. سازه‌ی چهار درجه آزادی، پاسخ سازه با سیستم کنترلی بهینه‌ی شده با زلزله‌ی نورث‌ریج (نسبت جرم ۵ درصد): (a) جابجایی طبقه چهارم، تحریک کوبه، (b) جابجایی طبقه سوم، تحریک کوبه، (c) جابجایی طبقه چهارم، تحریک طبس، (d) جابجایی طبقه سوم، تحریک طبس ۹۸
- شکل ۱۲.۶. سازه چهار درجه آزادی، پاسخ سازه با سیستم کنترلی بهینه‌ی شده با زلزله کوبه (نسبت جرم ۵ درصد): (a,b) به ترتیب جابجایی طبقه چهارم و سوم در برابر تحریک نورث‌ریج، (c,d) به ترتیب جابجایی طبقه چهارم و سوم در برابر تحریک طبس .. ۹۹
- شکل ۱۳.۶. سازه‌ی چهار درجه آزادی، پاسخ سازه با سیستم کنترلی بهینه‌ی شده با زلزله‌ی طبس (نسبت جرم ۷/۵ درصد): (a,b) به ترتیب جابجایی طبقه چهارم و سوم در برابر تحریک نورث‌ریج، (c,d) به ترتیب جابجایی طبقه چهارم و سوم در برابر تحریک کوبه ۹۹
- جدول ۹.۶. مقادیر بهینه‌ی نسبت سختی و فضای آزاد حرکت برای سازه‌ی هفت و ده درجه آزادی ۱۰۰
- جدول ۱۰.۶. معیارهای ارزیابی سازه‌ی هفت درجه آزادی، بهینه‌ی یابی برای زلزله‌ی نورث‌ریج با نسبت جرم ۰/۰۵ و اعمال سه زلزله برای همان بهینه‌ی یابی ۱۰۰
- جدول ۱۱.۶. معیارهای ارزیابی سازه‌ی ده درجه آزادی، بهینه‌ی یابی برای یک زلزله و اعمال همان زلزله به سازه ۱۰۰
- جدول ۱۲.۶. معیارهای ارزیابی سازه‌ی ده درجه آزادی، بهینه‌ی یابی برای زلزله‌ی نورث‌ریج با نسبت جرم ۰/۰۵ و اعمال سه زلزله برای همان بهینه‌ی یابی ۱۰۱
- جدول ۱۳.۶. معیارهای ارزیابی سازه‌ی ده درجه آزادی، بهینه‌ی یابی برای زلزله‌ی کوبه با نسبت جرم ۰/۰۵ و اعمال سه زلزله برای همان بهینه‌ی یابی ۱۰۱
- جدول ۱۴.۶. معیارهای ارزیابی سازه‌ی ده درجه آزادی، بهینه‌ی یابی برای زلزله‌ی طبس با نسبت جرم ۰/۰۵ و اعمال سه زلزله برای همان بهینه‌ی یابی ۱۰۱

