

Optimization approaches for structural control

Saeedeh Ghaemifard¹, Amin Ghannadiasl^{2*}

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ABSTRACT

In recent decades, the vibration control of the structures subject to some loads such as winds and earthquakes, etc., has been widely expressed. Vibration control, which intends to keep the behavior of a structure within a permissible limit, is utilized in several structures like bridges, tall buildings, wind turbines, foundations with additional vibrations in industry, and even ordinary structures. In this paper, some of the recent studies on optimal control of structures are reviewed. In other words, a comprehensive review of articles on the optimal design of different known control systems of each category i.e., Tuned Mass Dampers (Active, Passive, and Semi-active), Viscoelastic Dampers and Base Isolation (Passive and Semi-active), Fluid Viscous Dampers (Passive and Semi-active) and the active Tendons, with special attention to studies performed in the past decades, are presented. Also, due to simplicity, reliability, and maximum energy dissipation of the friction dampers as an energy dissipation device, especially for seismic amplification of the engineering structures, a brief overview of the optimization of the friction dampers is discussed.

ARTICLE INFO

Receive Date: 14 April 2022

Revise Date: 02 June 2022

Accept Date: 20 June 2022

Keywords:

*Structural control,
Optimization,
Meta-heuristic algorithms,
Friction damper,
Seismic hazard*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.336919.2773>

*Corresponding author: Amin Ghannadiasl.

Email address: aghannadiasl@uma.ac.ir

رویکردهای بهینه‌سازی برای کنترل سازه‌ها

سعیده قائمی فرد^۱، امین قنادی اصل^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

چکیده

کنترل ارتعاش سازه‌های مهندسی، تحت برخی از بارهای شدید همانند زلزله و بادهای شدید و ... در دهه‌های اخیر به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. موضوع کنترل ارتعاش، در بسیاری از سازه‌ها مانند ساختمان‌های بلند، پل‌ها، توربین‌های بادی، فنداسیون‌های دارای ارتعاش اضافی در صنعت برق و ... و حتی سازه‌های معمولی به منظور حفظ نمودن رفتار یک سازه در محدوده مجاز استفاده می‌شود. در این مقاله، برخی از مطالعات اخیر در زمینه کنترل بهینه سازه‌ها بررسی شده است. انواع سیستم‌های کنترل فعال، غیرفعال و نیمه‌فعال معرفی شدند و اهمیت بهینه‌سازی در هر مورد، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است؛ به عبارتی دیگر، سعی گردیده تا مروری جامع در بر مقالات مطرح شده در زمینه طراحی بهینه سیستم‌های کنترل شناخته شده مختلف هر دسته، به عنوان مثال از جمله میراگر جرمی تنظیم شونده (فعال، غیرفعال و نیمه‌فعال)، میراگر ویسکو الاستیک و جداسازی پایه (غیرفعال و نیمه‌فعال)، میراگر ویسکوز مایع (غیرفعال و نیمه‌فعال) و تاندون فعال با توجه ویژه به اولین مطالعات و همچنین مطالعات انجام شده در دهه‌های گذشته، انجام پذیرد ارائه شده است. همچنین با توجه به قابلیت میراگرهای اصطکاکی به دلیل سادگی، قابلیت اطمینان و حداکثر اتلاف انرژی، به عنوان یک دستگاه اتلاف انرژی، به ویژه برای تقویت لرزه‌ای سازه‌های مهندسی، ترجیح داده می‌شوند. که در پایان این مقاله، مروری مختصر بر بهینه‌سازی میراگرهای اصطکاکی انجام پذیرفته شده است.

کلمات کلیدی: کنترل سازه، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراابتکاری، میراگر اصطکاکی، خطر لرزه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.336919.2773	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.336919.2773	۱۴۰۲/۰۱/۳۱	۱۴۰۱/۰۳/۳۰	۱۴۰۱/۰۳/۳۰	۱۴۰۱/۰۳/۱۲	۱۴۰۱/۰۱/۲۵
امین قنادی اصل aghannadiasl@uma.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

عمل بهینه‌سازی به معنای دستیابی به بهترین نتیجه با توجه به یکسری بعضی شرایط خاص است، به همین منظور در مسائل مهندسی به دفعات زیاد، مواردی همانند کمینه کردن هزینه، کمترین مقدار اندازه، بالاترین پایداری و استقامت، بهترین ساختار و ... ملاحظه می‌شود که نیازمند مدل‌سازی ریاضی مسئله مذکور با ساختار یک مسئله بهینه‌یابی و به دست آوردن جواب آن با روش‌های مناسب است. در این راستا، بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری، یکی از روش‌های یافتن جواب بهینه مسئله می‌باشد. در بعضی از این الگوریتم‌ها، جست‌وجو، با ایجاد یک یا چند جواب تصادفی در محدوده مجاز متغیرهای مسئله، آغاز می‌شود که این مجموعه پاسخ‌ها در هر کدام از الگوریتم‌ها، نام‌هایی مثل جمعیت، کلونی، گروه و ... دارند. از گذشته تاکنون، انجمن مهندسی سازه، همواره به کاهش ارتعاشات سازه ناشی از بارهای جانبی همانند بار زلزله، باد، موج و ... برای ارائه یک عملکرد ایمن و بدون وقفه سازه، علاقه‌مند بوده است. در همین راستا، محققان بسیاری تلاش کرده‌اند تا با استفاده از روش‌های مختلفی، به این چالش موضوع بپردازند که در میان آنها، کنترل سازه، یکی از محبوب‌ترین و شناخته شده‌ترین رویکردها است. در کنترل سازه، پارامترهای دینامیکی سازه (مانند سختی، میرایی)، اغلب با افزودن دستگاه‌ها و سیستم‌های خارجی به منظور کاهش اثرات بارهای دینامیکی اعمالی بر المان‌های سازه، دچار تغییر می‌شوند؛ در نتیجه فرکانس طبیعی، اشکال مودی و مقادیر میرایی متناظر سازه به گونه‌ای دچار تغییر می‌شوند که اثر نیروهای ناشی از بارهای دینامیکی کاهش یابند؛ به عبارت دیگر، کنترل سازه به استفاده از ابزارهای مناسب در یک سازه با هدف بهبود رفتار آنها اشاره می‌کند. کنترل سازه‌ها به چهار دسته مختلف تقسیم می‌شود:

- کنترل فعال^۱ (AC)
- کنترل غیرفعال^۲ (PC)
- کنترل نیمه فعال^۳ (SA)
- کنترل ترکیبی^۴ (HC)

این سیستم‌های کنترل سازه به طور گسترده در سازه‌های مختلفی همچون ساختمان‌ها، پل‌ها، نیروگاه‌های برق، سکوها دریایی، بیمارستان‌ها، مدارس، کارخانه‌ها و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از نکاتی که در بحث کنترل سازه و بهره‌گیری از سیستم‌های کنترل باید مد نظر قرار داد می‌گیرد، این است که به منظور متعادل کردن هزینه‌های مربوط به پروژه‌ها، با توجه به دستگاه‌های کنترل اضافه‌شده، آنها باید به طور بهینه در سازه، طراحی و استقرار یابند تا کارایی سیستم را افزایش داده و هزینه‌های مربوطه را کاهش دهند. شکل ۱، روش‌های متداول کنترل سازه را نمایش می‌دهد. بنابراین، اغلب استفاده از دستگاه‌های کنترل با روش‌های بهینه‌سازی ترکیب می‌شود. به همین دلیل، اغلب با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی، عملکرد بهینه سیستم‌های کنترل سازه بررسی می‌گردد. سیستم‌های کنترل سازه، از روش‌های بهینه‌سازی برای این منظور، تعداد قابل توجهی از مطالعات بر روی کنترل بهینه سازه‌ها انجام شده است، که در ادامه توضیح داده خواهند شد. در ابتدا، دستگاه‌های کنترل غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال مختلف و ویژگی‌های آنها معرفی و با اهمیت بهینه‌سازی در هر مورد بحث و بررسی انجام شده است. در ابتدا، فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه و سپس کاربرد این الگوریتم‌ها بر روی نمونه‌هایی از سیستم‌های غیرفعال، نیمه‌فعال، فعال مورد بررسی قرار داده شده است؛ به عبارت دیگر، مروری جامع بر طراحی بهینه هر گروه، با توجه ویژه به اولین مطالعات و مطالعات انجام شده در دهه‌های گذشته، ارائه شده است. در ادامه نهایت، نتایج برخی از مطالعات تجربی در مورد بهینه‌سازی ابزارهای کنترلی مختلف به طور جامع مورد بحث قرار گرفته است. شکل ۱، روش‌های متداول کنترل سازه را نمایش می‌دهد. همچنین تعدادی از تحقیقاتی که در راستای بهینه‌سازی میراگر اصطکاکی و نیز کاربرد آنالیز حساسیت در زمینه بهینه‌سازی انواع کنترل‌های سازه با استفاده از میراگرهای مختلف انجام شده است، به مختصر توضیح داده شده‌اند.

¹ Active Control

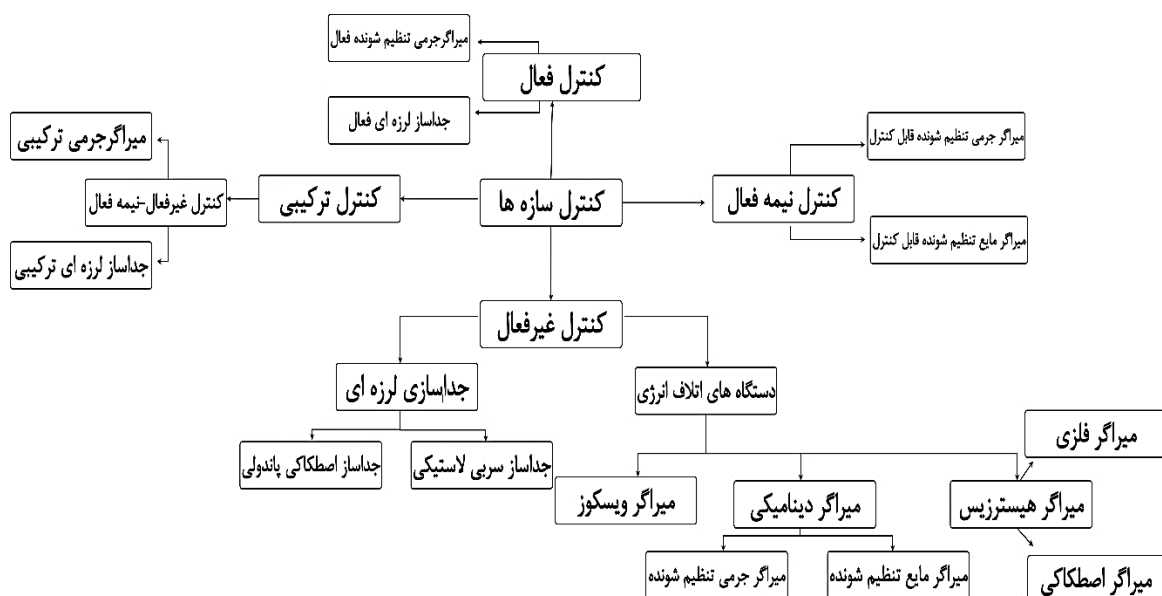
² Passive Control

³ Tuned mass damper

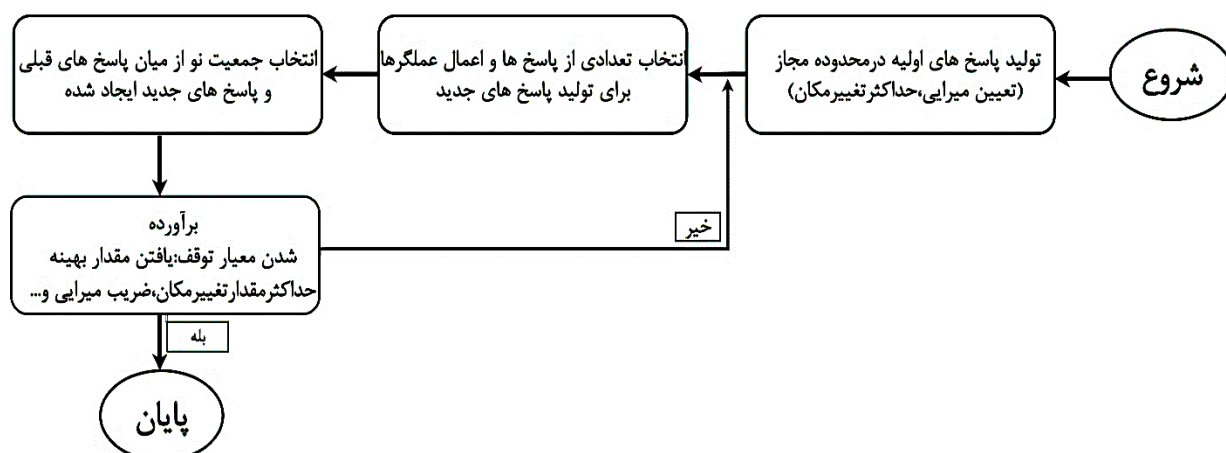
⁵ Tuned mass damper

۲- فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم‌های فراابتکاری

از گذشته تا کنون، روش‌های فراابتکاری در حل مسائل بهینه‌سازی در زمینه‌های مختلفی همانند بهینه‌سازی سازه‌ها، طراحی عامل‌های هوشمند، طراحی بهینه کنترل‌کننده برای فرآیندهای صنعتی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها دارای سرعت بالایی می‌باشند که جواب نزدیکی به مقدار بهینه را تولید می‌کنند. این الگوریتم‌ها به دو دسته اصلی جست‌وجوی محلی و جست‌وجوی مبتنی بر جمعیت تقسیم می‌شوند. تمامی الگوریتم‌های فراابتکاری، از پروسه نسبتاً یکسانی برای یافتن جواب بهینه استفاده می‌کنند. در بعضی از این الگوریتم‌ها فرآیند جست‌وجو، با ایجاد تعدادی جواب به صورت تصادفی در محدوده مجاز متغیرهای کنترل، شروع می‌گردد. سپس با بهره‌گیری از عملگرهایی، مجموعه‌ای از جواب‌های جدید ایجاد می‌شود که در ادامه فرآیند بهینه‌سازی، با روش‌های مختلف، پاسخ‌هایی از میان مجموعه پاسخ‌های قبلی و پاسخ‌های جدید انتخاب می‌گردد و این پروسه تا رسیدن به معیار توقف ادامه می‌یابد؛ یعنی می‌توان گفت که هر الگوریتم دو قسمت اساسی و مهم دارد که قسمت اول ساختار و روش عملگرها برای ایجاد پاسخ‌های جدید و قسمت دوم و مهم‌تر، مرحله انتخاب (چگونگی انتخاب تعدادی از جواب‌های فعلی برای اعمال عملگرها و تولید پاسخ‌های جدید) است که هوشمندی الگوریتم‌ها در این مرحله اعمال می‌شود. شکل ۲ فرآیند کلی عملیات بهینه‌سازی را نشان می‌دهد. پوشش کارآمد فضای جست‌وجو، یک موضوع مهم در برخورد با مسئله فراابتکاری است. از طرفی، ارزیابی تأثیر هر متغیر از یک مسئله بر پاسخ مدل (یعنی تابع هدف) با استفاده از روش‌های آنالیز حساسیت ممکن می‌باشد. چنین روش‌هایی، دانشی را در مورد رفتار تابع ارائه می‌دهند و برای هدایت فراابتکاری مناسب هستند. برای ارزیابی صحیح تأثیرات ابعاد، روش‌های معمول آنالیز حساسیت به ارزیابی‌های زیادی از تابع هدف نیاز دارند. آنالیز حساسیت طراحی سازه‌ها بخش بسیار مهمی از روش حل در بسیاری از مسائل مهندسی مانند بهینه‌سازی سازه‌ها، شناسایی پارامتری، پایش سلامت سازه، به روز رسانی مدل [۱]، قابلیت اطمینان سازه، تشخیص آسیب و ... است [۲].



شکل ۱: روش‌های متداول کنترل سازه.



شکل ۲: فرآیند کلی الگوریتم های فراابتکاری در بهینه سازی کنترل سازه.

۳- مروری بر بهینه سازی در کنترل سازه ها

۳-۱- کنترل غیر فعال

شناخته شده ترین و رایج ترین نوع کنترل، کنترل غیرفعال است که به حدود یک قرن پیش باز می گردد. در این روش، از دستگاه-هایی استفاده می شود که نیازی به منبع نیرو خارجی برای اعمال نیروی کنترل ندارند و با اتلاف انرژی تحمیلی خارجی از طریق دستگاه-های اضافه شده، عمل می کنند، استفاده می شود که این موضوع به نوبه خود، تقاضای تغییر شکل پلاستیک المان های سازه ای را کاهش می دهد. نمونه هایی از انواع دستگاه های کنترل غیرفعال، می توان به میراگر جرمی تنظیم شونده^۵ (TMD)، میراگر ویسکوز مایع^۶ (FVD)، میراگر ویسکو الاستیک^۷ (VE)، جداسازی پایه^۸ (BI) و ... اشاره کرد، اما باید توجه داشت که فقط محدود به این موارد نیستند. در تحقیقات بسیاری به عملکرد محدود این دستگاه ها اشاره شده است، اما با این حال محققان توانسته اند کارایی و عملکرد آنها را با ادغام روش های بهینه سازی افزایش دهند که منجر به کاربرد گسترده دستگاه های کنترل غیرفعال شده است [۳، ۴].

