

افزودن بهینه المان اینترتر به میراگرهای جرمی تنظیم شده به منظور کنترل لرزه‌ای سازه‌های فولادی به وسیله الگوریتم ازدحام ذرات

امیرحسین خانی^۱، سید مهدی زهرایی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، صندوق پستی، ۴۵۶۳۱۱۱۵۵، mzahrai@ut.ac.ir

چکیده

در سازه‌های فولادی بلندمرتبه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی، تنظیم سختی سازه به منظور کنترل تغییر مکان‌های جانبی، همواره امری چالش برانگیز و کنترل‌کننده طرح است. میراگرهای جرمی متداول ترکیبی از جرم، فنر و کمک‌فنر هستند. این میراگرها بر روی یک محدوده فرکانسی خاص تنظیم می‌شوند؛ زمانی که سازه تحت تحریک خارجی در محدوده فرکانسی مورد نظر قرار گیرد، این میراگرها با ایجاد یک نیرو در خلاف جهت حرکت سازه باعث کاهش پاسخ‌های سازه می‌شوند. مهم‌ترین محدودیت این میراگرها، تأمین نسبت جرمی کافی به منظور کنترل بهینه سازه است. المان اینترتر، یک المان با دو پایانه است که می‌تواند نیرویی متناسب با اختلاف شتاب ایجاد شده در دو پایانه‌اش تولید کند. از ویژگی‌های متمایزکننده این المان نسبت به سایر ابزارهای کنترل سازه، می‌توان به امکان تغییر در ماتریس جرم سازه اشاره کرد. افزودن المان اینترتر به میراگرهای جرمی متداول به صورت قابل توجهی باعث افزایش راندمان این میراگرها شده و محدودیت این میراگرها برای تأمین نسبت جرمی مناسب را به خوبی برطرف می‌کند. به عنوان مثال می‌توان گفت اضافه کردن المان اینترتر با $\beta = 0.2$ به میراگر جرمی تنظیم شده با $\mu = 0.03$ ، راندمان این میراگر را برای سیستم‌های یک درجه آزادی، ۵۷ درصد افزایش می‌دهد. در این پژوهش بهینه‌سازی پارامترهای ترکیب المان اینترتر با میراگرهای جرمی متداول با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات و با قابلیت تعمیم به تمامی سازه‌ها انجام می‌شود.

واژگان کلیدی

سازه‌های فولادی، کنترل غیرفعال سازه‌ها، میراگر جرمی تنظیم شده، المان اینترتر، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

Optimum addition of inerter element to tuned mass dampers for seismic control of steel structures by particle swarm algorithm

A.H. Khani, S.M. Zahrai

Abstract

tuned mass dampers are a combination of mass, spring and dampers. tuned mass dampers are set on a specific frequency range, when the structure is subjected to external force in the desired frequency range, TMD reduce the responses of the structure by creating a force against the movement direction of the structure. The most important limitation of TMD is providing a sufficient mass ratio in order to optimally control the structure. The inerter element is an element with two terminals that can produce a force proportional to the acceleration difference created in its two terminals. One of the distinguishing features of this element compared to other structural control tools is the possibility of changing the mass matrix of the structure. Nowadays, extensive research is being done in order to combine the inerter element with structural control systems. Adding an inerter element to conventional tuned mass dampers significantly increases the efficiency of TMD and removes the limitation of TMD to provide a suitable mass ratio. The placement position of the inerter element in the control system is very important. If the inerter element is placed between two inappropriate levels in the system, it will disrupt the function of absorbing dynamic vibrations and cause the responses to intensify. In this research, the optimization of the parameters of the inerter element combination with tuned mass dampers is done using the particle optimization algorithm and with the ability to generalize to all structures.

Keywords

Steel structures, Passive Control of Structures, Tuned Mass Damper, Inerter, PSO Algorithm

۱- مقدمه

ایمنی سازه‌های عمرانی مانند سازه‌های ساختمانی، صنعتی، حیاتی و تاریخی باید در برابر تمامی مخاطرات طبیعی از جمله تحریک زلزله تضمین شود. با توجه به ایمنی عمومی به‌عنوان یک دغدغه اصلی در طراحی سازه‌ها، سازه‌های عمرانی باید برای سطح خطر مشخصی از زلزله که توسط آیین‌نامه‌ها ارائه شده است، طراحی شوند. معمولاً اکثر سازه‌های عمرانی به‌گونه‌ای طراحی و جزئیات‌بندی می‌شوند که برای زلزله‌ای با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله در سطح عملکرد ایمنی جانی قرار بگیرند.

در رویکرد متداول طراحی سازه‌های عمرانی در برابر تحریک زلزله، مقاومت و شکل‌پذیری سازه به‌منظور رفتار مناسب در برابر تحریک زلزله افزایش می‌یابد. با این حال، تجربیات جامعه مهندسی از زلزله‌های گذشته، نشان داده که استفاده از این رویکرد معایبی مانند کاهش تاب‌آوری سازه‌ها و همچنین افزایش خسارات وارده به سازه‌ها را به دنبال دارد. از این‌رو، رویکرد دیگری در طراحی سازه‌ها در برابر تحریک زلزله، به‌عنوان کنترل سازه‌ها گسترش یافته است.

کنترل سازه‌ها به معنی در نظر گرفتن سازه به‌عنوان یک سیستم دینامیکی و تغییر و تنظیم خصوصیات سازه نظیر سختی، میرایی و جرم به‌نحوی است که اثر دینامیکی نیروهای وارد بر سازه تا سطح قابل‌قبولی کاهش پیدا کند. کنترل سازه‌ها به سه شاخه اصلی غیرفعال، نیمه‌فعال و فعال تقسیم می‌شود.

در یک سیستم کنترل غیرفعال، به منبع خارجی نیرو جهت عملکرد سیستم کنترل نیازی نیست. در این حالت سیستم با استفاده از حرکت سازه، نیروهای کنترل را به وجود می‌آورد. قابل‌ذکر است که استفاده از سیستم‌های کنترل غیرفعال به‌دلیل سادگی نصب و کم‌بودن هزینه‌های اجرا و نگهداری در سازه‌های عمرانی بسیار شایع است.

ایده اضافه‌کردن یک جرم ثانویه به سازه اصلی، به‌منظور کاهش پاسخ‌های سازه اصلی ناشی از تحریک‌های دینامیکی، اولین ایده در طول تاریخ برای کنترل غیرفعال سازه‌ها است. این رویکرد متکی بر طراحی و تنظیم ابزارهای مکانیکی، متصل به جرم ثانویه شامل فنر و کمک‌فنر جهت کاهش پاسخ‌های سازه اصلی است.

فراهم^۱ [۱] ترکیبی از جرم و فنر را به سازه یک درجه آزادی، فاقد میرایی ذاتی و تحت تحریک نیرویی هارمونیک اضافه کرد. نتایج این تحقیقات نشان داد که ترکیب اضافه‌شده، قادر است تغییر مکان سازه اصلی را در محدوده فرکانسی بسیار کوچکی پیرامون فرکانس سازه اصلی به صفر برساند.

اورموندروید^۲ و دون هارتوگ^۳ [۲] به‌منظور افزایش ظرفیت ترکیب ارائه‌شده در بالا برای اتلاف انرژی جنبشی تحت تحریک نیرویی هارمونیک، یک کمک‌فنر با عملکرد موازی با فنر را به ترکیب اضافه کردند.

بعدها دون هارتوگ [۳] یک روش نیمه‌تجربی به‌منظور تنظیم پارامترهای سختی و میرایی در ترکیب ارائه‌شده جهت کمینه‌کردن تغییر مکان جرم اصلی در یک سازه یک درجه آزادی، فاقد میرایی ذاتی و تحت تحریک نیرویی هارمونیک پیشنهاد کرد. این روش نیمه‌تجربی مبتنی بر فرضیه نقطه ثابت است. در این فرضیه گفته شده است که تمام منحنی‌های پاسخ فرکانسی از دو نقطه ثابت می‌گذرند. موقعیت این نقاط مستقل از میرایی سیستم است. نتایج نشان داده است که بهترین پاسخ در حالتی اتفاق می‌افتد که ارتفاع این دو نقطه یکسان باشد.

امروزه این ترکیب از جرم، فنر و کمک‌فنر که به‌منظور کاهش پاسخ‌های سازه اصلی به‌خصوص در حوزه تغییر مکان به سازه اضافه شده، به‌عنوان میراگر جرمی تنظیم‌شده شناخته می‌شود.

در سازه‌های بلند فولادی به‌خصوص با سیستم باربر جانبی قاب خمشی، تنظیم سختی سازه برای کنترل تغییر مکان‌های جانبی، همواره امری چالش برانگیز و کنترل‌کننده طرح است. به‌طور معمول در این شرایط طراح سازه باید با افزایش ابعاد المان‌های باربر جانبی، به‌ویژه افزایش ارتفاع تیرهای فولادی در قاب خمشی، سختی قاب خمشی را جهت کنترل تغییر مکان‌های جانبی افزایش دهد. این افزایش در ارتفاع تیرها، ارضای کنترل‌های لرزه‌ای آیین‌نامه‌ها از جمله ضابطه برش چشمه اتصال و همچنین ضابطه تیر ضعیف-ستون قوی را با مشکل مواجه می‌کند. بنابراین استفاده از سختی اعضای باربر جانبی در قاب خمشی فولادی جهت تأمین سختی کافی برای سازه، منجر به افزایش ابعاد تیر و ستون و در نهایت افزایش مقدار فولاد مصرفی در پروژه می‌شود.

