



http://journaliss.ir

کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان شکاری (BPBO) در تعیین پارامترهای بهینه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده برای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها

حبیب‌اله احمدی^۱، سید مهدی زهرایی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

۲- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵، mzahrai@ut.ac.ir

چکیده

امروزه توجه قابل ملاحظه‌ای به توسعه روش‌های کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها معطوف شده است. در میان کلیه تجهیزات میراکننده ارتعاشات، میراگر جرمی تنظیم‌شده، به دلیل سادگی مکانیکی، مقرون به صرفه بودن و عملکرد قابل اطمینان، یکی از فناوری‌های مناسب محسوب می‌شود. عملکرد مطلوب این سامانه‌ها به انتخاب بهینه پارامترهای جرم، سختی و میرایی وابسته است. در مطالعه حاضر با هدف غلبه بر این چالش و یافتن مقادیر ایده‌آل پارامترهای میراگر، تحت اثر زلزله، از الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان شکاری (BPBO)، به عنوان یک روش نوین و اثربخش در این عرصه، بهره گرفته شده است. در این پژوهش، بهبود عملکرد میراگر با دو معیار کاربردی ارزیابی شده است: ۱- کاهش بیشینه جابه‌جایی بام؛ ۲- کاهش جذر میانگین مربعات بیشینه جابه‌جایی تمامی طبقات.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد استفاده از پارامترهای بهینه استخراج‌شده توسط BPBO منجر به کاهش معنی‌دار پاسخ لرزه‌ای نسبت به حالت بدون میراگر و همچنین نسبت به مقادیر تنظیم کلاسیک می‌شود. با استفاده از روش حاضر، میانگین کاهش جابه‌جایی برای معیار اول به حدود ۳۸/۳ درصد و برای معیار دوم به حدود ۳۸/۵ درصد رسیده است. همچنین کاهش بیشینه جابه‌جایی بام برای معیار اول ۳۶/۵ درصد و برای معیار دوم ۳۶/۴ درصد محاسبه شده است. این ارقام در مقایسه با یافته‌های مطالعات گذشته، بهبود چشم‌گیری را نمایان می‌سازد و گویای توانایی بالاتر روش پیشنهادی در استهلاک انرژی زلزله و کنترل جابه‌جایی‌های سازه است. بررسی همگرایی الگوریتم نیز کارایی مناسب آن را در مسائل بهینه‌سازی غیرخطی سازه‌ای نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی

کنترل غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم‌شده، الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان شکاری، کنترل ارتعاشات

Applying the Birds of Prey-Based Optimization Algorithm (BPBO) to Find Optimal Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Control of Structures

H. Ahmadi, S.M. Zahrai

Abstract

In recent years, structural vibration control has received considerable attention as an effective strategy for mitigating seismic responses in buildings. Among various passive control devices, the Tuned Mass Damper (TMD) has emerged as one of proper solutions due to its mechanical simplicity, cost-efficiency, and reliable performance. The effectiveness of a TMD, however, strongly depends on the proper selection of its design parameters, including mass, stiffness, and damping ratio. Determining these optimal parameters remains a critical and challenging task in structural control design. To address this issue, the present study employs the Birds of Prey-Based Optimization (BPBO) algorithm, a recently developed metaheuristic method inspired by the cooperative hunting strategies of predatory birds. The algorithm is applied to optimize the parameters of a TMD installed in a benchmark 10-story shear building model subjected to seismic excitation. Two objective functions are considered: (1) minimizing the maximum roof displacement and (2) minimizing the overall structural drift, quantified using the root mean square (RMS) of peak floor displacements.

Numerical simulations indicate that the BPBO-optimized TMD achieves significant reductions in structural response. The average displacement reduction reaches approximately 38.3% for the first objective function and 38.5% for the second. In addition, the maximum roof displacement decreases by 36.5% and 36.4%, respectively. These findings demonstrate the effectiveness and robustness of the BPBO algorithm in identifying optimal TMD parameters and highlight its potential as a competitive optimization tool for seismic vibration control applications. The convergence analysis further confirms the algorithm's efficiency and reliability in solving nonlinear structural optimization problems.

Keywords

Passive Control, Tuned Mass Damper, Metaheuristic Algorithms, Birds of Prey-Based Optimization Algorithm, Control of Vibration



یکی از مسائل دیرینه در مهندسی سازه، یافتن ابزارهایی جدید و سودمند برای محافظت از سازه‌ها و تجهیزات در برابر اثرات مخرب نیروهای طبیعی است. ارتعاشات ایجادشده در سازه‌ها، چه بر اثر باد و چه زلزله، از طریق اصلاح ویژگی‌هایی نظیر سختی، میرایی، جرم و شکل سازه، یا با استفاده از تأمین نیروهای مخالف فعال یا غیرفعال، قابل کنترل هستند. سیستم‌های جذب انرژی غیرفعال در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای در صنعت ساختمان به‌کار رفته‌اند. این سیستم‌ها عموماً شامل مصالح و وسایلی هستند که مقاومت، سختی و میرایی سازه را افزایش داده و برای کاهش خطرات طبیعی سازه‌های جدید یا بهسازی سازه‌های موجود مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به‌منظور کاهش پاسخ‌های دینامیکی سیستم‌های سازه‌ای و مکانیکی تحت ارتعاش، از ابزارهای کنترل غیرفعال^۱ استفاده می‌شود که میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD)^۲ یکی از مهم‌ترین آن‌ها است. TMD در ساده‌ترین حالت خود از یک جرم، یک فنر (المان سختی) و یک میراگر ویسکوز تشکیل شده است. با انتخاب دقیق مشخصه‌های طراحی TMD شامل جرم، سختی فنر و میرایی، می‌توان پاسخ دینامیکی سازه اصلی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد. میراگرهای جرمی تنظیم‌شده به دلیل کارآمدی نسبی، سادگی و مقرون‌به‌صرفه‌بودن، از پرکاربردترین سیستم‌های کنترلی غیرفعال در سازه‌ها محسوب می‌شوند. سرآغاز طراحی این میراگرها به مطالعاتی بازمی‌گردد که توسط فرا^۳ در سال ۱۹۰۹ درخصوص ضربه‌گیرهای ارتعاشات دینامیکی منتشر شد [۱].

در جهت گسترش تأثیر روش‌های کنترل، یافتن پارامترهای مکانیکی بهینه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از مسائل بنیادین در طراحی TMD، بهینه‌سازی پارامترهای آن (جرم، سختی و میرایی) است که مستقیماً بر پاسخ سازه اصلی تأثیر می‌گذارد. روابط متعددی برای تخمین این پارامترها پیشنهاد شده است؛ برای مثال، دن هارتوگ^۴ نحوه تخمین پارامترهای بهینه میراگر جرمی برای یک سازه بدون میرایی داخلی تحت تحریکات هارمونیک خارجی را شرح داده‌اند [۲].

سادک^۵ و همکاران نیز با استفاده از روش برازش منحنی، فرمول‌هایی برای محاسبه فرکانس و میرایی بهینه TMD برای دو مود اول سیستم ارائه کردند. همچنین سیستم‌های چند درجه آزادی با سه مدل سازه‌ای مختلف را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند [۳].

لی^۶ و همکاران نیز مسائل مرتبط با بهینه‌سازی پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شده را بررسی نمودند. در پژوهش مذکور، یک چارچوب نظری برای طراحی بهینه سازه‌های مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده ارائه شده است [۴].

در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده و تعیین پارامترهای بهینه آن‌ها انجام شده است. به‌عنوان مثال، پیسال^۷، کارایی میراگرهای اصطکاکی جرمی تنظیم‌شده چندگانه غیرفعال را در مقایسه با یک میراگر اصطکاکی جرمی تنظیم‌شده منفرد مورد مطالعه قرار داد [۵].

سالوی^۸ و ریزی^۹ بر روی تعیین معادلات تنظیم بهینه مشخصات برای یک میراگر جرمی تنظیم‌شده غیرفعال، تحقیق کرده و با استفاده از برازش منحنی‌ها، روابطی برای تعیین بهینه پارامترهای میراگرهای جرمی ارائه کردند [۶].

همچنین سالوی و جیارالیس^{۱۰}، به تحلیل عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم‌شده مجهز به اینترتر (TMDI) پرداخته‌اند که از قابلیت اتلاف انرژی بالایی برخوردارند. این مطالعه، پاسخ این سیستم‌ها را تحت تأثیر ارتعاشات با طیف نویز سفید بررسی نموده است [۷].

مونتریو^{۱۱} و همکاران، موضوع تعیین پارامترهای بهینه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده را با به‌کارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهش آن‌ها، نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی مصنوعی در مقایسه با یکی از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری (الگوریتم بهینه‌سازی الهام‌گرفته از دایره یا GIOA) ارزیابی و تحلیل شده است. در ادامه، مقادیر بهینه پارامترها مشخص شده و بر مزیت روش مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)^{۱۲} از نظر زمان تحلیل کوتاه‌تر، تأکید شده است [۸].

⁵ Sadek

⁶ Lee

⁷ Pisal

⁸ Salvi

⁹ Rizzi

¹⁰ Giaralis

¹¹ Monteiro

¹² Artificial Neural Networks

¹ Passive Control

² Tuned Mass Damper

³ Frahm

⁴ Den Hartog

خزایی و همکاران نیز عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم‌شده چندگانه (MTMD) را در سازه‌های بلندمرتبه فولادی با پلان‌های منظم و نامنظم (اشکال L و U) در دو ارتفاع ۱۰ و ۲۰ طبقه، تحت اثر رکوردهای زلزله با فاصله کانونی نزدیک و دور مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، تعیین آرایش بهینه میراگرها در پلان ساختمان نیز تحلیل و ارزیابی شده است [۹].

کاوه و همکاران نیز موضوع بهینه‌یابی مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم‌شده با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی ذرات باردار (GSS) را مورد نقد و بررسی قرار دادند [۱۰].

کامگر و همکاران نیز همین موضوع تعیین مشخصات بهینه را تحت تحریک بحرانی بررسی نمودند [۱۱].

