

New formulas for optimal design of TMD using genetic programming method and their application to control of seismic-excited structures

Abbas-Ali Zamani^{1*}, Sadegh Etedali²

1- Assistant professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

2- Associate professor, Department of Civil Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

ABSTRACT

The purpose of this paper is to propose new formulas for optimal tuning of tuned mass damper (TMD) parameters using the genetic programming (GP) method with the aim of its application in seismic-excited structures. For this purpose, the optimal TMD parameters in the main structure under white-noise base acceleration are determined using the teaching-learning-based optimization (TLBO) algorithm for a wide range of TMD mass ratios and structural damping ratios. The outcome database is then applied to derive formulas based on the GP technique. The proposed formulas have high accuracy and efficiency while eliminating computational costs. Considering two 10-story and 40-story structures, the efficiency of the proposed formulas is then evaluated for seismic control applications of structures. For this purpose, their results are compared with those given by the TLBO algorithm. The numerical studies show that the optimal tuning of TMD parameters using the proposed formulas, while eliminating the computational cost due to the use of meta-heuristic optimization algorithms, provides better performance in reducing the floor displacement and absolute acceleration of the studied structures. Consequently, they can be efficient for seismic control applications of structures by presenting a simple and fast optimal tuning. The TMD tuned using the TLBO results in a reduction of 18.03%, 6.72% in the maximum displacement and acceleration of the 10-story structure, while the TMD adjusted using the proposed formulas gives a reduction of 18.47% and 11.23% in the above-mentioned responses. The results given for the 40-story structure show a reduction of 9.46% and 0.98% for the TMD tuned by the TLBO, while it is found a reduction of 11.58% and 5.11% in the maximum displacement and acceleration for the TMD tuned by the suggested formulas.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 July 2022

Revise Date: 22 August 2022

Accept Date: 19 September 2022

Keywords:

Seismic control of structures

Tuned mass dampers

Optimal design

Teaching-learning-based optimization

Genetic programming method

Optimal designing formulas

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.348576.2857>

*Corresponding author: Abbas-Ali Zamani.

Email address: a-zamani@tvu.ac.ir

ارائه فرمول‌هایی برای طراحی بهینه TMD با بهره‌گیری از روش برنامه‌ریزی ژنتیک و کاربرد آن در کنترل سازه‌های در معرض زلزله

عباسعلی زمانی^{۱*}، صادق اعتدالی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

چکیده

هدف از مقاله حاضر، ارائه فرمول‌های جدید برای تنظیم بهینه پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD) با بهره‌گیری از روش برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) و باهدف کاربرد آن در کنترل سازه‌های در معرض زلزله است. برای این منظور، ابتدا مسئله تنظیم بهینه پارامترهای TMD در یک سازه اصلی تحت تحریک شتاب پایه از نوع اغتشاش سفید تبیین شده است. سپس پارامترهای بهینه TMD با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO) و برای طیف وسیعی از نسبت‌های جرمی TMD و نسبت میرایی سازه تعیین گردیدند. پایگاه داده‌های حاصل برای استخراج فرمول‌هایی مبتنی بر روش GP مورد استفاده قرار گرفتند. کارایی فرمول‌های پیشنهادی برای کاربردهای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها با تنظیم بهینه پارامترهای TMD برای دو سازه ۱۰ و ۴۰ طبقه و مقایسه آن‌ها با نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم TLBO ارزیابی شد. پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه تحت تأثیر چهار زلزله معروف شامل زلزله ال سنترو، هاجینو، نورتریج و کوبه نشان داد که تنظیم بهینه پارامترهای TMD به کمک فرمول‌های پیشنهادی، ضمن حذف هزینه محاسباتی ناشی از به‌کارگیری الگوریتم‌های فرا اکتشافی، عملکرد مطلوبی را در کاهش جابجایی و شتاب مطلق طبقات فراهم می‌نمایند و با ارائه یک تنظیم بهینه ساده و سریع، می‌توانند برای کاربردهای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها به کار آیند. TMD تنظیم‌شده به کمک TLBO، کاهش در حدود ۱۸/۰۳ و ۶/۷۲ درصد را در بیشینه جابجایی و شتاب طبقات سازه ۱۰ طبقه به‌طور متوسط برای همه زلزله‌ها فراهم نموده، لیکن TMD تنظیم‌شده به کمک فرمول‌های پیشنهادی، به ترتیب سبب کاهش ۱۸/۴۷ و ۱۱/۲۳ درصد در پاسخ‌های مذکور شد. نتایج سازه ۴۰ طبقه نشان داد که این کاهش‌ها به ترتیب برابر ۹/۴۶ و ۰/۹۸ درصد برای TMD تنظیم‌شده به کمک TLBO بود، درحالی‌که کاهش ۱۱/۵۸ و ۵/۱ درصد برای TMD تنظیم‌شده به کمک فرمول‌های پیشنهادی در پاسخ بیشینه جابجایی و شتاب طبقات به دست آمد.

کلمات کلیدی: کنترل لرزه‌ای سازه‌ها، میراگرهای جرمی تنظیم شده، طرح بهینه، الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری، روش برنامه‌ریزی ژنتیک، فرمول‌های طراحی بهینه

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.348576.2857	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.348576.2857	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	۱۴۰۱/۰۶/۲۸	۱۴۰۱/۰۶/۲۸	۱۴۰۱/۰۵/۳۱	۱۴۰۱/۰۴/۱۱
				عباسعلی زمانی a-zamani@tvu.ac.ir	*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

میراگرهای جرمی تنظیم شده موسوم به (TMD)^۱ یکی از ابزارهای ساده، ارزان، جذاب، قابل اطمینان و مؤثر غیرفعال هستند که شامل یک سیستم متشکل از جرم، فنر و میراگر است. یکی از کاربردهای موفقیت‌آمیز این نوع از سیستم‌های کنترل غیرفعال در سازه‌های ساختمانی و پل‌های در معرض زلزله و بادهای شدید گزارش شده است. TMDها عمدتاً در تراز فوقانی ساختمان‌ها نصب می‌شوند. در هنگام وقوع باد یا زلزله، انرژی تحریک به‌جای ورود به ساختمان به نوسانگر فرعی یا TMD منتقل می‌شود و بخشی از انرژی ورودی از طریق نیروی اینرسی TMD مستهلک می‌شود [۳، ۲، ۱]. تنظیم بهینه پارامترهای دینامیکی سیستم جرم-فنر-میراگر TMD نقش مؤثری بر عملکرد آن در کاهش ارتعاشات دارد. تنظیم بهینه فرکانس و میرایی سیستم TMD در یک سیستم یک درجه آزاد نامیرا تحت تحریکات خارجی هارمونیک مورد مطالعه قرار گرفت و روابط ریاضی برای تخمین پارامترهای بهینه TMD به ازای مقدار ثابتی از نسبت جرمی TMD ارائه شد [۵، ۴]. امکان و دقت بالای بهره‌گیری از یک سیستم یک درجه آزاد معادل به‌جای سیستم چند درجه آزاد مجهز به TMD در مطالعات واربرتون و آیوریند [۷، ۶] تأیید شد. راه‌حل‌های گرافیکی برای تخمین بهینه پارامترهای TMD توسط باپت و کوماراسوامی [۹، ۸] توسعه یافتند. همچنین تعمیم این تئوری‌ها برای سازه‌های میرا یک درجه آزاد معادل مجهز به TMD تحت تحریکات مختلف نظیر بار هارمونیک، شتاب پایه هارمونیک و اغتشاش سفید مورد توجه محققین قرار گرفت. در این راستا، واربرتون [۱۰] فرمول‌های ریاضی ساده‌ای را برای تنظیم پارامترهای TMD در سیستم‌های یک درجه آزاد نامیرا و میرا تحت تحریک خارجی هارمونیک و اغتشاش سفید ارائه داد. با در نظر گرفتن پاسخ حالت پایا سیستم اصلی به‌عنوان تابع هزینه، تسای و لین [۱۱] یک تکنیک جستجوی عددی را برای یافتن میرایی و فرکانس تنظیم بهینه TMD به کار بردند و با استفاده از تکنیک‌های برازش منحنی، به فرمول‌های صریحی برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD در سازه‌های میرا دست یافتند. اخیراً بکره و جانگید [۱۲] روش‌های جستجوی عددی را برای تعیین روابط ریاضی صریح برای طراحی بهینه میرایی و فرکانس تنظیم TMD ارائه دادند. لئونگ و ژانگ [۱۳] پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم شده را با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات تحت تحریکات مختلف به دست آوردند و بر اساس نتایج حاصل، روابط ریاضی را برای تخمین بهینه سیستم TMD ارائه دادند. با محک مدل‌های برازشی مختلف، سالوی و ریزی [۱۴] فرمول‌های صریحی را برای تخمین بهینه پارامترهای TMD پیشنهاد دادند. اعتدالی و ملایی [۱۵] با بهره‌گیری از رویکرد حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان، مدل‌هایی را برای تخمین بهینه پارامترهای TMD ارائه دادند. کشته‌گر و اعتدالی [۱۶] مدل‌های ریاضی جدیدی مبتنی بر رویه تحلیل رگرسیون برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD پیشنهاد دادند. اعتدالی و همکاران [۱۷] با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی، مدل‌هایی را برای تخمین بهینه پارامترهای TMD در سازه‌های در معرض تحریک‌های مختلف شامل بار هارمونیک، شتاب پایه هارمونیک و اغتشاش سفید ارائه دادند. باهدف به‌کارگیری TMDها در سازه‌های چند درجه آزاد در معرض زلزله، اخیراً بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک [۱۸]، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات [۲۰، ۲۱]، الگوریتم جستجوی هارمونی [۱۶]، الگوریتم کلونی مورچه‌ها [۲۲]، الگوریتم جستجوی فاخته [۲۳، ۲۴، ۲۵]، الگوریتم بهینه‌سازی آشوبناک [۲۶] الگوریتم حرکت کاتوره‌ای گازها [۲۷]، الگوریتم بهبود یافته بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری [۲۸] برای تخمین بهینه پارامترهای TMD مورد توجه محققان قرار گرفته است.