¹ Frahm

² Ormondroyd

³ Den Hartog



در این صورت استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده در سازه‌های فولادی با قاب خمشی موجب بهینه‌تر شدن طرح سازه‌ای می‌شود. میراگرهای جرمی تنظیم شده، معمولاً در بام سازه قرار گرفته و هنگامی که سازه تحت یک تحریک جانبی خارجی مثل تحریک زلزله قرار بگیرد، با اعمال یک نیرو در خلاف جهت تحریک اعمالی به سازه، باعث کاهش پاسخ‌های سازه به‌خصوص در حوزه تغییر مکان می‌شود. بنابراین در صورت استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده در سازه‌های فولادی بلندمرتبه، می‌توان با استفاده از تیرها و ستون‌ها با ابعاد کوچک‌تر نسبت به حالت عادی، تغییر مکان‌های سازه را در محدوده مجاز آیین‌نامه کنترل کرد.

با معرفی میراگر جرمی تنظیم شده، محققان در حوزه مهندسی زلزله به بررسی عملکرد این جذب‌کننده‌های ارتعاشات دینامیکی تحت تحریک‌های پایه پرداختند. به این منظور، در این تحقیقات یک سازه یک درجه آزادی، فاقد میرایی ذاتی و تحت تحریک پایه مورد بررسی قرار گرفته است. در این حالت چون محتوای فرکانسی تحریک نسبت به تحریک نیرویی هارمونیک بسیار غنی‌تر است، بنابراین تابع هدف نیز تغییر کرده است. در چنین وضعیتی هدف از بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی سستی، به حداقل رساندن واریانس پاسخ‌های سازه به‌خصوص در حوزه تغییر مکان است [۴ و ۵].

سازه‌ها همواره مقداری میرایی ذاتی دارند. اتلاف انرژی ورودی به سازه ناشی از تحریک خارجی در حوزه خطی رفتار، به وسیله میرایی ذاتی صورت می‌گیرد. بنابراین در مرحله بعدی از تحقیقات صورت گرفته برای میراگر جرمی تنظیم شده، محققان به بررسی سازه یک درجه آزادی با میرایی ذاتی پرداختند. با اضافه شدن میرایی ذاتی به سیستم‌های یک درجه آزادی، بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده با استفاده از روش‌های تحلیلی کاری طولانی و زمان‌بر است. در نهایت محققان با استفاده از روش‌های عددی اقدام به بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی کردند [۶-۹].

در سازه‌های چند درجه آزادی با افزایش درجات آزادی، تابع هدف به‌صورت تصاعدی بزرگ شده و با بزرگ شدن تابع هدف، بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده زمان‌بر می‌شود. محققان برای کاهش محاسبات، یک روش تقریبی اما با دقت مناسب را پیشنهاد کردند. در روش پیشنهاد شده سازه چند

درجه آزادی به یک سازه یک درجه آزادی معادل تبدیل می‌شود. در این صورت عملاً بهینه‌سازی بر روی یک سیستم یک درجه آزادی انجام می‌پذیرد. این درجه آزادی، معادل با مد ارتعاشی است که میراگر جرمی سنتی بر روی آن تنظیم شده است.

تحقیقات زیادی برای بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده در سازه‌های چند درجه آزادی انجام شده است. در این تحقیقات، سازه‌های مختلفی از جمله سازه‌های ساختمانی، پل‌ها، سازه‌های پوسته‌ای و ... مورد بررسی قرار گرفته‌اند. میراگر جرمی در این تحقیقات بر روی مد ارتعاشی غالب سازه، که معمولاً مد اول است، تنظیم شده است. این سازه‌ها تحت تحریک‌های خارجی، خصوصاً نیروی باد و تحریک زلزله قرار گرفته‌اند [۱۰-۱۲].

نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد با افزایش جرم میراگر جرمی، راندمان این میراگر به‌خصوص در حوزه کاهش تغییر مکان‌های سازه به‌صورت محسوس افزایش می‌یابد. از جمله محدودیت‌های استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده، تأمین نسبت جرمی کافی در هر سازه است. چرا که با افزایش نسبت جرمی، جرم مورد نیاز برای این میراگر افزایش می‌یابد. طبیعتاً با افزایش جرم میراگر مذکور در سازه، فضاهای مفید معماری کاهش یافته و همچنین نیاز به اتصالات پیچیده‌تری وجود خواهد داشت؛ در نتیجه مهم‌ترین محدودیت استفاده از میراگرهای جرمی در کاربردهای عملی، تأمین نسبت جرمی برای این میراگر به‌صورتی است که قابلیت اجرایی شدن در سازه را داشته و انطباق مناسبی با معماری پروژه داشته باشد.

راهکارهای مختلفی به‌منظور کاهش نسبت جرمی مورد نیاز میراگر جرمی و همچنین بهبود عملکرد میراگرهای جرمی سنتی در کاهش پاسخ‌های سازه ناشی از تحریک زلزله توسط محققان پیشنهاد شده است. از جمله این راهکارها می‌توان به استفاده از میراگرهای جرمی چندگانه، ترکیب سری و یا موازی دو میراگر جرمی و همچنین استفاده از کمک‌فنر با قابلیت رفتار غیرخطی در میراگرهای جرمی سنتی اشاره کرد [۱۳-۱۵].

در سال ۲۰۱۴ یک جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی جدید^۱ از ترکیب میراگر جرمی سنتی با المان اینرتر^۲ توسط **ماریان**^۳ و **گریس**^۴ [۱۶] معرفی شد. این جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی به‌علت افزایش محسوس راندمان میراگرهای جرمی سنتی به‌خصوص در حوزه کاهش نسبت جرمی مورد نیاز جذب‌کننده

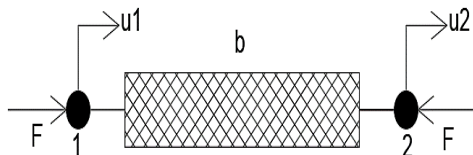
¹ Tuned Mass Damper Inerter

² Inerter

³ Marian

⁴ Giaralis





شکل ۱- مدل ایده آل المان اینترتر

$$F = b(\dot{u}_1 - \dot{u}_2) \quad (1)$$

پارامتر (b) در ادبیات فنی به عنوان ثابت المان اینترتر معرفی می شود.

سیستم های کنترل مبتنی بر استفاده از المان اینترتر قبلاً در ادبیات فنی ظاهر شده بودند، اما به طور گسترده ای پذیرفته نشدند و مورد بررسی قرار نگرفتند تا زمانی که اسمیت تعریف دقیق و جامعی را از المان اینترتر در سال ۲۰۰۲ پیشنهاد کرد. وی عمدتاً بر مفهوم المان اینترتر تمرکز کرد و در تحقیقات او، سیستم های کنترل ارتعاش مبتنی بر استفاده از المان اینترتر با جزئیات مورد بحث قرار نگرفتند.

عملاً سیستم های کنترل غیرفعال، توانایی تغییر در سختی و میرایی سازه را به صورت دائمی دارند. بر این اساس سیستم های کنترل غیرفعال، خصوصیات سازه از لحاظ میرایی و سختی را به صورتی تغییر می دهند که این تغییرات باعث بهبود رفتار سازه ها در برابر تحریک های خارجی شود. هیچ یک از سیستم های کنترل سازه ها توانایی تغییر در ماتریس جرم سازه ها را ندارند.

مزیت اصلی المان اینترتر نسبت به سایر سیستم های کنترل غیرفعال، توانایی تغییر در ماتریس جرم سازه ها است. به همین دلیل استفاده از آن ها در ترکیب با سیستم های کنترل غیرفعال باعث بهبود عملکرد این سیستم ها در کنترل سازه ها شده است. محققان اخیراً تحقیقات گسترده ای در زمینه ترکیب المان اینترتر با سیستم های کنترل غیرفعال ارتعاشات انجام می دهند. به عنوان مثال یک سازه یک درجه آزادی با میرایی ذاتی در نظر گرفته شده است، این سازه شامل جرم، سختی و میرایی ذاتی است. یک المان اینترتر به این ترکیب اضافه می شود. عملاً المان اینترتر در این صورت از یک سمت به سازه یک درجه آزادی و از سمت دیگر به زمین متصل شده است. حال با توجه به اضافه شدن المان اینترتر به این ترکیب، لازم است تا معادلات تعادل برای ترکیب جدید، دوباره برقرار شود. شکل (۲) مدل

ارتعاشات دینامیکی، توجهات زیادی را به خود جلب کرده و تحقیقات زیادی در این زمینه در حال انجام است.

در تحقیقات صورت گرفته تاکنون، TMDI به سازه های چند درجه آزادی اضافه شده و عملکرد سازه تحت تحریک های خارجی از جمله نیروی باد و تحریک زلزله بررسی شده است [۱۷ و ۱۸]. همچنین عملکرد سازه های مجهز به TMDI با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه نیز بررسی شده است [۱۹]. تحقیقاتی پیرامون ترکیب TMDI با سایر سیستم های کنترل سازه از جمله میراگرهای ویسکوز و جداسازهای لرزه ای نیز انجام شده است [۲۰ و ۲۱].

در این مقاله پیرامون بهینه سازی پارامترهای جذب کننده ارتعاشات دینامیکی با استفاده از روش بهینه سازی ازدحام ذرات، برای سیستم های یک درجه آزادی و چند درجه آزادی با فرض وجود یا عدم وجود میرایی ذاتی تحت تحریک پایه بحث خواهد شد. بهینه سازی به صورتی انجام می شود که نتایج، قابلیت استفاده برای تمامی سازه ها را داشته باشد. همچنین عملکرد این جذب کننده ارتعاشات دینامیکی با میراگرهای جرمی سنتی مقایسه خواهد شد.

