



University Of Qom



Opposition-Switching Search for Optimal Seismic Control by Tuned Mass Damper Considering Soil-Structure Interaction

Mohsen Shahrouzi¹, Seyed Hossein Hosseini Lavasani², Javad Gholizadeh³

1. Corresponding author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: shahrouzi@khu.ac.ir
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: lavasani@khu.ac.ir
3. MSc Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: javadgholizadeh@khu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 08 Jun 2025
Revised 11 Nov 2025
Accepted 28 Nov 2025
Published 02 Dec 2025

Keywords:
Passive Control,
Tuned Mass Damper,
Opposition-Switching
Search,
Soil-structure
interaction.

ABSTRACT

In this study, the optimal design of a tuned mass damper (TMD) considering soil–structure interaction (SSI) is investigated. To this end, the objective function is formulated based on minimizing the H_{∞} norm of the roof-displacement transfer function in the frequency domain. The TMD parameters are optimized utilizing Opposition-Switching Search (OSS). It is a powerful metaheuristic algorithm that applies opposition-based learning in its particular steps to effectively seek the design space for global optimum. After obtaining the optimal parameters, seismic performance of the controlled structure is evaluated both in the frequency domain and under a set of far-field and near-field earthquake records in the time domain. Consequently, significant reduction in the seismic responses of structure was observed in each case due to the proposed control by the optimized TMD. Furthermore, the controlled system exhibits better performance under far-field ground motions. In addition, comparison between the rigid, stiff, and soft soil conditions shows that soil flexibility has a remarkable influence on both the optimal parameters and the performance of the TMD. These findings highlight the importance of simultaneous consideration of SSI effects and optimal TMD design in achieving efficient seismic control.

Cite this article: Shahrouzi M, Hosseini Lavasani SH, Gholizadeh J. Opposition-Switching Search for Optimal Seismic Control by Tuned Mass Damper Considering Soil-Structure Interaction. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(2): 159-170. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13052.1630>



Introduction

In recent years, passive control systems have been widely considered as effective solutions for reducing the seismic responses of structures. Among them, the tuned mass damper (TMD) is extensively employed due to its simple design, low construction cost, and applicability to high-rise buildings. As its performance is sensitive to the tuned damping and frequency of the soil–structure system, such parameters should be carefully designed.

Methodology

In this study, the optimal design of tuned mass damper is performed considering soil–structure interaction. For this purpose, a recent meta-heuristic algorithm called Opposition-Switching Search (OSS), is employed. It applies opposition-based learning to efficiently explore the design space in such a continuous optimization problem with the capability of overpassing local optima. The objective function is defined as minimizing the H_∞ norm of the roof displacement transfer function in the frequency domain, providing a robust design independent of external excitation characteristics. The design variables include the damping and frequency ratios. For practical purposes, the mass ratio of TMD is taken as 1% of the total structural mass. The optimization process is distinctly conducted for three SSI conditions; i.e. rigid base, dense soil, and soft soil. The performance of the uncontrolled and controlled structures is evaluated first in the frequency domain and then under sets of far-field and near-field earthquake records in the time domain.

Results Evaluation

The results show that the optimized TMD leads to significant reduction in roof displacement in all SSI conditions. Additionally, the variation in optimal designs across different SSI conditions shows the sensitivity of TMD performance to the soil flexibility. Further time-history analyses reveal that the controlled system performs more

effectively under far-field ground motions than under near-field motions, which is attributed to differences in the energy content and frequency characteristics of the records.

Conclusion

The present study demonstrates crucial effect of TMD parameter optimization for seismic control, particularly in presence of soil–structure interaction. The utilized OSS provides an efficient and reliable solution for determining the optimal parameters. Considering the sensitivity of high-rise structures to frequency shifts and excitation characteristics, frequency-domain-based optimization can improve seismic control performance and reliability, under various SSI conditions. Overall, the obtained results can serve as a basis for practical design strategies for tuned mass dampers in tall buildings and motivate further studies in this field.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare no known competing interests for this work.

Authors' Contributions

Mohsen Shahrouzi:

Conceptualization; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Programming; Supervision; Validation; Visualization; Roles/ Writing – review & editing.

Seyed Hossein Hosseini-Lavasani:

Conceptualization; Data curation; Methodology; Project administration; Resources; Supervision; Validation; Roles/Writing – review & editing.

Javad Gholizadeh:

Data curation; Investigation; Methodology; Resources; Software; Visualization; Roles/Writing – original draft.