باسیلی^۱ و همکاران نیز درباره موضوع بهسازی تلفیقی لرزه‌ای و انرژی ساختمان‌های موجود بر اساس مفهوم میراگر جرمی تنظیم‌شده تحقیق کردند؛ در این پژوهش برای اولین بار پیاده‌سازی روش‌های نوین تلفیقی بهسازی لرزه‌ای و انرژی با بهره‌گیری از مفهوم میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD) مطالعه شده است [۱۲].

زهرایی و اخلاق‌پسند، مقایسه میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد (STMD) با MTMDs بر اساس تحلیل مودال را در یک ساختمان ۲۰ طبقه، مورد تحلیل و بررسی قرار دادند؛ در این مقاله علاوه بر استفاده از الگوریتم فراابتکاری PSO^۲، تلاش شده است از بیش از یک مد ارتعاشی، برای تنظیم میراگرهای جرمی تنظیم‌شده، بهره گرفته شود [۱۳].

جرونی^۳ و همکاران، مفهوم میراگرهای جرمی تنظیم‌شده چندگانه همراه با اینترتر (MTMDI) را معرفی کرده و عملکرد آن در کنترل ارتعاشات را در مقایسه با میراگر جرمی همراه با اینترتر تک (TMDI) مورد بحث و بررسی قرار دادند. در تحقیق مذکور، از الگوریتم بهینه‌سازی PSO برای تعیین مشخصات استفاده شده است [۱۴].

حاتمی و همکاران نیز موضوع تعیین بهینه پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شده با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی بهبودیافته را مطالعه نمودند [۱۶].

محتشم و همکاران، روشی مؤثر برای طراحی بهینه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده چندگانه (MTMD) برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها ارائه دادند. با در نظر گرفتن پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شده (TMD) به‌عنوان متغیر، یک مسئله بهینه‌سازی با

هدف کمینه‌سازی بیشینه پاسخ سازه تعریف می‌شود. از الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بهینه‌سازی یک قاب برشی خطی ۱۰ طبقه استفاده شده که میراگرهای جرمی تنظیم‌شده چندگانه بهینه برای آن طراحی می‌شوند [۱۸].

آگاتوکلیس^۴ و همکاران نیز از یک جستجوی بهینه‌سازی عددی استاندارد برای طراحی بهینه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده مجهزه اینترتر (TMDI) از نظر پارامترهای میرایی، سختی و ثابت اینترتر استفاده کردند. طراحی بهینه میراگر TMDI برای محدوده‌ای از مقادیر از پیش تعیین‌شده جرم آن انجام و میرایی و سختی بهینه برای بهبود کارایی میراگر استخراج شد [۱۹].

لاوان^۵ یک فرمول‌بندی چندهدفه برای مسئله بهینه‌سازی میراگر جرمی تنظیم‌شده، تحت بارهای خارجی و همچنین تحریک پایه، ارائه داد. رویکرد اول، معادلات میراگر را در نظر می‌گیرد و رویکرد دوم، تقریباً پاسخ‌های مودال سازه را به سهم‌های مودال آن تجزیه می‌کند [۲۰].

بکداش^۶ و همکاران نیز یک روش بهینه‌سازی نوین ارائه دادند که از الگوریتم خفایش اصلاح‌شده برای مسئله بهینه‌سازی میراگر جرمی تنظیم‌شده استفاده می‌کند. روش پیشنهادی، رکوردهای زلزله‌های مختلف را برای بهینه‌سازی متغیرهای طراحی مانند نسبت میرایی، دوره تناوب و جرم میراگر در نظر می‌گیرد. نتایج این روش با سایر روش‌ها مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی هارمونی مقایسه شده است. روش پیشنهادی هنگام اعمال بر یک سازه عمرانی ۱۰ طبقه، در مقایسه با سایر روش‌ها، کارآمدتر و عملی‌تر اثبات شده است [۲۱].

یانگ^۷ و همکاران، یک مقاله مروری جامع درباره تکنولوژی‌های میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD) برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها ارائه کردند. مطالعه مذکور به چهار حوزه اصلی می‌پردازد: ۱- مفاهیم طراحی TMD و اصلاحات آن؛ ۲- مدل‌سازی ریاضی برای سازه‌های گسسته و پیوسته؛ ۳- روش‌های بهینه‌سازی پارامترهای TMD؛ ۴. توسعه‌های عملی شامل سیستم‌های نیمه‌فعال و فعال [۲۲].

وانگ^۸ و همکاران نیز در سال ۲۰۲۲، موضوع بهبود عملکرد سازه‌های جداسازی‌شده با استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم‌شده نیمه‌فعال را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. در این پژوهش،

⁴ Agathoklis

⁵ Lavan

⁶ Bekdaş

⁷ Yang

⁸ Wang

¹ Basili

² Particle Swarm Optimization

³ Djerouni



عملکرد بهتر میراگر جرمی نیمه‌فعال (STMD)، در کاهش جابه‌جایی و شتاب طبقه بام، نسبت به میراگر جرمی بهینه‌شده، در شبیه‌سازی‌های یک سازه هشت طبقه در حالت خطی و غیرخطی نشان داده شده است [۲۳].

کاو^۱ نیز در سال ۲۰۲۵، یک میراگر جرمی دوگانه جدید مجهز به اینترتر به زمین متصل شده (DTMDI)^۲ را معرفی نمود که برای کنترل موثرتر ارتعاش سازه‌ها، نسبت به میراگر جرمی دوگانه و معمولی طراحی شده است. همچنین نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد DTMDI، به‌ویژه با نسبت اینترتس^۳ بالاتر، کارایی و پایداری بیشتری نسبت به DTMD و حتی TMDI با جرم و اینترتس یکسان داشته و برای رسیدن به کاهش ارتعاش مشابه به جرم افزوده کمتری نیاز دارد [۲۴].

تعیین پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شده (TMD) به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها محسوب می‌شود. هدف اصلی این تحقیق، یافتن مقادیر بهینه پارامترهای این میراگرها به‌منظور کنترل کارآمد سازه تحت تحریک زلزله است. در این راستا، برای نخستین بار، از الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان شکاری (BPBO) به‌منظور تعیین پارامترهای بهینه TMD و دست‌یابی به حداکثر کاهش در پاسخ‌های سازه‌ای استفاده می‌شود. توابع هدف^۴ در این مسئله، حداقل‌سازی حداکثر جابه‌جایی طبقه بام و حداقل‌سازی جذر مجموع مربعات حداکثر جابه‌جایی طبقات تعریف شده‌اند.

در این پژوهش، با انجام تحلیل تاریخچه زمانی بر روی سیستم اصلی فاقد کنترل و نیز سیستم اصلی مجهز به میراگر جرمی که با روش‌های مختلف طراحی شده است، میزان کاهش در پاسخ‌های دینامیکی مختلف ارزیابی می‌شود تا در نهایت بتوان پارامترهای مناسب را برای طراحی لرزه‌ای میراگر جرمی ارائه نمود. روش تحلیل فضای حالت برای تحلیل سازه و نیز برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB، پایه محاسبات این تحقیق را تشکیل می‌دهد. افزون بر تلاش برای دست‌یابی به پاسخی بهینه و مؤثر در مقایسه با پژوهش‌های پیشین، مقایسه عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده (BPBO) با الگوریتم‌های به‌کارگرفته‌شده در سایر مطالعات نیز مورد توجه قرار دارد.

شایان‌ذکر است که الگوریتم BPBO از یک مکانیزم جابه‌جایی استفاده می‌کند که به عامل‌های جستجو اجازه می‌دهد به مناطق

امیدبخش حرکت کنند و جستجوی سراسری را تداوم بخشند (مکانیزم‌های الگوریتم در بخش‌های بعد تشریح می‌شود). این ارتباط نظام‌مند بین تکنیک‌های شکار پرندگان و کارکردهای الگوریتمی، تعادل بهینه‌ای بین بهره‌برداری و کاوش در BPBO ایجاد کرده و به کارایی بالاتر در بهینه‌سازی منجر شده است. تغییر پویا بین دو فاز بهره‌برداری و کاوش، باعث افزایش قدرت حل مسائل غیرخطی شده، احتمال گیرافتادن در بهینه‌های محلی را حداقل و سرعت دست‌یابی به پاسخ بهینه کلی با صرف هزینه (زمان و حافظه) کم‌تر را نسبت به سایر الگوریتم‌ها به میزان چشم‌گیری افزایش می‌دهد. همچنین در این مطالعه، بر خلاف سایر پژوهش‌ها، خلأ تحلیل حساسیت، نسبت به تغییرات برخی پارامترهای سازه‌ای، تا حدودی مرتفع شده است.

۲- معادلات حرکت

سازه مورد مطالعه یک قاب برشی متقارن، با رفتار خطی الاستیک و فرض تمرکز جرم در تراز طبقات در نظر گرفته شده است. قابل‌ذکر است که با توجه به تمرکز پژوهش بر بررسی عملکرد TMD در کنترل پاسخ جانبی و متقارن بودن پلان فرضی سازه، از یک مدل دوبعدی قاب برشی معادل که پاسخ اصلی سازه در یک راستا را مدل می‌کند، استفاده شده است. این رویکرد در بسیاری از مطالعات مشابه (مانند [۳]، [۱۰]، [۱۵] و [۱۶]) برای ساده‌سازی و تمرکز بر ماهیت مسئله بهینه‌سازی پذیرفته شده است.