اخیراً الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO)^۲ برای حل طیف گسترده‌ای از مسائل بهینه‌سازی با موفقیت استفاده شده است. TLBO بر اساس تأثیر معلم بر عملکرد فراگیران در کلاس درس کار می‌کند. این عملکرد را می‌توان با نمرات کسب شده توسط یادگیرنده سنجید. در این فلسفه، معلم به‌عنوان تأمین‌کننده دانش، فردی است که می‌تواند دانش‌آموز را به سمت کسب نتایج بهتر سوق دهد. معلم بهتر باعث می‌شود که زبان آموزان به نتایج بهتری دست یابند. برتری الگوریتم TLBO نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در [۲۹ و ۳۰] گزارش شده است. مزایای TLBO از نظر درک بهتر، پیاده‌سازی آسان و نیاز به تعداد کم پارامتر برای عملکرد، آن را به یکی از متداول‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی تبدیل کرده است. اگرچه عملکرد موفقیت‌آمیز این الگوریتم برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD در سازه‌های چند درجه آزاد در معرض زلزله گزارش شده است [۲۸]، لیکن بهره‌گیری از الگوریتم‌های با ماهیت جستجو

¹ Tuned-mass-damper

² Teaching-Learning-Based Optimization

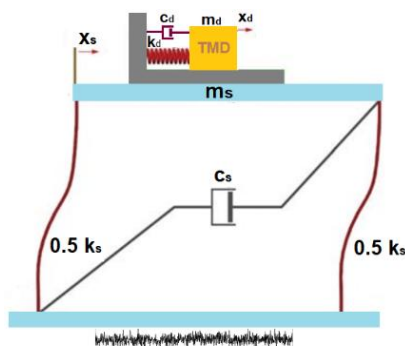
در فضای ممکنه برای تخمین بهینه پارامترهای TMD به دلیل نیاز به تحلیل عددی معادله حرکت سازه بسیار وقت گیر بوده و لذا، نسبت به مدل‌های ریاضی از عمومیت، کارایی و سادگی کمتری برخوردارند. بنابراین ارائه فرمول‌هایی با دقت برازش بالا، ضمن حذف محاسبات وقت گیر ناشی از به کارگیری الگوریتم‌های فرا ابتکاری، به راحتی و سادگی می‌توانند پارامترهای بهینه TMD را در اختیار طراح قرار دهند. یکی از روش‌های پر کاربرد در مدل‌سازی سیستم‌ها، استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)^۳ است [۳۳ و ۳۲، ۳۱]. در این روش با در نظر گرفتن مدل‌های ساختار درختی مختلف با مؤلفه‌های گوناگون به جستجو و بهینه‌سازی ساختار و پارامترهای مدل می‌پردازد. در GP با انتخاب یک جمعیت اولیه، ساختارهای درختی مختلف که ترکیب تصادفی از مجموعه توابع و مجموعه ترمینال‌ها است، تولید خواهد شد. سپس ارزیابی ساختارها با تعریف یک تابع شایستگی ارزیابی می‌شوند. در مرحله بعد، جمعیت جدید از ساختارها با استفاده از اپراتورهای همچون تلاقی یا جهش تشکیل می‌شوند و این روند تا رسیدن به حداکثر تعداد نسل تعیین شده تکرار خواهد شد. خروجی برنامه‌ریزی ژنتیک تعیین یک رابطه مناسب با برازش بالا برای ارتباط بین متغیرهای مستقل ورودی و متغیرهای خروجی است. در مقاله حاضر، ابتدا تنظیم بهینه پارامترهای TMD برای یک سیستم در معرض اغتشاش سفید با بهره‌گیری از الگوریتم TLBO انجام و متغیرهای طراحی شامل فرکانس تنظیم بهینه و نسبت میرایی بهینه TMD برای طیف وسیعی از نسبت‌های جرمی TMD و برای دو حالت سیستم اصلی نامیرا و میرا با نسبت میرایی ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ تعیین می‌گردد. سپس با استفاده از پایگاه داده‌های حاصل و به منظور تعیین یک رابطه ریاضی مناسب با برازش بالا برای تنظیم پارامترهای بهینه TMD از تکنیک GP استفاده شده است. روابط ریاضی ارائه شده از سادگی، دقت و کارایی بالایی برخوردار بوده و قادرند بدون صرف هزینه زمانی و با دقت بالا، یک تخمین مناسب از پارامترهای بهینه TMD در سیستم‌های در معرض تحریک پایه‌ای از نوع اغتشاش سفید را فراهم نمایند. در انتها، کارایی فرمول‌های پیشنهادی برای کاربردهای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها برای دو سازه ۱۰ و ۴۰ طبقه ارزیابی شده است. برای این منظور، عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مذکور مجهز به TMD تنظیم شده با فرمول‌های پیشنهادی و تنظیم شده با بهره‌گیری از الگوریتم TLBO مقایسه شده است. الگوریتم بهینه‌سازی TLBO و همچنین الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیک در محیط نرم‌افزار Matlab [۳۴]، برنامه‌نویسی شده است. تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌های در معرض زلزله نیز با استفاده از نرم‌افزار Matlab انجام شده است. همچنین امکان اتصال برنامه نوشته شده برای تحلیل تاریخچه زمانی سازه به الگوریتم بهینه‌سازی TLBO و الگوریتم برنامه‌ریزی ژنتیک از طریق تعریف توابع در نرم‌افزار Matlab انجام شده است.

بخش‌های بعدی مقاله حاضر به شرح زیر ساماندهی شده است: در بخش دوم، مسئله تنظیم بهینه پارامترهای TMD در یک سازه اصلی در معرض تحریک پایه اغتشاش سفید تبیین شده است. بخش‌های سوم و چهارم به تشریح الگوریتم TLBO و GP می‌پردازند. فرمول‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی ژنتیک برای تخمین بهینه پارامترهای TMD در بخش پنجم ارائه و ارزیابی می‌شوند. در بخش ششم، کارایی فرمول‌های پیشنهادی در دو سازه ۱۰ و ۴۰ طبقه مجهز به TMD و در معرض زلزله‌های مختلف ارزیابی می‌گردند. در بخش انتهایی، نتایج کلی حاصل از مطالعه حاضر جمع‌بندی می‌شوند.

۲- تبیین مسئله تنظیم بهینه پارامترهای TMD

سازه اصلی با مشخصات دینامیکی شامل جرم سازه m_s ، میرایی سازه c_s و سختی سازه k_s نشان داده شده در شکل ۱ مفروض است. با تجهیز سازه اصلی به یک TMD به جرم m_d ، میرایی c_d و سختی k_d ، یک سیستم یک درجه آزاد میرا مجهز به TMD خواهیم داشت. هنگامی که سازه تحریک می‌شود، حرکت TMD در فازی خلاف حرکت سازه تشدید می‌شود. لذا انرژی تحریک از طریق نیروی اینرسی که TMD به سازه وارد می‌کند، مستهلک می‌شود [۳۵ و ۳۶]. معادله دینامیکی حرکت سازه تحت شتاب پایه زلزله $\ddot{x}_g(t)$ به صورت زیر بیان می‌شود [۱۷]:

³ Genetic programming



شکل ۱: سازه اصلی مجهز به سیستم TMD در معرض شتاب زلزله [۱۷].

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s(t) \\ \ddot{x}_d(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s + c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s(t) \\ \dot{x}_d(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s(t) \\ x_d(t) \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_s \\ m_d \end{Bmatrix} \ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

برای طراحی TMDها در کاربردهای لرزه‌ای، شتاب پایه زلزله را معمولاً به صورت تحریک پایه‌ای از نوع اغتشاش سفید در نظر می‌گیرند [۳۶] که یک فرآیند تصادفی با چگالی توان طیفی یکنواخت به شدت S_0 است. با تعریف نسبت جرمی و فرکانس تنظیم TMD به صورت $f = \omega_d / \omega_s$ و $\mu = m_d / m_s$ ، میانگین مربعات جابجایی سیستم اصلی σ_{xs}^2 از طریق معادلات (۲) تا (۴) به دست می‌آید [۱۷].

$$\sigma_{xs}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_0 |J_{xs}(\omega)|^2 d\omega \quad (2)$$

$$J_{xs}(\omega) = \frac{1}{\Lambda} [\omega_d(1+\mu) - \omega^2 + 2i\omega_d\xi_d\omega(1+\mu)] \quad (3)$$

$$\Lambda = \omega^4 - 2i[\omega_s\xi_s + \omega_d\xi_d(1+\mu)]\omega^3 - [\omega_s^2 + (1+\mu)\omega_d^2 + 4\omega_s\xi_s\omega_d\xi_d]\omega^2 + 2i\omega_d\omega_s[\omega_s\xi_d + \omega_d\xi_s]\omega + \omega_d^2\omega_s^2 \quad (4)$$

که در آن ω_s و ξ_s فرکانس طبیعی و میرایی ویسکوز سیستم اصلی، ω_d و ξ_d فرکانس طبیعی و میرایی ویسکوز سیستم TMD هستند که از طریق معادلات (۵) تا (۸) به دست می‌آیند.

$$\omega_s = \sqrt{k_s / m_s} \quad (5)$$

$$\xi_s = \frac{c_s}{2m_s\omega_s} \quad (6)$$

$$\omega_d = \sqrt{k_d / m_d} \quad (7)$$

$$\xi_d = \frac{c_d}{2m_d\omega_d} \quad (8)$$

در این صورت مقدار میانگین مربعات جابجایی سیستم اصلی به صورت زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$\sigma_{xs}^2 = \left(\frac{2\pi S_0}{\omega_s^3} \right) \frac{A}{4B} \quad (9)$$

$$A = f^4 [\xi_d (1 + \mu)^4] + f^3 [\xi_s \mu (1 + \mu)^2 + 4 \xi_s \xi_d^2 (1 + \mu)^3] + f^2 [-\xi_d (2 - \mu)(1 + \mu)^2 + 4 \xi_s^2 \xi_d (1 + \mu)^2 + 4 \xi_d^3 (1 + \mu)^3] + f [\xi_s \mu^2 + 4 \xi_s \xi_d^2 (1 + \mu)^2 + \xi_d] \quad (10)$$

$$B = f^4 [\xi_s \xi_d (1 + \mu)^2] + f^3 [\xi_s^2 \mu + 4 \xi_s^2 \xi_d^2 (1 + \mu)] + f^2 [-2 \xi_d \xi_s + 4 \xi_s^3 \xi_d + 4 \xi_s \xi_d^3 (1 + \mu)] + f (\mu \xi_d^2 + 4 \xi_s^2 \xi_d^3) + \xi_d \xi_s \quad (11)$$