۳-۱-۱- میراگر جرمی تنظیم شونده

میراگر جرمی تنظیم شونده، برای اولین بار توسط فرام^۹ در سال ۱۹۰۹ میلادی برای کنترل حرکت غلتان و ارتعاش کشتی ها معرفی شد [۵]. دن هارتوگ^{۱۰} و اورموندروید^{۱۱}، یک نظریه جامعی در مورد عملکرد و کارایی محدود میراگرهای تنظیم شونده ارائه کردند [۶]. همچنین دن هارتوگ، پارامترهای طراحی (فرکانس و میرایی) TMDها را در سال ۱۹۳۴ بهینه سازی کرد. ضعف اصلی فرمولاسیون ارائه شده توسط دن هارتوگ، چشم پوشی از میرایی سازه ای بود که به ترکیب میرایی و اصلاح معادلات مذکور منجر شد [۷]. در ادامه به همین دلیل، محققان بسیاری، روابط تجربی را بر روی عملکرد TMDها [۸، ۹] و برخی از جداول طراحی ساده شده [۱۰، ۱۱] را ارائه نمودند. به طور کلی از سال ۱۹۳۴، مطالعات متعددی بر روی بهینه سازی TMDها انجام شده است. اخیرا با پیشرفت علم کامپیوتر و روش های مختلف بهینه سازی، استفاده از روش های فراابتکاری معمول تر و محبوب تر شده است [۱۲، ۱۳]. هادی و آرفیادی^{۱۲} برای نخستین بار، پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم شونده را با استفاده از الگوریتم ژنتیک^{۱۳} (GA) ارائه دادند یافتند [۱۴]. به طور مشابه، محققان از

⁵ Tuned mass damper

⁶ Fluid Viscose Damper

⁷ Viscoelastic Damper

⁸ Base Isolation

⁹ Frähm

¹⁰ Den Hartog

¹¹ Ormondroide

¹² Hadi and Arfiadi

¹³ Genetic Algorithm

الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلفی برای یافتن پارامترهای بهینه TMD استفاده کرده‌اند، که می‌توان به تعدادی از آنها از جمله ازدحام ذرات^{۱۴} (PSO) [۱۵]، جست‌وجوی هارمونی^{۱۵} (HS) [۱۶]، کلونی مورچه‌ها^{۱۶} (ACO) [۱۷]، کلونی زنبور مصنوعی^{۱۷} (ABC) [۱۸]، الگوریتم گرده افشانی گل^{۱۸} (FPA) [۱۹]، بهینه‌سازی اجسام در حال برخورد^{۱۹} (CBO) [۲۰] و ... اشاره کرد. علاوه بر این، محققان پارامتر-های بهینه TMD را با استفاده از مدل‌های سازه‌ای واقعی‌تر و بهبود یافته تعیین کرده‌اند. به عنوان مثال، بکتاش و همکاران^{۲۰} بر تعیین پارامترهای بهینه TMD با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه تمرکز کردند؛ آنها حداکثر دامنه تابع انتقال شتاب طبقه را به عنوان تابع هدف به حداقل رساندند [۲۱]. با توجه به جرم بزرگ میراگر و هزینه‌های اضافی، در اکثر مطالعات، جرم را به عنوان یک پارامتر از پیش تعیین شده در نظر می‌گیرند. برخی مطالعات نیز معیارهای بهینه‌سازی برای پارامترهای بهینه TMD را مقایسه و بهبود داده‌اند [۲۲]. هونگ نانلی و ژیانگ لینی^{۲۱}، یک روش مبتنی بر گرادیان برای بهینه‌سازی میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه^{۲۲} (MTMD) را ارائه کردند. نتایج آنها نشان داد که MTMDهای پیشنهادی طراحی شده در مقاله‌شان نسبت به MTMDهای سنتی بهینه توزیع یکنواخت موثرتر بودند سنتی بهینه، عملکرد موثرتری داشتند [۲۳]. یوسل و همکارانش^{۲۳}، پارامترهای بهینه TMD از طریق روش یادگیری ماشین تخمین زدند [۲۴]. با استفاده از الگوریتم HS نیگدلی و بکتاش^{۲۴}، با استفاده از الگوریتم HS، یک تکنیک بهینه‌سازی مبتنی بر فرکانس برای یافتن متغیرهای طراحی مانند جرم، دوره و نسبت میرایی TMD در بالای سازه ۱۰ طبقه و یک سازه ۴۰ طبقه را ارائه کردند [۲۵]. ژئو و نایفه^{۲۵}، یک رویکرد عددی کارآمد بر اساس روش گرادیان نزولی، برای به حداکثر رساندن حداقل میرایی حالت‌ها مودها در یک محدوده فرکانس تجویز شده برای سیستم‌های جرمی تنظیم‌شده چند درجه آزادی^{۲۶} (MDOF) ویسکوز پیشنهاد کردند. همچنین مثال‌هایی برای نشان دادن کارایی روش حداقل و پتانسیل میرایی TMD چند درجه آزاد توسط آنها ارائه شد [۲۶]. سهیلی و دوستان^{۲۷}، اثرات دستگاه TMD را بر پاسخ یک ساختمان ۴۰ طبقه شامل سه نوع خاک و شانزده رکورد ۱۶ زمین لرزه میدان دور بررسی کردند. آنها از روش ACO برای به دست آوردن بهترین تنظیمات برای مقادیر TMD استفاده کردند که تابع هدف آن، کاهش حداکثر تغییر مکان سازه با در نظر گرفتن اثرات متقابل ساختار خاک^{۲۸} (SSI) است بود [۲۷]. همچنین می‌توان اطلاعات بیشتر در مورد TMDها را در مراجع رفرنس‌های [۲۸، ۲۹] یافت. کیانی و واثقی امیری در تحقیقی، به بررسی اثر میرایی هیستریک آلیاژهای هوشمند بر عملکرد لرزه‌ای TMD پرداختند [۳۰]. شکل ۳، تعدادی از الگوریتم‌های فراابتکاری به کار رفته در بهینه‌سازی TMD در سال‌های مختلف را نشان می‌دهد.

¹⁴ Particle Swarm Optimization

¹⁵ Harmony Search

¹⁶ Ant Colony Optimization

¹⁷ Artificial Bee Colony

¹⁸ Flower Pollination Algorithm

¹⁹ Colliding Bodies Optimization

²⁰ Bekdas

²¹ Hong-NanLi and Xiang-LeiNi

²² Multiple tuned mass damper

²³ Melda Yucel

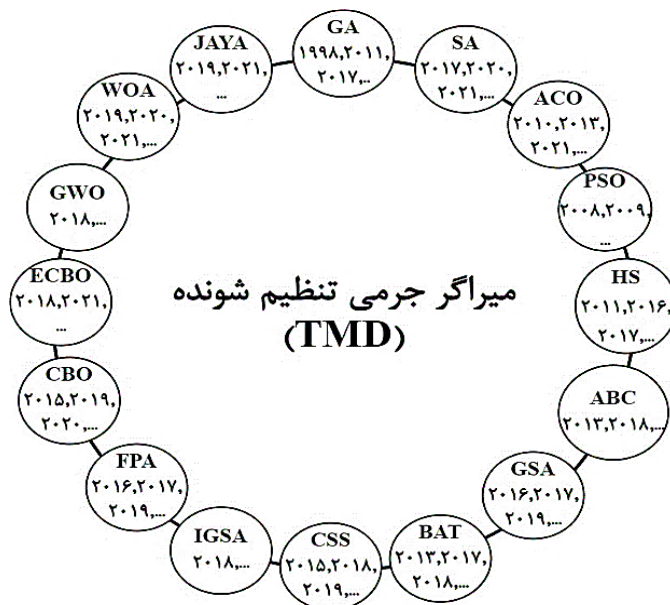
²⁴ Sinan Melih Nigdeli and Gebrail Bekdas

²⁵ Zuo and Nayfeh

²⁶ Multi-degree-of-freedom

²⁷ Saeed Soheili

²⁸ Soil structure interaction



شکل ۳: تعدادی از الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده در بهینه‌سازی TMD.

۳-۱-۲- میراگر ویسکوز مایع

میراگرهای ویسکوز مایع، یکی از پرکاربردترین دستگاه‌های کنترل غیرفعال در ساختمان‌ها هستند که قدمت آنها به بیش از یک قرن پیش برمی‌گردد؛ به طوریکه برای اولین بار در اواسط دهه ۱۸۰۰ در توپخانه کالیبر بزرگ به کار گرفته شدند. دی سیلوا^{۲۹}، الگوریتم گرادیان را برای طراحی بهینه میراگرها با تمرکز بر یافتن پارامترهای بهینه میراگر، اندازه میراگر و موقعیت آن در سازه توسعه داده است [۳۱]. گورگر و مولر^{۳۰}، یک مطالعه تحلیلی بر روی مکان بهینه یک FVD بر اساس معیارهای انرژی انجام دادند [۳۲]. تسوجی و ناکامورا^{۳۱}، ضرایب میرایی بهینه میراگرهای ویسکوز را محاسبه کردند و روشی را برای توزیع بهینه آنها در ساختمان‌های برشی برای یک مجموعه خاص از رکوردهای زلزله ارائه دادند [۳۳]. تاکواکی^{۳۲}، الگوریتم جست‌وجوی جهت دار را برای یافتن مکان بهینه FVD در ترکیب با TMD ارائه کرد [۳۴]. این الگوریتم شبیه به تندترین روش نزول است، اما رضایت‌پذیری میراگرهای بهینگی را تضمین می‌کند. عملکرد این الگوریتم همانند الگوریتم تندترین روش نزول اما با همگرایی معیارهای بهینگی بالاتری است. با فرض ارتفاع سقف ثابت، گارسیا^{۳۳}، یک الگوریتم جست‌وجوی متوالی ساده شده^{۳۴} (SSSA) را برای تعیین موقعیت بهینه و پارامترهای میراگر برای سازه چند درجه آزادی معرفی کرد [۳۵]. سینگ و مورشی^{۳۵}، اندازه و مکان بهینه میراگرهای غیرفعال مختلف را با توجه ویژه به میراگرهای FVD با استفاده از GA تعیین کردند [۳۶]. آنها دریافتند با وجود اینکه GA، یک ابزار بهینه‌سازی قدرتمند است، اشکال اصلی آن، هزینه محاسباتی بالا مرتبط با مدت زمان طولانی بهینه‌سازی است. مارتینز - رودریگو و رومرو^{۳۶}، یک مطالعه پارامتری را بر روی ترکیب از میراگرهای غیر خطی ویسکوز اجرا کردند و یک استراتژی ساده برای مقاوم‌سازی یک قاب خمشی ۶ طبقه مقاوم با استفاده از میراگرهای FVD برای یک رکورد زلزله خاص ارائه دادند [۳۷]. علاوه بر این، کریستوپولوس و فلیترولت^{۳۷} نیز روش جدیدی را برای محاسبه ضرایب میرایی میراگرهای FVD پیشنهاد دادند [۳۸]. تاکواکی^{۳۸} مکان بهینه میراگرهای غیرفعال، از جمله FVD را بر اساس یک رویکرد مبتنی بر گرادیان تعیین کرد [۳۹]. در دهه گذشته، محققان نیز از رویکردهای بهینه‌سازی جدید استفاده کرده و موارد خاص را مورد بررسی قرار داده‌اند. به عنوان مثال، آیدین^{۳۹} و

²⁹ DSilva

³⁰ Gurgoze and Muller

³¹ Tsuji and Nakamura

³² Takewaki

³³ Garcia

³⁴ Simplified sequential search algorithm

³⁵ Singh and Moreschi

³⁶ Martinez - Rodrigo and Romero

³⁷ Christopoulos and Filiatrault

³⁸ Takewaki

³⁹ Aydin

همکارانش توزیع بهینه میراگرهای FVD را در سازه‌هایی با طبقات نرم با استفاده از روش تندترین جست‌وجوی جهت با در نظر گرفتن نیروی برشی پایه به عنوان تابع هدف یافتند بررسی نمودند [۴۰]. به طور مشابه، توزیع بهینه میراگرهای ویسکوز در قاب‌های فولادی توسط استکانچی و باسیم^{۴۰}، با استفاده از GA با به حداقل رساندن ضرایب میرایی کل در سازه مورد بررسی قرار گرفت [۴۱]. توزیع بهینه بر اساس عملکرد لرزه‌ای آنها با استفاده از روش زمان دوام انتخاب شد. پارسیان‌لو و همکارانش^{۴۱} بر طراحی بهینه میراگرهای غیر خطی ویسکوز به منظور بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها تمرکز داشتند [۴۲]. آلتیری و همکارانش^{۴۲} طراحی بهینه میراگرهای غیر خطی ویسکوز را با استفاده از یک روش مبتنی بر قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار دادند [۴۳]. مانیاشی و تاکواکی^{۴۳}، اثر توزیع میراگرهای ویسکوز را بر پاسخ سازه‌های الاستیک - پلاستیک مورد مطالعه قرار داده و روشی را برای جایگذاری بهینه این میراگرها ارائه نموده‌اند [۴۴]. کاربرد دیگر میراگر FVD، کاهش آسیب ناشی از ارتعاش دو سازه مجاور است. خو و همکاران^{۴۴} از FVD برای کنترل ارتعاش دو سازه مجاور با ارتفاع‌های مختلف استفاده کردند [۴۵]. برخی محققان، مانند کندمیر مازانوغلو و مازانوغلو^{۴۵}، ظرفیت بهینه و محل FVD بین دو سازه مجاور را مورد ارزیابی قرار داده‌اند [۴۶]. محققان دیگر بر بهینه سازی FVD هنگامی که در ترکیب با دیگر میراگرها مورد استفاده قرار می‌گیرند، با هدف غلبه بر نقاط ضعف هر یک از میراگرها تمرکز کرده‌اند. لیو و همکارانش^{۴۶} پارامترهای بهینه FVD را برای سازه‌های جداسازی شده از پایه مورد بررسی قرار دادند [۴۷]. تحقیقات بسیار دیگری نیز در مورد تعیین پارامترهای بهینه، اندازه و محل FVD، از جمله [۴، ۳۹، ۴۸] انجام شده‌است. شکل ۴، تعدادی از پرکاربردترین الگوریتم‌های فراابتکاری به کار رفته در بهینه‌سازی FVD در سال‌های مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۴: تعدادی از الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده در بهینه‌سازی FVD.

۳-۱-۳- میراگر ویسکو الاستیک

دسته سوم میراگرهای غیرفعال که در این مقاله بررسی ارائه می‌شود، میراگرهای VE هستند. اولین کاربرد این میراگرها در دهه ۱۹۵۰، برای کنترل خستگی ناشی از ارتعاش بدنه هواپیما بود [۴۹]. VE برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ در برج‌های دو قلوئی مرکز تجارت جهانی (WTC) در شهر نیویورک به سازه‌های مهندسی عمران معرفی شدند، که در آن حدود ده هزار میراگر VE برای کنترل ارتعاشات ناشی از باد نصب شدند. به طور مشابه، در سال ۱۹۸۲ حدود ۲۶۰ میراگر VE در مرکز کلمبیا واقع در سیاتل، واشنگتن نصب شد [۵۰]. به طور کلی، میراگرهای VE در سازه‌هایی که انتظار تغییر شکل برشی انتظار می‌رود، مورد استفاده قرار می‌گیرند. ژانگ و سونگ^{۴۷}، یک روش بهینه‌سازی را برای به حداقل رساندن تعداد میراگرهای VE با یافتن محل بهینه ارائه کردند [۵۱]. آنها به این نتیجه رسیدند که روش پیشنهادی منجر به استفاده اقتصادی‌تر و بادوام‌تر از میراگرهای ویسکو الاستیک خواهد شد. هان و استیاوگسواران^{۴۸}، بر تعیین ضریب میرایی بهینه در میراگرهای VE تمرکز کرده بودند [۵۲]. آنها همچنین اثر توزیع این میراگرها را در طول ارتفاع ساختمان بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای سختی طبقه یکنواخت، میراگرها در صورتی که در طبقات پایین‌تر قرار گیرند، کارآمدتر خواهند بود. وو و همکارانش^{۴۹}، موقعیت بهینه میراگرهای VE را در یک قاب بدون تقارن سه بعدی مورد مطالعه قرار دادند [۵۳]. شوکلا و داتا^{۵۰}، محل بهینه میراگرهای VE را در سازه‌های MDOF با استفاده از روش جذر میانگین مربعات^{۵۱} (RMS)، جابه‌جایی نسبی طبقه (دریفت) به عنوان معیار

⁴⁰ Estekanchi and Basim

⁴¹ Parciannelo

⁴² Altieri

⁴³ Akehashi and Takewaki

⁴⁴ Xu

⁴⁵ KandemirMazanoglu and Mazanoglu

⁴⁶ Liu

⁴⁷ Zhang and Soong

⁴⁸ Hahn and Stithavageswaran

⁴⁹ Wu

⁵⁰ Shukla and Datta

⁵¹ Root Mean Squared

کنترل تعیین کردند [۵۴]. آنها دریافتند که تعداد و مکان بهینه میراگرهای VE به ماهیت نیروی تحریک و مدل‌سازی میراگرهای ویسکو الاستیک بستگی دارد. کیم و بنگ^{۵۲}، روشی را برای یافتن توزیع بهینه میراگرهای VE به منظور به حداقل رساندن پاسخ پیچشی سازه ارائه نموده‌اند [۵۵]. خو و همکاران^{۵۳} یک تحلیل بهینه‌سازی ترکیبی برای سازه‌های مجهز به VE انجام دادند و مکان و پارامترهای بهینه میراگرهای VE را یافتند [۵۶]. آنها همچنین یک تست میز لرزان از یک ساختمان سه طبقه با استفاده از یک مدل مقیاس‌بندی شده برای اهداف اعتبار سنجی انجام دادند. علاوه بر این، پارک و همکاران^{۵۴}، از یک روش مبتنی بر گرادیان برای یافتن پارامترهای بهینه این میراگرها استفاده کردند [۵۷]. به طور مشابه فوجیتا و همکاران^{۵۵} و پاولاک و لواندوفسکی^{۵۶} در میان محققان دیگر، مکان بهینه میراگرهای VE را در سازه‌ها تعیین کرده‌اند [۵۸، ۵۹]. ژو و همکارانش^{۵۷}، به بررسی میراگرهای اتصالی بهینه بین دو سازه موازی با استفاده از میراگرهای FVD و VE پرداخته و عملکرد آنها را از طریق کاهش پاسخ لرزه‌ای در سازه‌های مجاور مشابه است. لاگروس و همکارانش^{۵۸} از روش PSO برای یافتن مکان و پارامترهای بهینه میراگرهای VE استفاده کردند [۴۸]. شکل ۵، روند کلی بهینه‌سازی میراگر VE را نشان ارائه می‌دهد.