این مفروضات، که همگی معقول و نزدیک به شرایط واقعی هستند، امکان مدل‌سازی ساده‌شده و در عین حال مؤثری از رفتار دینامیکی سازه را فراهم می‌کنند. اثر زلزله به‌عنوان حرکت پایه در سطح فونداسیون (با صرف‌نظر از اثرات اندرکنش سازه و خاک) به سازه اعمال می‌شود. درجات آزادی دینامیکی سیستم نیز جابه‌جایی افقی هر یک از طبقات در نظر گرفته می‌شوند. معادله حرکت^۵ حاکم بر این سازه تحت اثر تحریک لرزه‌ای به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (1)$$

که در آن $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به‌ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه است. $\{u\}$ بردار تغییر مکان ساختمان و $\{r\}$ برداری با

⁵ Equation of Motion

¹ Cao

² Double Tuned Mass Damper with a Grounded Inerter

³ Inertance

⁴ Objective Function

$$\{\ddot{u}\} = -[M]^{-1}[C]\{\dot{u}\} - [M]^{-1}[K]\{u\} - \{r\}\ddot{u}_g \quad (4)$$

از ترکیب روابط فوق:

$$\begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \ddot{u} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \dot{u} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\{r\} \end{bmatrix} \ddot{u}_g \quad (5)$$

که (0) ماتریس صفر و (I) ماتریس یکه یا واحد است. برای یک سازه با n درجه آزادی معادلات فضای حالت به شرح زیر خواهد بود.

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix}_{2n \times 2n} Z_{2n \times 1} + \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} \\ -\{r\}_{2n \times 1} \end{bmatrix}_{2n \times 1} \ddot{u}_g \quad (6)$$

از دیدگاه فیزیکی، کوپل شدن بین جرم سازه و جرم میراگر جرمی تنظیم شده ناشی از اتصال آنها توسط یک عنصر فنری با سختی k_d و یک عنصر میراگر با ضریب میرایی c_d است. این اتصال موجب ایجاد نیروهای اندرکنشی متقابل بین دو جرم می شود که متناسب با اختلاف جابه جایی و اختلاف سرعت آنها است. به عبارت دیگر، نیروی فنری برابر $k_d(x_s - x_d)$ و نیروی میرایی برابر $c_d(\dot{x}_s - \dot{x}_d)$ بوده و این نیروها با علامت مخالف بر هر دو جرم اعمال می شوند.

در هنگام تحریک لرزه ای، سازه تمایل به نوسان در مودهای طبیعی خود دارد؛ اما در صورتی که فرکانس طبیعی به درستی تنظیم شده باشد، جرم میراگر با ایجاد نوسانی خارج از فاز نسبت به حرکت سازه، بخشی از انرژی ارتعاشی را جذب کرده و از طریق میرایی مستهلک می کند. این تبادل انرژی بین سازه و TMD باعث کاهش دامنه پاسخ سازه، به ویژه در مود غالب ارتعاشی، می شود. بنابراین، عملکرد مؤثر TMD وابسته به تنظیم مناسب پارامترهای جرم، سختی و میرایی آن است تا بیشترین انتقال و اتلاف انرژی دینامیکی حاصل شود. برای دستیابی معادلات حرکت، سازه مجهزه میراگر جرمی است، فرض می شود یک درجه آزادی (میراگر جرمی) به درجات آزادی سازه اضافه شده و ماتریس های مشخصه و معادلات حرکت سازه مجهزه میراگر جرمی به شرح زیر تعیین می شود.

در معادله حرکت سازه مجهزه میراگر جرمی TMD، مشخصات دینامیکی سازه (ماتریس جرم، سختی، میرایی و بردار تغییر مکان) به صورت زیر نشان داده می شوند. در معادلات زیر (M_{str})

ابعاد $(n \times 1)$ که درایه های نظیر درجات آزادی در راستای شتاب زلزله برابر یک و در دیگر درایه ها مقدار صفر را دارند و در نهایت (\ddot{u}_g) شتاب زلزله در لحظه های مختلف را نشان می دهد.

یکی از روش های مدرن برای حل دستگاه های معادلات دیفرانسیل خطی مرتبه دوم، روش موسوم به فضای حالت است. سیستم های پیچیده مدرن، اغلب چندین ورودی و چندین خروجی دارند که ممکن است به شیوه های پیچیده ای با یکدیگر اندرکنش داشته باشند. تحلیل چنین سیستم هایی مستلزم کاهش پیچیدگی عبارات ریاضی و به کارگیری روش های محاسباتی رایج برای انجام عملیات ریاضی گسترده است. از این منظر، روش فضای حالت رویکردی بسیار مناسب برای تحلیل محسوب می شود. افزون بر این، از آنجاکه نظریه های نوین کنترل سازه بر توصیف معادلات سیستم بر پایه n معادله دیفرانسیل ماتریسی مرتبه دوم استوارند، می توان این معادلات را در قالب یک معادله دیفرانسیل ماتریسی مرتبه اول بازنویسی کرد. بر این اساس، حل معادله دیفرانسیل مرتبه دوم حاکم بر سازه، با استفاده از روابط زیر به یک معادله ماتریسی در فضای حالت تبدیل می شود.

برای حل معادله بالا، به منظور تعیین پاسخ های سازه در فضای حالت، متغیر فضای حالت به صورت زیر لحاظ می شود.

$$Z = \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\dot{u}\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

حال معادله دیفرانسیل ماتریسی مرتبه دوم سازه، تحت اثر نیروی زلزله به صورت فضای حالت تبدیل می شود.

$$\dot{Z} = [A]Z + [B]\ddot{u}_g \quad (3)$$

ماتریس [A] موسوم به ماتریس سیستم¹ است و مبین دینامیک ذاتی سیستم بدون ورودی ها بوده و ماتریس [B]، که به آن ماتریس ورودی² گفته می شود، نحوه تأثیرگذاری ورودی های خارجی بر سیستم را توصیف می کند.

برای حل دستگاه جدید کافی است ماتریس های معادلات فضای حالت از رابطه حرکت سازه به دست آید. از سوی دیگر مقدار بردار شتاب سازه از معادله حرکت سازه به شرح زیر قابل دستیابی است.

¹ System Matrix

² Input Matrix



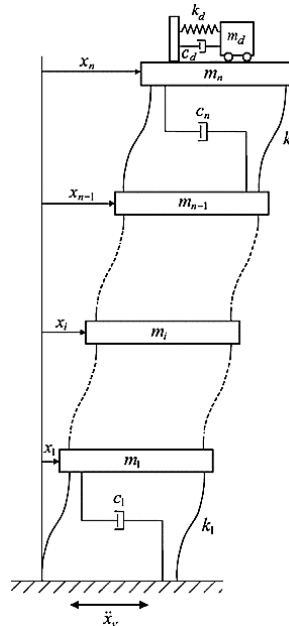
ماتریس قطری جرم سازه بدون سیستم میراگر جرمی است. شایان ذکر است، (m_d) ، (k_d) و (c_d) به ترتیب جرم، سختی و میرایی میراگر جرمی و (k_i) و (c_i) نیز به ترتیب برابر سختی و میرایی طبقه نام هستند.

$$[M]_T = \begin{bmatrix} M_{str} & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[K]_T = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & 0 \\ 0 & -k_3 & \ddots & & \\ & 0 & & k_n + k_t & -k_d \\ & & & -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[C]_T = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & 0 \\ 0 & -c_3 & \ddots & & \\ & 0 & & c_n + c_d & -c_d \\ & & & -c_d & c_d \end{bmatrix} \quad (9)$$

$[M]_T$ ، $[K]_T$ و $[C]_T$ نیز ماتریس های جرم، سختی و میرایی سازه همراه با میراگر جرمی هستند. در شکل زیر قاب مجهزه یک میراگر جرمی در بام نشان داده شده است.



شکل ۱- مدل سازه همراه با میراگر جرمی تنظیم شده

به منظور حل دستگاه معادلات فضای حالت از روش های مختلفی استفاده می شود. یکی از روش های مورد استفاده که در این پژوهش نیز از آن استفاده شده است، گسسته سازی^۱ معادلات حاکم بر حرکت است؛ این روش با گسسته سازی زمان و به شکل زیر آغاز می شود.

$$t_k = k\Delta t \quad (10)$$

بر این اساس متغیرهای حالت به شکل زیر تعیین می شوند.

$$z_{k+1} = \Phi z_k + \Gamma \ddot{u}_{g,k} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، (Φ) ماتریس انتقال حالت گسسته بوده و به شکل زیر تعریف می شود.

$$\Phi = e^{A\Delta t} \quad (12)$$

(Γ) نیز ماتریس ورودی گسسته بوده و به شرح زیر محاسبه می شود.

$$\Gamma = \int_0^{\Delta t} e^{A\tau} B d\tau \quad (13)$$

اگر ماتریس $[A]$ معکوس پذیر باشد (که معمولاً در سازه ها این گونه است)؛ خواهیم داشت:

$$\Gamma = A^{-1}(\Phi - I)B \quad (14)$$

در معادلات بالا، (k) شماره گام زمانی و $(\ddot{u}_{g,k})$ نیز برابر شتاب زمین در لحظه k ام گام زمانی است.

۳- الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر پرندگان شکاری (BPBO)

الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر پرندگان شکاری (BPBO)، یک الگوریتم فراابتکاری جدید و الهام گرفته از طبیعت است که در سال ۲۰۲۵ توسط قاسمی و همکاران معرفی شد [۱۷]. الگوریتم BPBO رفتار هوشمندانه پرندگان شکاری (مانند عقاب، شاهین و کرکس) را در فرآیند شکار مدل سازی می کند.

الگوریتم BPBO مستقیماً از عادات شکار پرندگان شکاری الهام گرفته و روش های سازگاری آن ها را در قالب یک فرآیند بهینه سازی سازماندهی کرده است. این فرآیند در چهار فاز اصلی طراحی شده که هر کدام بازتاب دهنده رفتار خاصی از شکار در طبیعت هستند.

- سازگاری فردی^۲ (شکار انفرادی)

¹ Discretization
² Self-Adaptation

۴- صحت‌سنجی مدل ساخته شده

برای اطمینان از صحت نتایج و پاسخ‌های به‌دست‌آمده و همچنین ارزیابی روند بهینه‌سازی، لازم است دقت پاسخ‌های محاسباتی مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، روش‌شناسی مدل‌سازی، روش تحلیل لرزه‌ای و مکانیزم سیستم کنترل غیرفعال مبتنی بر میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD) اعتبارسنجی می‌شود. در این راستا، نتایج و پاسخ‌های حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی یک مدل سازه‌ای مجهز به TMD، با پاسخ‌های گزارش شده در مطالعات معتبر پیشین مقایسه می‌شود.