لذا با تعریف مقدار میانگین پاسخ سازه اصلی به صورت $N = \sigma_{xs}^2 \omega_s^3 / 2\pi S_0$ و در نظر گرفتن آن به عنوان تابع هزینه در فرآیند طراحی TMD، مسئله طراحی بهینه پارامترهای سیستم TMD به صورت زیر قابل تعریف است:

Find f^{opt} and ξ_d^{opt}

$$\text{Min } N(\mu, \xi_s, \xi_d, f) = \frac{A}{4B} \quad (12)$$

subjected to : $0.5 \leq f \leq 1.5; 0 < \xi_d < 1$

تابع هدف مسئله بهینه‌سازی برای تعیین پارامترهای بهینه سیستم TMD وابسته به نسبت جرمی TMD (μ)، میرایی سازه اصلی (ξ_s)، نسبت فرکانس تنظیم (f) و میرایی سیستم TMD (ξ_d) است. بنابراین برای یک نسبت مشخص از نسبت جرمی TMD و نسبت میرایی سیستم اصلی، رابطه فوق وابسته به دو متغیر طراحی شامل نسبت فرکانسی (f) و نسبت میرایی (ξ_d) است که پارامترهای طراحی TMD را شامل می‌شوند. معمولاً از نقطه نظر عملیاتی مقدار نسبت جرمی TMD به یک‌دهم جرم سازه اصلی محدود می‌شود. لذا به ازای مقادیر مشخصی از نسبت وزنی $0.02 \leq \mu \leq 0.1$ و برای سیستم اصلی نامیرا و میرا با نسبت میرایی $0.01, 0.02, 0.03, 0.05$ ، 0.075 و 0.1 ، متغیرهای طراحی شامل فرکانس تنظیم بهینه (f) و نسبت میرایی بهینه TMD (ξ_d) می‌بایستی در یک فرآیند طراحی بهینه تعیین گردند. فرکانس سیستم TMD معمولاً در نزدیکی فرکانس سیستم تنظیم می‌گردد، لذا محدوده‌ی جستجوی نسبت فرکانس به صورت $0.5 \leq f \leq 1.5$ تعریف شده است. همچنین محدوده‌ی نسبت میرایی TMD به صورت $0 \leq \xi_d \leq 1$ در نظر گرفته شده است.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری

مزایای الگوریتم TLBO نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی از نظر درک بهتر، پیاده‌سازی آسان و نیاز به تعداد کم پارامتر برای توابع مختلف محک در حوزه بهینه‌سازی و همچنین برخی مسائل بهینه‌سازی مهندسی مفید ارزیابی و در مراجع [۲۹] و [۳۰] گزارش شده است. نتایج حاصل برتری نسبی الگوریتم TLBO را نسبت به سایر الگوریتم‌های متداول بهینه‌سازی نشان می‌دهند. همچنین، اخیراً عملکرد موفقیت‌آمیز این الگوریتم برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD در سازه‌های چند درجه آزاد در معرض زلزله گزارش شده است [۲۸]. لذا در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی TLBO برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری بر اساس تأثیر معلم بر عملکرد فراگیران در کلاس توسط رانو [۲۹] ارائه شد. الگوریتم TLBO از دو فاز اصلی شامل فاز معلم و مرحله یادگیرنده تشکیل شده است. مرحله معلم به وقوع فرآیند یادگیری به واسطه نقش معلم اشاره دارد، درحالی که مرحله یادگیرنده به وقوع یادگیری در نتیجه تعامل بین فراگیران می‌پردازد. مراحل اصلی TLBO به شرح زیر است [۲۹]:

۳-۱- فاز معلم

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، یک معلم خوب می‌تواند میانگین نمرات به‌دست‌آمده توسط فراگیران را از M_A به M_B بهبود دهد. یک معلم خوب دانش فراگیران را ارتقا دهد. معلم می‌تواند میانگین نمره کلاس را تا حدودی ارتقا دهد، به‌طوری که میزان آن به توانایی کلی اعضای کلاس بستگی دارد. اگر مقدار میانگین نمره و معلم در تکرار i به ترتیب با M_i و T_i نشان داده شود، در مرحله

معلم، T_i سعی می کند مقدار میانگین M_i را به سطح خودش افزایش دهد، به طوری که اگر میانگین جدید M_{new} نشان داده شود. بسته به تفاوت بین میانگین موجود و جدید، راه حل را می توان با استفاده از معادله زیر به روز کرد [۲۹ و ۲۸]:

$$\text{Difference_Mean}_i = r_i (M_{new} - T_F M_i) \quad (13)$$

T_F فاکتور آموزش است که سعی در تغییر مقدار میانگین دارد و مقدار آن ۱ یا ۲ تنظیم می شود. همچنین r_i یک عدد تصادفی در بازه $[0, 1]$ است. از معادله زیر برای اصلاح راه حل موجود استفاده می شود [۲۹ و ۲۸]:

$$X_{new,i} = X_{old,i} + \text{Difference_Mean}_i \quad (14)$$

۲-۳- فاز یادگیرنده

ارتقای فراگیران در فرآیند یادگیری به دو صورت انجام می شود. یادگیری از معلم و تعامل بین فراگیران. تعامل بین فراگیران از طریق بحث، ارائه، ارتباطات رسمی و غیره صورت می گیرد. به عبارت دیگر، زمانی که یک یادگیرنده آگاه، اطلاعات بیشتری در مورد موضوع خاصی ارائه می دهد، یادگیرنده می تواند چیزهای جدیدی بیاموزد. اصلاح یادگیرنده برای تعداد جمعیت $nPop$ را می توان به صورت شبه کد زیر بیان کرد [۲۸]:

For $i = 1 : nPop$

Randomly select two learners X_i and X_j

where $i \neq j$

If $f(X_i) < f(X_j)$

$$X_{new,i} = X_{old,i} + r_i (X_i - X_j)$$

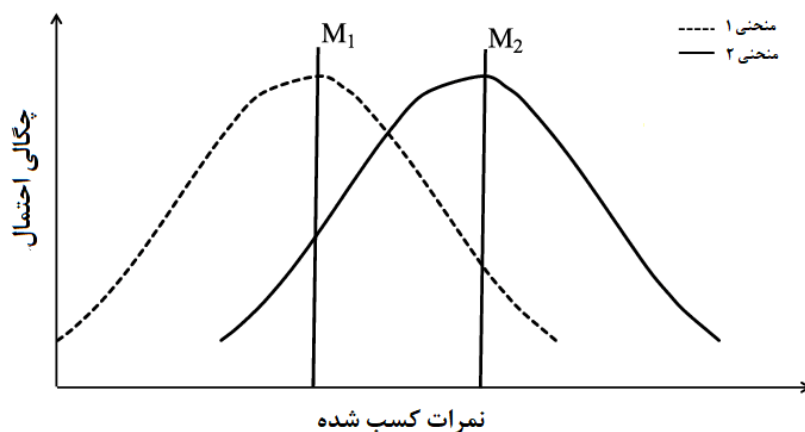
Else

$$X_{new,i} = X_{old,i} + r_i (X_j - X_i)$$

End If

End For

Accept X_{new} if it gives a better function value



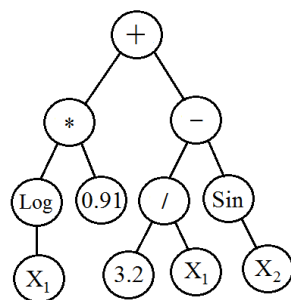
شکل ۲: یک نمونه مدل برای توزیع نمرات به دست آمده برای گروهی از فراگیران [۲۹].

۴- برنامه ریزی ژنتیک

یکی از روش‌های پرکاربرد در مدل‌سازی سیستم‌ها، استفاده از روش برنامه‌ریزی ژنتیک می‌باشد. این روش اولین بار توسط کوزا در [۳۱] ارائه شد. برنامه‌ریزی ژنتیک تعمیم یافته‌ای از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک است که بر اساس تئوری داروین برای حل مسائل بهینه‌سازی پیشنهاد شده است. برنامه‌ریزی ژنتیک به نوعی یک روش خودتنظیم برای یافتن راه‌حلی برای یک مسئله با استفاده از برنامه کامپیوتری می‌باشد، به طوری که در ابتدای روند حل مسئله هیچ رابطه تابعی بین متغیرهای مسئله در نظر نمی‌گیرد، اما در ادامه روند خود، با در نظر گرفتن مدل‌های ساختار درختی مختلف با مؤلفه‌های گوناگون به جستجو و بهینه‌سازی ساختار و پارامترهای مدل می‌پردازد. این روش توانایی بیان ساختارهای پیچیده به صورت یک ساختار درختی را دارد. هر ساختار از مجموعه‌ای از گره‌ها و شاخه‌ها تشکیل می‌شود. گره‌ها در این ساختار از مجموعه توابع و مجموعه ترمینال‌ها که متناسب با نوع مسئله انتخاب شده‌اند، تشکیل می‌شوند. شاخه‌ها ارتباط دهنده گره‌ها هستند. مجموعه توابع شامل انواع اپراتورها $\{+, -, \times, /\}$ ، توابع ریاضی $\{\text{Sin}, \text{Cos}, \text{Tan}, \text{log}, \text{Exp}, \dots\}$ ، عبارات منطقی $\{\text{IF-THEN-ELSE}\}$ ، اپراتورهای بولی $\{\text{AND}, \text{OR}, \text{NOT}, \dots\}$ ، و سایر توابع تعریف شده توسط طراح می‌باشند. مجموعه ترمینال‌ها شامل انواع متغیرهای مستقل مسئله مورد نظر و ثابت‌هایی که در طول مسئله تنظیم خواهند شد، می‌باشند [۳۳، ۳۲، ۳۱]. برای نمونه اگر مجموعه توابع به صورت $\{+, -, \times, /, \text{Sin}, \text{log}\}$ و مجموعه ترمینال به صورت $\{X_1, X_2, \text{rand}\}$ انتخاب شوند، یک ساختار درختی نمونه متناسب با این مجموعه‌ها، در شکل ۳ نمایش داده شده و معادله ریاضی متناسب با این ساختار به صورت رابطه (۱۶) بیان می‌شود.