۳-۱-۴- جداسازی پایه

اولین کاربرد دستگاه‌های غیرفعال جداسازی پایه در دنیای مدرن به اواخر قرن نوزدهم باز می‌گردد که توسط جان میلن^{۵۹} مهندس معدن انگلیسی [۴۹]، انجام شد. اولین استفاده از BI در سال ۱۹۶۹ بود که برای حفاظت از یک مدرسه بتنی سه طبقه در اسکوپیه مقدونیه

⁵² Kim and Bang

⁵³ Xu

⁵⁴ Park

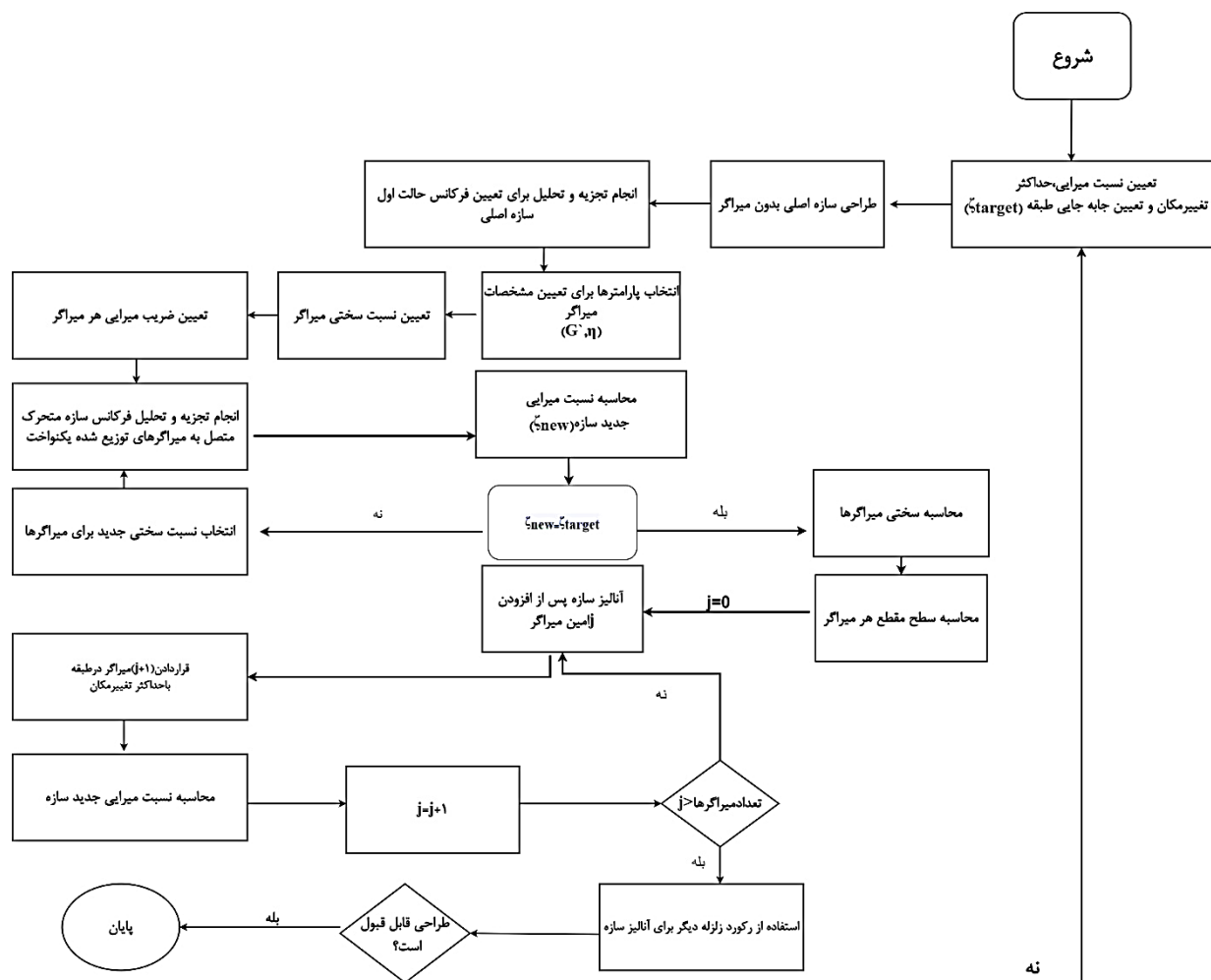
⁵⁵ Fujita

⁵⁶ Pawlak and Lewandowski

⁵⁷ Zhu

⁵⁸ Lagaros

⁵⁹ John Milne

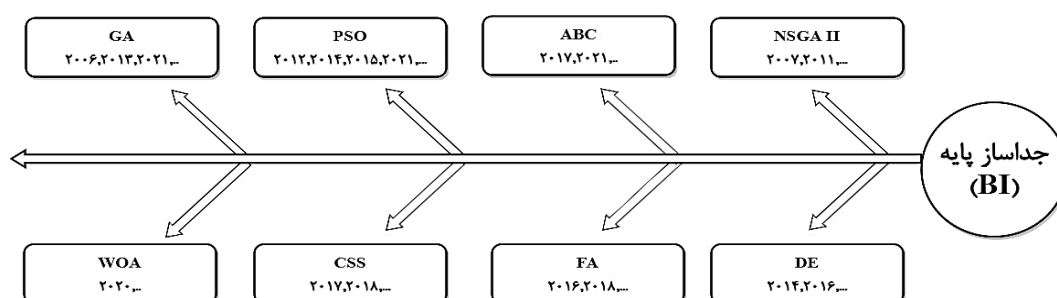


شکل ۵: روند بهینه‌سازی میراگر ویسکو الاستیک [61].

در برابر حوادث لرزه‌ای نصب شد [۶۲]. انواع مختلفی از BI شامل سیستم‌های الاستومری (لاستیک طبیعی)، جداساز لاستیکی سربی (LRB)، جداساز لغزشی پاندول اصطکاکی (FPS)، جدا ساز ارتجاعی-اصطکاکی (R - FBI)، جداساز لاستیکی با میرایی بالا (HDRB) و برخی از جداسازهای هیبریدی می‌باشند [۶۱]. جداسازها، سختی جانبی سیستم را کاهش می‌دهند که به دنبال آن، دوره تناوب طبیعی افزایش می‌یابد، به همین دلیل کارایی بیشتری دارند؛ در نتیجه، بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا عملکرد خود را با بهینه‌سازی تعداد، اندازه و موقعیت آنها در یک سازه افزایش دهند. برای این منظور، بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا به این مساله بپردازند و از روش‌های عددی و تحلیلی مختلف برای محاسبه خواص بهینه BI استفاده کنند که شامل الگوریتم معیار بهینه (OC) [۶۳]، روش بهینه‌سازی محدود (COP) [۶۴]، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) [۶۴]، داده کاوی [۶۵]، الگوریتم برنامه ریزی درجه دوم متوالی (SQP) [۶۶] و ... است. پورزینعلی و ظریف، یک مطالعه بهینه‌سازی چندمنظوره بر روی ساختمان‌های بلند جداسازی شده با استفاده از GA، با در نظر گرفتن هر دو رفتار خطی و غیر خطی برای دستگاه جداساز انجام دادند [۶۷]. آنها دریافتند که روش پیشنهادی برای به دست آوردن پارامترهای بهینه BI بر اساس به حداقل رساندن جابه‌جایی‌های سطح جداسازی شده پایه و طبقه به طور همزمان، کارآمد می‌باشد. نیگدلی و همکاران، پارامترهای بهینه BI را برای سازه‌های در معرض هر دو رکورد زلزله میدان نزدیک و دور با استفاده از روش HS تعیین کردند [۶۸]؛ در حالی که کوارنتا و همکاران مطالعه مشابهی را با استفاده از روش PSO ارائه دادند [۶۹]. سرچویک و همکارانش از سه الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری مختلف، یعنی الگوریتم جست و جوی کلاغ (CSA)، الگوریتم بهینه‌سازی وال (WOA) و بهینه‌ساز گرگ خاکستری (GWO)، برای یافتن پارامترهای بهینه جداساز در ساختمان‌های برشی جدا شده از پایه استفاده نموده‌اند [۷۰]. آنها دریافتند که نسبت

میرایی بالای جداساز لزوماً یک پارامتر بهینه برای جداسازی‌های پایه را تضمین نمی‌کند. زو و همکاران^{۶۰}، یک الگوریتم معیار بهینه را برای طراحی بهینه سازه‌های بتنی جداسازی شده پایه پیشنهاد کردند [۶۵]؛ در حالی که میترا و همکاران^{۶۱} مطالعه مشابهی را با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی الگو^{۶۲} (PSA) بر روی طراحی جداگرهای لرزه‌ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترها با هدف کاهش اثرات زلزله انجام دادند [۶۶]. ژانگ و شو^{۶۳} یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر عملکرد را برای کاهش تلفات سازه‌ای، غیر سازه‌ای و عایق، ناشی از خسارات زلزله در سازه‌های جداسازی شده از پایه را با انجام یک مطالعه پارامتری پیشنهاد کردند [۶۷]. موسی‌زاده و همکارانش^{۶۴} از GA چندمنظوره برای ارائه یک روش عملی برای طراحی بهینه LRB بر اساس هزینه اولیه و چرخه عمر سازه‌ها استفاده کردند بهره بردند و از زمان دوام برای ارزیابی عملکرد سازه‌های جداسازی شده از پایه استفاده کردند [۶۸]. طراحی بهینه BI برای کنترل ارتعاش سازه‌ای، اغلب با حداقل سازی RMS پاسخ‌های سازه‌ای کامل می‌شود و معمولاً واریانس پاسخ‌ها نادیده گرفته می‌شود؛ این امر می‌تواند منجر به حساسیت کل سیستم نسبت به پارامترهای ورودی گردد؛ بنابراین، روی و چاکرابورتی^{۶۵} از روش بهینه‌سازی استاندارد گرادیان - محور برای یافتن یک طراحی بهینه و قوی برای سیستم BI استفاده کردند [۶۹]. تا به این بخش از مقاله، چهار دستگاه کنترل غیرفعال معرفی و مروری کوتاه بر هر یک از آنها ارائه شد. شکل ۶، زمان ارائه و تعدد الگوریتم‌های فراابتکاری در سال‌های مختلف به منظور استفاده برای بهینه‌سازی BI را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که دستگاه‌های کنترل غیرفعال دیگری نیز وجود دارند که به طور گسترده برای بهبود عملکرد خود با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که شامل میراگر مایع تنظیم شده^{۶۶} (TLD) [۷۰، ۷۱]، میراگر فلزی تسلیم شونده^{۶۷} (MD) [۷۲، ۷۳]، میراگر اصطکاکی^{۶۸} (FD) [۷۴، ۷۵]، میراگر فولادی U شکل^{۶۹} [۷۶، ۷۷] می‌باشند. شکل ۶، زمان ارائه و تعدد الگوریتم‌های فراابتکاری سال‌های مختلف به منظور استفاده برای بهینه‌سازی BI را نشان می‌دهد.



شکل ۶: تعدادی از الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده در بهینه‌سازی سیستم BI.

۲-۳- کنترل فعال

بازده و برخی معایب نسبتاً کم دستگاه‌های سیستم‌های کنترل غیرفعال در کاهش اثرات لرزه‌ای منجر به تکامل مفهوم کنترل جدید، که به عنوان کنترل فعال شناخته می‌شود، شد گردید. مفهوم کنترل فعال، ابتدا توسط زوک و کلارک^{۷۰} در سال ۱۹۷۰ برای سازه‌های جنبان در نظر گرفته شد [۷۸]. اجزای مختلف کنترل فعال دارای اجزای مختلفی است که شامل سنسورها، الگوریتم کنترل برای

⁶⁰ Zou

⁶¹ Mishra

⁶² Pattern Search Algorithm

⁶³ Zhang and Shu

⁶⁴ Mousazadeh

⁶⁵ Roy and Chakraborty

⁶⁶ Tuned Liquid Damper

⁶⁷ Metallic Yield Damper

⁶⁸ Friction Damper

⁶⁹ U-shaped Steel Damper

⁷⁰ Zuk and Clark

محاسبه نیروی کنترل و محرک برای اعمال نیروی کنترل می‌باشد. بنابراین، فرآیند بهینه‌سازی نه تنها شامل پارامترهای میراگر و موقعیت آنها، بلکه انتخاب پارامترهای الگوریتم کنترل، موقعیت و تعداد سنسورها، توان محرک و ... می‌باشد. میراگر جرمی تنظیم شده فعال^{۷۱} (ATMD) و تاندون های فعال^{۷۲} (ATS) نمونه‌هایی از دستگاه‌های کنترل فعال می‌باشند [۷۹].

۱-۲-۳- میراگر جرمی با تنظیم فعال

ATMD یکی از شناخته شده‌ترین دستگاه‌های کنترل فعال است که برای اولین بار توسط لوند^{۷۳} معرفی شد [۸۰]. اولین مطالعه بهینه‌سازی بر روی کنترل فعال با استفاده از TMD توسط چانگ و سونگ^{۷۴} انجام شد [۸۱]. نیشیمورا^{۷۵}، یک راه‌حل فرم بسته از بازخورد بهینه و پارامترهای بهینه ATMD در دامنه فرکانس تحت یک تحریک هارمونیک ارائه داد دادند [۸۲]. همچنین او و همکارانش مطالعه خودشان را برای به دست آوردن و ارائه یک راه‌حل فرم بسته برای پارامترهای بهینه ATMD تحت انواع مختلف تحریک‌ها گسترش دادند؛ به عنوان مثال نویز سفید ثابت و ارتعاشات تصادفی غیر ثابت مانند زلزله [۸۳]. خو^{۷۶} یک مطالعه پارامتری انجام داد و روشی را برای انتخاب پارامترهای طراحی ATMD برای ساختمان‌های بلند تحت تحریک باد ارائه داد [۸۴]؛ نتایج نشان دادند که استفاده از سنسورهای شتاب، به جای سرعت و جابه‌جایی، می‌تواند پاسخ‌های سازه را به طور موثر کاهش دهد. علاوه بر این، وو و یانگ^{۷۷} از ATMD برای کنترل ارتعاشات یک برج انتقال تلویزیونی در نانجینگ چین به دلیل تحریک باد با استفاده از استراتژی‌های کنترل مود لغزشی پیوسته^{۷۸} (CSMC)، ∞H و مربعی گاوسی خطی^{۷۹} (LQG) بر اساس بازخوردهای شتاب استفاده کردند [۸۵].

لی و همکارانش^{۸۰} از ATMD برای کاهش پاسخ‌های انتقالی و چرخشی سازه‌های نامتقارن در معرض تحریک‌های زلزله استفاده کردند [۸۶]. آنها پارامترهای بهینه ATMD را با به حداقل رساندن واریانس‌های جابه‌جایی انتقالی و پیچشی با استفاده از روش جست‌و-جوی گرادیان به دست آوردند. اکثر روش‌های کنترل، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به عنوان ابزاری برای بهبود عملکرد خود استفاده می‌کنند؛ بنابراین، تلاش‌های زیادی برای استفاده از رویکردهای فراابتکاری برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل و محرک صورت گرفته‌است. جیانگ و عادل^{۸۱} یک الگوریتم عصبی - ژنتیک جدید را برای یافتن نیروی کنترل بهینه در هر گام زمانی پیشنهاد کردند [۸۷]. روش پیشنهادی، مشابه با روش بهینه‌سازی شبکه عصبی، نیاز به آموزش ندارد، که همین موضوع منجر به عملکرد بالای روش پیشنهادی شد. احوات و راماسوامی^{۸۲} روشی را برای طراحی بهینه کنترلر منطق فازی چند هدفه و پارامترهای بهینه ATMD بر اساس روش GA ارائه دادند [۸۸]. آنها جابه‌جایی و شتاب را به عنوان توابع هدف انتخاب کردند، زیرا این‌ها به ترتیب نشان دهنده ایمنی و راحتی ساکنان بودند. سلیمانی و خدادای^{۸۳} از یک کنترل کننده فازی - ژنتیکی تطبیقی چند منظوره برای کنترل فعال یک ساختمان معیار ۷۶ طبقه با استفاده از ATMD در معرض تحریک‌های لرزه‌ای و بادی استفاده کردند [۸۹]. نتایج، عملکرد موثری را از نظر فرونشاندن برش پایه و تغییر مکان-های بین طبقه‌ای نشان داد. کایابکر و همکارانش^{۸۴} از الگوریتم HS برای یافتن پارامترهای بهینه ATMD با استفاده از کنترلرهای PID^{۸۵} پیشنهادی استفاده کردند [۹۰]. آنها تمامی خواص مکانیکی میراگر، یعنی جرم، سختی و ضریب میرایی و پارامترهای کنترل کننده PID را به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفتند. امینی و همکارانش^{۸۶} از یک روش جدید برای تعیین نیروی کنترل بهینه ATMD برای یک سازه ۱۰ طبقه تحت حرکات زمین لرزه نزدیک به گسل با استفاده از سه الگوریتم PSO، تبدیل موجک گسسته^{۸۷} (DWT) و تنظیم کننده

⁷¹ Active tuned mass damper

⁷² Active tendon system

⁷³ Lund

⁷⁴ Chang and Soong

⁷⁵ Nishimura

⁷⁶ Xu

⁷⁷ Wu and Yang

⁷⁸ Continuous sliding mode control

⁷⁹ Linear-Quadratic-Gaussian

⁸⁰ Li

⁸¹ Jiang and Adeli

⁸² Ahlawat and Ramaswamy

⁸³ Soleymani and Khodadadi

⁸⁴ Kayabekir

⁸⁵ Proportional-Integral-Derivative

⁸⁶ Amini

⁸⁷ Discrete wavelet transformation

خطی درجه دوم^{۸۸} (LQR) استفاده کردند [۹۱]. شریعتمدار و رضوی^{۸۹} پارامترهای بهینه کنترل کننده منطق فازی^{۹۰} (FL) را با استفاده از روش PSO بررسی کردند [۹۲]. علاوه بر این، امینی و باقری^{۹۱} از الگوریتم رقابت استعماری برای محاسبه نیروی کنترل بهینه استفاده کردند [۹۳]. پورزینعلی و همکاران از ترکیبی از FL و GA برای کنترل فعال سازه‌های ساختمانی با هدف کاهش پاسخ استفاده کردند [۹۴]. آنها نسبت‌های جرم، فرکانس و میرایی ATMD را با استفاده از GA تعیین کردند؛ در حالی که همپوشانی پارامترها در توابع عضویت را با استفاده از الگوریتم کنترل FL پیدا کردند. آذر^{۹۲} و همکاران پارامترهای بهینه کنترلر ATMD را برای یک ساختمان برشی سه طبقه با استفاده از GA با در نظر گرفتن هر دو هدف واحد (پاسخ طبقه) و چند منظوره (انرژی کنترل و پاسخ طبقه) تعیین کردند [۹۵]. به طور کلی، برخی از الگوریتم‌های کنترل مختلف که برای کنترل فعال استفاده می‌شوند عبارتند از: LQR [۹۶]، LQG [۹۷]، کنترل بهینه آنی^{۹۳} [۹۸]، کنترل مد لغزشی^{۹۴} [۹۹]، تخصیص قطب^{۹۵} [۱۰۰]، H_2 [۱۰۱]، H_∞ [۱۰۲]، FL [۱۰۳]، کنترل کننده PID [۱۰۴]، [۱۰۵].

۲-۲-۳- تاندون فعال

یکی دیگر از دستگاه‌های کنترل فعال که به طور خلاصه در این مقاله ارائه می‌شود، سیستم ATS است. ATS توسط یوجین فریسینت^{۹۶} در سال ۱۹۶۰ معرفی شد [۱۰۶]. این سیستم کنترلی شامل کابل، سیستم سرومکانیزم هیدرولیکی^{۹۷} و یک قاب فولادی سفت است که محرک را برای اعمال نیروی کنترل به کابل متصل می‌کند [۱۱۲]. سوهاردجو و همکاران^{۹۸} روشی را برای کنترل فعال بهینه سازه‌ها تحت تحریک باد با هدف کاهش شتاب‌های طبقه پیشنهاد کردند [۱۰۷]. مطالعه آنها بر روی یک ساختمان ۶۰ طبقه با استفاده از سه سیستم کنترل مختلف از جمله ATS انجام شد. چانگ و لین^{۹۹} با در نظر گرفتن تاخیر زمانی در سیستم، یک الگوریتم کنترل بهینه را برای ATS معرفی کردند [۱۰۸]. لی و همکاران^{۱۰۰} با در نظر گرفتن پیچیدگی، گسستگی و غیرخطی بودن مسئله طراحی بهینه، مکان بهینه محرک در ATS را با استفاده از GA تعیین کرد [۱۰۹]. عملکرد روش پیشنهادی برای یک ساختمان برشی ۱۶ طبقه تحت رکورد زلزله تیانبجین^{۱۰۱} ارزیابی شد. عیسی و همکاران^{۱۰۲} عملکرد ATS را برای کاهش ارتعاش قاب‌ها مورد مطالعه قرار دادند و روشی را برای یافتن مکان بهینه تاندون‌ها پیشنهاد کردند [۱۱۰]. راثو و سیواسوبرامانیان^{۱۰۳} از الگوریتم جست‌وجوی محله هدایت شده با شروع چندگانه^{۱۰۴} (MSGNS) برای یافتن مکان بهینه تاندون‌های فعال استفاده کردند [۱۱۱]. در این روش بهینه‌سازی، چهار معیار طراحی مهم در کنترل فعال، یعنی جابه‌جایی اوج کنترل شده، نسبت جابه‌جایی اوج کنترل شده، شتاب مطلق اوج کنترل شده و نیروی کنترل متوسط، اجرا در نظر گرفته شده است. عملکرد الگوریتم MSGNS برای یک ساختمان برشی ۱۰ طبقه و سه دهانه تحت ۱۴ رکورد زلزله ارزیابی شد و نتایج الگوریتم پیشنهادی با سه روش فراابتکاری مانند تبرید شبیه سازی شده^{۱۰۵} (SA)، جست‌وجوی ممنوعه^{۱۰۶} (TS) و روش GA مقایسه شد. مطالعات بهینه‌سازی بسیاری نیز بر روی دیگر دستگاه‌های کنترل فعال انجام شده است که شامل مهاربند فعال^{۱۰۷} [۱۱۲]، میراگر ویسکوز فعال^{۱۰۸} [۱۱۳]، دستگاه‌های آیرودینامیک فعال^{۱۰۹} [۱۱۴]، جداگرهای فعال^{۱۱۰} [۱۱۵]، میراگر مایع تنظیم شده فعال^{۱۱۱} [۱۱۶] می‌باشد.