طرح بهینه میراگر جرمی متوازن تحت اندرکنش خاک-سازه به کمک الگوریتم جستجوی تقابلی متناوب

محسن شهروزی^۱، سید حسین حسینی لواسانی^۲، جواد قلی‌زاده^۳

۱. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: shahruzi@khu.ac.ir

۲. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: lavasani@khu.ac.ir

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: javadgholizadeh@khu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، طراحی بهینه میراگر جرمی متوازن تحت اندرکنش خاک-سازه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، تابع هدف بر پایه حداقل‌سازی نرم H_{∞} تابع تبدیل جابجایی بام در حوزه فرکانس تعریف شده و پارامترهای میراگر با استفاده از جستجوی تقابلی متناوب بهینه‌سازی شده‌اند. این الگوریتم فراابتکاری به شیوه خاص خود از یادگیری تقابلی برای جستجوی موثر بهینه سراسری بهره می‌برد. پس از تعیین مقادیر بهینه، عملکرد لرزه‌ای سازه در حوزه فرکانس و تحت مجموعه‌ای از رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور و نزدیک در حوزه زمان ارزیابی شده است. نتایج بیانگر کاهش قابل توجه پاسخ‌های لرزه‌ای سازه در حالت کنترل‌شده در مقایسه با سازه اولیه، متعاقب تنظیم بهینه میراگر در هر حالت است. همچنین مشاهده شد که سیستم کنترل در تحریک‌های حوزه دور عملکرد بهتری نسبت به حوزه نزدیک دارد. افزون بر این، مقایسه حالات پی صلب، خاک سخت و خاک نرم نشان می‌دهد که شرایط خاک اثر معناداری بر مقادیر بهینه و کارایی سیستم میراگر دارد. نتایج تحقیق حاضر بیانگر اهمیت توجه هم‌زمان به اندرکنش خاک-سازه و انتخاب بهینه پارامترهای میراگر در تحقق عملکرد مطلوب کنترل لرزه‌ای می‌باشد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

کلیدواژه‌ها:

کنترل غیرفعال،

میراگر جرمی متوازن،

الگوریتم جستجوی تقابلی

متناوب،

اندرکنش خاک و سازه.

استناد: شهروزی محسن، حسینی لواسانی سیدحسین، قلی‌زاده جواد. طرح بهینه میراگر جرمی متوازن تحت اندرکنش خاک-سازه به کمک الگوریتم جستجوی تقابلی متناوب. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴، ۱۱(۲): ۱۵۹-۱۷۰.

<https://doi.org/10.22091/cer.2025.13052.1630>

۱- مقدمه

یکی از اهداف مهم در طراحی سازه‌ها، کاهش اثرات ناشی از بارهای دینامیکی می باشد تا ساختمان‌ها در برابر پدیده‌هایی مانند باد و زلزله، عملکرد مطمئن و پایدار داشته باشند. در این زمینه دو رویکرد عمومی مطرح است. رویکرد سنتی، طراحی سازه‌های شکل پذیر و مقاوم در برابر بارهای وارده است. لیکن طبق مطالعات مختلف این رویکرد ظرفیت محدودی برای کاهش آسیب سازه‌ها تحت بارهای دینامیکی دارد. رویکرد جدیدتر، کنترل سازه است طوری که بتواند با کاهش جابجایی، سرعت و شتاب سازه‌ها، آسایش و ایمنی را برای ساکنین تامین نماید [۱ و ۲].

روش‌های کنترل سازه به چهار گروه کنترل غیرفعال، فعال، نیمه فعال و ترکیبی تقسیم می‌شوند که سامانه‌های کنترل غیرفعال به دلیل سادگی و مقرون به صرفه بودن مورد توجه هستند. در این دسته، کاربرد میراگر جرمی متوازن^۱ (TMD) بسیار رایج می باشد [۳]. البته عملکرد این میراگر به پارامترهای جرم، میرایی و سختی حساس است لذا طراحی بهینه این پارامترها با روش‌های فراابتکاری بطور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۴ و ۵]. در طراحی بهینه میراگر جرمی متوازن، به دلیل محدودیت‌های معماری و اجرایی معمولاً نسبت جرم حدود ۱ تا ۵ درصد جرم کل سازه انتخاب می‌شود و نسبت میرایی و نسبت فرکانس بعنوان متغیرهای طراحی مسئله بهینه سازی جستجو می‌شوند [۶-۸].

روشهای فراابتکاری به دو دسته روش‌های تک عاملی و روش‌های مبتنی بر جمعیت تقسیم می‌شوند. در روش‌های تک عاملی، یک راه حل اولیه ایجاد شده و به تدریج بهبود می‌یابد تا بهترین نتیجه حاصل شود. اما در روش‌های مبتنی بر جمعیت، مجموعه ای از راه حل‌ها بصورت تصادفی تولید می‌شود و بصورت مکرر بروز می‌شود تا بهترین نتیجه حاصل شود. تا کنون روشهای فراابتکاری

متعددی برای حل مسائل مهندسی ابداع شده اند. در این میان می توان به الگوریتم رقابت استعماری، بهینه یاب تعادلی، الگوریتم برخورد ذرات، الگوریتم تعویض تیمها، الگوریتم ذرات مرتعش، جستجوی پرنده گریزان، الگوریتم تولید پلاسما و بهینه یاب انرژی صوتی اشاره نمود [۴ و ۹-۱۸].