$$T_s(X_1, X_2) = 0.91 * \log(X_1) + \frac{3.2}{X_1} - \text{Sin}(X_2) \quad (16)$$

برای پیاده‌سازی برنامه‌ریزی ژنتیک به منظور یافتن یک مدل مناسب برای مسائل مختلف گام‌های مقدماتی که توسط طراح طی می‌شود عبارت‌اند از: تعیین مجموعه ترمینال‌ها که شامل متغیرهای مستقل مسئله و اعداد ثابت تصادفی باشد، تعیین مجموعه توابع پیشنهادی متناسب با مسئله مورد نظر، تعیین یک تابع شایستگی مناسب برای سنجش روابط به دست آمده از اجرای برنامه‌ریزی ژنتیک، تعیین پارامترهای کنترلی مربوط به اجرای برنامه و تعیین یک معیار مناسب برای پایان روند اجرای برنامه ژنتیک. در فرایند اجرای برنامه‌ریزی ژنتیک، در ابتدا یک جمعیت اولیه از ساختارها که ترکیب تصادفی از مجموعه توابع و مجموعه ترمینال‌ها است، تولید خواهد شد. در مرحله بعدی هر یک از افراد جمعیت مورد نظر با استفاده از تابع شایستگی تعریف شده طراح، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در مرحله بعدی با استفاده از اپراتورهایی همچون تلاقی یا جهش یک جمعیت جدید از ساختارها تشکیل می‌شود. این روند تا رسیدن به حداکثر تعداد نسل تعیین شده تکرار خواهد شد. در انتها برنامه‌ریزی ژنتیک بین متغیرهای مستقل ورودی و متغیرهای خروجی یک رابطه مناسب را پیشنهاد می‌دهد.



شکل ۳: یک نمونه ساختار درختی در برنامه‌ریزی ژنتیک [۳۷].

۵- فرمول‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی ژنتیک برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD

در یک سازه میرا مجهز به TMD، امکان تعیین یک فرمول صریح و دقیق برای تنظیم بهینه پارامترهای بهینه TMD برای یک نسبت جرمی مشخص با استفاده از روش‌های تحلیلی میسر نیست. بهره‌گیری از روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک رهیافتی مناسب برای برون‌رفت از این مشکل است. با انتخاب تعداد جمعیت $nPop = 10$ و بیشینه تکرار ۱۰۰۰، مسئله بهینه‌سازی تعریف شده در بخش ۲ مقاله برای نسبت‌های جرمی مختلف TMD و (μ) و درصد میرایی‌های مختلف سازه اصلی (ξ_s) و باهدف تنظیم پارامترهای بهینه TMD شامل فرکانس تنظیم بهینه (f^{opt}) و نسبت میرایی بهینه TMD (ξ_d^{opt}) انجام شد. سپس باهدف ارائه فرمول‌های تنظیم بهینه پارامترهای TMD با بهره‌گیری از روش برنامه‌ریزی ژنتیک دو ساختار زیر در نظر گرفته شده است.

$$f^{opt} = T_{s_1}(\mu, \xi_s) \quad (17)$$

$$\xi_d^{opt} = T_{s_2}(\mu, \xi_s) \quad (18)$$

با انتخاب مجموعه توابع به صورت $\{+, -, \times, /, \text{Log}, \text{Pow}\}$ ، مجموعه ترمینال به صورت $\{\mu, \xi_s, \text{rand}\}$ و پارامترهای اولیه یکسان برای f^{opt} و ξ_d^{opt} ، برنامه‌ریزی ژنتیک با اندازه جمعیت اولیه ۵۰۰، تعداد نسل ۱۰۰۰، نرخ تقاطع ۰٫۸ و احتمال جهش ۰٫۱۲ اجرا شد. سه شاخص آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین R^2 و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) مطابق روابط زیر برای ارزیابی دقت فرمول‌های پیشنهادی استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_o - y_p)^2}{N_s}} \quad (19)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_o - y_p)^2}{\sum_{i=1}^N (y_o - \bar{y})^2} \quad (20)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_o - y_p|}{N_s} \quad (21)$$

که در آن N_s ، y_o ، y_p و \bar{y} تعداد نمونه‌ها، داده‌های مشاهده‌شده حاصل از بهینه‌ساز TLBO، داده‌های به‌دست‌آمده متناظر با استفاده از فرمول‌های ارائه‌شده مبتنی بر GP و میانگین داده‌هاست. پس از سه بار اجرای فرآیند برنامه‌ریزی ژنتیک، سه فرمول پیشنهادی برای تنظیم بهینه فرکانس تنظیم (f^{opt}) و نسبت میرایی TMD (ξ_d^{opt}) مندرج در جداول ۱ و ۲ ارائه شدند. مقادیر شاخص آماری شامل RMSE، R^2 و MAE متناظر با هر فرمول پیشنهادی در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۱: فرمول‌های پیشنهادی برای تنظیم بهینه فرکانس (f^{opt}) .

فرمول‌های پیشنهادی	
۱	$f^{opt} = 1.002 - 0.9563\mu^{0.9169} - 1.404\xi_s^{1.895} - 1.749\mu^{0.4287}\xi_s^{0.9827}$
۲	$f^{opt} = 1.007 - 0.7545\mu^{0.8021} - 0.7952\xi_s^{1.319} - 5.195\mu\xi_s$
۳	$f^{opt} = 1.016 - 0.9487\mu^{0.8313} - 0.9432\xi_s^{1.182}$

جدول ۲: فرمول‌های پیشنهادی برای تنظیم بهینه نسبت میرایی TMD (ξ_d^{opt}) .

فرمول‌های پیشنهادی	
۱	$\xi_d^{opt} = -0.002712 + 0.4573\mu^{0.4698} + 1.468\xi_s^{5.325}$
۲	$\xi_d^{opt} = -0.005178 + 0.4567\mu^{0.47} + 82520\xi_s^{8.487} + 0.004245\mu^{0.01811}\xi_s^{0.08402}$
۳	$\xi_d^{opt} = 0.4763\mu^{0.5001} + 0.004016\xi_s^{0.1174}$

جدول ۳: مقادیر شاخص آماری متناظر با هر فرمول پیشنهادی.

	فرمول پیشنهادی	RMSE	R ²	MAE
f^{opt}	۱	۰٫۰۰۰۴۱	۰٫۹۹۹۹۳	۰٫۰۰۰۳۳
	۲	۰٫۰۰۱۴۴	۰٫۹۹۹۰۹	۰٫۰۰۱۰۹
	۳	۰٫۰۰۵۶۵	۰٫۹۸۶۰۹	۰٫۰۰۴۲۶
ξ_d^{opt}	۱	۰٫۰۰۲۴۹	۰٫۹۹۶۰۹	۰٫۰۰۱۱۵
	۲	۰٫۰۰۲۲۰	۰٫۹۹۶۹۴	۰٫۰۰۱۳۵
	۳	۰٫۰۰۲۲۹	۰٫۹۹۶۷۱	۰٫۰۰۱۴۹

همان‌گونه که مشاهده می‌شود از میان فرمول‌های ارائه‌شده برای تنظیم بهینه فرکانس (f^{opt}) ، فرمول شماره ۱ و از میان فرمول‌های ارائه‌شده برای تنظیم بهینه نسبت میرایی TMD (ξ_d^{opt}) ، فرمول شماره ۲ بهترین تطبیق را با داده‌های حاصل از بهینه‌سازی مبتنی بر TLBO دارند، لذا فرمول‌های زیر برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD پیشنهاد می‌گردند:

$$f^{opt} = 1.002 - 0.9563\mu^{0.9169} - 1.404\xi_s^{1.895} - 1.749\mu^{0.4287}\xi_s^{0.9827} \quad (22)$$

$$\xi_d^{opt} = -0.005178 + 0.4567\mu^{0.47} + 82520\xi_s^{8.487} + 0.004245\mu^{0.01811}\xi_s^{0.08402} \quad (23)$$

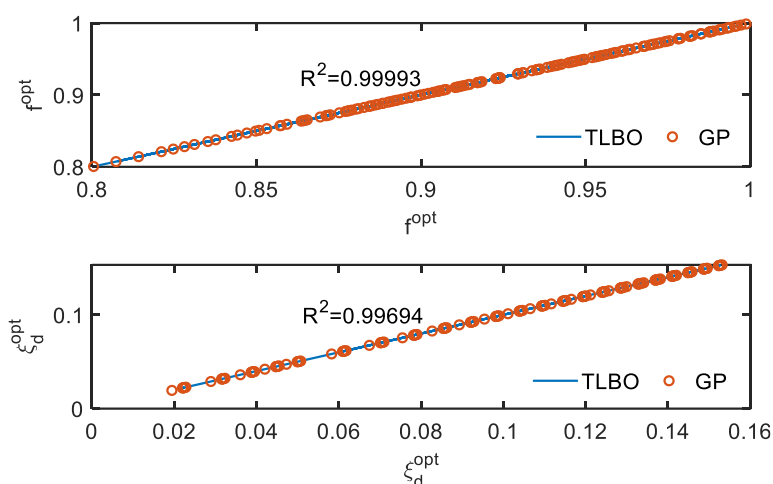
شکل ۴ تطبیق مناسب نتایج حاصل از تخمین بهینه TMD به کمک فرمول‌های پیشنهادی مبتنی بر GP و نتایج حاصل از TLBO را برای کل داده‌های مربوط به فرکانس بهینه (f^{opt}) و نسبت میرایی بهینه TMD (ξ_d^{opt}) نشان می‌دهد. همچنین رویه‌های حاصل از فرمول‌های ارائه‌شده و مقایسه آن با داده‌های حاصل از بهینه‌سازی مبتنی بر TLBO در شکل ۵ نمایش داده شده است. تطبیق

مناسبی از نتایج حاصل از تنظیم بهینه پارامترهای TMD به کمک فرمول‌های پیشنهادی مبتنی بر GP و نتایج حاصل از TLBO حاصل شده است. بنابراین فرمول‌های پیشنهادی با دقت مناسبی قادر به تنظیم بهینه پارامترهای TMD هستند و طراح را از محاسبات وقت‌گیر و پیچیده بهینه‌یابی‌های مبتنی بر الگوریتم‌های فرا اکتشافی بی‌نیاز می‌کنند.