- شکل ۱۴.۶. سازه‌ی هفت درجه آزادی، زلزله‌ی نورث‌ریج- نسبت جرم ۰/۰۵ - فضای آزاد حرکت ۰/۵۰۴۴- نسبت سختی ۰/۰۰۵ (a) جابجایی طبقه ششم، (b) جابجایی طبقه هفتم، (c) جابجایی نسبی NES و طبقه هفتم و (d) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخوردها ۱۰۲
- شکل ۱۵.۶. سازه‌ی هفت درجه آزادی، پاسخ سازه با سیستم کنترلی بهینه شده با زلزله‌ی نورث‌ریج: (a) جابجایی طبقه ششم، تحریک کوبه، (b) جابجایی طبقه هفتم، تحریک کوبه، (c) جابجایی طبقه ششم، تحریک طبس، (d) جابجایی طبقه هفتم، تحریک طبس ۱۰۲
- شکل ۱۶.۶. سازه‌ی ده درجه آزادی، زلزله‌ی طبس- نسبت جرم ۰/۰۳۵ - فضای آزاد حرکت ۰/۸- نسبت سختی ۰/۰۰۵۵ (a) جابجایی طبقه نهم، (b) جابجایی طبقه دهم، (c) جابجایی نسبی NES و طبقه دهم و (d) نسبت انرژی اتلافی متناظر با برخوردها ۱۰۳
- شکل ۱۷.۶. سازه‌ی ده درجه آزادی، پاسخ سازه با سیستم کنترلی بهینه شده با زلزله‌ی نورث‌ریج (نسبت جرم ۵ درصد): (a,b) به ترتیب جابجایی طبقه دهم و نهم در برابر تحریک کوبه، (c,d) به ترتیب جابجایی طبقه دهم و نهم در برابر تحریک طبس ۱۰۳
- شکل ۱۸.۶. سازه‌ی ده درجه آزادی، پاسخ سازه با سیستم کنترلی بهینه شده با زلزله‌ی کوبه (نسبت جرم ۵ درصد): (a,b) به ترتیب جابجایی طبقه دهم و نهم در برابر تحریک نورث‌ریج، (c,d) به ترتیب جابجایی طبقه دهم و نهم در برابر تحریک طبس ۱۰۴
- شکل ۱۹.۶. سازه‌ی ده درجه آزادی، پاسخ سازه با سیستم کنترلی بهینه شده با زلزله‌ی طبس (نسبت جرم ۳/۵ درصد): (a,b) به ترتیب جابجایی طبقه دهم و نهم در برابر تحریک نورث‌ریج، (c,d) به ترتیب جابجایی طبقه دهم و نهم در برابر تحریک کوبه ۱۰۴
- شکل ۲۰.۶. طیف فوریه‌ی پاسخ قاب چهار درجه آزادی با جاذب انرژی بهینه شده برای زلزله‌ی کوبه به زلزله‌ی کوبه، نسبت جرم ۵ درصد: (a) $u_4(t) - u_3(t)$ (b) $u_4(t) - u_3(t)$ (c) $u_3(t) - u_2(t)$ (d) $u_3(t) - u_2(t)$ ۱۱۰
- شکل ۲۱.۶. طیف فوریه‌ی پاسخ قاب چهار درجه آزادی با جاذب انرژی بهینه شده برای زلزله‌ی کوبه به زلزله‌ی طبس، نسبت جرم ۵ درصد: (a) $u_4(t) - u_3(t)$ (b) $u_4(t) - u_3(t)$ (c) $u_4(t) - u_3(t)$ (d) $u_3(t) - u_2(t)$ ۱۱۰
- شکل ۲۲.۶. طیف فوریه‌ی پاسخ قاب چهار درجه آزادی با جاذب انرژی بهینه شده برای زلزله‌ی طبس به زلزله‌ی طبس، نسبت جرم ۵ درصد: (a) $u_4(t) - u_3(t)$ (b) $u_4(t) - u_3(t)$ (c) $u_4(t) - u_3(t)$ (d) $u_3(t) - u_2(t)$ ۱۱۱
- شکل ۲۳.۶. طیف فوریه‌ی پاسخ قاب هفت درجه آزادی با جاذب انرژی بهینه شده برای زلزله‌ی نورث‌ریج به زلزله‌ی کوبه، نسبت جرم ۵ درصد: (a) $u_7(t) - u_6(t)$ (b) $u_7(t) - u_6(t)$ (c) $u_7(t) - u_6(t)$ (d) $u_6(t) - u_5(t)$ ۱۱۱
- شکل ۲۴.۶. طیف فوریه‌ی پاسخ قاب ده درجه آزادی با جاذب انرژی بهینه شده برای زلزله‌ی طبس به زلزله‌ی کوبه، نسبت جرم ۳/۵ درصد: (a) $u_{10}(t) - u_9(t)$ (b) $u_{10}(t) - u_9(t)$ (c) $u_{10}(t) - u_9(t)$ (d) $u_9(t) - u_8(t)$ ۱۱۲
- شکل ۲۵.۶. طیف فوریه‌ی پاسخ قاب ده درجه آزادی با جاذب انرژی بهینه شده برای زلزله‌ی طبس به زلزله‌ی طبس، نسبت جرم ۵ درصد: (a) $u_{10}(t) - u_9(t)$ (b) $u_{10}(t) - u_9(t)$ (c) $u_{10}(t) - u_9(t)$ (d) $u_9(t) - u_8(t)$ ۱۱۲
- شکل ۲۶.۶. طیف فوریه‌ی پاسخ قاب ده درجه آزادی با جاذب انرژی بهینه شده برای زلزله‌ی نورث‌ریج به زلزله‌ی کوبه، نسبت جرم ۵ درصد: (a) $u_{10}(t) - u_9(t)$ (b) $u_{10}(t) - u_9(t)$ (c) $u_{10}(t) - u_9(t)$ (d) $u_9(t) - u_8(t)$ ۱۱۳

فصل اول

کنترل ارتعاشات سازه‌ها

۱.۱. مقدمه

ارتعاشات ناخواسته در طول تاریخ باعث ایجاد اختلال، خسارت و ویرانی شده است. یکی از شدیدترین انواع ارتعاشات، ارتعاش تولید شده توسط زلزله است که مخربترین نوع ارتعاش است و باعث خسارات و تلفات زیادی شده است. خودروها و هواپیماها همیشه در معرض ارتعاشات بوده‌اند. موتورهای رفت و برگشتی آن‌ها، گذشته از اینکه تا چه میزان خوب طراحی و تراز شده‌اند، مولد ارتعاشات هستند. بدون تدابیر ضد ارتعاش مناسب، موتور یک هواپیمای سبک می‌تواند ارتعاش و تنش نوسانی کافی در سازه که منجر به گسیختگی فاجعه آفرین ناشی از خستگی شود، تولید کند. به وسیله‌ی جداسازی ارتعاش این مشکل قابل حل است. معرفی اولین موتورهای جت در دهه‌ی ۱۹۴۰ این مشکل را برطرف کرد. اما شکل دیگری از خستگی سازه‌ای بروز کرد - خستگی صوتی^۱. این خستگی ناشی از ارتعاش تولید شده توسط طنین شدید جت که بر سطح سازه‌ای خارجی برخورد می‌کرد، بود. این مشکل به سرعت به مشکلی حتی بزرگ‌تر برای سازه‌های موشک‌های پرتاب کننده‌ی ماهواره تبدیل شد.

هر ماشینی که دوران می‌کند یا حرکت رفت و برگشتی دارد منبعی از ارتعاش است. یک کشتی تعداد زیادی از این ماشین‌ها دارد که شامل موتورهای اصلی جلو برنده، دستگاه‌های تراکم و تهویه‌ی هوا، دستگاه‌های مولد دیزلی و پمپ‌های آب می‌شوند. ارتعاش تولید شده توسط این ماشین‌ها می‌تواند محیط پرخطری از لحاظ صوتی در اتاق‌های موتور ایجاد کند. پروانه‌های کشتی به خودی خود فشارهای هیدرودینامیکی متناوب تولید می‌کنند که با اصابت بر بدنه‌ی کشتی باعث ارتعاش آن می‌شوند.