به‌عنوان مدل سازه‌ای مرجع، از یک سازه ۱۰ طبقه تحت اثر شتابنگاشت زلزله السترو^۱ استفاده شده است [۱۰]. مشخصات دینامیکی این مدل سازه‌ای (برگرفته از مرجع [۱۰]) در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات طبقات ساختمان ۱۰ طبقه مرجع [۱۰]

Floor ID	Mass (ton)	Stiffness (kN/m)	Damping (kN.s/m)
1	360	6.50E+05	6200
2	360	6.50E+05	6200
3	360	6.50E+05	6200
4	360	6.50E+05	6200
5	360	6.50E+05	6200
6	360	6.50E+05	6200
7	360	6.50E+05	6200
8	360	6.50E+05	6200
9	360	6.50E+05	6200
10	360	6.50E+05	6200

در الگوریتم BPBO، این رفتار به‌صورت کاوش و بهبود فردی مدل شده است؛ یعنی هر عامل موقعیت خود را با توجه به بهترین راه‌حل یافت‌شده‌اش به‌روز می‌کند.

- شکار گروهی^۱ (جستجو و حمله جمعی)

الگوریتم BPBO این رفتار را از طریق تعدیل‌ها یا اصلاحات گروهی شبیه‌سازی می‌کند، به‌طوری که عامل‌های جستجو حرکت خود را با توجه به مرکزیت جمعیت بهبود می‌بخشند و این امر موجب افزایش تنوع در جستجو می‌شود.

- رقابت^۲ (هدف‌گیری طعمه‌های آسان)

الگوریتم این اصل را با جایگزینی راه‌حل‌های ضعیف توسط راه‌حل‌های بهینه اعمال می‌کند که به افزایش جستجو و جلوگیری از توقف در بهینه‌های محلی منجر می‌شود.

- جستجوی مستمر^۳ (فرار از بهینه‌های محلی)

الگوریتم BPBO از یک مکانیسم جابه‌جایی استفاده می‌کند که به عامل‌های جستجو اجازه می‌دهد به مناطق امیدبخش حرکت کنند و جستجوی سراسری را تداوم بخشند.

این ارتباط نظام‌مند بین تکنیک‌های شکار پرندگان و کارکردهای الگوریتمی، تعادل بهینه‌ای بین بهره‌برداری^۴ و کاوش^۵ در BPBO ایجاد کرده و به کارایی بالاتر در بهینه‌سازی منجر شده است. شبه‌کد الگوریتم بهینه‌یابی مبتنی بر پرندگان شکاری، در شکل زیر نشان داده شده است.

شروع

۱- تنظیم پارامترهای الگوریتم:

- تعیین تعداد پرندگان (N)
- تعیین حداکثر تعداد تکرار (MaxIter)
- تعیین حدود بالا و پایین متغیرهای طراحی (U_{max} و U_{min})

۲- مقداردهی اولیه جمعیت:

- برای هر پرنده i از ۱ تا N
- موقعیت اولیه X_i را به‌صورت تصادفی در بازه مجاز تولید کن
- مقدار تابع هدف $f(X_i)$ را محاسبه کن

پایان حلقه

۳- تعیین بهترین پرنده (X_{best})

۴- برای $t = 1$ تا MaxIter تکرار کن:

- برای هر پرنده i :
 - اگر در فاز جستجوی اکتشافی (Exploration) باشد: تولید موقعیت جدید با استفاده از الگوی پرواز گسترده (حرکت تصادفی هدایت‌شده در فضای جستجو)
 - اگر در فاز تعقیب یا حمله (Exploitation) باشد: به‌روزرسانی موقعیت بر اساس فاصله از بهترین پرنده (حرکت همگرا به سمت X_{best})
 - اعمال محدودیت مرزی: اگر X_i خارج از بازه مجاز بود
 - محاسبه مقدار جدید تابع هدف
 - اگر مقدار جدید بهتر بود: موقعیت را جایگزین کن
- پایان برای به‌روزرسانی بهترین جواب کلی (X_{best})
- بررسی معیار توقف:
 - اگر شرط همگرایی برقرار بود ← خروج
- پایان تکرار

۵- گزارش بهترین جواب نهایی (X_{best})

پایان

شکل ۲- الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر پرندگان شکاری [۱۷]

⁶ Elcentro

¹ Cooperative Hunting

² Competition

³ Ongoing Search

⁴ Exploitation

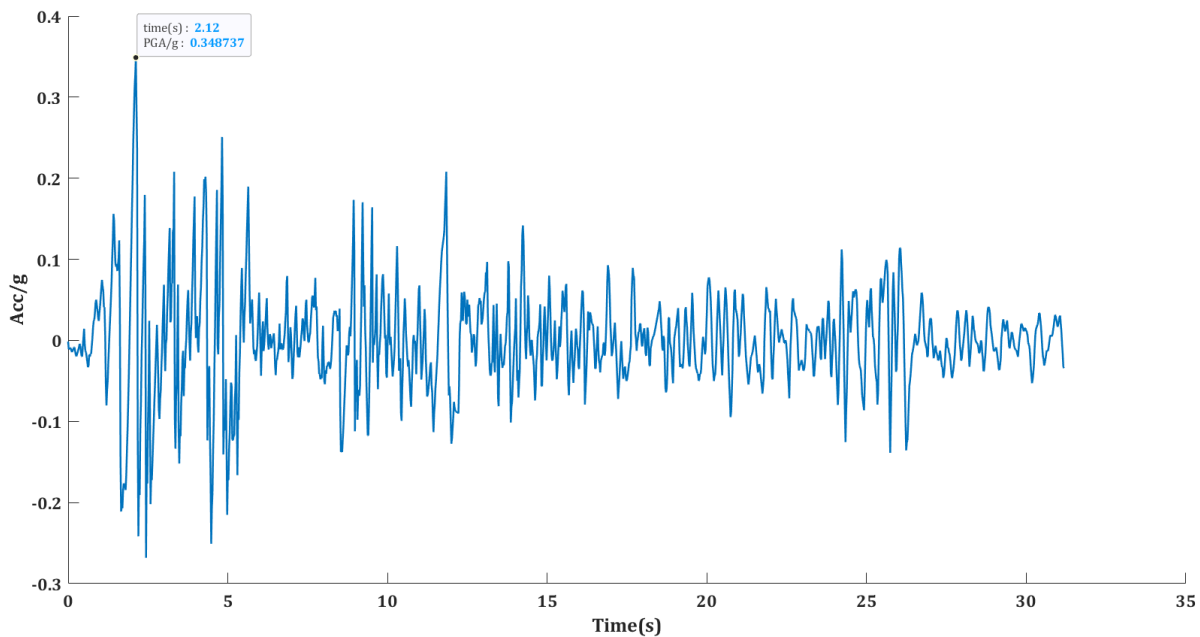
⁵ Exploration



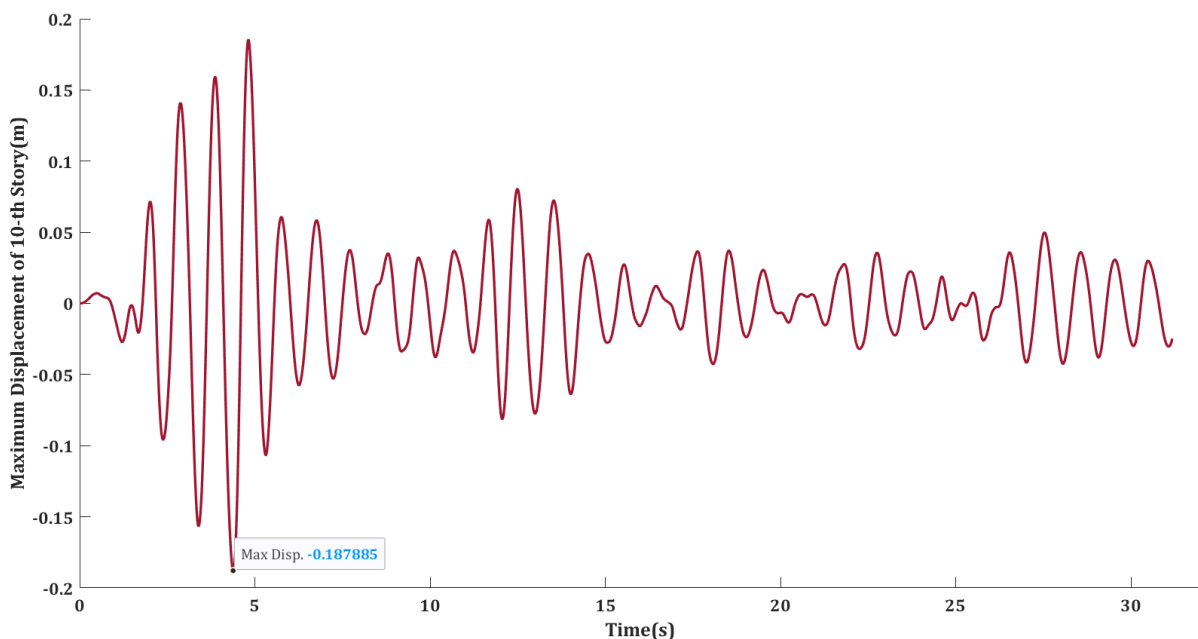
[۱۰]، [۱۵]) اثرات سایر بارها (گرانش، باد)، تاثیر مشخصات ژئوتکنیکی خاک سایت در انتخاب رکورد یا اندرکنش خاک-سازه در نظر گرفته نشده است. همچنین برای حفظ یکنواختی شرایط مقایسه (در این بخش و بخش بعدی) با مراجع پیشین (مراجع فوق‌الذکر) که از رکورد مقیاس‌نشده الاسترو استفاده کرده‌اند، در این مرحله از مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت نیز صرف‌نظر شده است.