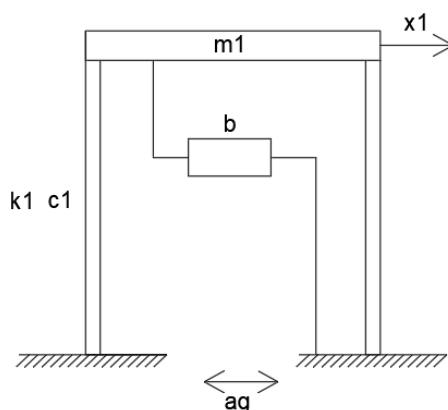
۲- المان اینترتر

مفهوم اینترتر ابتدا توسط اسمیت^۱ بر اساس قیاس نیرو-جریان بین شبکه های الکتریکی و مکانیکی پیشنهاد شد [۲۲]. نیرو، سرعت، سختی، جرم و میرایی از عوامل تأثیرگذار در شبکه های مکانیکی هستند. جریان، ولتاژ، خاصیت القایی، خازن و مقاومت از عوامل تأثیرگذار در شبکه های الکتریکی هستند. جرم و میرایی در شبکه های مکانیکی معادل با القاگر، خازن و مقاومت در شبکه های الکتریکی هستند. تمامی المان ها به جز جرم دارای دو پایانه هستند. به عبارت دیگر، جرم نمی تواند در هماهنگی کامل با خازن باشد. چراکه جرم یک المان با یک پایانه است. اما خازن یک المان با دو پایانه است.

برای تحقق کامل هماهنگی بین المان های مربوط در شبکه های مکانیکی و الکتریکی، اسمیت المان اینترتر با دو پایانه را پیشنهاد کرد که می تواند نیرویی متناسب با اختلاف شتاب ایجاد شده در دو پایانه خود تولید کند. در شکل (۱) مدل ساده شده المان اینترتر با فرض رفتار خطی برای این المان معرفی شده است.

¹ Smith

جرم متمرکز یک سازه یک درجه آزادی در ترکیب با المان اینترتر را نشان می‌دهد.



شکل ۲- سازه یک درجه آزادی دارای میرایی ذاتی، تحت تحریک پایه همراه با المان اینترتر

$$(m_1 + b) \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1) + k_1(x_1) = -m_1 \ddot{x}_g \quad (2)$$

عملاً المان اینترتر می‌تواند ثابتی بین ۶۰ تا ۲۰۰ برابر وزن خود تولید کند. اگر فرض کنیم وزن المان اینترتر ۱۰۰ کیلوگرم باشد، ثابت این المان می‌تواند بین ۶۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ کیلوگرم باشد. بنابراین این ثابت در اختلاف شتاب ایجادشده در دو پایانه المان اینترتر ضرب شده و نیروی تولیدی توسط این المان محاسبه می‌شود. با توجه به خصوصیات این المان، می‌توان گفت که نیروی ایجادشده توسط آن، در ماتریس جرم سازه‌ها تغییراتی ایجاد می‌کند.

در سازه یک درجه آزادی مورد نظر، اضافه‌کردن این المان به سیستم باعث می‌شود که ثابت المان با جرم سازه جمع شود. بنابراین جرم سیستم به صورت مجازی افزایش پیدا می‌کند. با افزایش جرم به صورت مجازی، فرکانس سیستم کاهش پیدا کرده و زمان تناوب آن افزایش می‌یابد. در این صورت چون جرم سیستم به طور مجازی افزایش یافته، نیروی ورودی به سازه تحت تحریک پایه تغییری نمی‌کند. به دلیل این ویژگی منحصر به فرد، از این المان در ترکیب با جرم، فنر و کمک‌فنر به منظور کنترل غیرفعال سازه‌ها استفاده شده است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

در دهه‌های اخیر هم‌زمان با مطرح‌شدن مسائل بهینه‌سازی جدید، روش‌های نوین بهینه‌سازی ابداع شدند. مهم‌ترین گروه از این روش‌ها، روش‌های تکاملی می‌باشند که توانایی حل مسائل با ابعاد بزرگ و تعداد متغیرهای زیاد را دارا هستند. این روش‌ها مبتنی بر پدیده‌های طبیعی بوده و سعی در قانون‌مند کردن روند جستجوی تصادفی با این قوانین دارند. از جمله مطرح‌ترین این روش‌ها می‌توان به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ اشاره کرد. این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی تصادفی مبتنی بر ازدحام است که در سال ۱۹۹۵ توسط کندی^۲ و ابرهارت^۳ پیشنهاد شده است [۲۳] که رفتارهای اجتماعی حیوانات و جانوران از جمله پرندگان، ماهی‌ها و سایر جانورانی که به صورت جمعی فعالیت می‌کنند را شبیه‌سازی می‌کند.

در مقایسه با سایر الگوریتم‌های تکاملی مثل الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها، الگوریتم ازدحام ذرات دارای ویژگی‌های برتری نظیر اجرای آسان‌تر، تنظیم پارامترهای کم‌تر و سرعت همگرایی بیشتر می‌باشد.

در الگوریتم ازدحام ذرات تعدادی از موجودات زنده وجود دارند، که آن‌ها ذره نامیده می‌شوند و در فضای جستجوی پاسخ بهینه پخش شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هزینه را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که قبلاً در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمعیت، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. پس از انجام حرکت جمعی، این مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آن که جواب بهینه به دست آید. در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی پارامترهای جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی از الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است.

۴- بهینه‌سازی پارامترهای TMDI در ترکیب با سازه‌های

یک درجه آزادی تحت تحریک پایه

در تحقیقات انجام‌شده تاکنون توسط محققان برای ترکیب میراگر جرمی سنتی با المان اینترتر، بهینه‌سازی متمرکز بر مطالعه موردی بوده است. در تحقیقات صورت گرفته، یک سازه شاخص در نظر گرفته شده و برای آن سازه، معادلات تعادل دینامیکی

¹ PSO

² Kennedy

³ Eberhart

در شکل (۳)، (M) معرف جرم، (C) میرایی، (K) سختی و (b) ثابت جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی است. در ادامه پارامترهای مورد نیاز برای بهینه‌سازی معرفی شده است.

(۳) درصد میرایی سازه اصلی

$$\xi_s = \frac{c_s}{2m_s w_s}$$

(۴) درصد میرایی بهینه TMDI

$$\xi_1 = \frac{c_1}{2(m_1+b)w_s}$$

(۵) فرکانس سازه اصلی

$$w_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}$$

(۶) فرکانس بهینه TMDI

$$w_1 = \sqrt{\frac{k_1}{(m_1+b)}}$$

(۷) نسبت فرکانس TMDI در حالت بهینه به فرکانس سازه اصلی

$$f_1 = \frac{w_1}{w_s}$$

(۸) نسبت جرم TMDI به جرم سازه اصلی

$$\mu = \frac{m_1}{m_s}$$

(۹) نسبت ثابت TMDI به جرم اصلی

$$\beta = \frac{b}{m_s}$$

سپس معادلات تعادل دینامیکی برای سیستم مورد نظر برقرار شده است.

$$(m_1 + b) \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_s) + k_1(x_1 - x_s) = -m_1 \ddot{x}_g \quad (10)$$

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + c_1(\dot{x}_s - \dot{x}_1) + k_s x_s + k_1 = -m_s \ddot{x}_g \quad (11)$$

حال با توجه به پارامترهای تعریف شده، معادلات تعادل دینامیکی به شکل ساده‌تری تبدیل شده است.

$$(\mu + \beta) \ddot{x}_1 + 2 \xi_1 (\mu + \beta) f_1 w_s (\dot{x}_1 - \dot{x}_s) + f_1^2 w_s^2 (\mu + \beta) (x_1 - x_s) = -\mu \ddot{x}_g \quad (12)$$

$$(x_1 - x_s) = -\mu \ddot{x}_g$$

$$\ddot{x}_s + 2 \xi_s w_s \dot{x}_s + 2 \xi_1 (\mu + \beta) f_1 w_s (\dot{x}_s - \dot{x}_1) + w_s^2 x_s + f_1^2 w_s^2 = -\ddot{x}_g \quad (13)$$

$$(\mu + \beta)(x_s - x_1) = -\ddot{x}_g$$

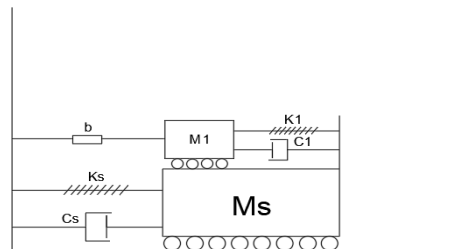
اکنون فرض شده است که تحریک پایه، یک تحریک هارمونیک با فرکانس مشخص است. بنابراین با این فرض، سایر پاسخ‌های سیستم به دست آمده است.

$$\ddot{x}_g = e^{i\omega t} \quad (14)$$

برقرار شده است. سپس با توجه به تابع هدف مورد نظر، تابع تبدیل مناسب برای سازه شاخص به دست آمده است. حال با توجه به تابع تبدیل به دست آمده، تابع هدف مناسب تشکیل شده و بهینه‌سازی صورت گرفته است. بنابراین نتایج حاصله، مخصوص سازه شاخص بوده و قابلیت تعمیم به تمامی سازه‌ها را ندارد.

تاکنون توسط محققان برای ترکیب میراگر جرمی سنتی با المان اینترتر، بهینه‌سازی به صورتی که قابل تعمیم برای تمامی سازه‌ها باشد، انجام نشده است. این نوع بهینه‌سازی برای میراگر جرمی سنتی، توسط محققان زیادی صورت گرفته است. در این پژوهش بهینه‌سازی به نحوی انجام شده که نتایج قابل استفاده برای تمام سازه‌ها از جمله سازه‌های فولادی باشد. عملاً می‌توان با داشتن مشخصات ذاتی سازه از جمله اشکال مودی، فرکانس‌های سازه، جرم‌های مودی و استفاده از نتایج بهینه‌سازی در این پژوهش، پارامترهای بهینه برای جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی اضافه‌شده به سازه را محاسبه کرد.