در هلی‌کوپترها تولید نیروی بالا برنده‌ی کل به وسیله‌ی چرخنده که تقریباً ثابت است، از طریق تغییر چرخه‌ای برخورد تیغه به هنگام دوران آن، صورت می‌گیرد. نیروی اعمال شده از یک تیغه به نوک چرخنده به طور اجتناب ناپذیری نوسان دارد و از انتهای چرخنده هم به سازه‌ی اتاقک و هم به اجزای مکانیکی کنترل چرخنده منتقل می‌شود. ساختمان بزرگی که با تحریک زلزله مرتعش می‌شود یا نفت کش غول پیکری که به وسیله‌ی موتورهایش تحریک می‌گردد از بزرگ‌ترین سازه‌هایی هستند که تحت ارتعاش قرار می‌گیرند. گوناگونی اندازه‌ی سیستم‌های مرتعش به معنی گوناگونی در بازه‌ی فرکانس ارتعاشات اصلی است. برای بسیاری از این سیستم‌ها فرکانس ارتعاشات در بازه‌ی قابل درک یعنی تقریباً ۱-۲۰ Hz قرار دارند [۱].

۱.۲. روش‌های کنترل ارتعاشات

^۱ Sonic or Acoustic Fatigue

هنگامی که باید یک ارتعاش غیر قابل قبول را کنترل کرد، لازم است ماهیتش به طور کامل شناخته شود. این شناخت شامل درک منبع تولید آن، ماهیت و جهت ارتعاش در محل وقوع، مسیری که انرژی ارتعاشی با طی آن به محل مورد نظر می‌رسد و محتوای فرکانسی ارتعاش می‌شود. ماهیت ارتعاش می‌تواند خمشی، پیچشی یا طولی باشد. موج می‌تواند به صورت هارمونیک، تصادفی، متناوب یا گذرا باشد.

پس از شناخت ماهیت ارتعاش، باید در مورد اینکه بهترین نوع سیستم کنترل قابل استفاده سیستم کنترل غیر فعال، فعال یا نیمه فعال است تصمیم گرفته شود. کنترل غیر فعال شامل اصلاح سختی، جرم و میرایی سیستم ارتعاشی می‌شود تا پاسخ سیستم به محیط مرتعش کننده‌ی آن کمتر شود. این اصلاح می‌تواند به شکل تغییرات پایه‌ی سازه‌ای یا افزودن اعضای غیر فعال مانند جرم (که می‌تواند یک قطعه‌ی بتنی باشد)، فنر (مانند جداسازهای ارتعاشی)، میراگرهای مایع یا لاستیک‌های میراگر باشد. این اعضا به سادگی به طور غیر فعال در برابر شتاب، تغییر شکل یا سرعتی که به وسیله‌ی ارتعاش بر آن‌ها تحمیل می‌شود واکنش نشان می‌دهند. همچنین این اجزاء نیاز به نیروی بیرونی ندارند.

سیستم‌های کنترل فعال نیاز به نیروی بیرونی دارند. آن‌ها اساساً به یک منبع انرژی برای بکار انداختن وسایل فعال وابسته هستند که این وسایل فعال می‌توانند فعال کننده‌های الکترومکانیکی، الکترو هیدرولیکی یا الکترو پنوماتیکی باشند. این وسایل بر روی سازه عمل می‌کنند و به طور مؤثری ارتعاشی تولید می‌کنند که ارتعاش تولید شده به وسیله‌ی نیروهای محرک اولیه را حذف یا تقریباً از بین می‌برد. سیستم‌های کنترل فعال به حسگرهای روی سازه که ارتعاش را تشخیص می‌دهند، به رایانه‌ها یا سیستم‌های الکترونیکی که سیگنال‌ها را پردازش می‌کنند و به تقویت کننده‌های انرژی که سیگنال‌های پردازش شده را دریافت و فعال کننده‌ها را برای کاهش ارتعاش کل به کار می‌اندازند (نه اینکه آن‌را تصادفی افزایش دهند)، وابسته هستند. روش‌های کنترل فعال لزوماً پرهزینه‌تر از روش‌های غیر فعال هستند، اما بعضی مسائل ارتعاشی به قدری شدیدند که تنها کنترل فعال می‌تواند آن‌ها را چاره کند. سیستم فعال باید به طور مناسبی نگهداری و تعمیر شود که هزینه‌های قابل توجهی در بر دارد. یک مشکل دیگر سیستم‌های فعال این است که ممکن است با پیش بینی اشتباه و اعمال نیرو باعث ناپایداری و خرابی سازه شوند.

کاربرد سیستم‌های کنترل فعال در سازه‌های عمرانی با محدودیت‌ها و چالش‌هایی روبرو است و عمومیت ندارد.