در شکل زیر، نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام سازه مرجع فاقد سیستم کنترل، تحت اثر شتاب‌نگاشت زلزله الاسترو (شکل (۳)) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، حداکثر جابه‌جایی بام سازه مرجع تحت این تحریک لرزه‌ای، حدود ۱۸/۷۹ سانتی‌متر به دست آمده است. لازم به ذکر است که مقدار حداکثر جابه‌جایی بام گزارش شده در مرجع [۱۰]، ۱۸/۸ سانتی‌متر است. این تطابق نزدیک بین نتایج، دقت و صحت مدل ارائه شده در این تحقیق را تأیید می‌کند.

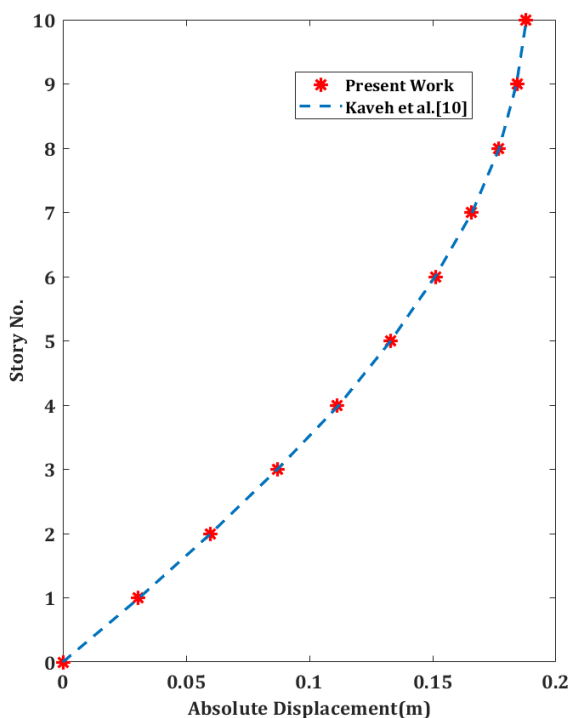
این مطالعه صرفاً پاسخ سازه را تحت تحریک افقی زلزله بررسی می‌کند و مشابه مراجع مورد مقایسه (از جمله مراجع [۳]،



شکل ۳- تاریخچه تحریک زلزله الاسترو (۱۹۴۰)



شکل ۴- تاریخچه ارتعاش بام سازه مرجع ۱۰ طبقه تحت تحریک زلزله السترو



شکل ۵- پروفیل جابه‌جایی مطلق حداکثر طبقات طی زلزله اعمالی

۵- مسئله حل شده

در این بخش، هدف کاهش حداکثر جابه‌جایی بام سازه ۱۰ طبقه مورد بحث در بخش قبل، با به‌کارگیری یک میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) نصب شده در بام است. این مثال به‌عنوان یک

در شکل (۵) نیز نمودار پروفیل ماکزیمم جابه‌جایی مطلق طبقات، تحت تحریک السترو، به همراه نتایج ارائه شده در مرجع [۱۰] و انطباق آن‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که پیش‌تر نیز عنوان شد، در این پژوهش معادلات حرکت در قالب فضای حالت بیان شده و پاسخ دینامیکی با استفاده از تابع Isim در نرم‌افزار MATLAB محاسبه شده است. این تابع برای سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان (LTI) از حل تحلیلی مبتنی بر نمایی ماتریسی (Exponential Matrix) استفاده می‌کند و لذا پایداری عددی آن تابع پایداری ذاتی سیستم پیوسته است. در نتیجه، محدودیت پایداری مشروط وابسته به گام زمانی، مشابه روش‌های صریح عددی، در اینجا وجود ندارد. باین‌حال، به‌منظور تضمین دقت کافی در بازسازی پاسخ دینامیکی، بردار زمان تحلیل با گام زمانی ۰/۰۲ ثانیه تعریف شد. این مقدار به‌گونه‌ای انتخاب شد که حداقل ۵۰ نقطه نمونه‌برداری در هر چرخه کوچک‌ترین پریود طبیعی سیستم (حدود یک ثانیه) وجود داشته باشد.

$$obj. 1 : \text{Minimize } \left(\text{Maximum Displacement of } 10\text{-th floor(roof)} \right) \quad (19)$$

$$obj. 2 : \text{Minimize } (SRSS^2 \text{ of the Maximum Stories Displacement}) \quad (20)$$

مقادیر بهینه سختی و میرایی برای سازه با مشخصات فوق با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی مبتنی بر پرندگان شکاری، با فرض جابه‌جایی مطلق^۳ حداکثر بام، به‌عنوان تابع هدف اول و جذر مجموع مربعات حداکثر جابه‌جایی مطلق طبقات، به‌عنوان تابع هدف دوم تعیین شده است؛ مقادیر بهینه پارامترهای تخمینی در این مقاله با مقادیر سایر پژوهش‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است.

در شکل‌های زیر نیز نمودار همگرایی ۱۰۰ تکرار اول الگوریتم بهینه‌سازی پرندگان شکاری برای هر دو تابع هدف مورد نظر نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، الگوریتم پس از مراحل اکتشاف^۴ پاسخ‌ها و توسعه^۵ و بهبود آن‌ها به پاسخ بهینه‌ای با مشخصات ذکر شده در فوق همگرا شده است. دست‌یابی به پاسخی قابل قبول، آن هم در کم‌تر از ۳۰ تکرار از قدرت الگوریتم مورد استفاده در این مقاله حکایت دارد.

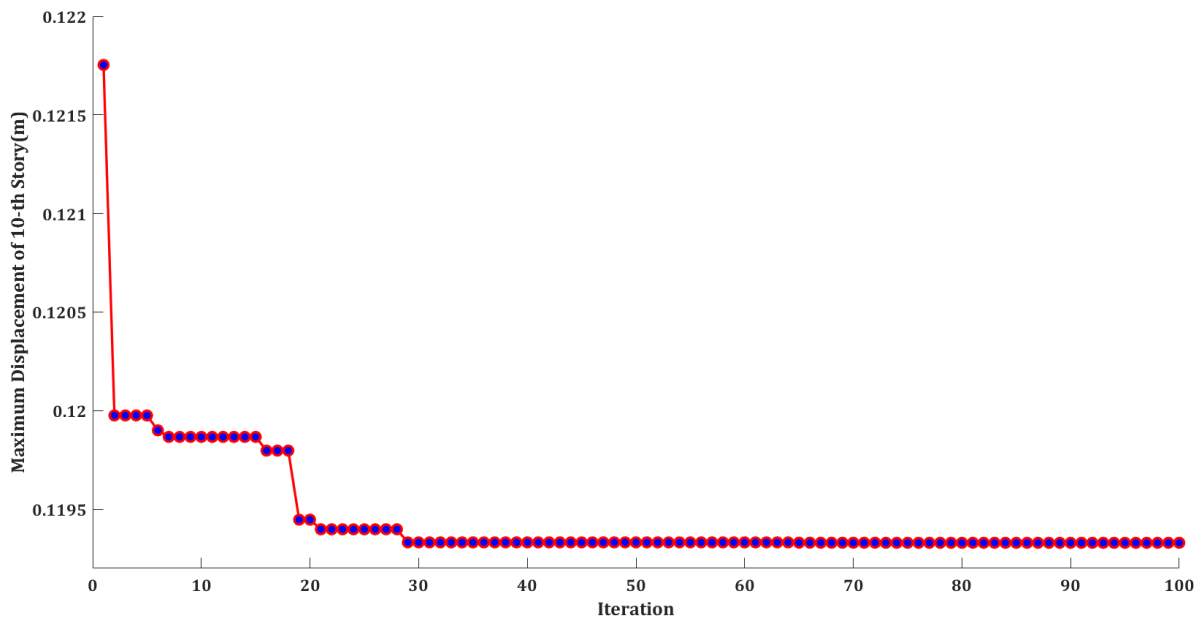
مسئله معیار (بنچمارک^۱) در مطالعات متعددی از جمله مراجع [۳]، [۱۰]، [۱۵] و [۱۶] مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار گرفته است. مطابق با مشخصات تعریف‌شده برای مسئله، جرم میراگر ثابت و برابر ۱۰۸ تن در نظر گرفته می‌شود. دو پارامتر سختی و ضریب میرایی میراگر به‌عنوان متغیرهای تصمیم مسئله بهینه‌سازی با محدوده‌ای از مقادیر کاربردی، انتخاب شده‌اند. حداکثر جابه‌جایی مطلق بام سازه به‌عنوان تابع هدف اول و جذر مجموع مربعات حداکثر جابه‌جایی مطلق طبقات به‌عنوان تابع هدف دوم تعریف می‌شوند. صورت استاندارد مسئله بهینه‌سازی برای سازه مرجع مجهز به یک میراگر جرمی تک به شرح زیر است.

$$\text{Find } x = [k_d, c_d] \quad (15)$$

$$m_d = 108 \text{ ton} \quad (16)$$

$$0 \leq k_d \leq 5000 \frac{kN}{m} \quad (17)$$

$$0 \leq c_d \leq 1000 kN \cdot \frac{s}{m} \quad (18)$$



شکل ۶- روند همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی در تکرارهای مختلف (تابع هدف اول)