⁸⁸ Linear Quadratic Regulator

⁸⁹ Shariatmadar and Razavi

⁹⁰ Fuzzy logic

⁹¹ Amini and Bagheri

⁹² Ozer

⁹³ Instantaneous optimal control

⁹⁴ Sliding mode control

⁹⁵ Pole assignment

⁹⁶ Eugene Freyssinet

⁹⁷ Hydraulic Servomechanism System

⁹⁸ Suhardjo

⁹⁹ Chang and Lin

¹⁰⁰ Li

¹⁰¹ Tianjin earthquake record

¹⁰² Issa

¹⁰³ Rao and Sivasubramanian

¹⁰⁴ Multiple start guided neighborhood search

¹⁰⁵ Simulated Annealing

¹⁰⁶ Tabu Search

¹⁰⁷ Active Brace

¹⁰⁸ Active Viscous Damper

¹⁰⁹ Active Aerodynamical Devices

۳-۳- کنترل نیمه فعال

کنترل فعال نیز به دلیل برخی اشکالات به خوبی در میان مهندسان پذیرفته نشده است. یکی از بزرگترین کاستی‌های سیستم کنترل فعال این سیستم‌ها، وابستگی آن به یک منبع انرژی خارجی، مصرف بالای انرژی، مشکلات مربوط به قطع برق در طول زلزله و همچنین احتمال ناپایداری سازه به دلیل اعمال نیروی خارجی است [۷۹]. با ترکیب ویژگی‌های مختلف دستگاه‌های غیرفعال و فعال، مفهوم میراگرهای نیمه‌فعال برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ برای سیستم تعلیق خودرو معرفی شد [۱۱۷]. سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال از دستگاه‌های مختلفی مانند میراگر مایع تنظیم شده نیمه فعال^{۱۱۲}، میراگر اصطکاکی نیمه‌فعال^{۱۱۳}، میراگر سختی متغیر نیمه‌فعال^{۱۱۴}، میراگر مایع الکترونی^{۱۱۵} (ER)، میراگر سیال مغناطیسی^{۱۱۶} (MR) و ... استفاده می‌کنند.

۳-۳-۱- میراگر سیال مغناطیسی

میراگر سیال مغناطیسی به دلیل مزایای مرتبط با خواص آن، یکی از پر استفاده‌ترین دستگاه‌های کنترل نیمه‌فعال است. اولین مطالعات در مورد استفاده از میراگرهای نیمه فعال در مهندسی عمران توسط دایک و اسپنسر^{۱۱۷} [۱۱۸-۱۲۰] انجام شد. اولین ساختمانی که از میراگرهای MR برای کنترل ارتعاش استفاده کرد، موزه ملی نو آوری و علوم نو ظهور توکیو بود [۱۲۱]. تحقیق بر روی بهینه‌سازی میراگرهای MR با یافتن پارامترهای مدل‌سازی بهینه میراگر آغاز شده است. ژوو^{۱۱۸} و همکارانش از GA برای تعیین پارامترهای بهینه مدل بوک - ون^{۱۱۹} در میراگرهای سیال MR استفاده کرده‌اند [۱۲۲]. آذر^{۱۲۰} و همکاران دو الگوریتم فراابتکاری معروف، جست‌وجوی سیستم باردار^{۱۲۱} (CSS)، و GWO را ترکیب کردند و الگوریتم هیبریدی CSS-GWO را برای به دست آوردن مدل‌سازی بهینه پیشنهاد کردند [۱۲۳]. رزمان^{۱۲۲} و همکاران و یانگ^{۱۲۳} و همکاران تحلیل مطالعات مشابهی را با استفاده از PSO انجام دادند [۱۲۴، ۱۲۵]. شائو^{۱۲۴} و همکارانش از ACO برای تعیین پارامترهای بهینه برای مدل‌های بینگهام^{۱۲۵} و بوک - ون از میراگرهای MR استفاده کردند [۱۲۶]. ژئو^{۱۲۶} و همکاران یک روش جدید برای به دست آوردن پارامترهای بهینه میراگرهای MR ارائه دادند و عملکرد برتر مدل توسعه یافته را نسبت به GA و PSO نشان دادند [۱۲۷]. طلعت اهری و دوستان^{۱۲۷}، از الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی سیستم شارژ تطبیقی برای اصلاح روش بوک-ون برای میراگرهای MR استفاده کردند [۱۲۸]. زمان و سیکدر^{۱۲۸}، پارامترهای بهینه مدل بوک - ون را با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب اصلاح شده^{۱۲۹} تعیین کردند و رویکرد خود را با GA و روش تکاملی دیفرانسیلی^{۱۳۰} (DE) از نظر دقت و نرخ هم‌گرایی مقایسه کردند [۱۲۹]. لازم به ذکر است که مدل بوک - ون یکی از پر کاربردترین مدل‌های پسماند^{۱۳۱} است که کاربردهای زیادی در زمینه‌های دیگر مانند فیزیک، شیمی، مهندسی، علم و اقتصاد دارد؛ بنابراین، تعداد قابل توجهی از تحقیقات بر روی بهینه‌سازی پارامترهای آن، به ویژه با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند GA [۱۳۰، ۱۳۱]، PSO [۱۳۲، ۱۳۳]، جایا^{۱۳۲} [۱۳۴]، ABC [۱۳۵] و ... انجام شده است. اسپنسر^{۱۳۳} و همکاران بر روی یافتن پارامترهای بهینه یک میراگر MR، ۲۰ بیست تنی تمرکز کردند که توسط مدل اصلاح شده بوک - ون

¹¹⁰ Active Isolators

¹¹¹ Active Tuned Liquid Damper

¹¹² Semi-Active Tuned Liquid Damper

¹¹³ Semi-Active Friction Damper

¹¹⁴ Semi-Active Variable Stiffness Damper

¹¹⁵ Electrorheological Fluid Damper

¹¹⁶ Magnetorheological fluid damper

¹¹⁷ Dyke and Spencer

¹¹⁸ Xue

¹¹⁹ Bouc-Wen model

¹²⁰ Azar

¹²¹ Charged System Search

¹²² Razman

¹²³ Yang

¹²⁴ Xiao

¹²⁵ Bingham Model

¹²⁶ Zhu

¹²⁷ Talatahari

¹²⁸ Zaman And Sikder

¹²⁹ modified firefly algorithm

¹³⁰ differential evolution

¹³¹ Hysteresis Model

¹³² Jaya

¹³³ Spencer

بر اساس ولتاژ با استفاده از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات [۱۳۶] مدل‌سازی شده است. یانگ^{۱۳۴} و همکارانش از یک محرک جریان برای کاهش موثر زمان پاسخ میراگر MR با اتصال کوپل‌های میراگرها به صورت موازی استفاده کردند [۱۳۷]. گیوکلیا^{۱۳۵} و همکارانش پارامترهای بهینه میراگرهای MR را با استفاده از روش معکوس یافتند که در آن از مدل اصلاح شده بوک - ون بر اساس GA استفاده کردند [۱۳۸، ۱۳۹]. پارامترهای مدل بر اساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی شامل تاریخچه جریان، جابه‌جایی، سرعت و نیرو در مقادیر مختلف جریان کالیبره شدند. لی و شوو^{۱۳۶} از GA برای یافتن پارامترهای بهینه مدل بوک - ون اصلاح شده استفاده کردند [۱۴۰].

برخی محققان تلاش کرده‌اند تا مدل‌های بهبود یافته را برای میراگر MR معرفی کنند و مدل اصلاح شده جدید را با استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی کنند. کواک^{۱۳۷} و همکاران از مدل کوک^{۱۳۸} برای شبیه‌سازی رفتار میراگرهای MR استفاده کردند و از PSO برای تعیین پارامترهای میراگر استفاده کردند [۱۴۱]. علاوه بر این، او و همکارانش یک مدل نامتقارن بوک - ون را برای مدل‌سازی رفتار میراگرهای MR پیشنهاد کردند که بر خلاف مدل مرسوم قادر به دریافت رفتار پسماند نامتقارن بود [۱۴۲]. آنها در این مطالعه از GA برای تعیین پارامترهای بهینه مدل بوک - ون استفاده کردند. از طرف دیگر، یکی از مسائلی که در بهینه‌سازی میراگرهای MR مورد توجه قرار گرفته است، بهبود عملکرد کنترلر (ولتاژ اعمالی به میراگر) می‌باشد. به عنوان مثال، بهبود رفتار در کنترلر منطبق فازی به دلیل بهبود توابع عضویت، قوانین کنترل، ضرایب مقیاس و ... است. یان و زوو^{۱۳۹} روشی را بر اساس GA برای طراحی سازه‌های کنترل شده توسط میراگر MR با کنترل کننده FL پیشنهاد کردند [۱۴۳]. توابع هدف در مطالعه آنها، کاهش جابه‌جایی و شتاب سازه بودند. نتایج نشان داد که در پایان، نتیجه گرفتند که روش پیشنهادی، انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان بالایی دارد؛ به عبارتی دیگر، مزیت تحقیقشان این مطالعه ارائه یک همبستگی فازی بین کنترلر (پاسخ سازه‌ای) و خروجی (ولتاژ فرمان) بر اساس قوانین مناسب با استفاده از GA بود. عسکری و مرکزی^{۱۴۰} قوانین، توابع عضویت و ضریب مقیاس کنترل کننده FL را برای تعیین و مدیریت ولتاژ مورد نیاز بهینه برای میراگر MR در سازه‌های غیر خطی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی بازگشتی از طریق الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب^{۱۴۱} (NSGAI) بررسی کردند [۱۴۴]. توابع هدف مورد استفاده در این مطالعه آنها، شتاب اوج طبقه بدون بعد و شاخص‌های شکل‌پذیری بودند. همچنین، شوک و همکاران^{۱۴۲} از GA برای غلبه بر پیچیدگی‌های مربوط به ورودی کنترلر منطبق فازی و بهینه‌سازی کنترلر در ساختمان‌های مجهز به میراگر-های MR استفاده کردند [۱۴۵]. برای این منظور، آنها از ۴ تابع هدف، یعنی کاهش پیک ماکزیمم تغییر مکان، پیک ماکزیمم شتاب و RMS تغییر مکان بین طبقه‌ای و شتاب دو حالت اول استفاده کرده‌اند. علاوه بر این، او و همکاران، از میراگرهای MR و کنترل کننده FL برای کاهش پاسخ پیچشی در ساختمان‌ها تحت تحریک‌های زلزله استفاده کردند [۱۴۶]. آنها در این مطالعه از GA برای بهبود کنترلر FL استفاده کردند و نشان دادند که GA منجر به کاهش قابل توجهی در پاسخ‌ها می‌شود. علی و راماسوامی^{۱۴۳}، الگوریتم میکرو ژنتیک و PSO برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترلر منطبق فازی میراگر MR استفاده کردند. آنها دو سناریو را در مطالعه خود بررسی کردند: بهینه‌سازی پارامترهای کنترلر FL با قوانین فازی ثابت، و بهینه‌سازی پارامترهای کنترلر فازی و قوانین فازی در این مطالعه بررسی شدند [۱۴۷]. به طور کلی، بهینه‌سازی پارامترهای توابع عضویت و قوانین منطبق فازی با استفاده از ۱۰ متغیر انجام شد و در نهایت عملکرد کنترلر کننده‌ها در سازه‌های یک درجه آزادی و چند درجه آزادی، مورد ارزیابی قرار گرفت. هوانگ و همکاران^{۱۴۴} از مدل بوک - ون و کنترل کننده منطبق فازی برای کنترل نیمه‌فعال ساختمان‌های مجهز به میراگرهای MR استفاده کردند و از GA برای بهینه‌سازی قوانین منطبق فازی استفاده کردند [۱۴۸]. که نتایج، عملکرد بهبود یافته کنترلر را برای کاهش ارتعاشات لرزه‌ای نشان داد.

134 Yang

135 Giuclea

136 Li and Shu

137 Kwok

138 Kwok model

139 Yan and Zou

140 Askari and DavaieMarkazi

141 Improved non-dominated sorting genetic algorithm

142 Shook

143 Ali and Ramaswamy

144 Huang

بیطرف و همکاران^{۱۴۵} از رویکرد کنترل منطق فازی مبتنی بر GA چند منظوره برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترلر FL در میراگرهای MR استفاده کردند [۱۴۹]. بزرگوار و زهرایی^{۱۴۶}، یک روش کنترل نیمه‌فعال را با استفاده از میراگرهای MR از طریق یک کنترل‌کننده منطق فازی - عصبی پیشنهاد دادند که شامل یک سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی^{۱۴۷} (ANFIS) برای تعیین ولتاژ ورودی میراگر MR است [۱۵۰]. عضویت فازی و توابع خروجی ANFIS به طور همزمان با استفاده از GA تنظیم شدند. عملکرد لرزه-ای سیستم کنترل برای یک ساختمان برشی ۳ طبقه ارزیابی شد و با الگوریتم کنترل پیش بینی شبکه عصبی^{۱۴۸} (NNPC)، سیستم‌های کنترل بهینه کاهش یافته^{۱۴۹} (COC) و LQG مقایسه شد. اوز و هادی^{۱۵۰}، از کد GA دو دویی برای بهینه‌سازی میراگرهای MR برای کنترل ارتعاش سازه‌های مجاور استفاده کردند [۱۵۱]. کنترل‌کننده و میراگر به ترتیب با استفاده از FL و مدل اصلاح شده بوک - ون به صورت ایده‌آل در آمده‌اند. نتایج مطالعه آنها با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی LQR و H_2/LQG با هدف کاهش هزینه‌های کلی مربوط به میراگر مقایسه شد. رئیس و همکاران^{۱۵۱} یک جایگزین بهینه برای سیستم استنتاج فازی تاکاگی - سوگنو - کانگ معکوس^{۱۵۲} (TSK) برای یک میراگر MR پیشنهاد کردند، که در آن پارامترهای بهینه TSK را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ بهبود یافته^{۱۵۳} (IGOA) تعیین کردند [۱۵۲]. بخشی از مقالات به کاربرد شبکه عصبی و الگوریتم عصبی - فازی برای بهبود عملکرد کنترل‌کننده FL اختصاص دارد که در آن ورودی و خروجی کنترل‌کننده منطق فازی به ترتیب شتاب و ولتاژ اعمالی به میراگر MR هستند [۱۵۳]. هیراماتو و همکاران^{۱۵۴} از GA برای یافتن توابع لیاپانوف برای کنترل بهینه سازه‌ها استفاده کردند [۱۵۴]. هاشمی و همکارانش^{۱۵۵} از یک کنترل‌کننده مبتنی بر شبکه عصبی و موجک برای تعیین نیروی کنترل بهینه میراگر MR استفاده کردند [۱۵۵]. علاوه بر این، آنها در این مطالعه، از یک الگوریتم ژنتیک اصلاح شده و محلی برای بهینه‌سازی وزن شبکه، جهت گیری‌ها و توابع موجک استفاده کردند. کد پیشنهادی علاوه بر جست‌وجوی کلی ارائه شده توسط GA رایج، هم‌گرایی سریعی را ارائه می‌دهد. کاربرد دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در میراگرهای MR، مکان و تعداد بهینه سنسورها و فعال‌کننده‌ها می‌باشد. شی و همکارانش^{۱۵۶}، تکنیک‌های بهینه‌سازی متعددی را برای یافتن مکان بهینه میراگرهای MR در ساختمان‌های بلند به کار بردند [۱۵۶]. اوکی و همکاران^{۱۵۷} از GA و روش خطی سازی تصادفی استفاده کردند و نشان دادند که تعداد محدودی از میراگرهای MR می‌توانند پاسخ‌های سازه‌ای را به طور موثر کاهش دهند [۱۵۷].