این چالش‌ها شامل این موارد می‌شوند:

۱- هزینه‌ی بالای تجهیزات، نصب و نگهداری

۲- نیاز به نیروی بیرونی

۳- وجود خطر ناپایداری سازه

۴- پذیرش در جامعه مهندسی به عنوان یک فن آوری مدرن در کنترل ارتعاش

راهبردهای کنترل نیمه فعال تا حد زیادی در رفع چالش‌های این فناوری امید بخش هستند. این راهبردها قابلیت اطمینان وسایل غیر فعال را ارائه می‌دهند و در عین حال انعطاف پذیری و قابلیت تطبیق سیستم‌های کاملاً فعال را بدون نیاز به منابع انرژی بزرگ حفظ کرده‌اند و می‌توانند با توان باتری عمل کنند. مطالعات نشان داده‌اند که سیستم‌های میراگر

نیمه فعالی که به طور مناسب اجرا شده‌اند در بعضی از موارد عملکرد به نسبت بهتری از سیستم‌های غیر فعال دارند. بنابراین این امکان را به وجود می‌آورند که به طور مؤثری پاسخ سازه‌ای در برابر آرایه‌ی وسیعی از شرایط بارگذاری دینامیکی کاهش یابد.

۱.۲.۱. سیستم‌های کنترل غیر فعال

به طور کلی چهار روش مختلف در کنترل غیر فعال وجود دارد:

- کنترل ارتعاش به وسیله‌ی طراحی سازه‌ای
- کنترل ارتعاش به وسیله‌ی وسایل اضافی موضعی
- کنترل ارتعاش به وسیله‌ی میرایی اضافی
- کنترل ارتعاش به وسیله‌ی جداسازی ارتجاعی

که به آن‌ها می‌توان روش‌های ترکیبی از دو یا سه روش را اضافه کرد.

باید تأکید شود که پارامترهای پاسخ مختلف به ویژگی‌های اصلی سازه‌ای یعنی جرم، سختی و میرایی وابسته هستند. منظور از «پارامترهای پاسخ» مقادیر موضعی شتاب، تغییر شکل، تنش و ... ناشی از ارتعاش می‌باشد که مشکل اصلی را در محل وقوع ارتعاش ایجاد می‌کنند. این ویژگی تأکید بر این دارد که مسئله باید به طور کامل و به خوبی درک شود و تصور نشود که یک روش کنترل برای هر نوع ارتعاش مناسب است (برای مثال افزایش میرایی یک جزء سازه‌ای در بعضی موارد می‌تواند یک راه حل مفید باشد اما می‌تواند در موارد دیگری بی‌فایده باشد). اگر ارتعاش خمشی تیرها و ورق‌های سازه‌ای را موجب شود، طرح دوباره شامل تغییر ابعاد، ضخامت، جهت‌گیری و فواصل خواهد شد؛ لذا می‌توان فرکانس‌های تشدید را از فرکانس‌های تحریک دور کرد که بسیار سودمند خواهد بود و همچنین می‌توان میزان ارتعاشات را با یک افزایش سختی سازه کاهش داد. همچنین می‌توان با بهبود ساده‌ی جزئیات طراحی از شکست خستگی ناشی از ارتعاش جلوگیری کرد که البته باعث کاهش چشم‌گیر میزان ارتعاش نخواهد شد ولی تمرکز تنش ناشی از خستگی را از بین می‌برد.

اگر کاهش ارتعاش منبع و اصلاح طرح سازه‌ای در کاهش ارتعاش ناکافی باشند، باید به سراغ افزودن وسایل یا مصالح اضافی برویم، که می‌توان آن‌ها را در طبقه بندی «وسایل اضافی موضعی»، «سیستم‌های میراگر» و «سیستم‌های جداسازی» قرار داد. «وسایل موضعی اضافی» می‌توانند تا حد یک جرم متمرکز که فرکانس تشدید سیستم اصلی را تغییر می‌دهد ساده باشند، یا می‌توانند به شکل یک خنثی‌کننده‌ی ارتعاش باشند (که معمولاً به عنوان جاذب/ارتعاش‌شناخته می‌شوند). مورد ذکر شده‌ی اخیر به طور مؤثری نیروی تحریک‌کننده‌ی اعمالی بر سازه را در بازه‌ی فرکانسی باریکی خنثی می‌کند. جاذب ارتعاش یک سیستم کمکی غیر فعال است که تنها متشکل از ترکیبی از جرم، فنر (معمولاً انعطاف پذیر) و میراگر می‌باشد. ساده‌ترین خنثی‌کننده از این سه مورد یکی را دارد و مقادیر نسبی آن‌ها طوری انتخاب می‌شوند که ارتعاش سیستم اصلی در یک بازه‌ی فرکانس معین به حداقل برسد. خنثی‌کننده‌های بسیار کوچک در صورت مکان

یابی دقیق می توانند تأثیر بزرگی بر سیستم اصلی بگذارند. اما اگر محل استقرار آن‌ها مناسب نباشد تقریباً بی فایده خواهند بود که این مطلب برای هر نوع وسیله‌ی موضعی اضافی صادق است.

اگر ارتعاش نامطلوب در اثر تشدید یک یا چند مود سازه باشد اغلب با افزایش میرایی سیستم قابل کنترل خواهد بود. هر سازه یا ماشینی دارای یک میرایی اولیه است. اگر بخواهیم سیستم میراگر مؤثر باشد، میرایی اضافی ناشی از آن باید به طور قابل توجهی از میرایی اولیه بزرگ‌تر باشد؛ لذا قبل از هر گونه تلاشی برای کنترل ارتعاش به وسیله‌ی افزایش میرایی، باید میزان میرایی اولیه و میزان افزایش میرایی محتمل ناشی از سیستم میراگر اضافی مشخص شود. منابع میرایی اولیه زیاد و متنوعند، بعضی کوچک و بعضی بزرگند و همه‌ی آن‌ها در هر سیستم ارتعاشی وجود ندارد.