نتایج تحقیقات صورت گرفته تاکنون در این زمینه نشان داده است که عملکرد TMDI کاملاً وابسته به محل قرارگیری المان اینترتر در سازه است. در صورت اضافه شدن میراگر جرمی تنظیم شده به یک سازه، اتلاف انرژی توسط تغییر مکان نسبی بین ترازوی که میراگر جرمی به آن متصل است و جرم میراگر جرمی صورت می‌گیرد. چنانچه به میراگر جرمی تنظیم شده، المان اینترتر اضافه شود و این المان بین میراگر جرمی و ترازوی که میراگر به آن متصل است قرار بگیرد، مکانیزم اتلاف انرژی خراب شده و جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی باعث تشدید پاسخ‌ها خواهد شد. بنابراین برای عملکرد مطلوب TMDI در سازه‌ها، المان اینترتر باید به ترازوی متفاوت از ترازوی که میراگر جرمی به آن متصل است، اتصال پیدا کند. در سازه‌های یک درجه آزادی به‌منظور کارایی مناسب TMDI، المان اینترتر باید بین زمین و میراگر جرمی قرار بگیرد. شکل (۳) مدل جرم متمرکز یک سازه یک درجه آزادی در ترکیب با TMDI را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مدل جرم متمرکز سازه یک درجه آزادی در ترکیب با TMDI

$$B = -4i^2 r^2 \xi_1 \xi_s f_1 + 2\beta i r^3 \xi_1 f_1 + \quad (31)$$

$$2i\mu r^3 \xi_1 f_1 - 2ir \xi_s f_1^2 + \beta r^2 f_1^2 +$$

$$2ir^3 \xi_1 f_1 - 2ir \xi_1 f_1 + \mu r^2 f_1^2 +$$

$$2ir^3 \xi_s + r^2 f_1^2 - f_1^2 - r^4 + r^2$$

محتوای فرکانسی تحریک از نوع ارتعاش سفید در نظر گرفته شده است. سپس با توجه به تابع تبدیل، تابع هدف مناسب به دست آمده است.

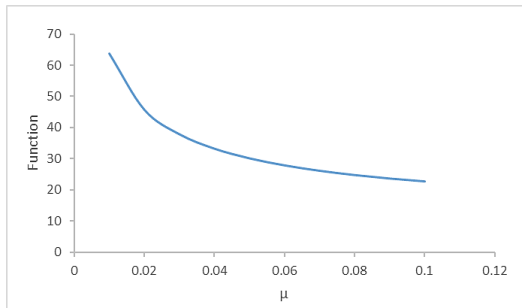
$$\frac{\sigma_s^2 w_s^3}{s_0} = \int_{-\infty}^{\infty} |H_r|^2 dr \quad (32)$$

پس از به دست آمدن تابع هدف، باید آن را بهینه سازی کرد. روش های مختلفی برای بهینه سازی توابع هدف وجود دارد. در این تحقیق با توجه به شرایط موجود، از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. بهینه سازی به ازای مقادیر مختلف β ، μ و ξ_s انجام شده است. در ادامه تعدادی از نتایج ارائه شده است.

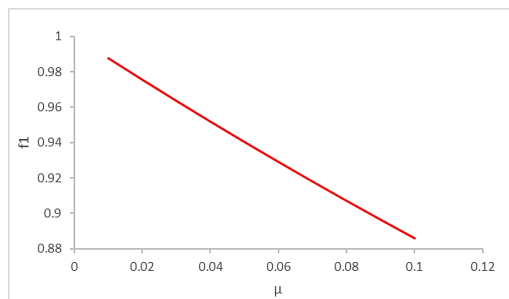
۴-۱- بهینه سازی پارامترهای جذب کننده ارتعاشات دینامیکی

با فرض $\mathbf{b}=0$ و $\mathbf{c}_s=0$

با این فرض پارامترهای میراگر جرمی سنتی، اضافه شده به یک سازه یک درجه آزادی و فاقد میرایی ذاتی، بهینه شده است.



شکل ۴- مقدار بهینه شده تابع هدف به ازای نسبت های جرمی مختلف



شکل ۵- مقادیر نسبت بهینه فرکانس TMDI به فرکانس سازه اصلی به ازای نسبت های جرمی مختلف

$$x_s = H_s e^{i\omega t} \quad (15)$$

$$\dot{x}_s = i\omega H_s e^{i\omega t} \quad (16)$$

$$\ddot{x}_s = -\omega^2 H_s e^{i\omega t} \quad (17)$$

$$x_1 = H_1 e^{i\omega t} \quad (18)$$

$$\dot{x}_1 = i\omega H_1 e^{i\omega t} \quad (19)$$

$$\ddot{x}_1 = -\omega^2 H_1 e^{i\omega t} \quad (20)$$

سپس دستگاه معادلات دینامیکی تشکیل شده و با توجه به آن تابع تبدیل مناسب به دست آمده است.

$$A H_1 + B H_s = -\mu \quad (21)$$

$$B H_1 + C H_s = -1 \quad (22)$$

$$A = -(\mu + \beta)\omega^2 + f_1^2 \omega_s^2 (\mu + \beta) + 2\xi_1 (\mu + \beta) f_1 \omega_s \omega i \quad (23)$$

$$B = -f_1^2 \omega_s^2 (\mu + \beta) - 2\xi_1 (\mu + \beta) f_1 \omega_s \omega i \quad (24)$$

$$C = -\omega^2 + 2\xi_s \omega_s \omega i + 2\xi_1 (\mu + \beta) f_1 \omega_s \omega i + \omega_s^2 \quad (25)$$

$$+ f_1^2 \omega_s^2 (\mu + \beta)$$

با حل دستگاه معادلات، تابع تبدیل تغییر مکان سازه اصلی به دست آمده است.

$$H_s = \frac{A}{B} \quad (26)$$

$$A = 2\xi_1 f_1 \omega_s \omega i \mu + 2i\omega \xi_1 f_1 \omega_s + f_1^2 \omega_s^2 \mu + f_1^2 \omega_s^2 - \omega^2 \quad (27)$$

$$B = -4i^2 \omega^2 \xi_1 \xi_s f_1 \omega_s^2 + 2\beta i \omega^3 \xi_1 f_1 \omega_s + \quad (28)$$

$$2i\mu \omega^3 \xi_1 f_1 \omega_s - 2i\omega \xi_s f_1^2 \omega_s^3 + \beta \omega^2 f_1^2 \omega_s^2 +$$

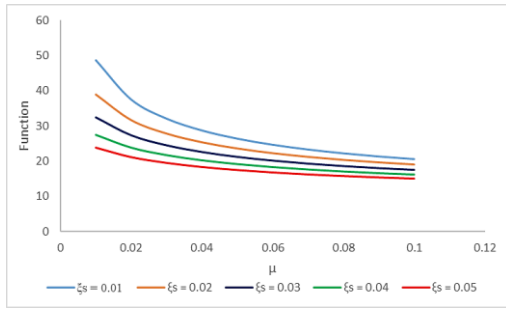
$$2i\omega^3 \xi_1 f_1 \omega_s - 2i\omega \xi_1 f_1 \omega_s^3 + \mu \omega^2 f_1^2 \omega_s^2 +$$

$$2i\omega^3 \xi_s \omega_s + \omega^2 f_1^2 \omega_s^2 - f_1^2 \omega_s^4 - \omega^4 + \omega^2 \omega_s^2$$

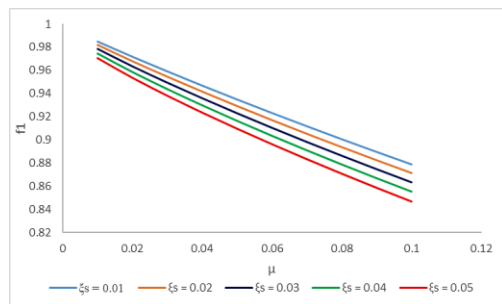
سپس تابع تبدیل به دست آمده به صورت بدون بعد تبدیل شده است.

$$H_r = \frac{A}{B} = \frac{x_s \omega^2}{\ddot{x}_g} \quad (29)$$

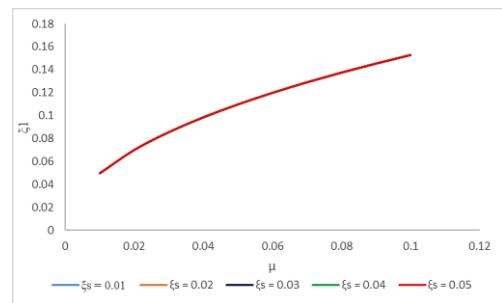
$$A = 2\xi_1 f_1 r i \mu + 2ir \xi_1 f_1 + f_1^2 \mu + f_1^2 - r^2 \quad (30)$$



شکل ۷- مقدار بهینه شده تابع هدف به ازای نسبت های جرمی و درصد های میرایی مختلف سازه اصلی



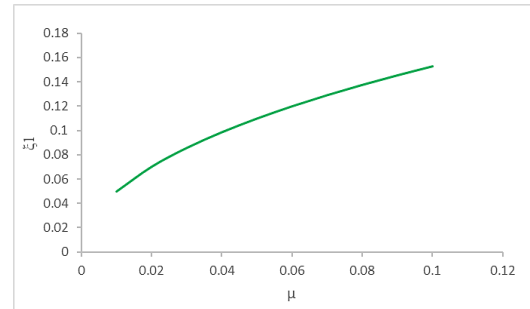
شکل ۸- مقادیر نسبت بهینه فرکانس TMDI به فرکانس سازه اصلی به ازای نسبت های جرمی و درصد های میرایی مختلف سازه اصلی



شکل ۹- مقادیر درصد میرایی بهینه TMDI به ازای نسبت های جرمی و درصد های میرایی مختلف سازه اصلی

با توجه به نتایج به دست آمده در شکل های (۴) الی (۹)، می توان به موارد زیر اشاره کرد.

- با افزایش نسبت جرمی برای میراگر جرمی سنتی، مقدار تابع هدف کاهش می یابد. این کاهش به معنای افزایش راندمان میراگر جرمی و کاهش بیش تر واریانس پاسخ سازه اصلی به خصوص در حوزه تغییر مکان است.
- با افزایش نسبت جرمی برای میراگر جرمی سنتی، فرکانس مورد نیاز برای میراگر جرمی به منظور رسیدن به پاسخ بهینه، کاهش می یابد.