بائو و همکارانش^{۱۵۸} یک الگوریتم مبتنی بر گرادینان ژنتیکی را برای تعیین مکان بهینه میراگر MR و بازخورد بهینه ارائه نموده‌اند [۱۵۸]. آنها از الگوریتم COC، برای یافتن ولتاژ خارجی مورد نیاز استفاده کردند. لی و همکارانش^{۱۵۹} یک رویکرد دو مرحله‌ای مبتنی بر GA را برای به دست آوردن جایگذاری بهینه میراگرهای MR در ساختمان‌های غیر خطی پیشنهاد کردند [۱۵۹]، که مرحله اول شامل تعیین نیروی کنترل فعال با استفاده از الگوریتم GA است که جنبه مهمی در کنترل نیمه‌فعال است. در مرحله بعد سپس جایگذاری بهینه میراگرهای MR در فاز دوم با استفاده از نتایج فاز اول تعیین شد. امینی و کرمی^{۱۶۰} از GA برای به حداقل رساندن توابع هدف، از جمله ماتریس‌های ضریب که موقعیت بهینه فعال‌کننده‌ها و نیروی کنترل را در کنترل نیمه‌فعال تعریف می‌کنند، استفاده کردند [۱۶۰]. الملیگی و حسن^{۱۶۱} تعداد بهینه میراگرهای MR در یک ساختمان برشی معیار ۳ طبقه و اثرات آن بر پاسخ جابه‌جایی و شتاب را با انجام یک مطالعه پارامتری مورد مطالعه قرار دادند [۱۶۱]. آنها دریافتند نتایج نشان داد که قرار دادن یک میراگر منجر به بهبود عملکرد می‌شود، در حالی که افزایش تعداد میراگرها عملکرد سازه را افزایش نمی‌دهد. بایا و همکارانش^{۱۶۲} یک طراحی بهینه و کارآمد را برای کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها با

¹⁴⁵ Bitaraf

¹⁴⁶ Bozorgvar and Zahrai

¹⁴⁷ Adaptive neuro-fuzzy inference system

¹⁴⁸ Neural network predictive control

¹⁴⁹ Clipped optimal control

¹⁵⁰ Uz and Hadi

¹⁵¹ Raeesi

¹⁵² Inverse Takagi-Sugeno-Kang system

¹⁵³ Improved grasshopper optimization algorithm

¹⁵⁴ Hiramoto

¹⁵⁵ Hashemi

¹⁵⁶ Shi

¹⁵⁷ OK

¹⁵⁸ Bao

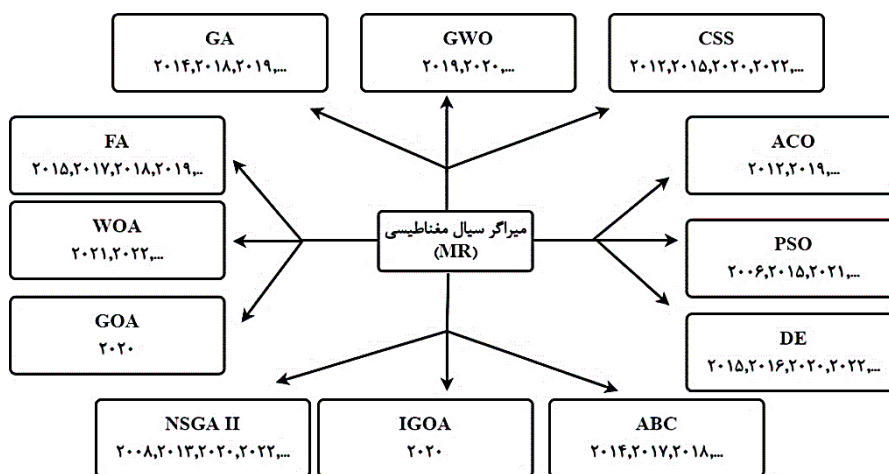
¹⁵⁹ Li

¹⁶⁰ Amini and Karami

¹⁶¹ Elmeligy and Hassan

¹⁶² Bhaiya

استفاده از تعداد محدودی از سنسورها و میراگرهای MR بر اساس GA توسعه دادند [۱۶۲]. ذبیحی سامانی و قانونی بقا^{۱۶۳}، یک کنترل-کننده FL را برای میراگرهای MR پیشنهاد کردند که بر اساس جست‌وجوی فاخته مبتنی بر موجک برای کاهش ارتعاش سازه‌ها تحت تحریک زلزله به منظور یافتن مکان بهینه و تعداد حسگرها و میراگرهای MR بود [۱۶۳]. الگوریتم پیشنهادی شامل DWT، کنترل‌کننده منطق فازی^{۱۶۴} (FLC)، مدل بوک - ون اصلاح شده و غیر خطی بودن هندسی می‌باشد. DWT برای به دست آوردن توزیع انرژی تحریک زلزله بر روی باندهای فرکانسی مورد استفاده قرار گرفت که به کنترلر FL منتقل شد. در این مطالعه رفتار غیر خطی میراگر MR با استفاده از مدل اصلاح شده بوک - ون مدل سازی شده است. فضائی حسین نژاد و کرم الدین، روشی را برای کنترل سازه سه طبقه غیرخطی محک مجهز به میراگر MR از الگوریتم GA بهره گرفتند [۱۶۴]. شکل ۷، زمان ارائه و تعدد الگوریتم‌های فراابتکاری در سال‌های مختلف به منظور استفاده برای بهینه سازی MR را نشان می‌دهد.



شکل ۷: تعدادی از الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده در بهینه‌سازی MR.

۲-۳-۳- میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه‌فعال

میراگر جرمی تنظیم شونده نیمه فعال برای اولین بار توسط هروات^{۱۶۵} و همکاران برای کاهش ارتعاشات ناشی از باد در ساختمان‌های بلند معرفی شد [۱۶۵]. ستاره^{۱۶۶} و همکارانش از یک دستگاه MR نیمه‌فعال درون یک میراگر TMD پاندولی استفاده کردند و یک میراگر جرمی تنظیم شده با آونگ نیمه فعال^{۱۶۷} (SAPTMD) را برای کنترل ارتعاشات بزرگ طبقات را در نظر گرفتند ایجاد کردند [۱۶۶]. که در مطالعه آنها، پارامترهای بهینه توسط یک نرم افزار بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مدل‌سازی تحلیلی با یک آزمون آزمایشی در مقیاس کامل و دستگاه غیرفعال معادل آن مقایسه شد. کاوه^{۱۶۸} و همکارانش به بررسی عملکرد TMD فعال به صورت موازی با یک میراگر MR بر روی رفتار ساختمان برشی ۱۰ طبقه تحت چهار رکورد زلزله پرداختند [۱۶۷]. آنها از کنترلر FL و زمین قلاب بهینه^{۱۶۹} با استفاده از CSS برای یافتن ولتاژ مورد نیاز بهینه استفاده کردند. لازم به ذکر است که در مطالعه آنها قوانین فازی بهینه شده بودند.

¹⁶³ Zabihi - Samani and Ghanooni - Bagha

¹⁶⁴ Fuzzy logic controller

¹⁶⁵ Hrovat

¹⁶⁶ Setareh

¹⁶⁷ Semi-Active Pendulum Tuned Mass Damper

¹⁶⁸ Kaveh

¹⁶⁹ Optimal Ground Hook

۴-۳-۳- جدا ساز پایه نیمه فعال

یکی از ابزارهای متداول نیمه فعال مورد استفاده برای کنترل سازه، جداساز نیمه فعال پایه است که از سیستم‌های کنترلی مختلف شامل میراگر اریفیس متغیر^{۱۷۰} [۱۶۸، ۱۶۹]، و میراگر اصطکاکی متغیر استفاده می‌کند [۱۷۰]. MR، همانطور که قبلاً ذکر شد، یکی دیگر از دستگاه‌های کنترل نیمه فعال است که می‌تواند به طور جدا گانه استفاده شود [۱۷۱-۱۷۳] یا در ترکیب با سیستم‌های جداسازی پایه [۱۷۴-۱۷۶] استفاده شود. کیم و روز که^{۱۷۱} از ترکیبی از میراگر MR و BI برای کنترل نیمه فعال سازه‌ها استفاده کردند [۱۷۷]. آنها ولتاژ ورودی برای میراگر MR را با استفاده از FL تعیین کردند و از GA برای یافتن قوانین کنترل فازی مناسب و بهینه‌سازی پارامترهای تابع عضویت استفاده کردند. علاوه بر این، آنها از ترکیبی از میراگر MR و میراگر FPS را برای کنترل نیمه فعال ساختمان‌ها استفاده کردند [۱۷۸] در این مطالعه که رفتار دینامیکی MR و FPS بر اساس منطق فازی - عصبی مدل سازی شده بود. در مطالعه آنها همچنین، یک کنترل کننده FL برای تنظیم MR استفاده شد، در حالی که پارامترهای بهینه توابع عضویت و یافتن قوانین منطق فازی مناسب با کمک GA چند منظوره تعیین شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی قادر به یافتن توابع عضویت بهینه و قوانین منطق فازی بوده و می‌تواند الگوریتم کنترل نیمه فعال را بهبود بخشد. اوزبولوت و همکاران^{۱۷۲}، از روش GA برای یافتن پارامترهای بهینه یک کنترل کننده عصبی فازی انطباقی^{۱۷۳} (AFNC) در سیستم‌های جداساز پایه نیمه فعال استفاده کردند [۱۷۹]. آنها از میراگرهای اصطکاکی متغیر برای توسعه دستگاه کنترل نیمه فعال استفاده کردند. اشکال این روش این بود که در اکثر کاربردها، شتاب اوج سازه را افزایش می‌داد که امری نامطلوب بود. در همین راستا، محبی و دادخواه^{۱۷۴}، طراحی بهینه جداسازی پایه نیمه فعال شامل جداسازی پایه خطی با میرایی کم و MR برای کنترل شتاب ساختمان و تغییر مکان پایه را مورد بررسی قرار دادند [۱۸۰]. علاوه بر این، آنها یک مطالعه بهینه‌سازی چند منظوره را با استفاده از GA با ترکیب خطی شتاب اوج و تغییر مکان پایه به عنوان توابع هدف انجام دادند و از الگوریتم‌های کنترل هماهنگ‌ساز (H₂/LQG) و COC برای تعیین ولتاژ ورودی MR استفاده کردند. نتایج نشان داد که اجرای جداسازی پایه و میراگر MR می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در شتاب و تغییر مکان پایه شود.

۵-۳-۳- سایر میراگر های نیمه فعال

یکی دیگر از دستگاه‌هایی که برای کاهش ارتعاش و کنترل سازه پیشنهاد شده است، میراگرهای نیمه فعال ویسکوز است که به منظور بهبود عملکرد میراگرهای ویسکوز مرسوم، ارائه شده‌اند [۱۸۱]. بخشی نژاد و محبی^{۱۷۵}، یک روش موثر برای طراحی میراگرهای ویسکوز مایع نیمه فعال برای کاهش ارتعاشات سازه‌های غیرخطی ارائه نموده‌اند [۱۸۲]. در مطالعه آنها، بهینه‌سازی تابع چند هدفی با هدف حداقل کردن تغییر مکان بین طبقه‌ای و شتاب مطلق به عنوان معیارهای ایمنی زندگی و راحتی، به ترتیب با استفاده از NSGA-III انجام شده است. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی قادر است به طور قابل توجهی پاسخ‌های سازه‌ای را کاهش دهد و ایمنی و راحتی بیشتری را برای ساکنان فراهم کند. میراگرهای هیدرولیکی نیمه فعال، نوع دیگری از دستگاه‌های کنترل سازه هستند. کاظمی بیدختی و همکاران^{۱۷۶}، از میراگرهای هیدرولیکی نیمه فعال به همراه کنترل کننده FL استفاده کردند [۱۸۳]. علاوه بر این، آنها در این مطالعه از GA برای یافتن پارامترهای بهینه کنترلر FL استفاده کردند.

۴-۳-۴- آنالیز حساسیت

لواسانی و همکاران^{۱۷۷} به بررسی واکنش یک سیستم TMD برای کاهش ارتعاش پیچشی یک پل معلق پرداختند. با استفاده از GA و آنالیز حساسیت، یک مطالعه پارامتری برای بهینه‌سازی پارامترهای TMD، یعنی نسبت جرم، شعاع چرخش، فرکانس تنظیم و نسبت میرایی با

¹⁷⁰ Variable Orifice damper

¹⁷¹ Kim and Roschke

¹⁷² Ozbulut

¹⁷³ Adaptive fuzzy neural controller

¹⁷⁴ Mohebbi and Dadkhah

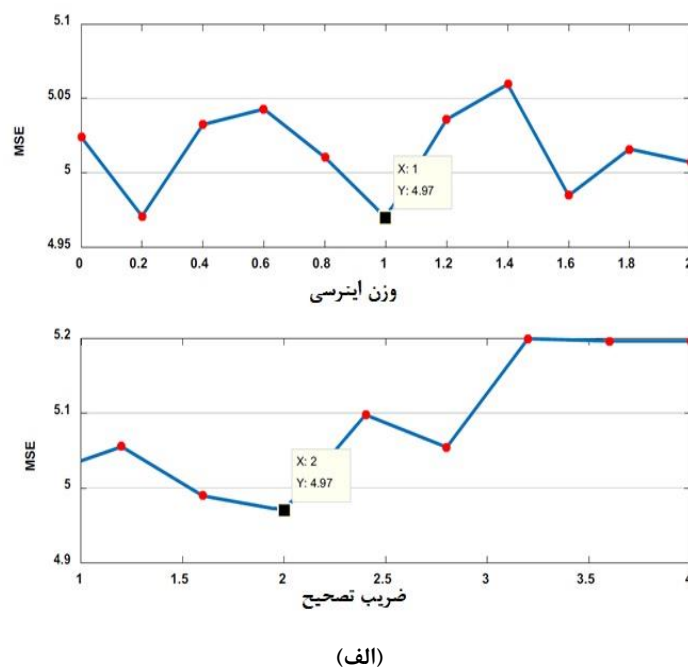
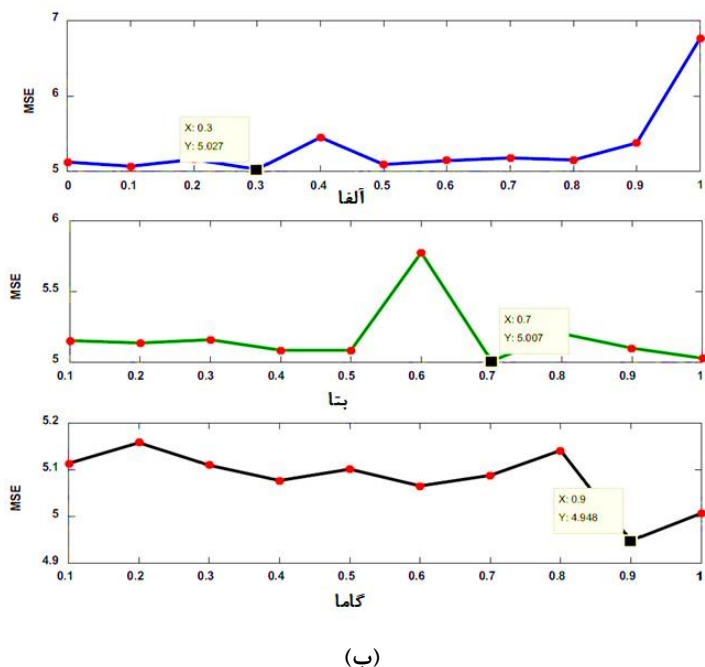
¹⁷⁵ Bakhshezhad and Mohebbi

¹⁷⁶ Kazemi Bidokhti

¹⁷⁷ Lavassani

توجه به حداکثر کاهش حداکثر پاسخ انجام دادند که در نهایت، محدوده بهینه هر پارامتر که بتواند بهترین عملکرد را داشته باشد و هم توجیه عملیاتی و هم اقتصادی را برای اجرای پروژه ارائه دهد، پیشنهاد نمودند [۱۸۴]. طالب و همکارانش^{۱۷۸} با استفاده از منطق فازی و الگوریتم کرم شب تاب پیشرفته^{۱۷۹} (AFA) و نیز آنالیز حساسیت، عملکرد سیستم تعلیق نیمه فعال با استفاده از دمپر مغناطیسی رئولوژیکی را مورد بررسی قرار داد. با در نظر گرفتن شتاب بدنه، جابجایی بدنه و شتاب لاستیک به عنوان معیارهای ارزیابی، کنترلر FL-AFA پیشنهادی در مقایسه با کنترلر کننده FL-FA، کنترل کننده FL-PSO، کنترل کننده FL و سیستم غیرفعال شبیه سازی شد که نتایج نشان داد

در مقایسه با کنترلر کننده FL-FA، کنترلر کننده FL-PSO، کنترلر کننده FL و سیستم‌های غیرفعال، از نظر شتاب فنر و پاسخ جابه‌جایی فنر با ۵۱٫۴٪ و ۵۲٫۳٪ بهبود را به همراه دارد [۱۸۵]. شکل ۸، نتایج حاصل از آنالیز حساسیت برای پارامترهای الگوریتم PSO و FA/AFA را به ترتیب در بخش‌های الف و ب نشان می‌دهد. ژيامین و دوستان^{۱۸۰} تخمین پارامتر مدل بوک-ون و تحلیل حساسیت مدل هیستریزس میراگر MR با استفاده از الگوریتم ژنتیک اصلاح شده را بررسی نمودند که شکل ۹ تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترها در مدل بوک-ون را نشان می‌دهد [۱۸۶].



شکل ۸: الف- تجزیه و تحلیل مطالعه حساسیت برای پارامترهای PSO، ب- تجزیه و تحلیل مطالعه حساسیت برای پارامترهای FA/AFA [185].

گرکو و همکاران^{۱۸۱} بهینه‌سازی چند هدفه از یک میراگر جرمی تنظیم‌شده با هدف کنترل ارتعاشات ناشی از سازه‌های ساختمانی تحت زلزله‌های با شدت کم و کاهش هزینه، با استفاده از الگوریتم ژنتیک نامغلوب و آنالیز حساسیت را بررسی کردند [۱۸۷]. جیان ژونگ و دوستان^{۱۸۲} تحلیل حساسیت مبتنی بر ریسک و بهینه‌سازی استراتژی کاهش لرزه‌ای با استفاده از الگوریتم مدل جایگزین فرآیند گاوسی و روش‌های آنالیز حساسیت GPSM و GSA را برای میراگر FVD انجام دادند. نتایج نشان داد روش مبتنی بر GPSM برای تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی دستگاه‌های جداسازی لرزه‌ای مؤثر و کارآمد است [۱۸۸].

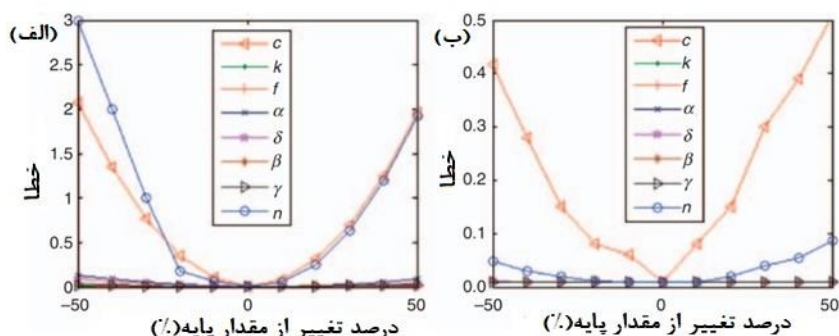
178 Mat Hussin Ab Talib

179 Advanced Firefly Algorithm

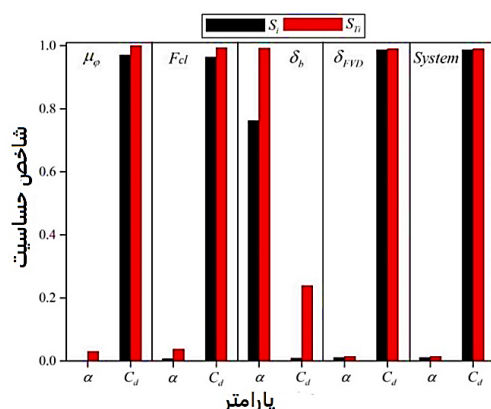
180 XIAOMIN

181 Greco

182 Jian Zhong



شکل ۹: تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترها در مدل بوک-ون: الف- تجزیه و تحلیل حساسیت محلی، ب- تجزیه و تحلیل حساسیت جهانی [۱۸۶].



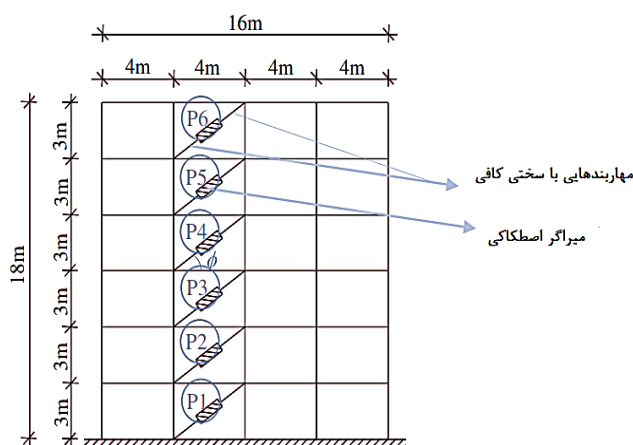
شکل ۱۰: تحلیل حساسیت جهانی خطر لرزه ای $\mu_{\phi 1}$ ، F_{c1} ، δ_b ، δ_{FVD} و سیستم نسبت به ضریب میرایی C_d و توان [188].