معمول‌ترین روش افزایش میرایی به کارگیری مصالح پلیمری میراگر در محل‌های خاص درون سازه است. سازه و پلیمر باید به گونه‌ای اندرکنش کنند که پلیمر تا جایی که ممکن است انرژی را تلف کند. این عمل کل ارتعاش را میرا می‌کند.

۱.۲.۱. ۱. میراگر خطی لزج (Viscous)

مزیت این میراگرها در این است که معادله‌ی حرکت آن‌ها خطی است و به طور تحلیلی قابل حل است. مزیت اصلی میراگرهای لزج بیرونی آن است که موجب افزایش میرایی مصالح سازه می‌شوند. در عمل برای تولید وسایل میرایی با ویژگی‌های لزج تقریباً خطی، میراگرها بر مبنای مایعات ساخته می‌شوند. طراحی میراگرهای لزج (اشکال ۱.۱ و ۲.۱) برای افزایش میرایی لزج کل در سازه‌ها شامل این مراحل هستند و ممکن است نیاز به تکرار برای برآوردن الزامات باشد:

- ۱- تعیین ویژگی‌های سازه‌ای و تحلیل آن
 - ۲- تعیین نسبت میرایی مطلوب
 - ۳- استقرار مکانی وسایل میرایی
 - ۴- طراحی میراگر مایع لزج
 - ۵- تخمین نسبت میرایی سازه‌ای
 - ۶- تحلیل کلی رفتار سازه‌ای با نسبت میرایی اضافه شده.
- میراگرهای مایع لزج با موفقیت برای کنترل سازه در زمینه‌های:

- صنایع خودروسازی
- طراحی پل، شالوده‌ی سازه‌ها
- ساختمان‌های بلند در کاهش ارتعاش باد و زلزله

بکار رفته‌اند [۲].

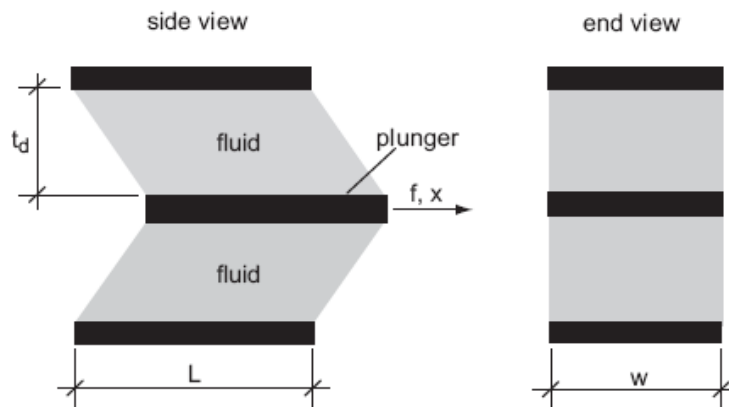
۱.۲.۱. ۲. میراگر لزج غیر خطی

مشکل اصلی این میراگرها آن است که ممکن است در سرعت‌های ارتعاشی کوچک سازه را کاملاً گیر دار کنند که ناشی از نیروی میرایی نسبتاً بزرگ آن است. *مارتینز و رومرو* یک شاخص نیرو برای تعیین لزجت بهینه‌ی میراگرهای لزج غیر خطی بر مبنای میراگرهای لزج خطی پیشنهاد دادند [۲].

۳.۱.۲.۱. میراگر ارتجاعی-لزج (Visco-Elastic)



شکل ۱.۱ میراگر لزج ۴۵۰ کیلو نیوتنی [۳]



شکل ۲.۱ ساز و کار میرایی لزج [۳]

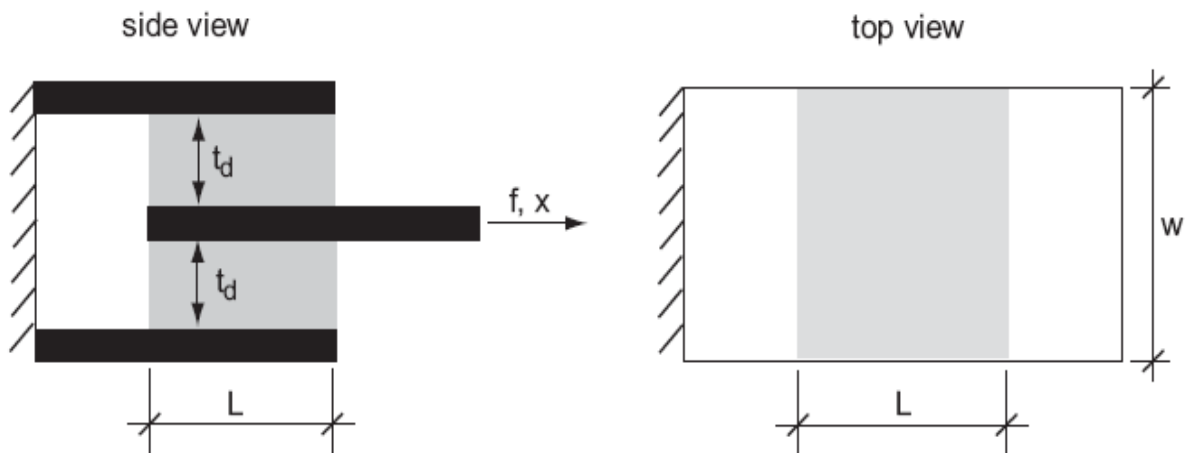
هنگام عملکرد میراگر، انرژی به شکل گرما تلف می‌شود که موجب افزایش دما در مصالح ارتجاعی لزج خواهد شد. *بگلی و تورویک* ویژگی‌های مدول افت برشی^۱ و مدول ذخیره برشی^۲ وابسته به دما و فرکانس را برای اکثر مصالح ارتجاعی لزج بیان کردند [۴]. روندهای گوناگونی در طراحی میراگرها وجود دارد که توسط *سونگ و دارگوش* جمع آوری شده‌اند [۵]. یک طراحی میراگر ارتجاعی لزج با چسباندن ورقه‌های مصالح ارتجاعی لزج به ورقه‌های فولادی در