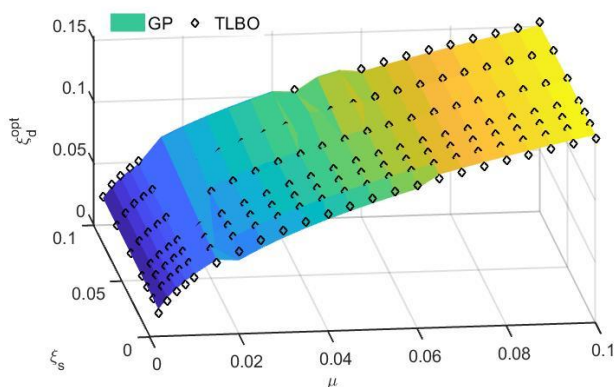
در انتهای این بخش، مقادیر شاخص‌های آماری به‌دست‌آمده برای فرمول‌های پیشنهادی در این مقاله با فرمول‌های پیشنهادی توسط سایر محققین در مراجع [۱۲] و [۱۳] مقایسه شده‌اند. نتایج این مقایسه مندرج در جدول ۴ نشان می‌دهند که فرمول‌های پیشنهادی در این مقاله تطبیق مناسب‌تری را با داده‌های حاصل از بهینه‌سازی دارند.

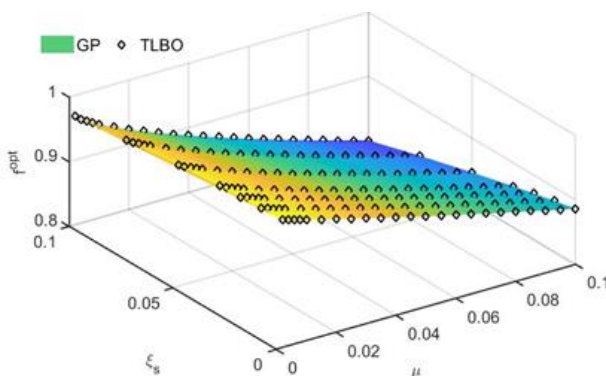
جدول ۴: مقایسه مقادیر شاخص آماری برای فرمول‌های پیشنهادی.

فرمول‌های پیشنهادی	RMSE	R ²	MAE	
f ^{opt}	رابطه (۲۲)	۰,۰۰۰۴۱	۰,۹۹۹۹۳	۰,۰۰۰۳۳
	مرجع [۱۳]	۰,۰۰۶۲۲	۰,۹۸۳۹۱	۰,۰۰۳۵۷
	مرجع [۱۲]	۰,۰۰۱۹۳	۰,۹۹۸۴۵	۰,۰۰۱۰۶
ξ _d ^{opt}	رابطه (۲۳)	۰,۰۰۲۲۰	۰,۹۹۶۹۴	۰,۰۰۱۳۵
	مرجع [۱۳]	۰,۰۰۸۴۴	۰,۹۹۲۰۱	۰,۰۰۵۷۸
	مرجع [۱۲]	۰,۰۰۵۸۱	۰,۹۹۴۳۱	۰,۰۰۹۶۲



شکل ۴: تطبیق مناسب نتایج حاصل از تخمین بهینه TMD به کمک فرمول‌های پیشنهادی مبتنی بر GP و نتایج حاصل از TLBO.





شکل ۵: رویه‌های حاصل از فرمول‌های ارائه شده و مقایسه آن با داده‌های حاصل از بهینه‌سازی مبتنی بر TLBO.

۶- ارزیابی عملکرد فرمول‌های پیشنهاد شده برای تنظیم بهینه TMD در سازه‌های در معرض زلزله

در مسئله طراحی بهینه TMD، سیستم جاذب انرژی TMD به صورت یک سیستم یک درجه آزادی میرا شده به سیستم اصلی (سازه) متصل است. در نظر گرفتن یک درجه آزاد معادل برای سیستم اصلی در مطالعات سایر محققین ارزیابی و تأیید شده است. در این مطالعات نشان داده شده است که پارامترهای بهینه برای TMD متصل به یک تیر طره (معادل یک سازه چند درجه آزاد) را می‌توان به سادگی و با دقت از تیر طره معادل یک درجه آزادی آن به دست آورد. بنابراین امکان و دقت بالای بهره‌گیری از یک سیستم یک درجه آزاد معادل به جای سیستم چند درجه آزاد مجهز به TMD در مطالعات آن‌ها تأیید شده است. لذا امکان بهره‌مندی از نتایج طراحی حاصل از سیستم‌های دو درجه آزاد معادل توصیف شده برای سیستم‌های چند درجه آزاد وجود دارد [۶ و ۷]. به منظور بررسی عملکرد فرمول‌های پیشنهاد شده در طراحی بهینه سیستم TMD در سازه‌های چند درجه آزاد ساختمانی در معرض زلزله، دو ساختمان ۱۰ و ۴۰ طبقه در نظر گرفته شده است. دو سازه ۱۰ و ۴۰ طبقه مورد آنالیز در این مقاله دو سازه بنچمارک در حوزه کنترل لرزه‌ای سازه‌های مجهز به TMD هستند و نتایج تحلیل تاریخچه زمانی آن‌ها در مراجع مختلفی ارائه شده‌اند و لذا امکان صحت سنجی برای ارزیابی صحت تحلیل تاریخچه زمانی آن‌ها وجود دارد. سازه ۱۰ طبقه در مرجع [۳۸] معرفی و صحت‌سنجی آنالیز تاریخچه زمانی آن تحت رکورد زلزله ال سنترو توسط نویسندگان در مراجع [۲۵ و ۲۸] انجام و نتایج تحلیل با نتایج سایر محققین مقایسه و ارزیابی شده است. سازه ۴۰ طبقه در مرجع [۲۲] معرفی و صحت‌سنجی آنالیز تاریخچه زمانی آن تحت رکورد زلزله طیس توسط نویسندگان در مراجع [۲۴] انجام شده است. پارامترهای بهینه TMD در دو سازه مذکور برای دو حالت الف) بهره‌گیری از الگوریتم TLBO و ب) بهره‌گیری از فرمول‌های ارائه شده مبتنی بر GP تعیین شدند. برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD به کمک الگوریتم TLBO، یک رکورد زلزله مصنوعی تولید شده با یک اغتشاش سفید گوسی فیلتر شده با فیلتر کانای-تاجیمی با تابع چگالی طیفی توان زیر به سازه اعمال شده است.

$$s(\omega) = \frac{0.03\xi_g}{\pi\omega_g(4\xi_g^2+1)} \left(\frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\xi_g^2\omega_g^2\omega^2} \right) \quad (24)$$

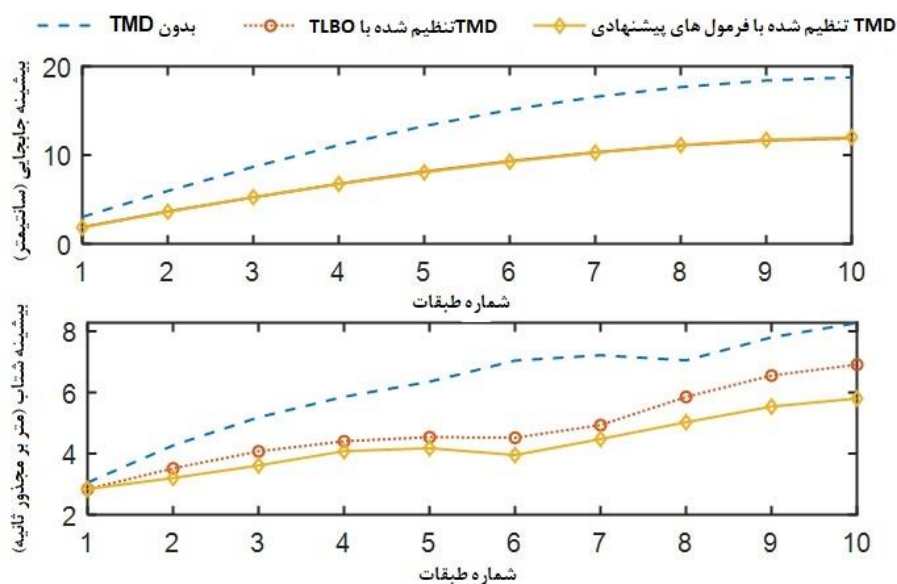
که در آن ξ_g و ω_g میرایی و فرکانس زمین است که مقادیر آن‌ها به ترتیب ۰٫۳ و ۳٫۳۷ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده است [۲۸]. سپس برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های مذکور در زلزله‌های واقعی، تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌ها در معرض دو زلزله دور از گسل ال سنترو (۱۹۴۰) و هاچینو (۱۹۶۸) و همچنین دو زلزله نزدیک گسل نورث‌ریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) انجام شده است. تمامی زلزله‌های یادشده به مقدار حداکثر $0.3g$ مقیاس شده‌اند که g شتاب گرانشی زمین است.