شکل ۱۰، شاخص آنالیز حساسیت سیستم مجهز به میراگر FVD را نسبت به ضریب میرایی نمایش می دهد. بهینه سازی توپولوژی حسگر پیزوالکتریک متصل به یک سازه پوسته نازک برای بهبود عملکرد کنترل فعال برای کاهش پاسخ دینامیکی تحت تحریک های گذرا، توسط شیائوپنگ ژانگ و ژان کانگ^{۱۸۳} با بهره گیری از الگوریتم کنترل بازخورد سرعت بهره ثابت (CGVF) و آنالیز حساسیت متغیرالحاقی با استفاده از یک الگوریتم برنامه ریزی ریاضی مبتنی بر گرادیان بررسی شد [۱۸۹].

۴- بهینه سازی میراگرهای اصطکاکی

در بخش های قبل، مروری مختصر به بهینه سازی روش های کنترل سازه انجام شد. در این بخش به بررسی تعدادی از مقالات در زمینه بهینه سازی میراگرهای اصطکاکی در سازه ها به طور جامع تر پرداخته می شود. شکل ۷، روند بهینه سازی میراگرهای اصطکاکی را نمایش می دهد. در جدول ۱، مروری مختصر بر تعدادی از تحقیقات انجام شده در زمینه بهینه سازی میراگرهای اصطکاکی آمده است. استفاده از میراگرهای اصطکاکی به عنوان دستگاه های سیستم اتلاف انرژی غیرفعال، پاسخ دینامیکی سازه ای را که در معرض حرکات زمین زلزله قرار می گیرد به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. با این حال، تعیین پارامترهای هر میراگر و همچنین بهترین محل قرارگیری این دستگاه ها همچنان دشوار است. بنابراین، در مقاله میگل و همکاران [۱۹۰]، بهینه سازی طراحی استوار میراگرهای اصطکاکی برای کنترل پاسخ ساختمان برشی ۶ طبقه در برابر زلزله پیشنهاد شده است. شکل ۱۱، ساختمان برشی شش طبقه مورد نظر در تحقیق آنها را نشان می دهد. برای انجام بهینه سازی استوار چنین سیستمی با استفاده از الگوریتم NSGA-II، دو تابع هدف، میانگین و واریانس حداکثر جابه جایی را به طور همزمان در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی تنها با سه میراگر قادر به کاهش میانگین حداکثر جابجایی

تقریباً ۷۰ درصد و واریانس حداکثر جابجایی تقریباً ۹۹ درصد است. جدول ۲، مقایسه بین نتایج سازه بدون میراگر اصطکاکی، طراحی معین و طراحی استوار را بیان می‌کند.



شکل ۱۱: ساختمان برشی شش طبقه و مکان‌های احتمالی میراگرهای اصطکاکی [۱۹۰].

همچنین او و همکارانش [۱۹۱] در تحقیقی دیگر، با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب، به تعیین نیروهای اصطکاک بهینه هر میراگر و همچنین بهترین موقعیت آنها در دو پل عابر پرداختند. در این مطالعه آنها، تابع هزینه به حداقل رساندن حداکثر شتاب سازه بوده، در حالی که نیروها و موقعیت میراگرهای اصطکاکی متغیرهای طراحی بودند. نتایج نشان داد که حداکثر شتاب بیش از ۹۵ درصد برای پل عابر پیاده خرپایی وارن^{۱۸۴}، با سه میراگر اصطکاکی، و بیش از ۹۲ درصد برای پل عابر خرپایی پرات^{۱۸۵}، با تنها دو میراگر اصطکاکی کاهش یافت. اشکال ۱۲ و ۱۳ به ترتیب مکان‌های احتمالی میراگرهای اصطکاکی پل عابر خرپایی وارن و پرات و مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی این دو پل با استفاده از الگوریتم کرم شب تاب را نشان می‌دهند.

¹⁸⁴ Warren Truss Footbridge

¹⁸⁵ Pratt Truss Footbridge

جدول ۱: مروری مختصر بر تعدادی از کارهای انجام شده در زمینه بهینه‌سازی میراگرهای اصطکاکی.

نویسنده(گان)	کار انجام شده
کسابا و اندرسون ^{۱۸۶}	بهینه‌سازی وزن میراگر اصطکاکی، شبیه سازی [۱۹۲]
سانلیتورک و همکاران ^{۱۸۷}	بهینه‌سازی میراگر اصطکاکی: شبیه سازی تست‌های رنگین کمان [۱۹۳]
پانینگ و همکاران ^{۱۸۸}	بهینه‌سازی طراحی میراگر اصطکاکی بین لایه ای [۱۹۴]
شائوچان بی و ویلیام ^{۱۸۹}	بهینه‌سازی میراگر اصطکاکی پیچشی [۱۹۵]
شوانگ زو و همکاران ^{۱۹۰}	بهینه‌سازی طراحی میراگر اصطکاکی با مکانیزم کوپلینگ برای پاسخ لرزه‌ای سازه جداسازی شده از پایه [۱۹۶]
پرزا و همکاران ^{۱۹۱}	روش بهینه‌سازی همزمان استوار میراگر اصطکاکی برای کنترل ارتعاش غیرفعال در یک ساختمان کلمبیایی [۱۹۷]
پرزا و همکاران	بهینه‌سازی مکان و نیروهای میراگرهای اصطکاکی [۱۹۸]
میگل و همکاران ^{۱۹۲}	روش شناسی بهینه‌سازی همزمان مکان و پارامترهای میراگرهای اصطکاکی در حوزه فرکانس [۱۹۹]
ندا نبید و همکاران ^{۱۹۳}	بهینه‌سازی تطبیقی برای طراحی لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد میراگرهای اصطکاکی [۲۰۰]
قربانی و رفوئی ^{۱۹۴}	طراحی میراگر اصطکاکی بار لغزشی دوگانه جدید برای کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها [۲۰۱]

جدول ۲: مقایسه بین نتایج سازه کنترل نشده (بدون میراگر اصطکاکی)، طراحی معین و طراحی استوار [۱۹۰].

موقعیت بهینه (بردار \bar{P})	نیروی اصطکاکی بهینه (F_{fn} کیلونیوتن)	میانگین بیشترین جابه جایی (متر)	واریانس حداکثر جابه جایی (مترمربع)
-----	-----	۰/۳۵۳۵	۵۳۸/۴۵ E-۵
{ ۱ ۱ ۱ ۰ ۰ ۰ }	۲۹۶۴/۷؛ ۲۱۱۷/۹؛ ۲۴۸۲/۱	۰/۱۱۱۵	۱۰/۶۰ E-۵
{ ۱ ۱ ۱ ۰ ۰ ۰ }	۲۷۴۰/۱؛ ۲۸۴۸/۸؛ ۱۵۷۰/۳	۰/۱۰۷۷	۶/۶۶ E-۵

¹⁸⁶ Csaba and Andersson

¹⁸⁷ Sanliturk

¹⁸⁸ Panning

¹⁸⁹ Ye and Williams

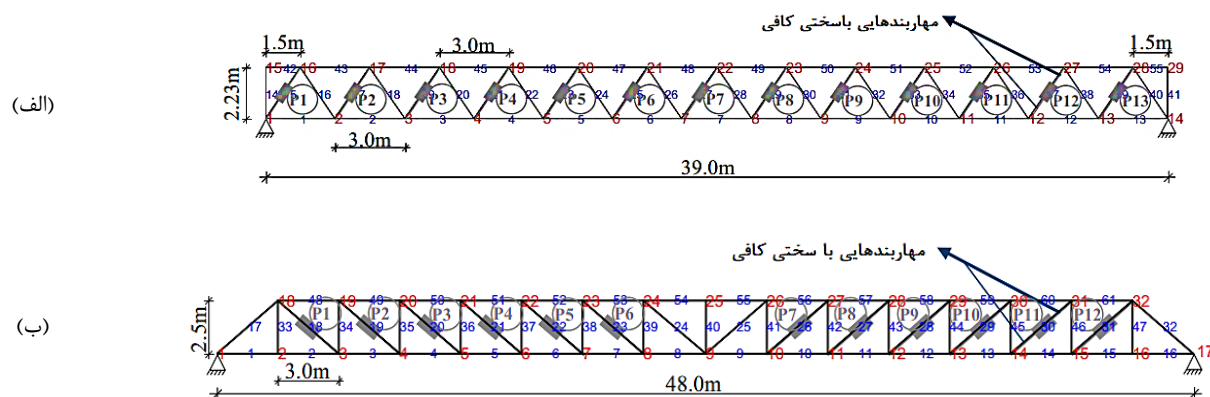
¹⁹⁰ Zou

¹⁹¹ Sergio Pastor Ontiveros-Pérez

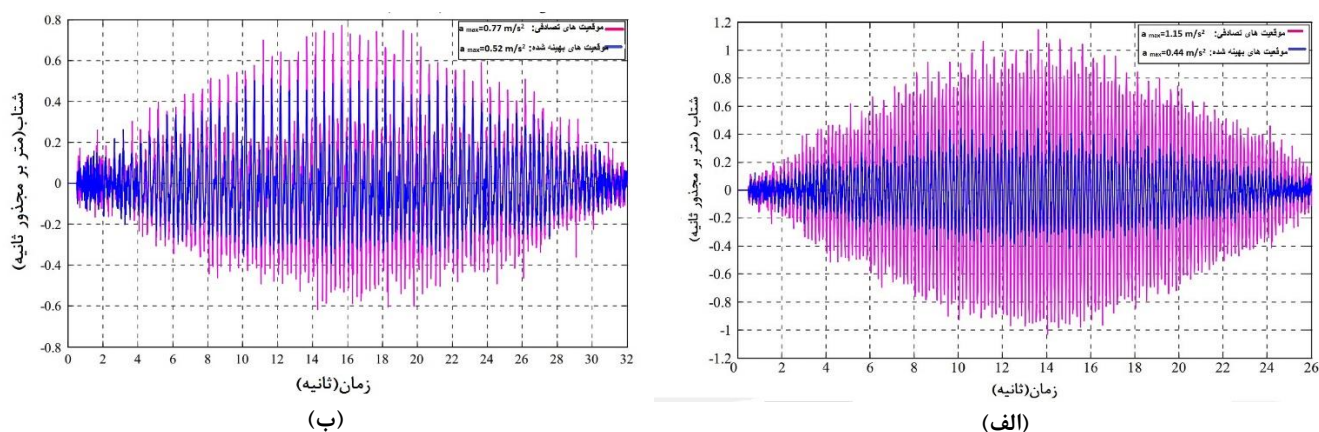
¹⁹² Leticia Fleck Fadel Miguel.

¹⁹³ Neda Nabid

¹⁹⁴ Ghorbani and Rofooei

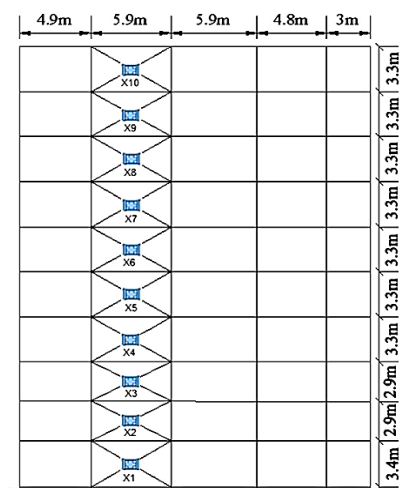


شکل ۱۲: مکان‌های احتمالی میراگرهای اصطکاکی: الف - پل عابر خرابایی وارن ، ب- پل عابر خرابایی پرات [۱۹۱].



شکل ۱۳: مقایسه نتایج الگوریتم کرم شب تاب: الف- مورد پل عابر خرابایی وارن، ب- مورد پل عابر خرابایی پرات [۱۹۱].

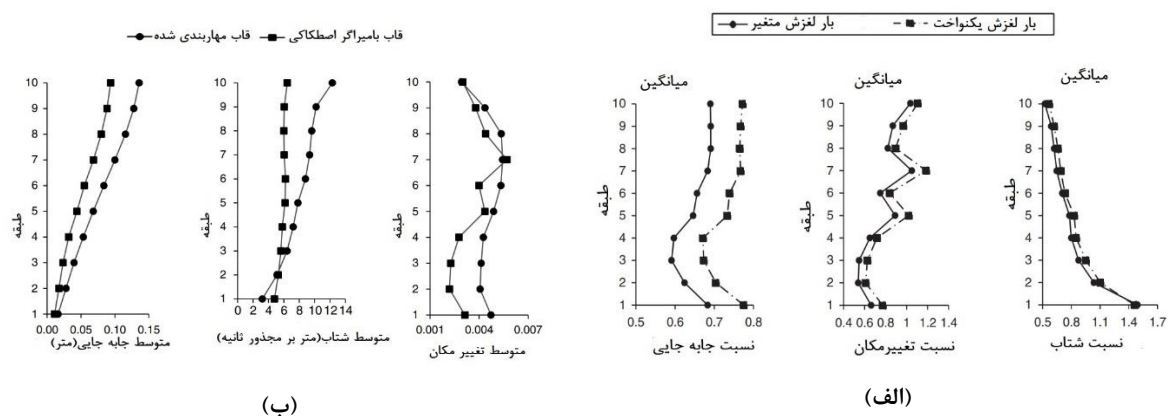
در بخش اول مقاله فلاح و هنرپرست ، به هدف بررسی بارهای لغزش بهینه میراگرهای اصطکاکی پال اسکلت ساختمانی در دو حالت است که خواه که میراگرهای تمام طبقات دارای بار لغزش یکسان باشند و یا هر میراگر دارای بار لغزش خاص خود باشد، پرداختند [۲۰۲]. جدول ۳، مقدار بهینه بار لغزش میراگرهای قاب ۱۰ طبقه مربوط به هر تحریک و طراحی نهایی بار لغزش هر میراگر را تشریح می- کند. در هر دو حالت کل بارهای لغزش یکسان فرض می‌شود. سه هدف به طور همزمان در روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم NSGA-II برآورده شدند. در بخش دوم تحقیق همچنین، به منظور دستیابی به یک طراحی مقرون به صرفه، از یک روش بهینه‌سازی چند هدفه برای یافتن محل بهینه میراگرهای پال با خواص مفروض که اهداف چندهدفه مورد نظر را برآورده می‌کند، استفاده شد. اشکال ۱۴ و ۱۵ به ترتیب مدل قاب ۱۰ طبقه و پاسخ‌های آن تحت بار لغزش یکنواخن و متغیر را نشان می‌دهند.



شکل ۱۴: مدل قاب ۱۰ طبقه [۲۰۲].

جدول ۳: مقدار بهینه بار لغزش میراگرهای قاب ۱۰ طبقه مربوط به هر تحریک و طراحی نهایی بار لغزش هر میراگر (kN). [۲۰۲].

زلزله	توزیع بار لغزشی	بار لغزشی هر میراگر										
		۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
ویکتوریا	یکنواخت	۲۲۵۰	۱۵۱/۵	۲۵۸	۲۴۹	۲۴۲/۵	۲۶۹	۲۲۶/۵	۲۵۵	۲۶۱/۵	۹۹	۲۳۸
	متغیر	۲۲۵۰	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۵
زنگیران	یکنواخت	۲۴۹۴	۱۵۸	۲۵۰/۵	۳۱۸	۲۹۱	۲۲۰/۵	۲۷۹/۵	۳۰۲	۲۰۹/۵	۲۰۷	۲۵۸
	متغیر	۲۴۹۴	۲۴۹/۴	۲۴۹/۴	۲۴۹/۴	۲۴۹/۴	۲۴۹/۴	۲۴۹/۴	۲۴۹/۴	۲۴۹/۴	۲۴۹/۴	۲۴۹/۴



شکل ۱۵: ساختمان ۱۰ طبقه: الف - مقایسه نسبت پاسخ قاب میرایی اصطکاکی با توزیع بار لغزش یکنواخت و متغیر به قاب مهاربندی شده برای هر طبقه، ب - میانگین حداکثر پاسخ قاب مهاربندی نشده و قاب کنترل شده با میراگرهای بار متغیر [۲۰۲].

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

از گذشته تا کنون، یکی از چالش‌های مهم در مهندسی زلزله و سازه، توسعه و پیشرفت ایده‌های طراحی ابتکاری به منظور محافظت بهتر از سازه‌ها، ساکنان آنها در برابر اثرات تخریبی نیروهای مخربی همچون زلزله، باد و موج است. در این راستا، کنترل سازه یکی از روش‌های محافظت سازه در برابر نیروهای مخرب می‌باشد. یکی از نکاتی که در بحث کنترل سازه و بهره‌گیری از سیستم‌های کنترل باید مد نظر قرار داد این است که به منظور متعادل کردن هزینه‌های مربوط به پروژه‌ها، با توجه به دستگاه‌های سیستم‌های کنترل اضافه‌شده، آنها باید به طور بهینه در سازه، طراحی و استقرار یابند تا کارایی سیستم را افزایش داده و هزینه‌های مربوطه را کاهش دهند. بنابراین، اغلب استفاده از دستگاه‌های سیستم‌های کنترل با روش‌های بهینه‌سازی ترکیب می‌شود. در این مقاله، مروری کوتاه بر پیشینه مطالعات انجام شده برای بهینه‌سازی سیستم‌های کنترلی ارائه شد.

مطابق تحقیقات بررسی شده، می‌توان گفت در اکثر مطالعات کنترل ارتعاش سازه‌ای که در این پژوهش گزارش شده است، فرض می‌شود که سازه الاستیک باقی می‌ماند که ممکن است در شرایط بارگذاری شدید واقع بینانه نباشد. تغییر شکل‌های غیرکشسان سازه می‌تواند منجر به عدم تنظیم دستگاه کنترل و در نتیجه عملکرد پایین‌تر شود؛ بنابراین بایستی حالت غیرالاستیک سازه‌ها برای بررسی بهینه کنترل سازه‌ها بیشتر مورد توجه قرار گیرد. همچنین کنترل لرزش فعال و نیمه فعال سازه‌های هوشمند به دلیل تکامل و پیشرفت‌های اخیر در مواد هوشمند، میراگرهای هوشمند، سنسورهای بهتر، تکنیک‌های پردازش سیگنال پیشرفته و قدرتمندتر به عنوان یکی از فعال‌ترین و چالش برانگیزترین حوزه‌های تحقیقاتی در مهندسی سازه شناخته شده است؛ بنابراین بهره‌گیری از مواد هوشمند در طراحی و ساخت میراگرها به منظور بهینه‌سازی عملکرد کنترل سازه، پیشنهاد می‌شود. در پایان، پیشنهاداتی می‌توان در این خصوص به صورت زیر ارائه داد:

- ۱- یک راهبرد کنترل چند مدله از طریق ادغام ماهرانه تکنیک‌های پردازش سیگنال پیشرفته
- ۲- استفاده از الگوریتم‌های کنترل غیرمتمرکز قوی برای سازه‌های عمرانی و مکانیکی بزرگ هوشمند
- ۳- استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی برای توسعه و ترکیب الگوریتم‌های کنترل تطبیقی با قابلیت یادگیری به طور همزمان
- ۴- شناسایی و کنترل سازه با استفاده از روش کاهش سختی ناگهانی سازه
- ۵- جمع‌آوری و محاسبه داده‌ها با سرعت بالا برای کنترل سازه در زمان واقعی سازه‌های عمرانی در معرض تحریک پایه لرزه‌ای
- ۶- کاربرد قیاس حرارتی در مسائل بهینه‌سازی کنترل سازه (به خصوص سازه‌های سبک وزن برای کنترل ارتعاشات سازه‌ای در محدوده فرکانس پایین)

مراجع

- [1]Mottershead, J.E., M. Link, and M.I. Friswell, (2011). *The sensitivity method in finite element model updating: A tutorial*. Mechanical systems and signal processing, **25**(7): p. 2275-2296.
- [2]Yan, W.J. and W.X. Ren, (2011). *A direct algebraic method to calculate the sensitivity of element modal strain energy*. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, **27**(5): p. 694-710.
- [3]Elias, S. and V. Matsagar, (2017). *Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers*. Annual Reviews in Control, **44**: p. 129-156.
- [4]De Domenico, D., G. Ricciardi, and I. Takewaki, (2019). *Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: a review*. Soil dynamics and earthquake engineering, **118**: p. 144-165.
- [5]Singh, M.P., S. Singh, and L.M. Moreschi, (2002). *Tuned mass dampers for response control of torsional buildings*. Earthquake engineering & structural dynamics, **31**(4): p. 749-769.
- [6]Den Hartog, J.P., (1985), Mechanical vibrations. Courier Corporation.