^۱ Shear loss modulus

^۲ Shear storage modulus

شکل ۳.۱ نشان داده شده است. اغلب میراگرهای مصالح اساساً رفتار ارتجاعی لزج دارند. کاربرد میراگرهای ارتجاعی لزج اغلب در موارد زیر است:

- کنترل و کاهش ارتعاش ماشین‌های حساس (به طور مثال صنایع هسته‌ای و فناوری هوافضا)
- سیستم‌های جداسازی پایه، همچنین شالوده‌ی سازه‌ها [۶]
- میرایی ارتعاشات در ساختمان‌های بلندمرتبه و
- میرایی عرشه‌ی پل و ارتعاشات کابل (تکیه‌گاه‌های الاستومری)



شکل ۳.۱ نمونه‌ای از میراگر ارتجاعی لزج [۳]

۱.۲.۱. ۴. میراگر اصطکاکی کولمب

در میراگرهای اصطکاکی، اتلاف انرژی به وسیله‌ی کار نیروی مماسی مورد نیاز برای لغزش یک جسم جامد بر دیگری انجام می‌شود. سطوح تماس باید در حین عمل خشک بمانند. نیروی اصطکاکی کولمب همواره بر خلاف جهت حرکت عمل می‌کند و لذا دارای رفتار اتلافی مانند هر نیروی میرایی است. در عمل میزان این نیروی انتخاب می‌شود که موجب قفل شدن سازه‌ی اصلی در اثر نیروی ثابت میراگر نشود.

انواع وسایل میراگر اصطکاکی: اتصالات پیچی با لغزش محدود، میراگر اصطکاکی مهار بند X ، قید اتلافی انرژی.

۱.۲.۱. ۵. میراگر اصطکاکی سازه‌ای^۱

^۱ Structural Friction Damper

میرایی سازه‌ای استفاده از اصطکاک درونی در یک ماده برای تبدیل انرژی ارتعاش سازه‌ای به گرمای تولید شده در مصالح میراگر است. میراگرهای اصطکاک سازه‌ای اغلب به عنوان وسایل کاهش ارتعاشی مستقیماً داخل ستون‌ها و دکل‌های پل برای اتلاف انرژی ارتعاش بکار می‌روند.

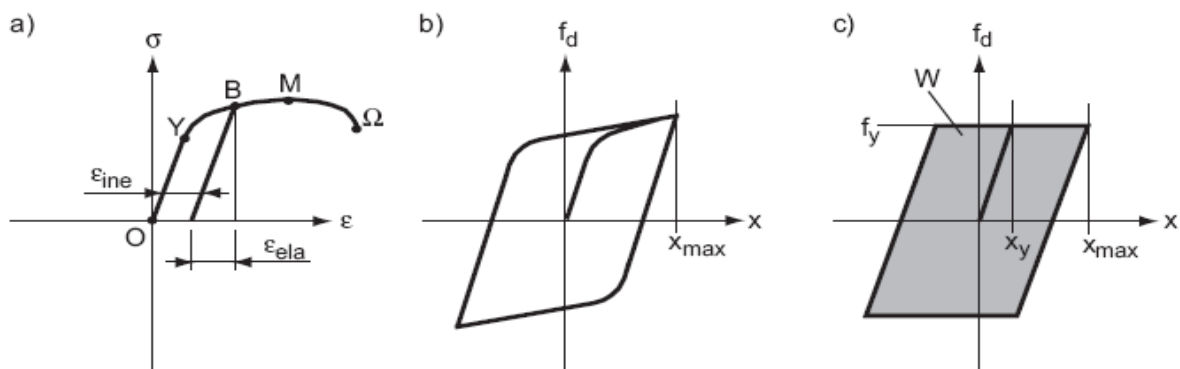
این میراگرها به ویژه در:

- سیستم‌های جداسازی پایه
- میرایی برج‌های ناقوس
- جعبه دنده‌ها به عنوان مصالح میراکننده
- اجزا یا نیم رخ‌های توخالی به عنوان مصالح میراگر و
- کاربردهای خودروسازی

بکار می‌روند.