شکل ۱۰- مقادیر درصد میرایی بهینه TMDI به ازای نسبت های جرمی مختلف

جهت اطمینان از صحت معادلات تعادل دینامیکی برقرار شده برای سیستم، تابع هدف تشکیل شده برای بهینه سازی و همچنین صحت نتایج به دست آمده از روش الگوریتم ازدحام ذرات، نتایج این بخش با تحقیقات صورت گرفته توسط سایر محققان در زمینه بهینه سازی پارامترهای میراگر جرمی سنتی به وسیله الگوریتم ازدحام ذرات [۲۳]، مقایسه شده است. با مقایسه نتایج، می توان گفت که هیچ تفاوتی بین آن ها وجود ندارد. در جدول (۱) بخشی از نتایج حاصل از تحقیقات قبلی ارائه شده است.

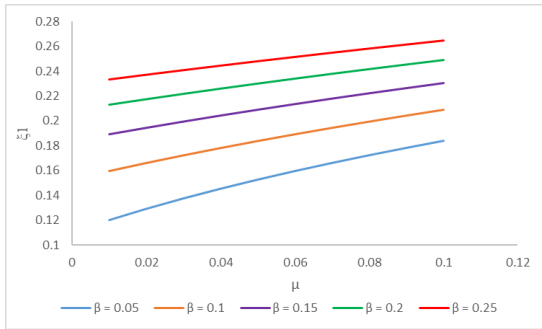
جدول ۱- پارامترهای بهینه شده میراگر جرمی تنظیم شده در تحقیقات قبلی

ξ_1	f_1	Function	ξ_s	μ
۰/۰۴۹	۰/۹۸	۶۳/۶۶	۰	۰/۰۱
۰/۰۷۰	۰/۹۷	۴۵/۶۳	۰	۰/۰۲
۰/۰۸۵	۰/۹۶	۳۷/۷۵	۰	۰/۰۲
۰/۰۹۸	۰/۹۵	۳۳/۱۳	۰	۰/۰۴
۰/۱۰۹	۰/۹۴	۳۰/۰۲	۰	۰/۰۵
۰/۱۱۹	۰/۹۲	۲۷/۷۶	۰	۰/۰۶
۰/۱۲۹	۰/۹۱	۲۶/۰۴	۰	۰/۰۷
۰/۱۳۷	۰/۹۰	۲۴/۶۶	۰	۰/۰۸
۰/۱۴۵	۰/۸۹	۲۳/۵۵	۰	۰/۰۹
۰/۱۵۲	۰/۸۸	۲۲/۶۲	۰	۰/۱

۲-۴- بهینه سازی پارامترهای جذب کننده ارتعاشات

دینامیکی با فرض $b=0$

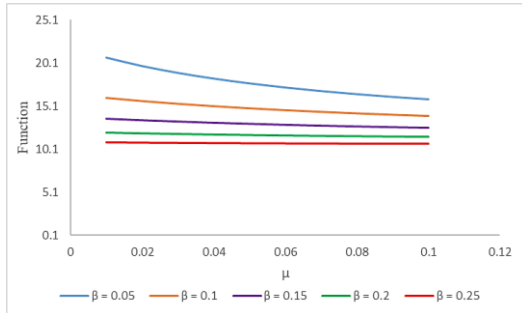
با این فرض پارامترهای میراگر جرمی سنتی، اضافه شده به یک سازه یک درجه آزادی و دارای میرایی ذاتی، بهینه شده است.



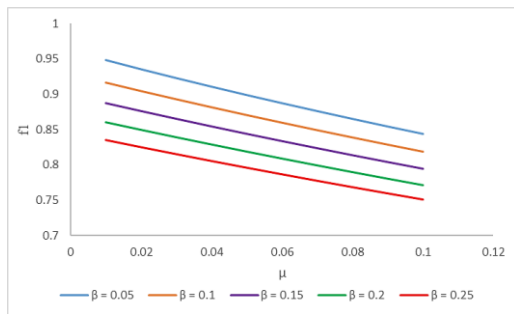
شکل ۱۲- مقادیر درصد میرایی بهینه TMDI به‌ازای نسبت‌های جرمی و β مختلف سازه اصلی

۴-۴- بهینه‌سازی پارامترهای جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی

با این فرض پارامترهای میراگر جرمی سنتی در ترکیب با اینترتر، اضافه‌شده به یک سازه یک درجه آزادی و با میرایی ذاتی، بهینه می‌شود.



شکل ۱۳- مقدار بهینه‌شده تابع هدف به‌ازای نسبت‌های جرمی و β مختلف سازه اصلی و درصد میرایی ۲ برای سازه اصلی

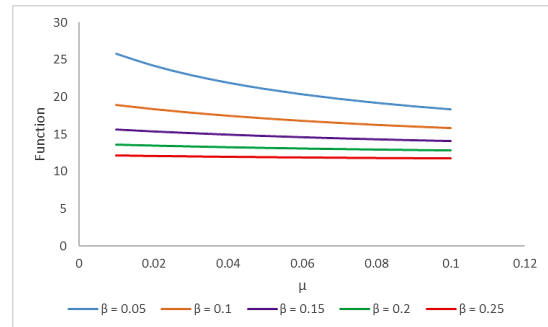


شکل ۱۴- مقادیر نسبت بهینه فرکانس TMDI به فرکانس سازه اصلی به‌ازای نسبت‌های جرمی و β مختلف سازه اصلی و درصد میرایی ۲ برای سازه اصلی

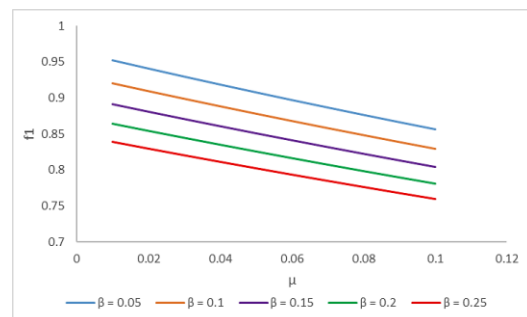
- با افزایش نسبت جرمی برای میراگر جرمی سنتی، درصد میرایی مورد نیاز برای میراگر جرمی به‌منظور رسیدن به پاسخ بهینه، افزایش می‌یابد.
- به‌ازای یک نسبت جرمی ثابت و با افزایش درصد میرایی سازه اصلی، مقدار تابع هدف و مقدار فرکانس مورد نیاز برای میراگر جرمی کاهش می‌یابد.
- همچنین درصد میرایی مورد نیاز برای میراگر جرمی ثابت بوده و حساسیتی به تغییرات درصد میرایی سازه اصلی ندارد.

۴-۳- بهینه‌سازی پارامترهای جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی با فرض $C_s=0$

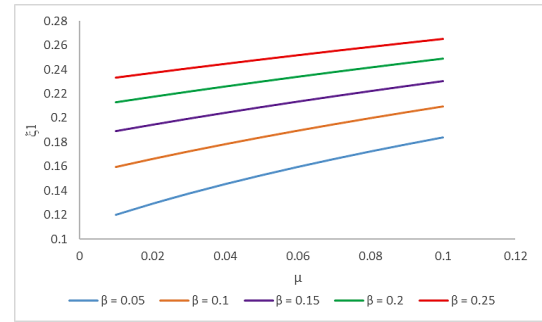
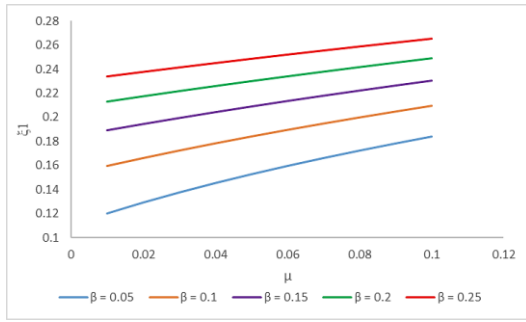
با این فرض پارامترهای میراگر جرمی سنتی در ترکیب با اینترتر، اضافه‌شده به یک سازه یک درجه آزادی و بدون میرایی ذاتی، بهینه می‌شود.



شکل ۱۰- مقدار بهینه‌شده تابع هدف به‌ازای نسبت‌های جرمی و β مختلف سازه اصلی



شکل ۱۱- مقادیر نسبت بهینه فرکانس TMDI به فرکانس سازه اصلی به‌ازای نسبت‌های جرمی و β مختلف سازه اصلی



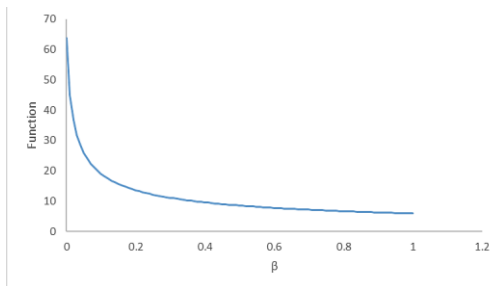
شکل ۱۵- مقادیر درصد میرایی بهینه TMDI به ازای نسبت های جرمی و β مختلف سازه اصلی و درصد میرایی ۲ برای سازه اصلی

شکل ۱۸- مقادیر درصد میرایی بهینه TMDI به ازای نسبت های جرمی و β مختلف سازه اصلی و درصد میرایی ۴ برای سازه اصلی با توجه به نتایج به دست آمده در شکل های (۱۰) الی (۱۸)، می توان به موارد زیر اشاره کرد.

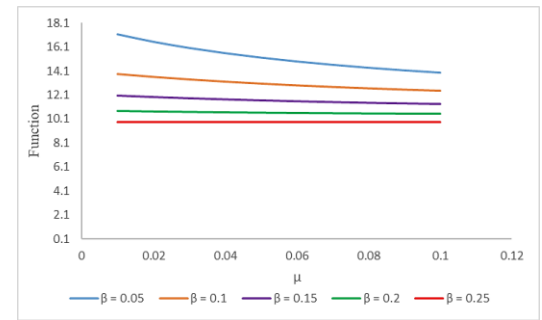
- به ازای یک نسبت جرمی ثابت و با افزایش ثابت المان اینترتر که منجر به افزایش پارامتر β می شود، مقدار تابع هدف کاهش می یابد.
- به ازای یک نسبت جرمی ثابت و با افزایش ثابت المان اینترتر، نسبت فرکانسی TMDI برای رسیدن به پاسخ بهینه کاهش می یابد.
- به ازای یک نسبت جرمی ثابت و با افزایش ثابت المان اینترتر، درصد میرایی TMDI برای رسیدن به پاسخ بهینه افزایش می یابد.
- به ازای نسبت جرمی ثابت و به ازای ثابت المان اینترتر مشخص، با افزایش درصد میرایی جرم اصلی، مقدار تابع هدف کاهش می یابد.