- [7] IOI, T. and K. IKEDA, (1978). *On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system*. Bulletin of JSME, **21**(151): p. 64-71.
- [8] Villaverde, R., (1985). *Reduction seismic response with heavily-damped vibration absorbers*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, **13**(1): p. 33-42.
- [9] Sadek, F., et al., (1997). *A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, **26**(6): p. 617-635.
- [10] Warburton, G. and E. Ayorinde, (1980). *Optimum absorber parameters for simple systems*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, **8**(3): p. 197-217.
- [11] Randall, S., D. Halsted III, and D. Taylor, (1981). *Optimum vibration absorbers for linear damped systems*.
- [12] Kaveh, A. and M.I. Ghazaan, (2018), *Meta-heuristic algorithms for optimal design of real-size structures*. Springer.
- [13] Kaveh, A., (2017), *Applications of metaheuristic optimization algorithms in civil engineering*. Springer.
- [14] Hadi, M.N. and Y. Arfiadi, (1998). *Optimum design of absorber for MDOF structures*. Journal of Structural Engineering, **124**(11): p. 1272-1280.
- [15] Leung, A.Y., et al., (2008). *Particle swarm optimization of TMD by non-stationary base excitation during earthquake*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, **37**(9): p. 1223-1246.
- [16] Bekdaş, G. and S.M. Nigdeli, (2011). *Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search*. Engineering Structures, **33**(9): p. 2716-2723.
- [17] Farshidianfar, A. and S. Soheili, (2013). *Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil-structure interaction*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **51**: p. 14-22.
- [18] Farshidianfar, A. and S. Soheili, (2013). *ABC optimization of TMD parameters for tall buildings with soil structure interaction*. Interaction and multiscale mechanics, **6**(4): p. 339-356.
- [19] Nigdeli, S.M., G. Bekdas, and X. Yang, (2016). *Optimum tuning of mass dampers for seismic structures using flower pollination algorithm*. Int. J. Theor. Appl. Mech, **1**: p. 264-268.
- [20] Fahimi Farzam, M. and A. Kaveh, (2020). *Optimum design of tuned mass dampers using colliding bodies optimization in frequency domain*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, **44**(3): p. 787-802.
- [21] Bekdaş, G., et al., (2019). *Transfer function amplitude minimization for structures with tuned mass dampers considering soil-structure interaction*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **116**: p. 552-562.
- [22] Kamgar, R. and M. Khatibinia, (2019). *Optimization criteria for design of tuned mass dampers including soil-structure interaction effect*. Iran University of Science & Technology, **9**(2): p. 213-232.
- [23] Li, H.-N. and X.-L. Ni, (2007). *Optimization of non-uniformly distributed multiple tuned mass damper*. Journal of Sound and Vibration, **308**(1): p. 80-97.
- [24] Yucel, M., et al., (2019). *Estimation of optimum tuned mass damper parameters via machine learning*. Journal of Building Engineering, **26**: p. 100847.
- [25] Nigdeli, S.M. and G. Bekdaş, (2017). *Optimum tuned mass damper design in frequency domain for structures*. KSCE Journal of Civil Engineering, **21**(3): p. 912-922.
- [26] Zuo, L. and S.A. Nayfeh, (2004). *Minimax optimization of multi-degree-of-freedom tuned-mass dampers*. Journal of Sound and Vibration, **272**(3): p. 893-908.
- [27] Soheili, S., H. Zoka, and M. Abachizadeh, (2021). *Tuned mass dampers for the drift reduction of structures with soil effects using ant colony optimization*. Advances in Structural Engineering, **24**(4): p. 771-783.
- [28] Parulekar, Y. and G. Reddy, (2009). *Passive response control systems for seismic response reduction: A state-of-the-art review*. International Journal of Structural Stability and Dynamics, **9**(01): p. 151-177.
- [29] Saeed, T.E., et al., (2015). *A state-of-the-art review of structural control systems*. Journal of Vibration and Control, **21**(5): p. 919-937.
- [30] Kiani, M. and J. Vaseghi Amiri, (2019). *Evaluation of effects of hysteretic damping of shape memory alloys on seismic performance of tuned mass damper*. Journal of Structural and Construction Engineering, **6**(Special Issue 2): p. 5-24.
- [31] De Silva, C., (1981). *An algorithm for the optimal design of passive vibration controllers for flexible systems*. Journal of sound and Vibration, **75**(4): p. 495-502.
- [32] Gürgöze, M. and P. Müller, (1992). *Optimal positioning of dampers in multi-body systems*. Journal of sound and vibration, **158**(3): p. 517-530.
- [33] Tsuji, M. and T. Nakamura, (1996). *Optimum viscous dampers for stiffness design of shear buildings*. The structural design of tall buildings, **5**(3): p. 217-234.
- [34] Takewaki, I., (2000). *Soil-structure random response reduction via TMD-VD simultaneous use*. Computer methods in applied mechanics and engineering, **190**(5-7): p. 677-690.
- [35] Garcia, D.L., (2001). *A simple method for the design of optimal damper configurations in MDOF structures*. Earthquake spectra, **17**(3): p. 387-398.

- [36] Singh, M.P. and L.M. Moreschi, (2002). *Optimal placement of dampers for passive response control*. Earthquake engineering & structural dynamics, **31**(4): p. 955-976.
- [37] Martinez-Rodrigo, M. and M. Romero, (2003). *An optimum retrofit strategy for moment resisting frames with nonlinear viscous dampers for seismic applications*. Engineering structures, **25**(7): p. 913-925.
- [38] Christopoulos, C., A. Filiatrault, and V.V. Bertero, (2006), Principles of passive supplemental damping and seismic isolation. Iuss press Pavia, Italy.
- [39] Takewaki, I., (2011), Building control with passive dampers: optimal performance-based design for earthquakes. John Wiley & Sons.
- [40] Aydin, E., M. Boduroglu, and D. Guney, (2007). *Optimal damper distribution for seismic rehabilitation of planar building structures*. Engineering Structures, **29**(2): p. 176-185.
- [41] Estekanchi, H.E. and M.C. Basim, (2011). *Optimal damper placement in steel frames by the Endurance Time method*. The structural design of tall and special buildings, **20**(5): p. 612-630.
- [42] Parciannelo, E., C. Chisari, and C. Amadio, (2017). *Optimal design of nonlinear viscous dampers for frame structures*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **100**: p. 257-260.
- [43] Altieri, D., et al., (2018). *Reliability-based optimal design of nonlinear viscous dampers for the seismic protection of structural systems*. Bulletin of Earthquake Engineering, **16**(2): p. 963-982.
- [44] Akehashi, H. and I. Takewaki, (2020). *Comparative investigation on optimal viscous damper placement for elastic-plastic MDOF structures: transfer function amplitude or double impulse*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **130**: p. 105987.
- [45] Xu, Y.L., Q. He, and J. Ko, (1999). *Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation*. Engineering Structures, **21**(2): p. 135-148.
- [46] Kandemir-Mazanoglu, E.C. and K. Mazanoglu, (2017). *An optimization study for viscous dampers between adjacent buildings*. Mechanical Systems and Signal Processing, **89**: p. 88-96.
- [47] Liu, Y., J. Wu, and M. Donà, (2018). *Effectiveness of fluid-viscous dampers for improved seismic performance of inter-storey isolated buildings*. Engineering structures, **169**: p. 276-292.
- [48] Lagaros, N.D., (2012), Design optimization of active and passive structural control systems. IGI global.
- [49] Housner, G., et al., (1997). *Structural control: past, present, and future*. Journal of engineering mechanics, **123**(9): p. 897-971.
- [50] Nielsen, E.J., et al. (1996). *Viscoelastic damper overview for seismic and wind applications*, Location: International Society for Optics and Photonics. pages.
- [51] Zhang, R.-H. and T. Soong, (1992). *Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications*. Journal of Structural Engineering, **118**(5): p. 1375-1392.
- [52] Hahn, G. and K. Sathivageeswaran, (1992). *Effects of added-damper distribution on the seismic response of buildings*. Computers & structures, **43**(5): p. 941-950.
- [53] Wu, B., J.-P. Ou, and T. Soong, (1997). *Optimal placement of energy dissipation devices for three-dimensional structures*. Engineering Structures, **19**(2): p. 113-125.
- [54] Shukla, A. and T. Datta, (1999). *Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic force*. Journal of Structural Engineering, **125**(4): p. 401-409.
- [55] Kim, J. and S. Bang, (2002). *Optimum distribution of added viscoelastic dampers for mitigation of torsional responses of plan-wise asymmetric structures*. Engineering structures, **24**(10): p. 1257-1269.
- [56] Xu, Z.-D., Y.-P. Shen, and H.-T. Zhao, (2003). *A synthetic optimization analysis method on structures with viscoelastic dampers*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **23**(8): p. 683-689.
- [57] Park, J.H., J. Kim, and K.W. Min, (2004). *Optimal design of added viscoelastic dampers and supporting braces*. Earthquake engineering & structural dynamics, **33**(4): p. 465-484.
- [58] Fujita, K., A. Moustafa, and I. Takewaki, (2010). *Optimal placement of viscoelastic dampers and supporting members under variable critical excitations*. Earthq. Struct, **1**(1): p. 43-67.
- [59] Pawlak, Z. and R. Lewandowski. (2010). *Optimization of viscoelastic dampers as described by the fractional rheological model*, Location., pages.
- [60] Zhu, H., D. Ge, and X. Huang, (2011). *Optimum connecting dampers to reduce the seismic responses of parallel structures*. Journal of Sound and Vibration, **330**(9): p. 1931-1949.
- [61] Heydarinouri, H. and S.M. Zahrai, (2017). *Iterative step-by-step procedure for optimal placement and design of viscoelastic dampers to improve damping ratio*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, **26**(9): p. e1361.
- [62] Morgan, T.A., (2007), The use of innovative base isolation systems to achieve complex seismic performance objectives. University of California, Berkeley.
- [63] Carrera, E., (2002). *Theories and finite elements for multilayered, anisotropic, composite plates and shells*. Archives of Computational Methods in Engineering, **9**(2): p. 87-140.

- [64] Khatir, A., Tehami, M., Khatir, S., & Abdel Wahab, M. (2016). Multiple damage detection and localization in beam-like and complex structures using co-ordinate modal assurance criterion combined with firefly and genetic algorithms. *JOURNAL OF VIBROENGINEERING*, 18(8), 5063–5073. .
- [65] Zou, X.-K., et al., (2010). *Integrated reliability-based seismic drift design optimization of base-isolated concrete buildings*. *Journal of Structural Engineering*, **136**(10): p. 1282-1295.
- [66] Mishra, S.K., B.K. Roy, and S. Chakraborty, (2013). *Reliability-based-design-optimization of base isolated buildings considering stochastic system parameters subjected to random earthquakes*. *International Journal of Mechanical Sciences*, **75**: p. 123-133.
- [67] Zhang, J. and Z. Shu, (2018). *Optimal design of isolation devices for mid-rise steel moment frames using performance based methodology*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**(9): p. 4315-4338.
- [68] Mousazadeh, M., et al., (2020). *An efficient approach for LCC-based optimum design of lead-rubber base isolation system via FFD and analysis of variance (ANOVA)*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **18**(4): p. 1805-1827.
- [69] Roy, B.K. and S. Chakraborty, (2015). *Robust optimum design of base isolation system in seismic vibration control of structures under random system parameters*. *Structural Safety*, **55**: p. 49-59.
- [70] Hu, J. and J. Xu, (2020). *Parameter Optimization and Control Characteristics Analysis of TLMD System Based on Phase Deviation*. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, **25**(3): p. 372-383.
- [71] Park, S., M. Glade, and M.A. Lackner, (2020). *Multi-objective optimization of orthogonal TLCDs for reducing fatigue and extreme loads of a floating offshore wind turbine*. *Engineering Structures*, **209**: p. 110260.
- [72] Manchalwar, A. and S. Bakre, (2019). *Optimization of metallic damper location for seismic response control*. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, **7**(3): p. 261-275.
- [73] Javanmardi, A., et al., (2020). *State-of-the-art review of metallic dampers: testing, development and implementation*. *Archives of Computational Methods in Engineering*, **27**(2): p. 455-478.
- [74] Jarrahi, H., et al., (2020). *Optimal design of rotational friction dampers for improving seismic performance of inelastic structures*. *Journal of Building Engineering*, **27**: p. 100960.
- [75] Zou, S., W. Heisha, and P. Tan, (2020). *Performance-based dynamic optimal design for isolated structures with multiple-coupling friction dampers*. *Advances in Structural Engineering*, **23**(10): p. 2149-2162.
- [76] Deng, K., et al., (2015). *Shape optimization of U-shaped damper for improving its bi-directional performance under cyclic loading*. *Engineering Structures*, **93**: p. 27-35.
- [77] Khatibinia, M., M. Jalaipour, and S. Gharehbaghi, (2019). *Shape optimization of U-shaped steel dampers subjected to cyclic loading using an efficient hybrid approach*. *Engineering Structures*, **197**: p. 108874.
- [78] Morales-Beltran, M. and P. Teuffel, (2013). *Towards smart building structures: adaptive structures in earthquake and wind loading control response—a review*. *Intelligent Buildings International*, **5**(2): p. 83-100.
- [79] Casciati, F., J. Rodellar, and U. Yildirim, (2012). *Active and semi-active control of structures—theory and applications: A review of recent advances*. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **23**(11): p. 1181-1195.
- [80] Lund, R., (1980 published), *Active Damping of Large Structures in Winds*, *Structural Control*, vol. 459. North-Holland Publishing Company.
- [81] Chang, J.C. and T.T. Soong, (1980). *Structural control using active tuned mass dampers*. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **106**(6): p. 1091-1098.
- [82] Nishimura, I. (1992). *Acceleration feedback method applied to active tuned mass damper*, Location: International Society for Optics and Photonics. pages.
- [83] Nishimura, I., et al., (1994). *Acceleration feedback method applied to active-passive composite tuned mass damper*. *Journal of Structural Control*, **1**(1-2): p. 103-116.
- [84] Xu, Y.L., (1996). *Parametric study of active mass dampers for wind-excited tall buildings*. *Engineering structures*, **18**(1): p. 64-76.
- [85] Wu, J. and J. Yang, (1998). *Active control of transmission tower under stochastic wind*. *Journal of Structural engineering*, **124**(11): p. 1302-1312.
- [86] Li, C., J. Li, and Y. Qu, (2010). *An optimum design methodology of active tuned mass damper for asymmetric structures*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **24**(3): p. 746-765.
- [87] Jiang, X. and H. Adeli, (2008). *Neuro-genetic algorithm for non-linear active control of structures*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **75**(7): p. 770-786.
- [88] Ahlawat, A. and A. Ramaswamy, (2004). *Multiobjective optimal fuzzy logic control system for response control of wind-excited tall buildings*. *Journal of engineering mechanics*, **130**(4): p. 524-530.
- [89] Soleymani, M. and M. Khodadadi, (2014). *Adaptive fuzzy controller for active tuned mass damper of a benchmark tall building subjected to seismic and wind loads*. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **23**(10): p. 781-800.
- [90] Kayabekir, A.E., et al., (2020). *Optimum design of PID controlled active tuned mass damper via modified harmony search*. *Applied Sciences*, **10**(8): p. 2976.

- [91]Amini, F., N.K. Hazaveh, and A.A. Rad, (2013). *Wavelet PSO-based LQR algorithm for optimal structural control using active tuned mass dampers*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, **28**(7): p. 542-557.
- [92]Shariatmadar, H. and H.M. Razavi, (2014). *Seismic control response of structures using an ATMD with fuzzy logic controller and PSO method*. Struct. Eng. Mech, **51**(4): p. 547-564.
- [93]Amini, F. and A. Bagheri, (2014). *Optimal control of structures under earthquake excitation based on the colonial competitive algorithm*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, **23**(7): p. 500-511.
- [94]Pourzeynali, S., H. Lavasani, and A. Modarayi, (2007). *Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms*. Engineering Structures, **29**(3): p. 346-357.
- [95]Ozer, H.O., et al. (2013). *Sliding mode control optimized by genetic algorithm for building model*, Location., pages.
- [96]Li, Q., et al., (2000). *Multi-level optimal design of buildings with active control under winds using genetic algorithms*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, **86**(1): p. 65-86.
- [97]Ankireddi, S. and H.T. Yang, (1997). *Multiple objective LQG control of wind-excited buildings*. Journal of Structural Engineering, **123**(7): p. 943-951.
- [98]Wong, K.K. and R. Yang, (2003). *Predictive instantaneous optimal control of elastic structures during earthquakes*. Earthquake engineering & structural dynamics, **32**(14): p. 2161-2177.
- [99]Khatibinia, M., M. Mahmoudi, and H. Eliasi, (2020). *Optimal sliding mode control for seismic control of buildings equipped with ATMD*. Iran University of Science & Technology, **10**(1): p. 1-15.
- [100]Chang, C.-C. and L.-O. Yu, (1998). *A simple optimal pole location technique for structural control*. Engineering structures, **20**(9): p. 792-804.
- [101]Palazzo, B. and L. Petti, (1999). *Optimal structural control in the frequency domain: control in norm H_2 and H_∞* . Journal of Structural Control, **6**(2): p. 205-221.
- [102]Huo, L., et al., (2007). *Robust control design of active structural vibration suppression using an active mass damper*. Smart materials and structures, **17**(1): p. 015021.
- [103]Ahlawat, A. and A. Ramaswamy, (2001). *Multiobjective optimal structural vibration control using fuzzy logic control system*. Journal of Structural Engineering, **127**(11): p. 1330-1337.
- [104]Othman, S.M., et al., (2015). *PID parameters optimization using PSO technique for nonlinear electro hydraulic actuator*. Jurnal Teknologi, **77**(28).
- [105]Arif Şen, M., M. Tinkir, and M. Kalyoncu, (2018). *Optimisation of a PID controller for a two-floor structure under earthquake excitation based on the bees algorithm*. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **37**(1): p. 107-127.
- [106]Soong, T., (1988). *State-of-the-art review: active structural control in civil engineering*. Engineering Structures, **10**(2): p. 74-84.
- [107]Suhardjo, J., B. Spencer Jr, and A. Kareem, (1992). *Frequency domain optimal control of wind-excited buildings*. Journal of Engineering Mechanics, **118**(12): p. 2463-2481.
- [108]Chang, C.-C. and C.-C. Lin, (2009). *H_∞ drift control of time-delayed seismic structures*. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, **8**(4): p. 617-626.
- [109]Li, Q., D. Liu, and J. Fang, (1999). *Optimum design of actively controlled structures using genetic algorithms*. Advances in Structural Engineering, **2**(2): p. 109-118.
- [110]Issa, J., R. Mukherjee, and S.W. Shaw, (2010). *Vibration suppression in structures using cable actuators*. Journal of Vibration and Acoustics, **132**(3).
- [111]Rao, A.R.M. and K. Sivasubramanian, (2008). *Optimal placement of actuators for active vibration control of seismic excited tall buildings using a multiple start guided neighbourhood search (MSGNS) algorithm*. Journal of Sound and Vibration, **311**(1-2): p. 133-159.
- [112]Nigdeli, S.M., (2011). *Active brace control of frame structures under earthquake excitation*. Nat. Cataclysms Glob. Prob. Mod. Civilization, **102**.
- [113]Gluck, J. and Y. Ribakov, (2002). *Active viscous damping system with amplifying braces for control of MDOF structures*. Earthquake engineering & structural dynamics, **31**(9): p. 1735-1751.
- [114]Gupta, H., T. Soong, and G. Dargush, (2000). *Active aerodynamic bi-directional control of structures II.: tall buildings*. Engineering structures, **22**(4): p. 389-399.
- [115]Scruggs, J., A. Taflanidis, and J. Beck, (2006). *Reliability-based control optimization for active base isolation systems*. Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures, **13**(2-3): p. 705-723.
- [116]Balendra, T., C. Wang, and N. Yan, (2001). *Control of wind-excited towers by active tuned liquid column damper*. Engineering Structures, **23**(9): p. 1054-1067.
- [117]Xu, J., et al., (2020). *Research on semi-active vibration isolation system based on electromagnetic spring*. Mechanics & Industry, **21**(1): p. 101.