۱.۲.۱.۶. میراگر هیستریزیس

توانایی تغییر شکل غیر ارتجاعی در مواد فلزی سازوکاری مؤثر در اتلاف انرژی برای میرایی سازه‌های مهندسی ارائه می‌دهد. منحنی تنش - کرنش نشان داده شده در شکل ۱.۴.۱ a برای اغلب فلزات صحت دارد. شکل منحنی نیرو - جابجایی بستگی به رابطه‌ی تنش - کرنش ماده و طراحی وسیله دارد (شکل ۱.۴.۱ b). برای حالت رفتار مصالح ارتجاعی - خمیری ایده آل، رابطه‌ی نیروی میرایی و جابجایی به صورتی است که در شکل ۱.۴.۱ c نشان داده شده است. ایده‌ی بکارگیری میراگرهای هیستریزیس فلزی مجزا برای بهبود مقاومت سازه در برابر زلزله برای نخستین بار توسط کار مفهومی کلی و اسکینر و همکاران فرمول نویسی شد ([۷] و [۸]). در سال‌های اخیر طراحی‌های متعددی از میراگرهای فلزی ایجاد شده‌اند. یک نمونه از آن‌ها در شکل ۱.۵ نشان داده شده است. یک ورق میراگر به شکل X از طریق آزمایش‌های انجام شده توسط ویت تیکر و همکاران و برگمن و گوئل مورد مطالعه قرار گرفت و متعاقب آن در پروژه‌های بهسازی لرزه‌ای مورد بحث توسط مارتینز-رومرو و پری بکار گرفته شد ([۹] و [۱۰]).

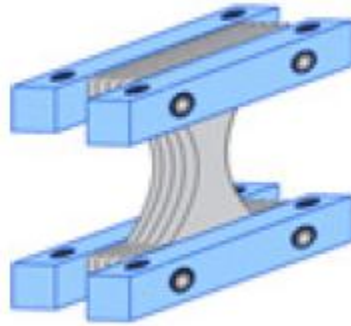


شکل ۱.۴. میرایی هیستریزیس: (a) رابطه‌ی تنش کرنش، (b) رفتار واقعی میراگر هیستریزیس، (c) رفتار ایده آل شده‌ی میراگر

میراگرهای هیستریزیس با موفقیت در کنترل سازه‌ها در زمینه‌های:

- طراحی سیستم‌های اتلاف انرژی غیر فعال لرزه‌ای
- سیستم جداسازی پایه و شالوده‌ی سازه‌ها

بکار رفته‌اند.



شکل ۵.۱. میراگر ورق X [۳]

۱.۲.۱. میراگر غیر فعال با جرم تنظیم شده (متوازن)^۱

میراگر غیر فعال با جرم تنظیم شده (TMD) یا جاذب ارتعاش تنظیم شده اساساً یک وسیله‌ی اتلاف انرژی است که در ساده‌ترین شکلش از یک جرم متصل به سازه (سیستم اولیه) با اعضای فنر و میراگر تشکیل شده است (شکل ۱.۶). اتلاف انرژی با انتقال انرژی از سیستم اولیه به TMD تا حد ممکن، به وسیله‌ی تنظیم دقیق فرکانس طبیعی و نسبت میرایی TMD بدست می‌آید. از آنجایی که جرم TMD به طور قابل توجهی از سازه‌ی اولیه کمتر است، انتقال انرژی از سیستم اولیه به TMD موجب نوسانات نسبی شدیدی در جرم TMD می‌شود. مفهوم TMD بدون وسیله‌ی میرایی یکپارچه توسط فیراهم در سال ۱۹۰۹ ابداع شد. تئوری اولیه‌ی TMD با وسیله‌ی میرایی یکپارچه در سال‌های بعد توسط اورموندروید و دن‌هارتوگ ارائه شد. تحلیل جزئیات پارامترهای بهینه‌ی TMD توسط دن‌هارتوگ ارائه شده است [۱۱]. در شکل ۱.۷.۱ یک سازه‌ی یک درجه آزادی دارای TMD نشان داده شده است.

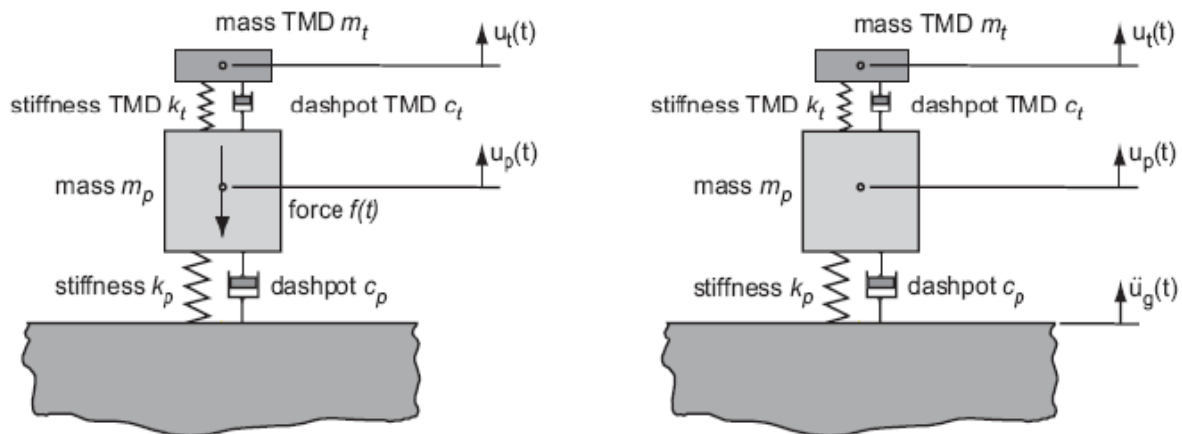
در کاربردهای عملی سیستم اولیه میرایی سازه‌ای غیر صفر دارد و لذا تلاش‌های زیادی برای یافتن راه حل‌های شکل بسته و دقیق پارامترهای بهینه انجام شده است. متأسفانه تا امروز راه حل‌های جبری دقیقی برای این مسئله شناخته نشده است.