۴-۵- مقایسه بین میراگر جرمی ستی و TMDI در سیستم های یک درجه آزادی

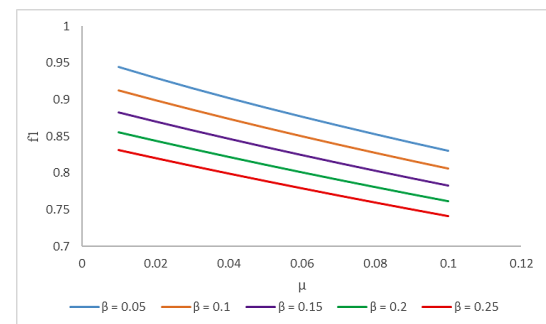
در شکل (۱۹) نحوه تغییرات تابع هدف با β به ازای یک نسبت جرمی و درصد میرایی ثابت نشان داده شده است.



شکل ۱۹- مقدار بهینه شده تابع هدف به ازای β مختلف برای نسبت جرمی یک و درصد میرایی صفر برای سازه اصلی



شکل ۱۶- مقدار بهینه شده تابع هدف به ازای نسبت های جرمی و β مختلف سازه اصلی و درصد میرایی ۴ برای سازه اصلی



شکل ۱۷- مقادیر نسبت بهینه فرکانس TMDI به فرکانس سازه اصلی به ازای نسبت های جرمی و β مختلف سازه اصلی و درصد میرایی ۴ برای سازه اصلی

اینترتر می‌توان با یک نسبت جرمی کم‌تر برای میراگر جرمی، به سطح عملکرد مناسبی رسید. در جدول (۲) مقایسه عددی بین مقادیر تابع هدف به‌ازای حالت‌های مختلف صورت گرفته است.

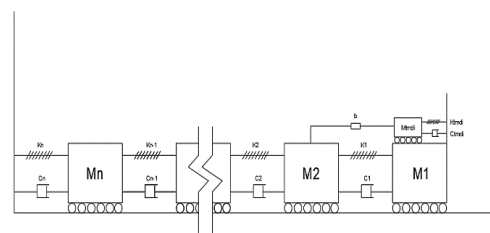
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت اضافه‌کردن المان اینترتر به میراگر جرمی تنظیم‌شده در سازه‌های یک درجه آزادی به‌صورت محسوسی راندمان میراگر جرمی را افزایش می‌دهد. در این سازه‌ها چون المان اینترتر بین میراگر جرمی و زمین قرار می‌گیرد، می‌توان گفت جرم این میراگر به‌صورت مجازی افزایش می‌یابد. این درحالی است که نیروی ورودی به سازه تحت تحریک پایه تغییری نخواهد داشت. بنابراین با اضافه‌کردن المان

جدول ۲- مقدار تابع هدف برای TMDI اضافه‌شده به سازه یک درجه آزادی با درصد میرایی دو برای سازه اصلی

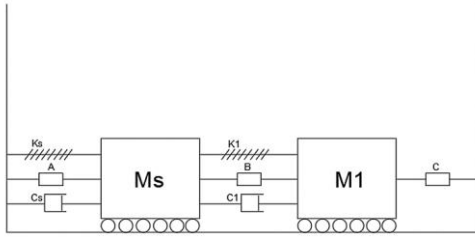
μ	β	مقدار تابع هدف	درصد کاهش تابع هدف نسبت به میراگر جرمی تنظیم شده
۰/۰۱	۰	۳۹/۸۶	۰
	۰/۰۵	۲۰/۶۸	۴۸
	۰/۱۰	۱۶/۰۵	۵۹
	۰/۱۵	۱۳/۶۲	۶۵
	۰/۲۰	۱۲/۰۴	۶۹
۰/۰۳	۰	۲۷/۷۸	۰
	۰/۰۵	۱۸/۹۲	۳۱
	۰/۱۰	۱۵/۳۷	۴۴
	۰/۱۵	۱۳/۳۰	۵۲
	۰/۲۰	۱۱/۸۸	۵۷
۰/۰۵	۰	۲۳/۵۱	۰
	۰/۰۵	۱۷/۷۱	۲۴
	۰/۱۰	۱۴/۸۵	۳۶
	۰/۱۵	۱۳/۰۴	۴۴
	۰/۲۰	۱۱/۷۶	۴۹

برای تأثیر المان اینترتر در بهبود رفتار میراگر جرمی سستی، این المان در سازه‌های چند درجه آزادی باید به تراز متفاوت از محل نصب میراگر جرمی، متصل شود. در این بخش از تحقیق فرض می‌شود که جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی بر روی بام سازه قرار گرفته و المان اینترتر به یک تراز پایین‌تر از بام سازه متصل است. همچنین می‌توان گفت که در این قسمت، فرض بر آن است که جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی به‌منظور کاهش پاسخ‌های سازه بر روی مد اول سازه تنظیم شود. با توجه به نکات گفته‌شده، معادلات تعادل دینامیکی برای این سیستم برقرار شده است.

۵- بهینه‌سازی پارامترهای TMDI در ترکیب با سازه‌های چند درجه آزادی تحت تحریک پایه



شکل ۱۹- مدل جرم متمرکز سازه چند درجه آزادی در ترکیب با TMDI



شکل ۲۰- سیستم یک درجه آزادی معادل برای سازه چند درجه آزادی همراه با جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی

$$A = b\Delta\varphi(1 - \Delta\varphi) \quad (35)$$

$$B = b(1 - \Delta\varphi) \quad (36)$$

$$C = b\Delta\varphi \quad (37)$$

معادلات تعادل دینامیکی برای سیستم تشکیل شده است.

$$(m_1 + b)\ddot{x}_1 - b(1 - \Delta\varphi)\ddot{x}_s + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_s) + k_1(x_1 - x_s) = -m_1\ddot{x}_g \quad (38)$$

$$(m_s + b(1 - \Delta\varphi)^2)\ddot{x}_s - b(1 - \Delta\varphi)\ddot{x}_1 + c_s\dot{x}_s + c_1(\dot{x}_s - \dot{x}_1) + k_sx_s + k_1(x_s - x_1) = -m_s\ddot{x}_g \quad (39)$$

با توجه به روابط (۳) الی (۹)، معادلات تعادل دینامیکی به شکل ساده‌تری تبدیل شده است.

$$(\mu + \beta)\ddot{x}_1 - \beta(1 - \Delta\varphi)\ddot{x}_s + 2\xi_1(\mu + \beta)f_1w_s(\dot{x}_1 - \dot{x}_s) + f_1^2w_s^2(x_1 - x_s) = -\mu\ddot{x}_g \quad (40)$$

$$(1 + \beta(1 - \Delta\varphi)^2)\ddot{x}_s - \beta(1 - \Delta\varphi)\ddot{x}_1 + 2\xi_s w_s \dot{x}_s + 2\xi_1(\mu + \beta)f_1w_s(\dot{x}_s - \dot{x}_1) + k_sx_s + f_1^2w_s^2(x_s - x_1) = -\lambda\ddot{x}_g \quad (41)$$

با فرض این که تحریک پایه، یک تحریک هارمونیک با فرکانس مشخص است پاسخ‌های سیستم مشابه با روابط (۱۴) الی (۲۰) به دست می‌آید. سپس دستگاه معادلات دینامیکی به صورتی که بتوان تابع تبدیل مناسب را به دست آورد تشکیل شده است.

$$AH_1 + BH_s = -\mu \quad (42)$$

$$BH_1 + CH_s = -\lambda \quad (43)$$

$$A = -(\mu + \beta)w^2 + f_1^2w_s^2(\mu + \beta) + 2\xi_1(\mu + \beta)f_1w_swi \quad (44)$$

$$B = \beta(1 - \Delta)w^2 - f_1^2w_s^2(\mu + \beta) - 2\xi_1(\mu + \beta)f_1w_swi \quad (45)$$

$$C = (-1 - \beta(1 - \Delta)^2)w^2 + 2\xi_s w_s wi + 2\xi_1(\mu + \beta)f_1w_swi + w_s^2 + f_1^2w_s^2(\mu + \beta) \quad (46)$$

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\tau\ddot{u}_g + B_k b(\ddot{u}_{tmd1} - \ddot{u}_k) + B_j (c_{tmd1}(\dot{u}_{tmd1} - \dot{u}_j) + k_{tmd1}(u_{tmd1} - u_j)) \quad (33)$$

$$m_{tmd1}\ddot{u}_{tmd1} = -m_{tmd1}\ddot{u}_g - b(\ddot{u}_{tmd1} - \ddot{u}_k) - (c_{tmd1}(\dot{u}_{tmd1} - \dot{u}_j) + k_{tmd1}(u_{tmd1} - u_j)) \quad (34)$$

در معادلات (۳۳) و (۳۴)، (M)، (C) و (K) به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه اصلی هستند. همچنین باید گفت که (τ)، (B_k) و (B_j) به ترتیب ماتریس‌های واحد، تخصیص نیروی اینترتر و تخصیص نیروی فنر و نیروی کمک‌فنر هستند. حال با توجه به این که هدف از بهینه‌سازی جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی، کنترل تنها یک مد از سازه است، سازه به یک سازه یک درجه آزادی تبدیل می‌شود.