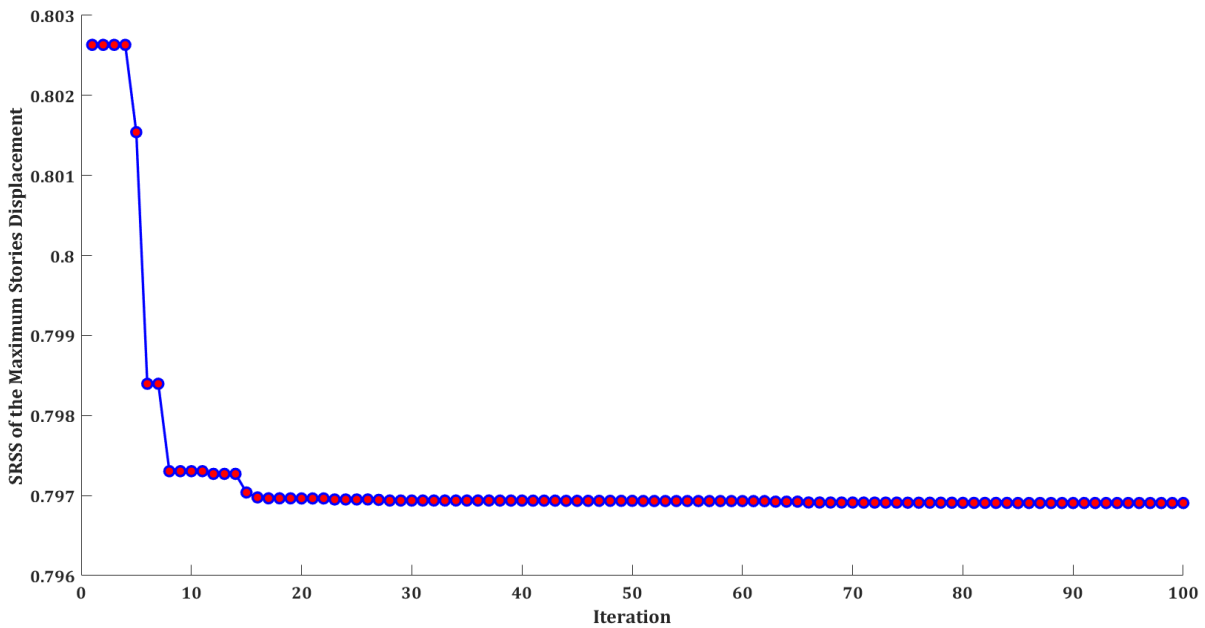
² Square Root of the Sum of the Squares (SRSS)

³ Absolute Displacement

⁴ Exploration

⁵ Exploitation

¹ Benchmark Problem



شکل ۷- روند همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی در تکرارهای مختلف (تابع هدف دوم)

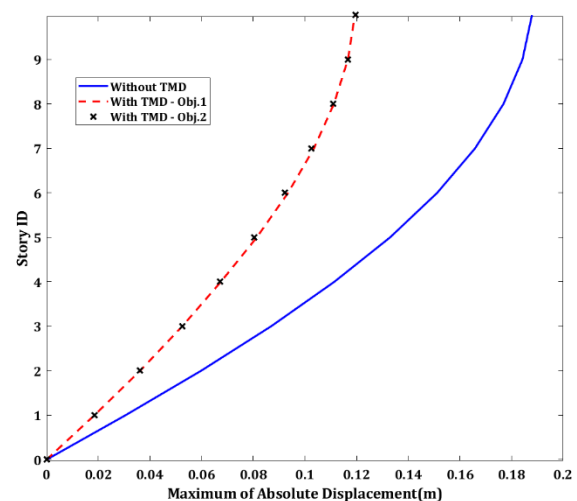
در جدول (۲) ارائه شده است. در شکل (۸) نیز مقادیر حداکثر جابه‌جایی طبقات در حالت کنترل‌نشده (برای هر دو تابع هدف) و کنترل‌نشده تحت تحریک زلزله‌السترو، با پارامترهای تعیین‌شده در این پژوهش، نشان داده شده است.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شده

TMD Parameters	Optimum Value						
	Hadi et al. [15]	Lee et al. [3]	Kaveh et al. [10]	Hatami et al. [16]		Present Work	
				obj.1	obj.2	obj.1	obj.2
C_t (kN.s/m)	151.5	271.79	88.697	121.51	210.9	57.7656	85.3569
K_t (kN/m)	3750	4126.93	4207.735	3653.94	3727.88	3243.789	3771.708

مقادیر پارامترهای بهینه‌میراگر جرمی و قیاس آن با سایر مقالات در جدول زیر نشان داده شده است. شایان‌ذکر است در مرجع [۱۶]، از دو تابع هدف نسبی برای تعیین مقادیر پارامترها استفاده شده است که مقادیر خروجی بهینه‌سازی هر دو تابع هدف

در جدول (۳)، مقادیر حداکثر جابه‌جایی طبقات به‌همراه نتایج گزارش‌شده در سایر مطالعات، به‌منظور مقایسه روش‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از این پژوهش در مقایسه با سایر مقالات کم‌تر بوده که نشان‌دهنده کارایی بالاتر الگوریتم بهینه‌سازی به‌کارگرفته‌شده است. جابه‌جایی بام در حالت کنترل‌نشده ۱۸/۷۹ سانتی‌متر بوده که با نصب میراگر با پارامترهای بهینه، این مقدار در تابع هدف اول به حدود ۱۱/۹۳ سانتی‌متر و در تابع هدف دوم به ۱۱/۹۵۷ سانتی‌متر کاهش یافته است. این ارقام بیانگر کاهش به میزان ۳۶/۵٪ برای تابع هدف اول و ۳۶/۳۶٪ برای تابع هدف دوم در جابه‌جایی مطلق بام هستند. در مقایسه، درصد کاهش جابه‌جایی بام در مقاله هادی و همکاران [۱۵]، لی و همکاران [۳]، کاوه و همکاران [۱۰] و حاتمی و همکاران [۱۶] به ترتیب ۳۵/۰۷٪، ۳۲/۹۴٪، ۳۴/۸٪ و ۳۵/۶٪



شکل ۸- حداکثر جابه‌جایی طبقات در حالت کنترل‌نشده و کنترل‌نشده تحت تحریک زلزله‌السترو

موضوع حاکی از آن است که روش ارائه‌شده در مقایسه با سایر مراجع، از قابلیت بالاتری در جذب انرژی لرزه‌ای و کاهش جابه‌جایی‌های طبقات برخوردار است.

ضمن این‌که مقایسه پارامترهای بهینه حاصل از این پژوهش با مقادیر توصیه‌شده توسط **دن هارتوگ** نیز حائز اهمیت است. در صورت استفاده از روش تحلیلی **دن هارتوگ** برای تعیین پارامترهای میراگر جرمی، مقادیر زیر برای این ساختمان به‌دست می‌آید.

جدول ۳- مقادیر حداکثر جابه‌جایی مطلق طبقات نسبت به زمین

Storey ID	W/O	Maximum absolute displacement with respect to the ground (m)						Percentage of Reduction (%)							
		Hadi et al.	Lee et al.	Kaveh et al.	Hatami et al. [16]		Present Work		Hadi et al.	Lee et al.	Kaveh et al.	Hatami et al. [16]		Present Work	
		TMD	[15]	[3]	[10]	obj.1	obj.2	obj.1	obj.2	[15]	[3]	[10]	obj.1	obj.2	obj.1
1	0.0306	0.019	0.02	0.0185	0.019	0.019	0.01855	0.01854	37.88	34.61	39.52	37.88	37.88	39.355	39.377
2	0.0598	0.037	0.039	0.0362	0.037	0.038	0.03622	0.03622	38.16	34.82	39.50	38.16	36.49	39.461	39.471
3	0.0869	0.058	0.057	0.0525	0.053	0.055	0.05253	0.05254	33.27	34.42	39.60	39.03	36.72	39.562	39.549
4	0.1114	0.068	0.073	0.0682	0.068	0.07	0.06747	0.06725	38.94	34.45	38.76	38.94	37.14	39.415	39.612
5	0.1330	0.082	0.087	0.0825	0.081	0.083	0.08137	0.08041	38.33	34.57	37.95	39.08	37.58	38.806	39.526
6	0.1512	0.094	0.099	0.095	0.093	0.095	0.09346	0.09226	37.82	34.51	37.16	38.48	37.16	38.176	38.971
7	0.1658	0.104	0.108	0.10156	0.103	0.105	0.10347	0.10254	37.28	34.87	36.32	37.88	36.68	37.599	38.161
8	0.1768	0.113	0.117	0.1139	0.112	0.114	0.11120	0.11090	36.10	33.84	35.59	36.67	35.54	37.119	37.291
9	0.1842	0.119	0.123	0.1196	0.118	0.12	0.11665	0.11668	35.40	33.23	35.07	35.94	34.85	36.675	36.658
10	0.1879	0.122	0.126	0.1225	0.121	0.123	0.11933	0.11957	35.07	32.94	34.80	35.60	34.53	36.486	36.361
TMD	-	0.358	0.282	0.4933	0.376	0.31	0.41430	0.44593	Mean						
									36.83	34.23	37.43	37.77	36.46	38.265	38.498

شکل‌های زیر، تحت عنوان Den Hartog TMD، نشان داده شده و با مقادیر جابه‌جایی میراگر با پارامترهای تعیین‌شده در این پژوهش مقایسه شده است.

جزئیات بیش‌تر از رفتار سازه از نمودار تاریخچه جابه‌جایی طبقات قابل‌برداشت است؛ در شکل‌های (۹) و (۱۰)، تاریخچه جابه‌جایی حداکثر جابه‌جایی طبقه اول و آخر در دو حالت کنترل‌شده (با مشخصات تعیین‌شده به کمک الگوریتم BPBO) و کنترل‌نشده نشان داده شده است؛ بهبود پاسخ با کمک میراگر جرمی تنظیم‌شده مشهود است. شایان‌ذکر است با نوعی فعال‌شدن میراگر جرمی، اختلاف فاز حرکتی آن با ارتعاش طبقات قابل‌رویت است.

(برای تابع هدف اول) گزارش شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کاهش حاصل در جابه‌جایی بام در این پژوهش نسبت به سایر مراجع برتری دارد.