^۱ passive Tuned Mass Damper



شکل ۶.۱ اجرای معمول یک TMD برای کاهش ارتعاش عمودی پل ها [۳]

اولین گام در طراحی TMD تصمیم گیری در مورد انتخاب معیار بهینه سازی آن است. برای سازه هایی که به وسیله ی بارهایی تحریک می شوند که عمدتاً مؤلفه های زمانی متناوب دارند (مثل بارهای تولید شده از فعالیت های انسان: راه رفتن، دویدن، پریدن و ... و ماشین ها)، بهینه سازی با معیار H_{∞} توصیه می شود. در مورد بارهایی که عمدتاً ویژگی تصادفی پهن باند دارند (مثل بارهای باد و زلزله) بهینه سازی با معیار H_2 مناسب تر است. دومین گام طراحی تعیین مود ارتعاشی سازه است که باید میرا شود و سومین گام هم انتخاب جرم TMD است.



شکل ۷.۱ مدل یک سازه ی یک درجه آزادی دارای TMD. سمت چپ: نیروی تحریک $f(t)$ اعمالی بر روی جرم سازه ی اصلی. سمت راست: تحریک به وسیله ی شتاب پایه $\ddot{u}_g(t)$ [۳]

TMD ها با موفقیت برای کنترل پاسخ ارتعاشی این موارد نصب شده اند:

- پل‌های عابر پیاده، پله‌ها و جایگاه تماشاگران که با راه رفتن یا پریدن اشخاص تحریک می‌شوند.
- کف‌های سبک در کارخانه‌ها که در یکی از فرکانس‌های طبیعی‌شان به وسیله‌ی ماشین‌ها تحریک می‌شوند.
- سازه‌های بلند بدون سازه‌ی پشتیبان (پل‌ها، دکل پل‌ها، دودکش‌ها، برج‌ها) که با بارهای باد تحریک می‌شوند.

۱.۲.۱. ۸.۱. میراگر مایع تنظیم شده (متوازن)^۱

اصل اساسی یک میراگر مایع تنظیم شده (TLD) شبیه به میراگر با جرم تنظیم شده (TMD) می‌باشد. به طور خاص، یک جرم ثانویه متحرک که با جرم مایع تعریف می‌شود به سیستم سازه‌ای اصلی اضافه می‌شود. اینرسی به صورت نیروی بازگرداننده عمل می‌کند و اتلاف انرژی از طریق عملکرد لزج عمدتاً در لایه‌های مرزی مایع بدست می‌آید. TLD از یک محفظه‌ی مستطیلی یا دایره‌ای که محتوی آب است تشکیل می‌شود (شکل ۱.۸). حرکت افقی محفظه موجب حرکت رفت و برگشتی سطح آزاد مایع می‌شود. یک نوع از TLD ها میراگر ستونی مایع متوازن^۲ است (TLCD) که از یک محفظه‌ی U شکل که تا حدی با مایع پر شده تشکیل شده است (شکل ۱.۹).

جاذب‌های ارتعاشی دینامیکی پیشنهاد شده توسط فراهم برای کشتی‌ها در حقیقت پایه و اساس میراگر ستون مایع متوازن مدرن می‌باشد. برای کاربردهای مهندسی عمران، تحقیقات اولیه در اواسط دهه‌ی ۸۰ با کار *بائور* آغاز شد [۱۲]. برخلاف TMD، پاسخ یک TLD در حالت کلی به شدت غیر خطی است. حرکت نوسانی سطح آزاد مایع یا جریان مایع از درون روزنه‌ها^۳ پدیده‌هایی کاملاً غیر خطی هستند؛ لذا پاسخ یک سازه‌ی اولیه با TLD حتی برای سازه‌های اولیه‌ای که در ناحیه‌ی ارتجاعی خطی عمل می‌کنند وابسته به دامنه است.

امیدبخش‌ترین مدل‌های بزرگ مقیاس بر مبنای تعمیم نظریه‌ی کلاسیک امواج گرانشی آب کم عمق با دامنه‌ی محدود قرار دارند. به علت کمبود مدل‌های ساده‌ی منطقی برای تشریح رفتار دینامیکی یک TLD، تا به امروز رویه‌ی طراحی با مقبولیت عام وجود ندارد. به خاطر شباهت نزدیک اصل اساسی عملکردی بین TMD و TLD، همان روشی که برای TMD ها شرح داده شد می‌تواند برای TLD ها هم بکار رود. در واقع شباهت حرکت نوسانی سطح آزاد مایع TLD به میراگر جرم متوازن برای مباحث طراحی با ضربه گیر^۴ و جرم مجازی^۵ وابسته به فرکانس توسط *سان* پیشنهاد شد [۱۳]. اما چون جرم و ضربه گیر مجازی وابسته به دامنه هستند، باید با آزمایش تعیین شوند و لذا ممکن است در اثر جزئیات اجرایی تغییر کند. بنابراین انجام آزمایش برای بهینه سازی رفتار دینامیکی TLD نسبت به سازه‌ی اولیه الزامی است.

به علت رفتار غیر خطی سخت شونده‌ی نوسانات سطح آزاد مایع TLD، تأثیر آن حساسیت کمتری به تنظیم فرکانس صحیح میراگر دارد. مخازن مستطیلی برای سازه‌هایی که دارای فرکانس‌های طبیعی مختلف در دو جهت اصلی هستند

¹ Tuned Liquid Damper

² Tuned Liquid Column Damper

³ Orifice

⁴ Dashpot

⁵ Virtual Mass