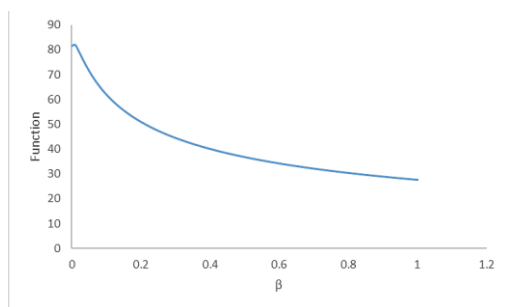
در سازه‌های چند درجه آزادی می‌توان بردار تغییرمکان u را به صورت $u(t) = \varphi u_j(t)$ تقریب زد. می‌توان گفت (φ) شکل یک مد ارتعاشی خاص از سازه چند درجه آزادی است که به گونه‌ای نرمال شده است تا در تراز j، $\varphi_j = 1.0$ باشد. همچنین (u_j) تغییرمکان سازه در تراز j است. شکل مد ارتعاشی φ باید شرایط مرزی سازه از لحاظ تغییرمکان را ارضا کند. بنابراین با توجه به این مورد می‌توان سازه‌های چند درجه آزادی در ترکیب با TMDI را به یک سازه دو درجه آزادی معادل تبدیل کرد. در شکل (۲۰) مدل دو درجه آزادی معادل برای ترکیب سازه‌های چند درجه آزادی با TMDI معرفی شده است. مدل ارائه‌شده در شکل (۲۰)، یک مدل‌سازی ریاضی برای حل مسئله است.

در شکل (۲۰) Ms نماینده سازه چند درجه آزادی است. به صورتی که جرم، سختی و میرایی معادل برای سازه چند درجه آزادی برابر است با $M_s = \varphi^T M \varphi$ ، $K_s = \varphi^T K \varphi$ و $C_s = \varphi^T C \varphi$.

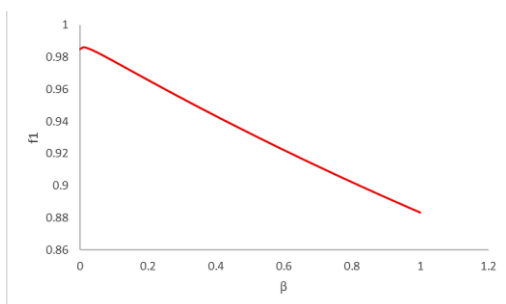
در شکل (۲۰) M1 نماینده جرم جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی است که با یک فنر با سختی K1، یک کمک‌فنر با میرایی C1 و یک اینترتر با ثابت $b(1 - \Delta\varphi)$ به جرم اصلی متصل شده است. همچنین این جرم با یک المان اینترتر با ثابت $b\Delta\varphi$ به زمین متصل شده و جرم اصلی نیز با یک المان اینترتر با ثابت $b\Delta\varphi(\Delta\varphi - 1)$ به زمین متصل شده است. همچنین $\Delta\varphi$ به عنوان اختلاف بین تغییرمکان سازه در تراز نصب میراگر جرمی و تراز نصب المان اینترتر در سازه تعریف می‌شود.

برابر با ۱۶/۹ ton و درصد میرایی برای این مد از سازه برابر با ۲ است.

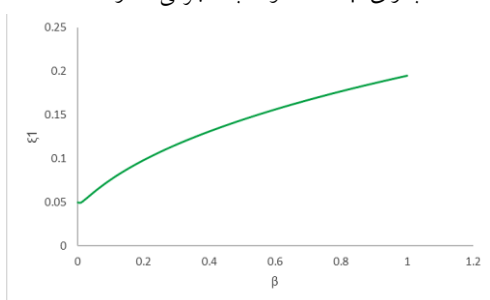
جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی مورد نظر به سازه اضافه می‌شود. هدف از اضافه کردن این سیستم کنترل غیرفعال به سازه، کنترل مد اول سازه و کاهش پاسخ‌های سازه به‌خصوص در حوزه تغییر مکان است. بنابراین پارامترهای جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی با هدف کنترل مد اول سازه، بهینه می‌شود.



شکل ۲۲- مقادیر بهینه‌شده تابع هدف به‌ازای beta مختلف و نسبت جرمی ۱ درصد



شکل ۲۳- مقادیر نسبت بهینه فرکانس TMDI به فرکانس سازه اصلی به‌ازای beta مختلف و نسبت جرمی ۱ درصد



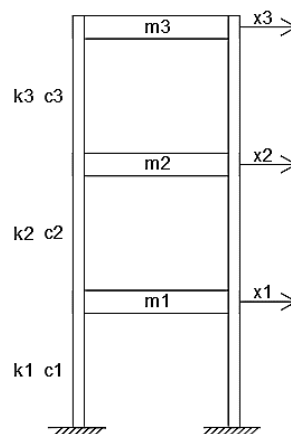
شکل ۲۴- مقادیر درصد میرایی بهینه TMDI به‌ازای beta مختلف و نسبت جرمی ۱ درصد

محتوای فرکانسی تحریک از نوع ارتعاش سفید در نظر گرفته شده است. سپس با توجه به تابع تبدیل، تابع هدف مناسب به‌دست آمده است.

$$\frac{\sigma_x^2 w_s^2}{s_0} = \int_{-\infty}^{\infty} |H_r|^2 dr \quad (47)$$

۶- مطالعه عددی برای بهینه‌سازی پارامترهای TMDI در

ترکیب با سازه‌های چند درجه آزادی تحت تحریک پایه یک سازه سه طبقه فولادی با سیستم باربر جانبی قاب خمشی را در نظر گرفته و جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی مورد نظر به بام سازه اضافه شده است. سپس پارامترهای جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی بهینه‌سازی شده‌اند. در شکل (۲۱) مدل جرم متمرکز سازه سه طبقه فولادی ارائه شده و در جدول (۳) مشخصات سازه‌ای برای سازه سه طبقه فولادی آورده شده است.

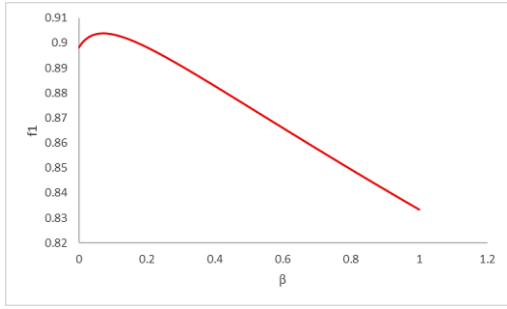


شکل ۲۱- مدل جرم متمرکز سازه فولادی با سیستم باربر جانبی قاب خمشی

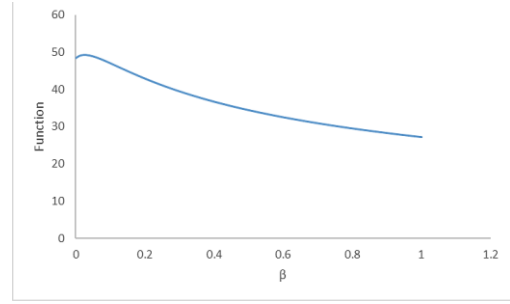
جدول ۳- مشخصات سازه فولادی با سیستم باربر جانبی قاب خمشی

X	M (ton)	K (kN/m)	C (Ns/m)
۱	۲۰	۳۵۰۰	۲۱۹۸۰
۲	۱۵	۲۵۰۰	۱۵۶۷۰
۳	۱۰	۱۰۰۰	۶۲۸۰

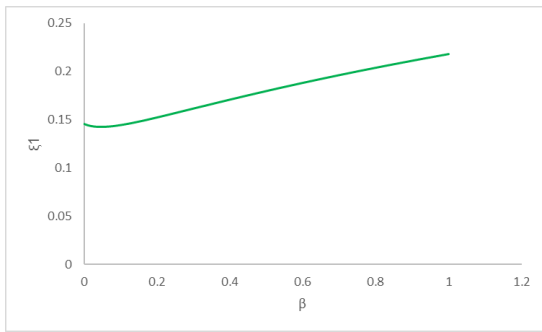
با توجه به اطلاعات داده‌شده در جدول (۳)، سازه فولادی تحلیل مودال شده و بر این اساس شکل‌های مودی سازه و فرکانس هر مد به‌دست آمده است. فرکانس مد اول، دوم و سوم سازه به ترتیب برابر با ۶/۳۷ rad/s، ۱۳/۰۲ rad/s و ۲۰/۵۷ rad/s است. همچنین باید گفت که جرم مد اول سازه



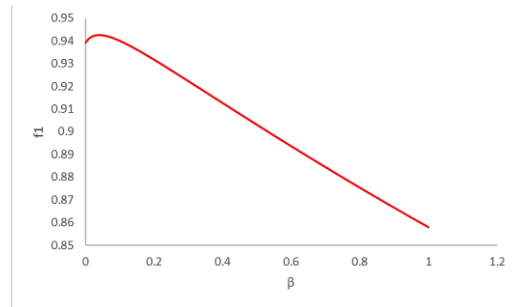
شکل ۲۹- مقادیر نسبت بهینه فرکانس TMDI به فرکانس سازه اصلی به ازای β مختلف و نسبت جرمی ۹ درصد



شکل ۲۵- مقادیر بهینه شده تابع هدف به ازای β مختلف و نسبت جرمی ۵ درصد



شکل ۳۰- مقادیر درصد میرایی بهینه TMDI به ازای β مختلف و نسبت جرمی ۹ درصد

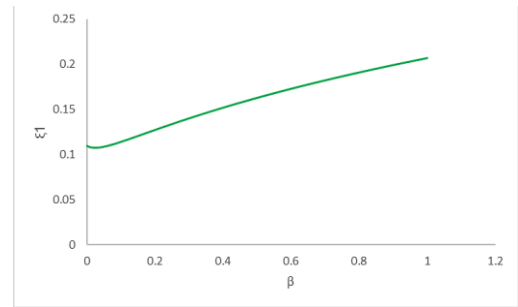


شکل ۲۶- مقادیر نسبت بهینه فرکانس TMDI به فرکانس سازه اصلی به ازای β مختلف و نسبت جرمی ۵ درصد

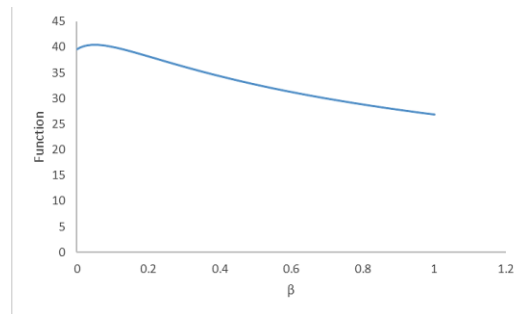
با توجه به شکل های (۲۲) الی (۳۰) می توان به موارد زیر اشاره کرد.