۱-۶- سازه ۱۰ طبقه

مشخصات سازه ده طبقه شامل جرم، سختی و میرایی طبقات به ترتیب برابر ۳۶۰ تن، ۶۵۰ مگانیوتن بر متر، ۶/۲ مگانیوتن ثانیه بر متر می‌باشد. یک TMD با نسبت جرمی برابر ۳ درصد وزن کل سازه یعنی معادل ۱۰۸ تن بر روی طبقه فوقانی سازه مستقر شده است [۲۸، ۲۵، ۲۱]. با بهره‌گیری از الگوریتم TLBO و با انجام ده بار اجرای الگوریتم برای یافتن بهترین تنظیم بهینه پارامترهای TMD، بهترین تنظیم باهدف کاهش بیشینه جابجایی طبقات سازه به صورت $k_d^{opt} = 3266.2167 \text{ kN/m}$ و $c_d^{opt} = 59.7440 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$ تعیین شد. با تعیین جرم مدی و نسبت میرایی سازه مذکور در مد اول سازه و بهره‌گیری از فرمول‌های ارائه شده برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD، مندرج در معادلات (۲۲) و (۲۳)، فرکانس بهینه تنظیم (f^{opt}) و نسبت میرایی بهینه TMD (ξ_d^{opt}) تعیین می‌گردند. سپس با استفاده از معادلات (۷) و (۸)، پارامترهای بهینه سیستم TMD برای سازه مورد مطالعه به صورت $k_d^{opt} = 3918.8930 \text{ kN}$ و $c_d^{opt} = 111.4677 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$ تعیین شد. شکل ۶ بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه در سه حالت سازه بدون TMD، سازه با TMD تنظیم شده با الگوریتم TLBO و سازه با TMD تنظیم شده با بهره‌گیری از فرمول‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با بهره‌گیری از فرمول‌های پیشنهادی و بدون صرف هزینه‌های محاسباتی ناشی از به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا اکتشافی، نتایج یکسانی در مقادیر کاهش بیشینه جابجایی طبقات مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که تنظیم بهینه پارامترهای TMD به کمک فرمول‌های پیشنهادی نسبت به تنظیم آن به کمک الگوریتم بهینه‌سازی TLBO، عملکرد مطلوب‌تری را در کاهش شتاب مطلق طبقات سازه مورد مطالعه فراهم کرده است.

پاسخ‌های لرزه‌ای سازه ۱۰ طبقه شامل بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات در زلزله‌های ال‌سنتر، هاچینو، نورث‌ریچ و کوبه در جدول ۵ گزارش شده‌اند. همچنین برای دستیابی به یک نتیجه کلی، متوسط درصد کاهش پاسخ‌های بیشینه همه طبقات سازه در زلزله‌های مختلف و همچنین متوسط همه آن‌ها در چهار زلزله مورد مطالعه در جدول ۶ خلاصه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای در زلزله‌های دور از گسل ال‌سنتر و هاچینو حاصل شده است. عملکرد TMD در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه مذکور تحت زلزله‌های نزدیک گسل به شدت کاهش می‌یابد. به‌طور متوسط برای همه زلزله‌ها، میراگر جرمی تنظیم شده با TLBO کاهش در حدود ۱۸/۰۳ و ۶/۷۲ درصد را به ترتیب در بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات فراهم نموده است. در حالی که میراگر جرمی تنظیم شده با فرمول‌های پیشنهادی، بدون صرف هزینه محاسباتی، کاهش در حدود ۱۸/۴۷ و ۱۱/۲۳ درصد را در بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات فراهم نموده است.

همان‌گونه که مشاهده شد میرایی بهینه TMD در طراحی مبتنی بر فرمول‌های مبتنی بر GP از طراحی مستقیم بهره‌گیری از الگوریتم TLBO بیشتر است. این مسئله ناشی از تفاوت در توابع هدف تعریف شده در دو روش مذکور است. در روش بهره‌گیری مستقیم از الگوریتم TLBO هدف کمینه کردن بیشینه جابجایی سازه تعریف شده است، در حالی که تابع هدف در فرمول‌های ارائه شده مبتنی بر GP کمینه کردن مقدار میانگین مربعات جابجایی سیستم اصلی است. با کاهش میانگین مربعات جابجایی سیستم اصلی در طول زمان اعمال تحریک پایه در واقع تغییرات ناگهانی پاسخ سازه اصلی در تمام طول زمان زلزله کنترل و کمینه می‌شود و این مسئله عامل اصلی در کاهش تغییرات پاسخ سازه و نهایتاً شتاب سازه می‌شود. البته این بدین معنی نمی‌باشد که به ازای یک مقدار ثابت سختی بهینه برای TMD، افزایش میرایی TMD لزوماً سبب کاهش شتاب طبقات می‌شود، در این حالت افزایش میرایی TMD بر روی میزان جابجایی طبقات سازه هم اثرگذار خواهد بود و لذا یک تنظیم هم‌زمان و بهینه از سختی و میرایی TMD نیاز است.



شکل ۶: پیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه ۱۰ طبقه.

جدول ۵: درصد کاهش پاسخهای پیشینه طبقات سازه ۱۰ طبقه در زلزله های مختلف.

طبقه	ال سنتر و				هاچینو			
	TLBO		فرمول های پیشنهادی		TLBO		فرمول های پیشنهادی	
	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)
۱	۱,۶۴	۰,۲۵	۱,۶۰	۰,۲۵	۲,۰۲	۰,۳۱	۲,۰۱	۰,۳۱
۲	۳,۱۶	۰,۳۱	۳,۱۳	۰,۲۸	۴,۰۰	۰,۳۷	۳,۹۷	۰,۳۷
۳	۴,۵۳	۰,۳۶	۴,۵۵	۰,۳۲	۵,۸۸	۰,۴۵	۵,۸۴	۰,۴۵
۴	۵,۸۴	۰,۳۹	۵,۸۲	۰,۳۶	۷,۶۴	۰,۵۲	۷,۵۷	۰,۵۲
۵	۷,۰۲	۰,۴۰	۶,۹۶	۰,۳۷	۹,۲۷	۰,۵۴	۹,۱۸	۰,۵۴
۶	۸,۰۵	۰,۴۰	۷,۹۸	۰,۳۵	۱۰,۷۸	۰,۵۲	۱۰,۶۶	۰,۵۱
۷	۸,۹۰	۰,۴۳	۸,۸۷	۰,۳۹	۱۲,۱۴	۰,۵۱	۱۲,۰۱	۰,۴۹
۸	۹,۵۷	۰,۵۱	۹,۶۰	۰,۴۴	۱۳,۲۵	۰,۶۴	۱۳,۱۲	۰,۶۲
۹	۱۰,۰۵	۰,۵۸	۱۰,۱۰	۰,۴۹	۱۴,۰۵	۰,۷۵	۱۳,۹۳	۰,۷۳
۱۰	۱۰,۲۸	۰,۶۱	۱۰,۳۷	۰,۵۱	۱۴,۴۵	۰,۸۱	۱۴,۳۶	۰,۷۹
طبقه	نور تریج				کوبه			
	TLBO		فرمول های پیشنهادی		TLBO		فرمول های پیشنهادی	
	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)
۱	۱,۸۵	۰,۳۷	۱,۸۴	۰,۳۷	۳,۲۸	۰,۴۳	۳,۲۲	۰,۴۱
۲	۳,۵۲	۰,۴۶	۳,۵۰	۰,۴۵	۶,۵۶	۰,۵۶	۶,۴۴	۰,۵۲
۳	۴,۹۵	۰,۵۱	۴,۹۳	۰,۵۱	۹,۷۵	۰,۶۵	۹,۵۸	۰,۵۸
۴	۶,۱۳	۰,۵۳	۶,۱۱	۰,۵۲	۱۲,۷۷	۰,۶۹	۱۲,۵۶	۰,۵۹
۵	۷,۰۴	۰,۴۹	۷,۰۱	۰,۴۸	۱۵,۵۵	۰,۷۰	۱۵,۳۲	۰,۵۸
۶	۷,۷۰	۰,۴۱	۷,۷۰	۰,۴۰	۱۸,۰۱	۰,۷۵	۱۷,۷۸	۰,۷۰
۷	۸,۲۱	۰,۳۲	۸,۲۵	۰,۳۱	۲۰,۰۷	۰,۸۶	۱۹,۸۶	۰,۸۳
۸	۸,۶۹	۰,۴۰	۸,۷۹	۰,۳۹	۲۱,۶۷	۰,۹۸	۲۱,۵۰	۰,۹۵
۹	۹,۱۳	۰,۴۸	۹,۲۷	۰,۴۷	۲۲,۷۵	۱,۰۷	۲۲,۶۳	۱,۰۴
۱۰	۹,۴۰	۰,۵۲	۹,۵۶	۰,۵۱	۲۳,۲۶	۱,۱۳	۲۳,۲۰	۱,۰۹

جدول ۶: متوسط درصد کاهش پاسخ‌های بیشینه طبقات سازه ۱۰ طبقه در زلزله‌های مختلف.