- [118] Dyke, S.J., et al., (1996). *Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction*. Smart materials and structures, **5**(5): p. 565.
- [119] Dyke, S., et al., (1996). *Seismic response reduction using magnetorheological dampers*. IFAC Proceedings Volumes, **29**(1): p. 5530-5535.
- [120] Spencer, B., S. Dyke, and M.K. Sain. (1996). *Magnetorheological dampers: a new approach to seismic protection of structures*, Location: IEEE. pages.
- [121] Jung, H.-J., I.W. Lee, and B.F. Spencer Jr. (2002). *State-of-the-art of MR damper-based control systems in civil engineering applications*, Location., pages.
- [122] Xue, X., et al., (2010). *Parameter identification of simplified Bouc-Wen model for a MR damper using efficient GA*. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, **33**(1-2): p. 175-181.
- [123] Azar, B.F., et al., (2020). *Optimal design of magnetorheological damper based on tuning Bouc-Wen model parameters using hybrid algorithms*. KSCE Journal of Civil Engineering, **24**(3): p. 867-878.
- [124] Razman, M.A., G. Priyandoko, and A.R. Yusoff. (2014). *Bouc-Wen model parameter identification for a MR fluid damper using particle swarm optimization*, Location: Trans Tech Publ. pages.
- [125] Yang, Y., Y. Ding, and S. Zhu. (2020). *parameter identification of MR damper model based on particle swarm optimization*, Location: Springer. pages.
- [126] Xiao, Z., Z. Zhang, and A. Quansah, (2019). *Combined Identification of Parameters in the Mechanical Model of Magnetorheological Damper*. Journal of Civil Engineering Research, **9**(1): p. 16-24.
- [127] Zhu, H., et al., (2019). *An efficient parameters identification method of normalized Bouc-Wen model for MR damper*. Journal of Sound and Vibration, **448**: p. 146-158.
- [128] Talatahari, S., A. Kaveh, and N. Mohajer Rahbari, (2012). *Parameter identification of Bouc-Wen model for MR fluid dampers using adaptive charged system search optimization*. Journal of mechanical science and technology, **26**(8): p. 2523-2534.
- [129] Zaman, M.A. and U. Sikder, (2015). *Bouc-Wen hysteresis model identification using modified firefly algorithm*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, **395**: p. 229-233.
- [130] Giuclea, M., T. Sireteanu, and A. Mitu, (2009). *Use of genetic algorithms for fitting the Bouc-Wen model to experimental hysteretic curves*. Rev. Roum. Sci. Techn.–Mec. Appl, **54**(1): p. 3-10.
- [131] Bartkowski, P., R. Zalewski, and P. Chodkiewicz, (2019). *Parameter identification of Bouc-Wen model for vacuum packed particles based on genetic algorithm*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, **19**(2): p. 322-333.
- [132] Ye, M. and X. Wang, (2007). *Parameter estimation of the Bouc-Wen hysteresis model using particle swarm optimization*. Smart Materials and Structures, **16**(6): p. 2341.
- [133] Charalampakis, A. and C. Dimou, (2010). *Identification of Bouc-Wen hysteretic systems using particle swarm optimization*. Computers & structures, **88**(21-22): p. 1197-1205.
- [134] Son, N.N., C. Van Kien, and H.P.H. Anh, (2020). *Parameters identification of Bouc-Wen hysteresis model for piezoelectric actuators using hybrid adaptive differential evolution and Jaya algorithm*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, **87**: p. 103317.
- [135] Talatahari, S., et al., (2014). *Solving parameter identification of nonlinear problems by artificial bee colony algorithm*. Mathematical Problems in Engineering, **2014**.
- [136] Spencer Jr, B., et al., (1997). *Phenomenological model for magnetorheological dampers*. Journal of engineering mechanics, **123**(3): p. 230-238.
- [137] Yang, G., et al., (2002). *Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations*. Engineering structures, **24**(3): p. 309-323.
- [138] Giuclea, M., et al., (2004). *Modeling of magneto rheological damper dynamic behavior by genetic algorithms based inverse method*. The Romanian Academy, **5**(1): p. 000-000.
- [139] Giuclea, M., et al., (2004). *Model parameter identification for vehicle vibration control with magnetorheological dampers using computational intelligence methods*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, **218**(7): p. 569-581.
- [140] Shu, G. and Z. Li, (2017). *Parametric identification of the Bouc-Wen model by a modified genetic algorithm: Application to evaluation of metallic dampers*. Earthquakes and Structures, **13**(4): p. 397-407.
- [141] Kwok, N., et al., (2006). *A novel hysteretic model for magnetorheological fluid dampers and parameter identification using particle swarm optimization*. Sensors and Actuators A: Physical, **132**(2): p. 441-451.
- [142] Kwok, N., et al., (2007). *Bouc-Wen model parameter identification for a MR fluid damper using computationally efficient GA*. ISA transactions, **46**(2): p. 167-179.
- [143] Yan, G. and L.L. Zhou, (2006). *Integrated fuzzy logic and genetic algorithms for multi-objective control of structures using MR dampers*. Journal of sound and vibration, **296**(1-2): p. 368-382.
- [144] Askari, M. and A.H. Davaie-Markazi. (2008). *Multi-objective optimal fuzzy logic controller for nonlinear building-MR damper system*, Location: IEEE. pages.

- [145] Shook, D.A., et al., (2008). *GA-optimized fuzzy logic control of a large-scale building for seismic loads*. Engineering structures, **30**(2): p. 436-449.
- [146] Shook, D.A., et al., (2009). *Semi-active control of a torsionally-responsive structure*. Engineering Structures, **31**(1): p. 57-68.
- [147] Ali, S.F. and A. Ramaswamy, (2009). *Optimal fuzzy logic control for MDOF structural systems using evolutionary algorithms*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, **22**(3): p. 407-419.
- [148] Huang, Z.-S., C. Wu, and D.-S. Hsu, (2009). *Semi-active fuzzy control of mr damper on structures by genetic algorithm*. Journal of Mechanics, **25**(1): p. N1-N6.
- [149] Bitaraf, M., et al., (2010). *Application of semi-active control strategies for seismic protection of buildings with MR dampers*. Engineering Structures, **32**(10): p. 3040-3047.
- [150] Bozorgvar, M. and S.M. Zahrai, (2019). *Semi-active seismic control of buildings using MR damper and adaptive neural-fuzzy intelligent controller optimized with genetic algorithm*. Journal of Vibration and Control, **25**(2): p. 273-285.
- [151] Uz, M.E. and M.N. Hadi, (2014). *Optimal design of semi active control for adjacent buildings connected by MR damper based on integrated fuzzy logic and multi-objective genetic algorithm*. Engineering structures, **69**: p. 135-148.
- [152] Raeesi, F., et al. (2020). *An inverse TSK model of MR damper for vibration control of nonlinear structures using an improved grasshopper optimization algorithm*, Location: Elsevier. pages.
- [153] Schurter, K.C. and P.N. Roschke, (2001). *Neuro-fuzzy control of structures using acceleration feedback*. Smart Materials and Structures, **10**(4): p. 770.
- [154] Hiramoto, K., T. Matsuoka, and K. Sunakoda, (2011). *Inverse Lyapunov approach for semi-active control of civil structures*. Structural Control and Health Monitoring, **18**(4): p. 382-403.
- [155] Hashemi, S.M.A., H. Haji Kazemi, and A. Karamodin, (2016). *Localized genetically optimized wavelet neural network for semi-active control of buildings subjected to earthquake*. Structural Control and Health Monitoring, **23**(8): p. 1074-1087.
- [156] Shi, Y., N. Xin, and W. Ningwei, (2004). *Optimal placement of MR damper set in structures*. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, **24**(3): p. 175-178.
- [157] Ok, S.-Y., J. Song, and K.-S. Park, (2008). *Optimal design of hysteretic dampers connecting adjacent structures using multi-objective genetic algorithm and stochastic linearization method*. Engineering structures, **30**(5): p. 1240-1249.
- [158] Bao, Y., et al., (2009). *Semi-active direct velocity control method of dynamic response of spatial reticulated structures based on MR dampers*. Advances in Structural Engineering, **12**(4): p. 547-558.
- [159] Li, L., G. Song, and J. Ou, (2010). *A genetic algorithm-based two-phase design for optimal placement of semi-active dampers for nonlinear benchmark structure*. Journal of Vibration and Control, **16**(9): p. 1379-1392.
- [160] Amini, F. and K. Karami, (2011). *Capacity design by developed pole placement structural control*. Structural engineering and mechanics: An international journal, **39**(1): p. 147-168.
- [161] Elmeligy, O.M. and M. Hassan, (2016). *Optimum allocation of MR dampers within semi-active control strategies of three-degree-of-freedom systems*. International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES), **4**(4): p. 45-49.
- [162] Bhaiya, V., et al., (2018). *Genetic algorithm based optimum semi-active control of building frames using limited number of magneto-rheological dampers and sensors*. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, **140**(10): p. 101013.
- [163] Zabihi-Samani, M. and M. Ghanooni-Bagha, (2019). *Optimal semi-active structural control with a wavelet-based cuckoo-search fuzzy logic controller*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, **43**(4): p. 619-634.
- [164] Fazaeli Hosseini Nejad, H. and A. Karamodin, (2021). *Semi-active control of three-story benchmark structure using LQG algorithm with a fuzzy-genetic system*. Journal of Structural and Construction Engineering.
- [165] Hrovat, D., P. Barak, and M. Rabins, (1983). *Semi-active versus passive or active tuned mass dampers for structural control*. Journal of Engineering Mechanics, **109**(3): p. 691-705.
- [166] Setareh, M., et al., (2007). *Semiactive tuned mass damper for floor vibration control*. Journal of Structural Engineering, **133**(2): p. 242-250.
- [167] Kaveh, A., S. Pirgholizadeh, and H.O. Khadem, (2015). *Semi-active tuned mass damper performance with optimized fuzzy controller using CSS algorithm*.
- [168] Madden, G.J., M.D. Symans, and N. Wongprasert, (2002). *Experimental verification of seismic response of building frame with adaptive sliding base-isolation system*. Journal of Structural Engineering, **128**(8): p. 1037-1045.
- [169] Wongprasert, N. and M. Symans, (2005). *Experimental evaluation of adaptive elastomeric base-isolated structures using variable-orifice fluid dampers*. Journal of Structural Engineering, **131**(6): p. 867-877.

- [170]Narasimhan, S. and S. Nagarajaiah, (2006). *Smart base isolated buildings with variable friction systems: H ∞ controller and SAIVF device*. Earthquake engineering & structural dynamics, **35**(8): p. 921-942.
- [171]Choi, K.M., et al., (2007). *Modified energy dissipation algorithm for seismic structures using magnetorheological damper*. KSCE Journal of Civil Engineering, **11**(2): p. 121-126.
- [172]Moon, S.-J., et al., (2011). *Sub-optimal design procedure of valve-mode magnetorheological fluid dampers for structural control*. KSCE Journal of Civil Engineering, **15**(5): p. 867-873.
- [173]Bharti, S., S. Dumne, and M. Shrimali, (2014). *Earthquake response of asymmetric building with MR damper*. Earthquake engineering and Engineering vibration, **13**(2): p. 305-316.
- [174]Ramallo, J., E. Johnson, and B. Spencer Jr, (2000). "Smart" Isolation for Seismic Control. USA Today.
- [175]Lee, H.J., et al., (2006). *Semi-active neurocontrol of a base-isolated benchmark structure*. Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures, **13**(2-3): p. 682-692.
- [176]Ali, S.F. and A. Ramaswamy, (2009). *Hybrid structural control using magnetorheological dampers for base isolated structures*. Smart Materials and Structures, **18**(5): p. 055011.
- [177]Kim, H.-S. and P.N. Roschke, (2006). *Design of fuzzy logic controller for smart base isolation system using genetic algorithm*. Engineering Structures, **28**(1): p. 84-96.
- [178]Kim, H.S. and P.N. Roschke, (2006). *Fuzzy control of base-isolation system using multi-objective genetic algorithm*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, **21**(6): p. 436-449.
- [179]Ozbulut, O.E., M. Bitaraf, and S. Hurlebaus, (2011). *Adaptive control of base-isolated structures against near-field earthquakes using variable friction dampers*. Engineering Structures, **33**(12): p. 3143-3154.
- [180]Mohebbi, M. and H. Dadkhah, (2017). *Multi-objective semi-active base isolation system*. Iran University of Science & Technology, **7**(3): p. 319-338.
- [181]Symans, M.D., (1996). *Development and experimental study of semi-active fluid damping devices for seismic protection of structures*.
- [182]Bakhshinezhad, S. and M. Mohebbi. (2020). *Multi-objective optimal design of semi-active fluid viscous dampers for nonlinear structures using NSGA-II*, Location: Elsevier. pages.
- [183]Kazemi Bidokhti, K., H. Moharrami, and A. Fayezi, (2012). *Semi-active fuzzy control for seismic response reduction of building frames using SHD dampers*. Structural Control and Health Monitoring, **19**(3): p. 417-435.
- [184]Hossein Lavassani, S.H., H. Alizadeh, and P. Homami, (2020). *Optimizing tuned mass damper parameters to mitigate the torsional vibration of a suspension bridge under pulse-type ground motion: A sensitivity analysis*. Journal of Vibration and Control, **26**(11-12): p. 1054-1067.
- [185]Ab Talib, M.H., I.Z. Mat Darus, and P. Mohd Samin, (2019). *Fuzzy logic with a novel advanced firefly algorithm and sensitivity analysis for semi-active suspension system using magneto-rheological damper*. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, **10**(8): p. 3263-3278.
- [186]Xiaomin, X., et al., (2009). *Parameter estimation and its sensitivity analysis of the MR damper hysteresis model using a modified genetic algorithm*. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, **20**(17): p. 2089-2100.
- [187]Greco, R., G.C. Marano, and A. Fiore, (2016). *Performance-cost optimization of tuned mass damper under low-moderate seismic actions*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, **25**(18): p. 1103-1122.
- [188]Zhong, J., et al., (2020). *Risk-informed sensitivity analysis and optimization of seismic mitigation strategy using Gaussian process surrogate model*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **138**: p. 106284.
- [189]Zhang, X. and Z. Kang, (2014). *Dynamic topology optimization of piezoelectric structures with active control for reducing transient response*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, **281**: p. 200-219.
- [190]Miguel, L.F.F., L.F.F. Miguel, and R.H. Lopez, (2014). *Robust design optimization of friction dampers for structural response control*. Structural Control and Health Monitoring, **21**(9): p. 1240-1251.
- [191]Miguel, L.F.F., L.F. Fadel Miguel, and R.H. Lopez, (2015). *A firefly algorithm for the design of force and placement of friction dampers for control of man-induced vibrations in footbridges*. Optimization and Engineering, **16**(3): p. 633-661.
- [192]Csaba, G. and M. Andersson. (1997). *Optimization of Friction Damper Weight, Simulation and Experiments*, Location., pages.
- [193]Sanliturk, K.Y., et al., (1999). *Friction Damper Optimization: Simulation of Rainbow Tests*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, **123**(4): p. 930-939.
- [194]Panning, L., W. Sextro, and K. Popp. (2000). *Optimization of Interblade Friction Damper Design*, Location., pages.
- [195]Ye, S. and K.A. Williams, (2006). *Torsional friction damper optimization*. Journal of Sound and Vibration, **294**(3): p. 529-546.
- [196]Zou, S., et al., (2016). *Design optimization of friction damper with coupling mechanism for seismic response of base isolated structure*. Zhendong Gongcheng Xuebao/Journal of Vibration Engineering, **29**(2): p. 201-206.

- [197] Ontiveros-Pérez, S.P., L.F. Fadel Miguel, and L.F. Fadel Miguel, (2017). *Robust Simultaneous Optimization of Friction Damper for the Passive Vibration Control in a Colombian Building*. *Procedia Engineering*, **199**: p. 1743-1748.
- [198] Ontiveros-Pérez, S.P., L.F.F. Miguel, and L.F.F. Miguel, (2017). *Optimization of location and forces of friction dampers*. *REM-International Engineering Journal*, **70**: p. 273-279.
- [199] Miguel, L.F.F., L.F.F. Miguel, and R.H. Lopez, (2018). *Methodology for the simultaneous optimization of location and parameters of friction dampers in the frequency domain*. *Engineering Optimization*, **50**(12): p. 2108-2122.
- [200] Nabid, N., I. Hajirasouliha, and M. Petkovski, (2019). *Adaptive low computational cost optimisation method for performance-based seismic design of friction dampers*. *Engineering Structures*, **198**: p. 109549.
- [201] Ghorbani, H.R. and F.R. Rofooei, (2020). *A novel double slip loads friction damper to control the seismic response of structures*. *Engineering Structures*, **225**: p. 111273.
- [202] Fallah, N. and S. Honarparast, (2013). *NSGA-II based multi-objective optimization in design of Pall friction dampers*. *Journal of Constructional Steel Research*, **89**: p. 75-85.