همچنین، میانگین حداکثر جابه‌جایی کلیه طبقات در این روش ۳۸/۳٪ برای تابع هدف اول و حدود ۳۸/۵٪ برای تابع هدف دوم است. این مقدار در مقایسه با میانگین کاهش حداکثر جابه‌جایی طبقات در مرجع [۱۵] (۳۶/۸۳٪)، مرجع [۳] (۳۴/۲۳٪) و مرجع [۱۰] (۳۷/۴۳٪)، برتری محسوسی را نشان می‌دهد. این

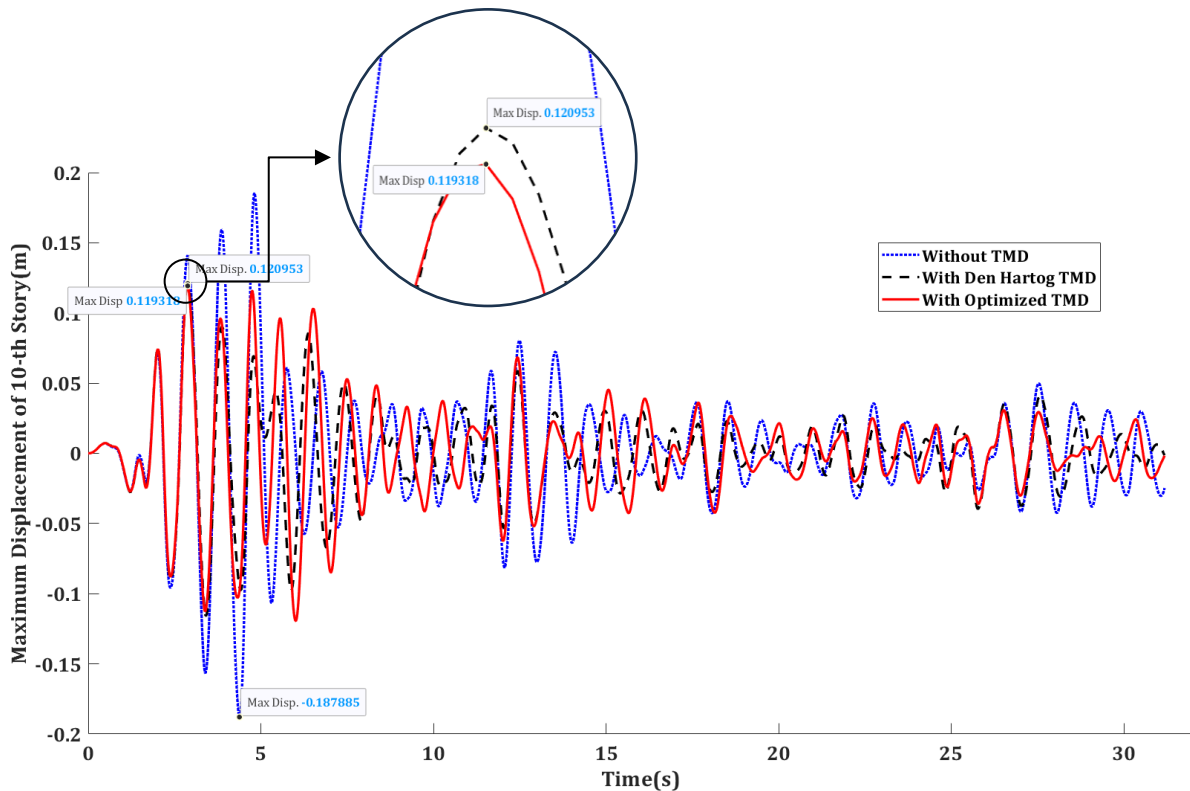
$$\mu = \frac{m_t}{M_{str}} = 0.03, \text{Mass Ratio} \quad (21)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \mu} \cong 0.97, \text{Frequency Ratio} \quad (22)$$

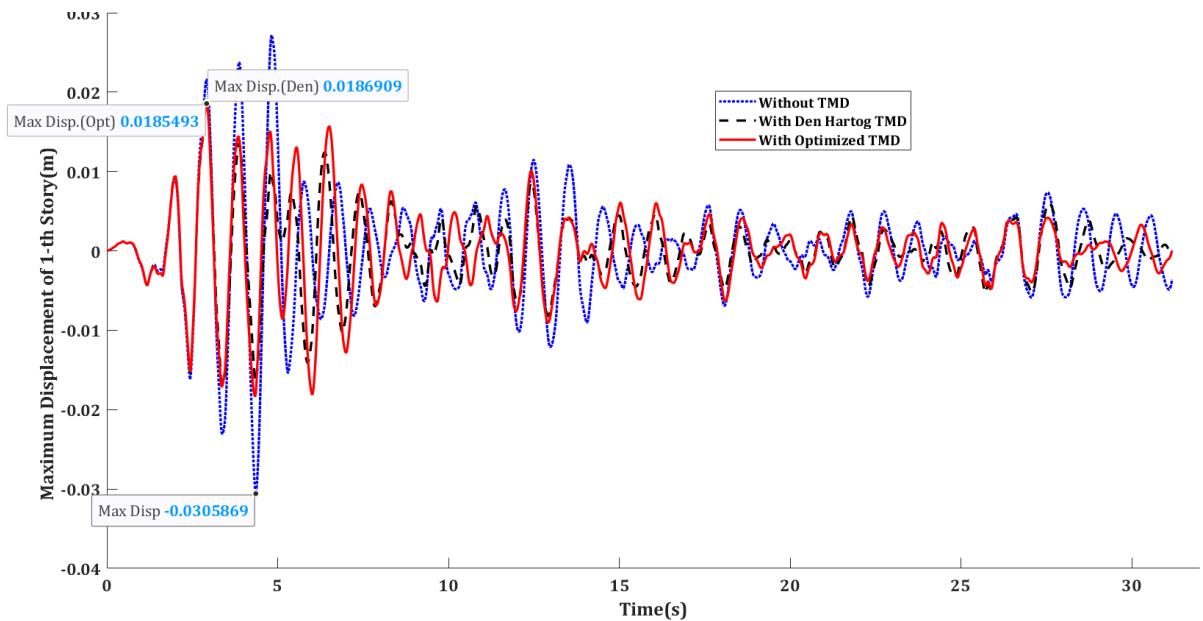
$$\zeta = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \cong 0.10, \text{Damping Ratio} \quad (23)$$

با مقادیر فوق، پارامترهای سختی و میرایی به‌ترتیب برابر ۴۱۰۴ کیلونیوتن بر متر و ۱۳۳/۲ کیلونیوتن.ثانیه بر متر تعیین می‌شود.

مقادیر به‌دست‌آمده به کمک روابط **دن هارتوگ** با روش ارائه‌شده در این مقاله قابل‌مقایسه است. مقادیر حداکثر جابه‌جایی طبقات، در صورت استفاده از میراگر با این مشخصات، در



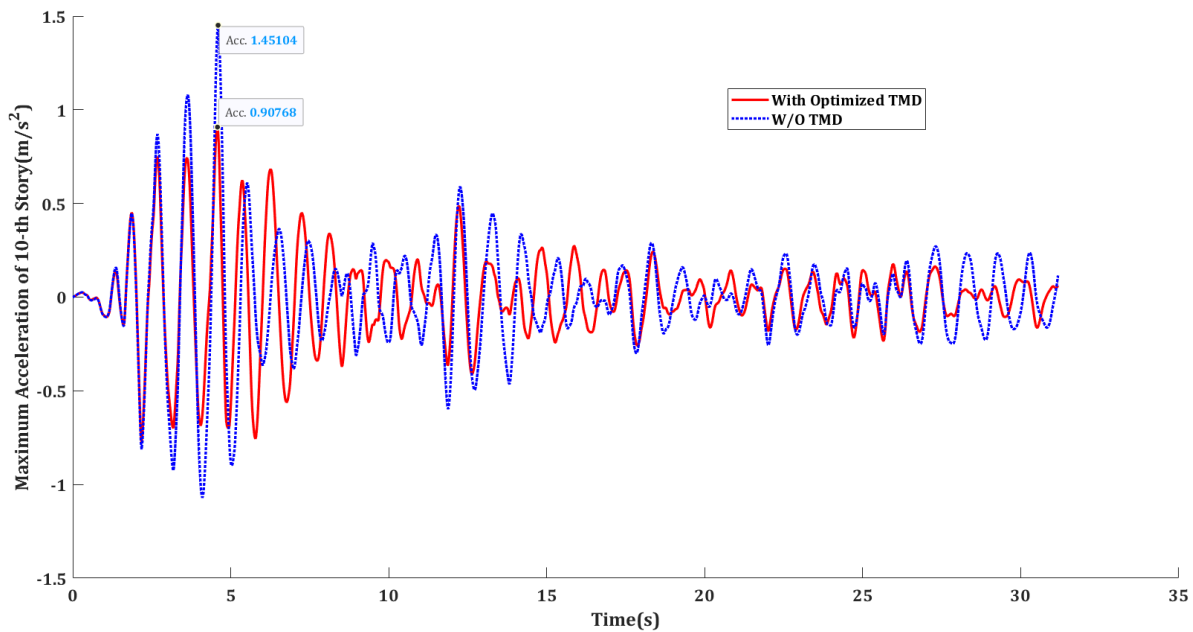
شکل ۹- حداکثر جابه‌جایی طبقه بام در حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده تحت تحریک زلزله السترو



شکل ۱۰- حداکثر جابه‌جایی طبقه اول در حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده تحت تحریک زلزله السترو

اینکه هدف این پژوهش تمرکز بر کاهش تغییر مکان سازه بوده است، اما شتاب سازه نیز تقریباً به همان میزان کاهش یافته است.