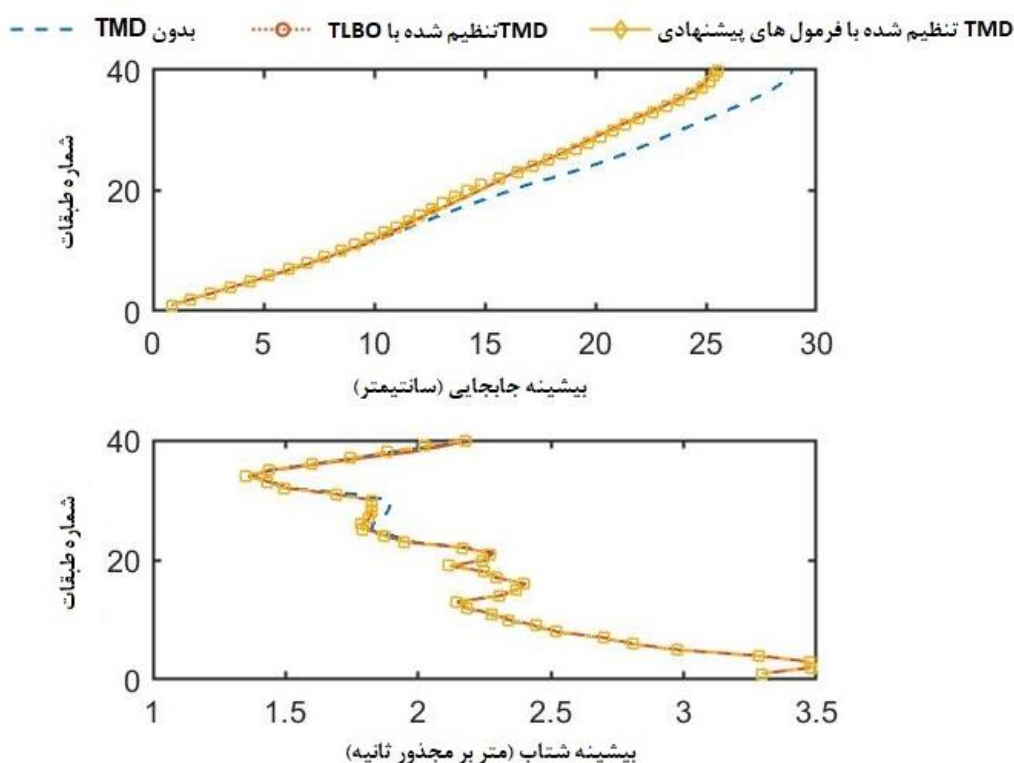
	درصد کاهش جابجایی (%)		درصد کاهش شتاب مطلق (%)	
	TLBO	GP	TLBO	GP
ال سنتر و	۳۷,۹۷	۳۸,۱۸	۲۱,۶۰	۲۹,۵۹
هاچینو	۱۶,۵۲	۱۷,۲۳	۱,۲۹	۲,۴۱
کوبه	۱۲,۳۶	۱۳,۴۶	۰,۱۶	۷,۷۸
نورثریچ	۵,۲۶	۵,۰۳	۳,۸۵	۵,۱۳
میانگین	۱۸,۰۳	۱۸,۴۷	۶,۷۲	۱۱,۲۳

۲-۶- سازه ۴۰ طبقه

یک سازه ۴۰ طبقه با جرم برابر با ۹۸۰ تن برای هر طبقه مفروض است. ارتفاع هر طبقه ۴ متر و ارتفاع سازه برابر ۱۶۰ متر است. سختی طبقات سازه ($K_1 < K_i < K_{40}$) به صورت خطی در ارتفاع ساختمان تغییر می‌کند. سختی طبقه اول و آخر به ترتیب برابر ۲۱۳۰ و ۹۹۸ مگانیوتن بر متر است. ماتریس میرایی سازه با استفاده از روش میرایی رایلی کلاسیک به صورت $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ قابل محاسبه است که در آن $\alpha = 0$ و $\beta = 0.20$ است [۲۴ و ۲۲,۲۰]. با بهره‌گیری از الگوریتم TLBO و با اجرای ده بار الگوریتم برای یافتن بهترین تنظیم بهینه پارامترهای TMD، بهترین تنظیم بهینه باهدف کاهش بیشینه پاسخ جابجایی سازه به صورت $k_d^{opt} = 5000 \text{ kN/m}$ و $c_d^{opt} = 301.8763 \text{ kN.s/m}$ تعیین شد. با تعیین جرم مدی و نسبت میرایی سازه مذکور در مد اول سازه و بهره‌گیری از فرمول‌های ارائه شده برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD مندرج در معادلات (۲۲) و (۲۳)، فرکانس بهینه تنظیم (f^{opt}) و نسبت میرایی بهینه TMD (ξ_d^{opt}) تعیین شدند. سپس با استفاده از معادلات (۷) و (۸)، پارامترهای بهینه سیستم TMD برای سازه مورد مطالعه به صورت $k_d^{opt} = 4554.1251 \text{ kN/m}$ و $c_d^{opt} = 653.9415 \text{ kN.s/m}$ تعیین گردید.

بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه در سه حالت سازه بدون TMD، سازه با TMD تنظیم شده با الگوریتم TLBO و فرمول‌های پیشنهادی در شکل ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود فرمول‌های ارائه شده قادرند بدون صرف هزینه زمانی و با کارایی بالا، یک تخمین مناسب از پارامترهای بهینه TMD را باهدف به‌کارگیری در سازه‌های در معرض زلزله فراهم نمایند.

پاسخ‌های لرزه‌ای سازه ۴۰ طبقه شامل بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات در زلزله‌های ال سنتر و، هاچینو، نورثریچ و کوبه در جدول ۷ گزارش شده‌اند. برای دستیابی به یک نتیجه کلی، متوسط درصد کاهش پاسخ‌های بیشینه همه طبقات سازه در زلزله‌های مختلف و همچنین متوسط همه آن‌ها در چهار زلزله مورد مطالعه در جدول ۸ خلاصه شده است. مشاهده می‌شود که تنظیم بهینه پارامترهای TMD به کمک فرمول‌های پیشنهادی نسبت به تنظیم آن به کمک الگوریتم بهینه‌سازی TLBO عملکرد مطلوب‌تری را در کاهش جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه مورد مطالعه فراهم می‌نماید، لذا ضمن ارائه یک تنظیم بهینه، ساده و کارا، قابلیت بهره‌گیری برای سازه‌های مجهز به TMD در معرض زلزله را فراهم می‌آورد.



شکل ۷: بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه ۴۰ طبقه.

جدول ۷: درصد کاهش پاسخ های بیشینه طبقات سازه ۴۰ طبقه در زلزله های مختلف.

طبقه	ال سنتر				هاچینو			
	TLBO		فرمول های پیشنهادی		TLBO		فرمول های پیشنهادی	
	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)
۵	۳,۸۹	۰,۲۶	۳,۷۸	۰,۲۶	۶,۶۳	۰,۲۳	۶,۶۴	۰,۲۳
۱۰	۷,۴۹	۰,۲۱	۷,۳۰	۰,۲۱	۱۳,۲۹	۰,۱۸	۱۲,۷۷	۰,۱۸
۱۵	۱۰,۱۷	۰,۲۱	۹,۹۵	۰,۲۱	۲۰,۰۷	۰,۱۹	۱۸,۶۵	۰,۱۹
۲۰	۱۲,۷۰	۰,۲۰	۱۲,۲۵	۰,۲۰	۲۶,۶۳	۰,۲۰	۲۴,۱۳	۰,۱۹
۲۵	۱۵,۲۷	۰,۱۶	۱۵,۴۱	۰,۱۶	۳۲,۴۱	۰,۱۹	۲۷,۸۷	۰,۱۹
۳۰	۱۷,۷۶	۰,۱۶	۱۷,۹۱	۰,۱۶	۳۶,۸۹	۰,۱۸	۳۱,۶۴	۰,۱۸
۳۵	۲۰,۳۷	۰,۱۳	۲۰,۵۱	۰,۱۳	۳۹,۴۲	۰,۱۸	۳۴,۴۶	۰,۱۷
۴۰	۲۱,۷۶	۰,۱۹	۲۱,۹۷	۰,۱۹	۳۹,۰۴	۰,۲۸	۳۵,۴۶	۰,۲۷

طبقه	نورتریج				کوبه			
	TLBO		فرمول های پیشنهادی		TLBO		فرمول های پیشنهادی	
	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتیمتر)	شتاب (g)
۵	۵,۰۸	۰,۲۳	۵,۰۸	۰,۲۳	۶,۴۳	۰,۳۸	۶,۴۲	۰,۳۸
۱۰	۹,۴۵	۰,۲۰	۹,۴۵	۰,۲۰	۱۱,۹۱	۰,۳۲	۱۱,۹۴	۰,۳۲
۱۵	۱۲,۸۷	۰,۱۹	۱۲,۸۸	۰,۱۹	۱۵,۱۹	۰,۳۱	۱۵,۲۹	۰,۳۱
۲۰	۱۵,۳۲	۰,۱۷	۱۵,۳۳	۰,۱۷	۱۵,۸۲	۰,۲۹	۱۶,۶۴	۰,۲۹
۲۵	۱۹,۰۲	۰,۱۵	۱۹,۰۳	۰,۱۵	۱۶,۳۲	۰,۳۵	۱۶,۶۵	۰,۳۴
۳۰	۲۲,۸۱	۰,۱۴	۲۲,۷۱	۰,۱۴	۱۶,۳۸	۰,۲۰	۱۶,۵۲	۰,۲۰
۳۵	۲۷,۷۷	۰,۲۰	۲۷,۷۱	۰,۲۰	۲۲,۰۹	۰,۲۱	۲۲,۱۴	۰,۲۱
۴۰	۳۰,۰۲	۰,۲۴	۳۰,۰۹	۰,۲۴	۲۶,۶۶	۰,۴۱	۲۶,۶۸	۰,۴۱

جدول ۸: متوسط درصد کاهش پاسخ‌های بیشینه طبقات سازه ۴۰ طبقه در زلزله‌های مختلف.

	درصد کاهش جابجایی (%)		درصد کاهش مطلق (%)	
	TLBO	GP	TLBO	GP
ال سنتر و	۷,۰۷	۸,۲۰	۰,۳۸	۰,۸۹
هاچینو	۲,۱۱	۱۰,۳۴	۱,۵۲	۲,۱۳
کوبه	۱۹,۴۳	۱۸,۶۱	۲,۰۵	۲,۷۶
نورثریج	۹,۲۳	۹,۲۶	۰,۰۴	۰,۲۳
میانگین	۹,۴۶	۱۱,۵۸	۰,۹۸	۱,۵۰

۷- نتیجه گیری

در این مقاله با بهره‌گیری از تکنیک برنامه‌ریزی ژنتیک، فرمول‌های جدیدی برای تخمین بهینه پارامترهای TMD برای کنترل سازه‌های در معرض زلزله ارائه گردید. اهم موارد بررسی شده و نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشند:

۱. مسئله تنظیم پارامترهای TMD برای سازه اصلی تحت تحریک اغتشاش سفید تبیین و سپس با استفاده از الگوریتم TLBO، پارامترهای طراحی TMD شامل فرکانس تنظیم بهینه و نسبت میرایی بهینه TMD برای مسئله مذکور و برای طیف وسیعی از نسبت‌های جرمی TMD و برای دو حالت سیستم اصلی نامیرا و میرا با نسبت میرایی ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۷۵ و ۰/۱ تعیین گردیدند و پایگاه داده‌های حاصل برای استخراج فرمول‌های کارا و با برازش بالا مبتنی بر تکنیک GP مورد استفاده قرار گرفت.