- اضافه کردن المان اینترتر به میراگرهای جرمی سنتی در سازه های چند درجه آزادی باعث افزایش راندمان این میراگرها می شود.
- با افزایش نسبت جرمی، از تأثیر المان اینترتر در بهبود رفتار جذب کننده ارتعاشات دینامیکی کاسته می شود. به عبارتی المان اینترتر در نسبت های جرمی کوچک تر برای میراگر جرمی، تأثیر بیشتری در کاهش پاسخ های سازه خواهد داشت.
- با افزایش β به ازای یک نسبت جرمی ثابت، ابتدا نسبت فرکانسی TMDI برای رسیدن به پاسخ بهینه افزایش پیدا کرده و سپس کاهش می یابد.
- با افزایش β به ازای یک نسبت جرمی ثابت، درصد میرایی TMDI برای رسیدن به پاسخ بهینه افزایش پیدا می کند.

در جدول (۴) مقایسه عددی بین مقادیر تابع هدف به ازای حالت های مختلف صورت گرفته است.



شکل ۲۷- مقادیر درصد میرایی بهینه TMDI به ازای β مختلف و نسبت جرمی ۵ درصد



شکل ۲۸- مقادیر بهینه شده تابع هدف به ازای β مختلف و نسبت جرمی ۹ درصد

جدول ۴- مقدار تابع هدف برای TMDI اضافه شده به سازه سه طبقه فولادی با سیستم باربر جانبی قاب خمشی

μ	β	مقدار تابع هدف	درصد کاهش تابع هدف نسبت به میراگر جرمی تنظیم شده
۰/۰۱	۰	۸۱/۵۹	۰
	۰/۰۵	۷۱/۵۰	۱۲
	۰/۱۰	۶۱/۹۹	۲۴
	۰/۱۵	۵۵/۶۲	۳۱
	۰/۲۰	۵۰/۹۷	۳۷
۰/۰۵	۰	۴۸/۴۳	۰
	۰/۰۵	۴۸/۹۱	-۱
	۰/۱۰	۴۷/۰۵	۲/۸
	۰/۱۵	۴۴/۹۳	۷/۲
	۰/۲۰	۴۲/۹۲	۱۱/۳
۰/۰۹	۰	۳۹/۵۹	۰
	۰/۰۵	۴۰/۴۷	-۲/۲
	۰/۱۰	۴۰/۰۴	-۱/۱
	۰/۱۵	۳۹/۱۸	۱
	۰/۲۰	۳۸/۱۹	۳/۵

۷- نتایج

نیاز به علت ایجاد نیروی مقاوم بسیار زیاد ناشی از المان اینترتر است.

- در سازه‌های چند درجه آزادی که المان اینترتر به سازه متصل است، نتایج نشان می‌دهد که تأثیر این المان تا نسبت جرمی برابر با چهار مناسب است. از این نسبت جرمی به بالاتر، راندمان جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی با سرعت کم‌تری افزایش می‌یابد. در این حالت نیاز به سختی و میرایی بیشتر برای جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی است.
- بررسی وضعیت جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی در حالت یک درجه آزادی برابر با وضعیت این سیستم در سازه‌های چند درجه آزادی است که المان اینترتر به زمین متصل شده است. عملاً در سازه‌های چند درجه آزادی که توسعه درجات آزادی بیشتر در پلان صورت گرفته و یا در سازه‌های کوتاه و میان‌مرتبه، امکان اتصال المان اینترتر به زمین وجود دارد.

- اضافه کردن اینترتر به میراگرهای جرمی سنتی برای افزایش راندمان این جذب‌کننده‌های ارتعاشات دینامیکی، باعث ایجاد یک نیروی مقاوم جدید در معادلات تعادل می‌شود. عملاً اضافه شدن این نیرو به دلیل وجود اینترتر بوده و باعث افزایش راندمان جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی می‌شود. می‌توان گفت که این نیروی مقاوم، نیروی بزرگی است. بنابراین بهتر است که به سازه منتقل نشده و به زمین منتقل شود.
- در صورت اتصال اینترتر به زمین، کارایی جذب‌کننده ارتعاشات دینامیکی نسبت به حالتی که اینترتر به سازه متصل است، به طور قابل توجهی بالاتر خواهد بود.
- در صورت اضافه کردن اینترتر به میراگرهای جرمی سنتی، نیاز به فنرهای با سختی بیشتر و کمک‌فنرها با میرایی بیشتر خواهد بود. این افزایش در سختی و میرایی مورد



- اضافه کردن المان اینرتر به میراگرهای جرمی تنظیم شده، باعث افزایش راندمان این گونه از میراگرها می شود.
- از نتایج به دست آمده در بهینه سازی پارامترهای TMDI می توان برای کاربردهای طراحی در واقعیت استفاده کرد. با داشتن مشخصات ذاتی هر سازه مثل اشکال مودی، فرکانس مدهای سازه، جرم مدهای سازه و استفاده از مقادیر بهینه شده پارامترها، می توان به ازای یک β و μ مشخص، مشخصات سختی فنر و میرایی کمک فنر جذب کننده ارتعاشات دینامیکی را به دست آورده و به سازه اضافه کرد. طبیعتاً انتظار می رود که طراح بتواند در کاربردهای عملی با جرم کوچک تری برای میراگر جرمی پاسخهای سازه در حوزه تغییر مکان را کاهش داده و سختی سازه را تنظیم کند.

- optimizer", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34(2), pp. 125-144.
- [16] Marian, L., and Giaralis, A. (2014), "Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 38, pp. 156-164.
- [17] Patsialis, D., Taflanidis, A.A., and Giaralis, A. (2021), "Tuned-mass-damper-inerter optimal design and performance assessment for multi-storey hysteretic buildings under seismic excitation", *Earthquake Engineering*, Vol. 21, pp. 1541-1576.
- [18] Su, N., Peng, S., and Xia, Y. (2022), "Wind-induced vibration absorption using inerter-based double tuned mass dampers on slender structures", *Journal of Building Engineering*, Vol. 58, pp. 104993.
- [19] Araz, O. (2022), "Optimization of tuned mass damper inerter for a high-rise building considering soil-structure interaction", *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 92, pp. 2951-2971.
- [20] Masnata, C., Di Matteo, A., Adam, C., and Pirrotta, A. (2020), "Smart structures through nontraditional design of tuned mass damper inerter for higher control of base isolated systems", *Mechanics Research Communications*, 105 (103513), pp. 1-7.
- [21] Rajana, K., Wang, Z., and Giaralis, A. (2023), "Optimal design and assessment of tuned mass damper inerter with nonlinear viscous damper in seismically excited multi-storey buildings", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 21(3), pp. 1509-1539.
- [22] Smith, M.C. (2002), "Synthesis of mechanical networks: the inerter", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 47(10), pp. 1648-1662.
- [23] Leung, A., and Zhang, H. (2009), "Particle swarm optimization of tuned mass dampers", *Engineering Structures*, Vol. 31, pp. 715-728.
- [1] Frahm, H. (1911), "Device for Damping Vibrations of Bodies", U.S. Patent, 989,958.
- [2] Ormondroyd, J., and Den Hartog, J.P. (1928), "The theory of the dynamic vibration absorber", *Transaction of the ASME*, Vol. 50, pp. 9-22.
- [3] Den Hartog, J.P., and fourth edition Mechanical, J.D.H., (1956), "Vibrations", McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.
- [4] Warburton, G.B. (1982), "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10(3), pp. 381-401.
- [5] Ayorinde, E.O., and Warburton, G.B. (1980), "Minimizing structural vibrations with absorbers", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 8(3), pp. 219-236.
- [6] Hoang, N., and Warnitchai, P. (2005), "Design of multiple tuned mass dampers by using a numerical optimizer", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34(2), pp. 125-144.
- [7] Leung, A.Y.T., and Zhang, H. (2009), "Particle swarm optimization of tuned mass dampers", *Engineering Structures*, Vol. 31(3), pp. 715-728.
- [8] Salvi, J., and Rizzi, E. (2011), "Minimax optimization of Tuned Mass Dampers under seismic excitation", In *EURODYN 2011: 8th International Conference on Structural Dynamics*, Leuven, Belgium, 4-6 July, pp. 1892-1899.
- [9] Bakre, S.V., and Jangid, R.S. (2007), "Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 14(3), pp. 448-470.
- [10] Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., and Chung, R.M. (1997), "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26(6), pp. 617-636.
- [11] Rana, R., and Soong, T.T. (1998), "Parametric study and simplified design of tuned mass dampers", *Engineering Structures*, Vol. 20(3), pp. 193-204.
- [12] Moutinho, C. (2012), "An alternative methodology for designing tuned mass dampers to reduce seismic vibrations in building structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 41(14), pp. 2059-2073.
- [13] Rüdinger, F. (2006), "Optimal vibration absorber with nonlinear viscous power law damping and white noise excitation", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 132(1), pp. 46-53.
- [14] Li, C., and Zhu, B. (2006), "Estimating double tuned mass dampers for structures under ground acceleration using a novel optimum criterion", *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 298(1-2), pp. 280-297.
- [15] Hoang, N., and Warnitchai, P. (2005), "Design of multiple tuned mass dampers by using a numerical