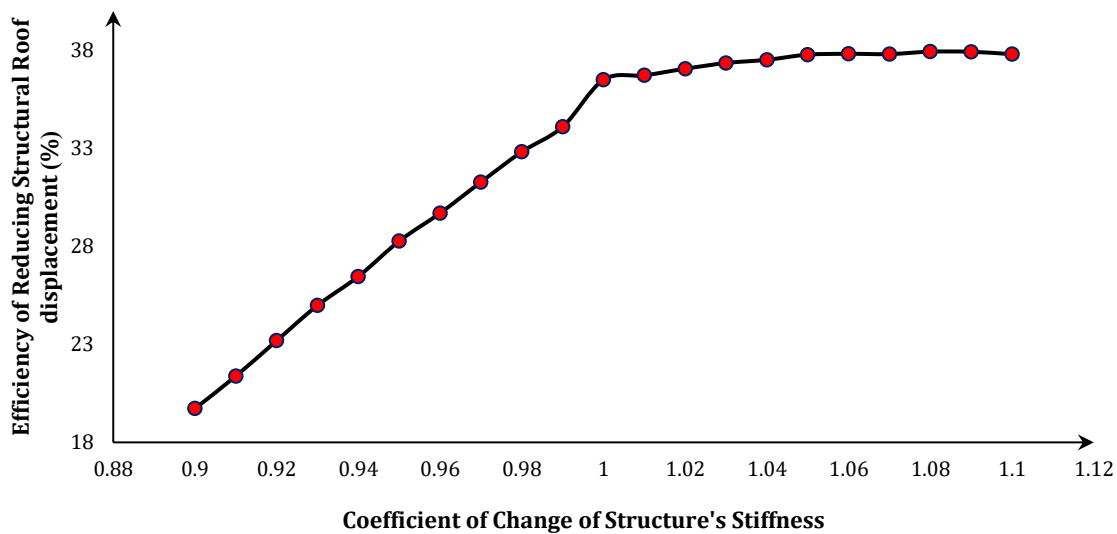
در شکل (۱۱) نیز برای مقایسه، نمودار تاریخچه تغییرات شتاب مطلق بام سازه تحت زلزله السترو در دو حالت با میراگر جرمی تنظیم‌شده (با مشخصات به‌دست‌آمده برای تابع هدف اول) و بدون میراگر جرمی نشان داده شده است. در این حالت علی‌رغم



شکل ۱۱- حداکثر شتاب مطلق طبقه بام در حالت کنترل‌شده و کنترل‌نشده تحت تحریک زلزله السترو

میراگر در کاهش پاسخ جابه‌جایی بام سازه، با لحاظ نمودن تغییرات سختی سازه در محدوده ۹۰ تا ۱۱۰ درصد سختی فعلی، در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

نظر به احتمال تغییرات مشخصات سازه حین دوران بهره‌برداری، برای بررسی عملکرد میراگر جرمی تنظیم‌شده، میزان کاهش تغییرات حداکثر بام سازه مجهزه میراگر جرمی (راندمان



شکل ۱۲- تأثیر تغییرات سختی سازه بر راندمان کاهش تغییر مکان سازه مجهزه میراگر جرمی با پارامترهای تعیین‌شده با تابع هدف اول

۶- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های مؤثر در کنترل غیرفعال سازه‌ها تحت تأثیر زمین‌لرزه‌ها، استفاده از سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD) است. هدف اصلی این پژوهش، تعیین پارامترهای بهینه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده به منظور دستیابی به حداکثر کاهش در پاسخ جابه‌جایی سازه تحت بارگذاری لرزه‌ای است. در این تحقیق، برای نخستین بار از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر پرندگان

همان‌طور که پیش‌تر نیز مطرح شد، یکی از ضعف‌های میراگرهای جرمی تنظیمی وابستگی به پارامترهای سازه است، در شکل (۱۲) واضح است که وجود میراگر جرمی حتی با تغییرات سختی موجب کاهش جابه‌جایی می‌شود اما راندمان آن به شدت (بیش از نصف) افت می‌کند.

شکاري (BPBO) برای تعیین پارامترهای بهینه TMD و بیشینه‌سازی کاهش لرزه ای استفاده شده است.

تابع هدف مورد استفاده در این مطالعه، مطابق با رویکرد رایج در مراجع پیشین، بر پایه حداکثر جابه‌جایی مطلق بام سازه و جذر مجموع مربعات جابه‌جایی‌های مطلق طبقات در طول مدت تحریک لرزه‌ای تعریف شد. همان‌گونه که اشاره شد، الگوریتم‌های فراابتکاری از جمله روش‌های قدرتمند در بهینه‌سازی پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم شده محسوب می‌شوند. پاسخ‌های خروجی حاصل از الگوریتم به‌کارگرفته‌شده در این مقاله، نتایج قابل‌قبولی ارائه داده و در مقایسه با یافته‌های سایر مطالعات، بهبود محسوسی را نشان می‌دهد.

روش ارائه‌شده در این پژوهش قابلیت تعمیم به طیف وسیعی از سیستم‌های سازه‌ای و مکانیکی تحت انواع تحریکات خارجی را دارا است. با این وجود، به‌منظور امکان مقایسه مستقیم نتایج با مقالات پیشین، روش مونتاژ ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه، صرفاً برای قاب‌های برشی با یک درجه آزادی انتقالی در هر طبقه در نظر گرفته شده است.

در مثال حل‌شده، یک ساختمان برشی ۱۰ طبقه در نظر گرفته شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که با جرم میراگر یکسان، مقدار میانگین کاهش جابه‌جایی حدود $38/3\%$ و مقدار کاهش حداکثر جابه‌جایی طبقه بام حدود $36/5\%$ برای تابع هدف اول (حداکثر جابه‌جایی طبقه بام) و مقدار میانگین کاهش جابه‌جایی حدود $38/5\%$ و مقدار کاهش حداکثر جابه‌جایی طبقه بام حدود $36/5\%$ برای تابع هدف دوم (جذر مجموع مربع حداکثر جابه‌جایی طبقات) است، که در مقایسه با مطالعات پیشین بهبود محسوسی را نشان می‌دهد. این نتیجه بیانگر قابلیت بالاتر روش حاضر در جذب انرژی زلزله و کاهش جابه‌جایی‌های طبقات است.

- [15] Hadi, M.N.S., and Arfiadi, Y. (1998), "Optimal design of absorber for MDOF structures", *Structural Engineering*, 124(11), pp.1272-1280,
- [16] Hatami, F., Saberi Hoseinabad, H., and Rahai, A. (2016), "Using improved harmony search algorithm (IHAS) for optimal designing of tuned mass dampers (TMD)", *Engineering Mechanics Institute Conference, EMI International Conference, ASCE*.
- [17] Ghasemi, M., Akbari, M.A., Zare, M., Mirjalali, S., Deriche, M., Abualigah, L., and Khodadadi, N. (2025), "Birds of prey-based optimization (BPBO): a metaheuristic algorithm for optimization", *Springer Science and Business Media LLC*. 18(4), 88.
- [18] Mohtasham, M., Kazem, S., Yavar, G., and Hossein, M. (2013), "Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms (GAs) for mitigating the seismic response of structures", *Journal of Vibration and Control*, 19(4), pp.1-21.
- [19] Agathoklis, G., and Francesco, P. (2017), "Optimum design of the tuned mass-damper-inerter for serviceability limit state performance in wind-excited tall buildings", *Procedia Engineering*, 199 pp.1773-1778.
- [20] Lavan, O. (2017), "Multi-objective optimal design of tuned mass dampers", *Journal of Structure and Control Health Monit.* 24(11).
- [21] Gebrail, B., Sinan, M., and Xin-She, Y. (2018), "A novel bat algorithm based optimum tuning of mass dampers for improving the seismic safety of structures", *Journal of Engineering Structures*, 159, pp.89-98
- [22] Yang, F., Sedaghati, R., and Esmailzadeh, E. (2021), "Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review", *Journal of Vibration and Control*, 28(7-8), pp.812-836.
- [23] Wang, L., Nagarajaiah, S., Shi, W., and Zhou, Y. (2022), "Seismic performance improvement of base-isolated structures using a semi-active tuned mass damper", *Engineering Structures*, 271, pp.114963.
- [24] Cao, H. (2025), "Double tuned mass damper with a grounded inerter for structural vibration control", *Journal of Vibration and Control*.
- [25] MathWorks. (2024), *MATLAB (Version R2024b) [Computer software]*. Natick, MA: The MathWorks Inc.
- [1] Frahm, H., (1911), "Device for damping vibrations of bodies", U.S. Patent 989,958.
- [2] Den Hartog, J.P. (1956), "Mechanical Vibrations", New York: McGraw Hill Inc.
- [3] Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., and Chung, R.M. (1997), "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 26, pp.617-635.
- [4] Lee, C.L., Chen, Y.T., Chung, L.L., and Wang, Y.P. (2006), "Optimal design the theories and applications of tuned mass dampers", *Engineering Structure*. 28, pp.43-53.
- [5] Pisal, A.Y. (2015), "Seismic response of multi-story structure with multiple tuned mass friction dampers", *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 7(1), pp.81-92.
- [6] Salvi, J., and Rizzi, E. (2016), "Closed-form optimum tuning formulas for passive Tuned Mass Dampers under benchmark excitations", *Smart Structures and Systems*, 17(2), pp.231-256.
- [7] Salvi, J., and Giaralis, A. (2016), "Performance Assessment of a novel energy harvesting-enabled tuned mass-damper-inerter (EH-TMDI) for white noise-excited structures", *EACS 6th European Conference on Structural Control*, 151.
- [8] Monteiro, D.K., Matos, D.B.M., Costa, P.O.B., and Miguel, L.F.F. (2024), "Optimization of tuned mass dampers parameters using Artificial Neural Networks", *XLV Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)*.
- [9] Khazaei, M., Vahdani, R., and Kheyroddin, A. (2020), "Optimal location of multiple tuned mass dampers in regular and irregular tall steel buildings plan", *Shock and Vibration*, (1), pp.9072637.
- [10] Kaveh, A., Mohammadi, S., Hosseini, O., and Keyhani, A., (2015), "Optimum parameters of tuned mass dampers for seismic applications using charged system search", *IJST, Transactions of Civil Engineering*, 39(C1), pp.21-40.
- [11] Kamgar, R., Samea, P., Khatibinia, M. (2017), "Optimizing parameters of tuned mass damper subjected to critical earthquake", *Journal of Structure Design Tall Special Build*, 27(17), pp.1460-1476.
- [12] Basili, M., Busato, F., and Angelis, M.D. (2024), "Integrated seismic and energetic rehabilitation of existing buildings based on the tuned mass damper concept", *Results in Engineering*, 24, pp.103552.
- [13] Akhlagh Pasand, A., and Zahrai, S.M. (2024), "Seismic Control of Tall Buildings by Vertically Distributed Multiple Tuned Mass Dampers", *Structure Design Tall Special Build*, 33(14), pp.2123.
- [14] Djerouni, S., Elias, S., Abdeddaim, M., and Rupakhety, R. (2025), "Multi-tuned mass damper inerter (MTMDI) system for earthquake-induced vibration control of buildings", *Engineering Structures*, 322, pp.119-139.