۲. نتایج شاخص‌های آماری به دست آمده نشان داد که فرمول‌های پیشنهادی ضمن برخورداری از ویژگی‌های سادگی و دقت، از کارایی بالایی نیز برخوردار بوده و قادرند بدون صرف هزینه زمانی و با دقت بالا، یک تخمین مناسب از پارامترهای بهینه TMD در کنترل لرزه‌ای سیستم‌های در معرض تحریک پایه‌ای از نوع اغتشاش سفید را فراهم نمایند.

۳. کارایی فرمول‌های پیشنهادی برای کاربردهای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها با تنظیم بهینه پارامترهای TMD برای دو سازه ۱۰ و ۴۰ طبقه و مقایسه آن‌ها با نتایج به دست آمده از الگوریتم TLBO ارزیابی شدند. پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه شامل بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات در چهار زلزله معروف ال سنتر و، هاچینو، نورثریج و کوبه ارزیابی شدند.

۴. نتایج به دست آمده برای سازه ۱۰ طبقه نشان داد که، به‌طور متوسط برای همه زلزله‌ها، TMD تنظیم‌شده به کمک TLBO، کاهشی در حدود ۱۸/۰۳ و ۶/۷۲ درصد را در بیشینه جابجایی و شتاب طبقات فراهم نموده، لیکن TMD تنظیم‌شده به کمک فرمول‌های پیشنهادی، به ترتیب سبب کاهش ۱۸/۴۷ و ۱۱/۲۳ درصد در پاسخ‌های مذکور شد.

۵. برای سازه ۴۰ طبقه نتایج به دست آمده نشان داد که، به‌طور متوسط برای همه زلزله‌ها، این کاهش‌ها به ترتیب برابر ۹/۴۶ و ۰/۹۸ درصد برای TMD تنظیم‌شده به کمک TLBO بود، درحالی‌که کاهش ۱۱/۵۸ و ۵/۱ درصد برای TMD تنظیم‌شده به کمک فرمول‌های پیشنهادی در پاسخ بیشینه جابجایی و شتاب طبقات به دست آمد.

۶. نتایج مطالعات انجام‌شده بر روی دو سازه مذکور نیز نشان داد که تنظیم بهینه پارامترهای TMD به کمک فرمول‌های پیشنهادی ضمن حذف هزینه محاسباتی ناشی از به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا اکتشافی، قادرند عملکرد مطلوب‌تری را در کاهش جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه‌های مورد مطالعه فراهم نمایند، لذا ضمن ارائه یک تنظیم بهینه، ساده و کارا قابلیت بهره‌گیری برای سازه‌های مجهز به TMD در معرض زلزله را فراهم می‌نمایند.

مراجع

- [1] Alizadeh, H. and Hosseini Lavassani, S.H., (2022). The effect of soil-structure interaction on longitudinal seismic responses of suspension bridges controlled by optimal TMD. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 4), pp.439-458.
- [2] Khazaei, M., Vahdani, R. and Kheyroddin, A., (2021). Investigation the Effects of Multiple Tuned Mass Damper on Reduction of Seismic Parameters of Tall Buildings Regular and Irregular on Plan in Steel Flexible Structures Under Near and Far-Fault Earthquakes. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(2), pp.244-263.
- [3] Rahman Shokrgozar, H., Naeim, K. and Imani Kalasar, H., (2017). Comparison of the Efficiency of Tuned Mass and Tuned Liquid Dampers at High-Rise Structures under Near and Far Fault Earthquakes. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 3(4), pp.105-119.
- [4] Den Hartog, J.P., (1985). *Mechanical vibrations*. Courier Corporation.
- [5] IOI, T. and IKEDA, K., (1978). On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system. *Bulletin of JSME*, 21(151), pp.64-71.
- [6] Warburton, G.B. and Ayorinde, E.O., (1980). Optimum absorber parameters for simple systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 8(3), pp.197-217.
- [7] Ayorinde, E.O. and Warburton, G.B., (1980). Minimizing structural vibrations with absorbers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 8(3), pp.219-236.
- [8] Bapat, V.A. and Kumaraswamy, H.V., (1979). Effect of primary system damping on the optimum design of an untuned viscous dynamic vibration absorber. *Journal of sound and vibration*, 63(4), pp.469-474.
- [9] Bapat, V.A. and Kumaraswamy, H.V., (1980). Optimizing The Untuned Viscous Dynamic Vibration Absorber With Primary System Damping-A Frequency Locus Method-Reply. *Journal of Sound and Vibration*, 73(3), p.472.
- [10] Warburton, G.B., (1982). Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(3), pp.381-401.
- [11] Tsai, H.C. and Lin, G.C., (1993). Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 22(11), pp.957-973.
- [12] Bakre, S.V. and Jangid, R.S., (2007). Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system. *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*, 14(3), pp.448-470.
- [13] Leung, A.Y.T. and Zhang, H., (2009). Particle swarm optimization of tuned mass dampers. *Engineering Structures*, 31(3), pp.715-728.
- [14] Salvi, J. and Rizzi, E., (2012). A numerical approach towards best tuning of Tuned Mass Dampers. In *Proc. of 25th Int. Conf. on Noise and Vibration Engineering (ISMA 2012), Leuven, Belgium* (pp. 17-19).
- [15] Etedali, S. and Mollayi, N., (2018). Cuckoo search-based least squares support vector machine models for optimum tuning of tuned mass dampers. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 18(02), p.1850028.
- [16] Keshtegar, B. and Etedali, S., (2018). Nonlinear mathematical modeling and optimum design of tuned mass dampers using adaptive dynamic harmony search algorithm. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(7), p.e2163.
- [17] Etedali, S., Bijaem, Z.K., Mollayi, N. and Babaiyan, V., (2021). Artificial Intelligence-Based Prediction Models for Optimal Design of Tuned Mass Dampers in Damped Structures Subjected to Different Excitations. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, p.2150120.

- [18] Mohebbi, M., Shakeri, K., Ghanbarpour, Y. and Majzoub, H., (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.605-625.
- [19] Etedali, S., Seifi, M. and Akbari, M., (2018). A numerical study on optimal FTMD parameters considering soil-structure interaction effects. *Geomechanics and Engineering*, 16(5), pp.527-538.
- [20] Shahi, M., Sohrabi, M.R. and Etedali, S., (2018). Seismic control of high-rise buildings equipped with ATMD including soil-structure interaction effects. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 12(03), p.1850010.
- [21] Etedali, S., (2020). Ranking of design scenarios of TMD for seismically excited structures using TOPSIS. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(6), pp.1372-1386.
- [22] Farshidianfar, A. and Soheili, S., (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, pp.14-22.
- [23] Etedali, S., (2017). A new modified independent modal space control approach toward control of seismic-excited structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 15(10), pp.4215-4243.
- [24] Etedali, S., Akbari, M. and Seifi, M., (2019). MOCS-based optimum design of TMD and FTMD for tall buildings under near-field earthquakes including SSI effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, pp.36-50.
- [25] Etedali, S. and Rakhshani, H., (2018). Optimum design of tuned mass dampers using multi-objective cuckoo search for buildings under seismic excitations. *Alexandria engineering journal*, 57(4), pp.3205-3218.
- [26] Kaveh, A., Javadi, S.M. and Moghanni, R.M., (2020). Optimal structural control of tall buildings using tuned mass dampers via chaotic optimization algorithm. In *Structures* (Vol. 28, pp. 2704-2713). Elsevier.
- [27] Etedali, S., Zamani, A.A. and Tavakoli, S., (2018). A GBMO-based $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller for vibration mitigation of seismic-excited structures. *Automation in Construction*, 87, pp.1-12.
- [28] Hosseinaei, S., Ghasemi, M.R. and Etedali, S., (2021). Optimal design of passive and active control systems in seismic-excited structures using a new modified TLBO. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(1), pp.37-55.
- [29] Rao, R.V., Savsani, V.J. and Vakharia, D.P., (2011). Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design*, 43(3), pp.303-315.
- [30] Rao, R.V. and Patel, V., (2013). An improved teaching-learning-based optimization algorithm for solving unconstrained optimization problems. *Scientia Iranica*, 20(3), pp.710-720.
- [31] Koza, J.R., (1994). Genetic programming as a means for programming computers by natural selection. *Statistics and computing*, 4(2), pp.87-112.
- [32] Zhang, F., Mei, Y., Nguyen, S. and Zhang, M., (2020). Evolving scheduling heuristics via genetic programming with feature selection in dynamic flexible job-shop scheduling. *IEEE transactions on cybernetics*, 51(4), pp.1797-1811.
- [33] Anđelić, N., Baressi Šegota, S., Lorencin, I., Mrzljak, V. and Car, Z., (2021). Estimation of COVID-19 epidemic curves using genetic programming algorithm. *Health informatics journal*, 27(1), p.1460458220976728.
- [34] The Math Works, Inc. (2016). MATLAB (Version 2016a).
- [35] Ramezani M., Zahrai S.M. (2016). Optimal Parameters of Tuned Mass Damper for Tall Buildings by neural networks. *IJBQ*. 16 (4) pp.109-122. (In Persian)
- [36] Mohebbi M., Shakeri K., Majzoub H. (2012). Genetic Algorithm Based Approach for Optimal Design of Multiple Tuned Mass Dampers (MTMDs) under Earthquake Excitation. *IJBQ*. 12 (1). (In Persian)
- [37] Tahmassebi, A., and Gandomi, A. H. (2018). Building energy consumption forecast using multi-objective genetic programming. *Measurement*, 118, 164-171.

- [38] Hadi, M. N., and Arfiadi, Y. (1998). Optimum design of absorber for MDOF structures. *Journal of Structural Engineering*, 124(11), pp. 1272-1280.