حساسیت این میراگر نسبت به فرکانس تنظیمی، یک چالش است چنانکه تغییر در فرکانس سازه، حتی می تواند به عملکرد لرزه ای نامطلوب منجر شود. محققان برای غلبه بر این چالش و نیز کاهش وزن تجهیز، میراگرهای جرمی اینترتر^۲ را معرفی کردند [۱۷]. اضافه شدن اینترتر به میراگر جرمی تنظیم شونده، پارامترهای طراحی را افزایش می‌دهد. از طرفی با لحاظ اندرکنش خاک و سازه، فرکانس‌های سازه مبنا تغییر می‌کنند [۱۹]. در بسیاری از پژوهش‌های پیشین این مسئله نادیده انگاشته شده و پی زیر سازه صلب (سختی خاک بینهایت) فرض گردیده است [۲۰]. بکداز و همکاران به مطالعه میراگر جرمی تحت اندرکنش خاک و سازه پرداختند و از ۶ الگوریتم فراابتکاری برای بهینه سازی پارامترهای میراگر جرمی استفاده کردند [۱۹]. اخیراً بهینه سازی میراگر جرمی متوازن با لحاظ عدم قطعیت‌ها مطرح شده است [۲۱]. شهبازی و همکاران عملکرد میراگر جرمی دوگانه اینترتر^۳ را تحت اندرکنش خاک و سازه مورد مطالعه قرار دادند [۲۲]. آنها از چهار الگوریتم بهینه سازی استفاده نمودند که الگوریتم جستجوی تقابلی متناوب نتایج بهتری نسبت به دیگر روش‌ها داد. با این وجود، طبق برخی مطالعات در سازه‌های چند درجه آزادی عملکرد میراگر جرمی متوازن کلاسیک بهتر از میراگر جرمی اینترتر گزارش شده است [۲۳ و ۲۴].

پژوهش حاضر به طراحی بهینه میراگر جرمی متوازن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی تقابلی متناوب تحت حالت‌های مختلف اندرکنشی خاک و سازه می‌پردازد

³ Double Tuned Mass Damper

¹ Tuned Mass Damper

² Tuned Mass Damper Inerter

۲- معادلات حرکت

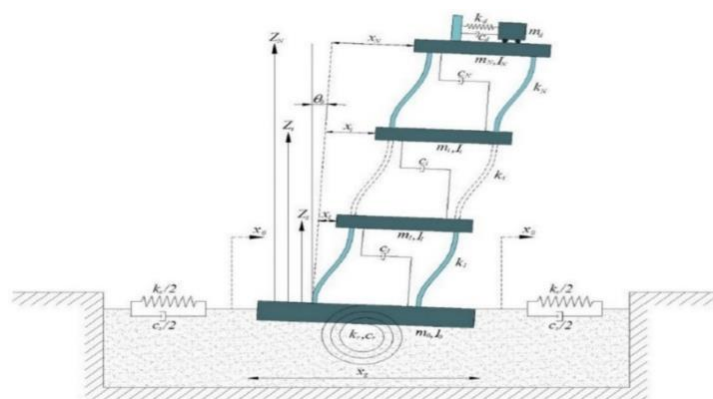
برای ارزیابی عملکرد میراگر جرمی متوازن تحت اثر اندرکنش خاک و سازه، یک مدل برشی از ساختمان ۱۵ طبقه اداری با جرم و سختی طبقات طبق جدول ۱ و ارتفاع نوعی طبقه برابر ۳/۲ متر مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. نسبت میرایی ۲ درصد در سازه بعنوان میرایی رایلی لحاظ شده است.

یک مدل برشی N درجه آزادی مجهز به میراگر جرمی متوازن تحت اندرکنش خاک و سازه در شکل ۱ به نمایش در آمده که مطابق آن، میراگر جرمی به صورت یک مدل جرم-میراگر اضافی به درجه آزادی افقی طبقه N وصل می‌شود. بدین ترتیب یک درجه آزادی به درجات سازه مبنا اضافه می‌شود.

[۲۵]. این الگوریتم با بهره‌گیری از یادگیری تقابلی عملکرد برتری در سایر مسائل پژوهشهای پیشین داشته است [۲۲]. ۲۵-۲۷]. بعنوان مطالعه موردی، یک ساختمان ۱۵ طبقه در سه حالت پی صلب، خاک سخت و خاک نرم زیر شالوده مدلسازی شده است. درجات آزادی پی نسبت به خاک اطراف طبق ادبیات فنی رایج به صورت افقی و چرخشی (گهواره ای) مدل می‌شوند. سپس مساله تنظیم بهینه پارامترهای میراگر فرمولبندی و با ویژه سازی الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی حل می‌گردد. طی این فرآیند نسبت جرم میراگر برابر ۱ درصد جرم کل سازه اولیه در نظر گرفته می‌شود. پس از طراحی بهینه ضرایب میراگر، عملکرد سیستم در حوزه زمان و فرکانس بررسی می‌گردد. برای ارزیابی عملکرد سامانه کنترل در حوزه زمان، از نگاشتهای حوزه دور و نزدیک زلزله‌های واقعی استفاده شده است.

جدول ۱- مقادیر جرم و سختی طبقات ساختمان برشی ۱۵ طبقه اداری - دانشگاه خوارزمی [۷]

طبقه	جرم ($10^6 kg$)	سختی ($10^8 N/m$)	طبقه	جرم ($10^6 kg$)	سختی ($10^8 N/m$)	طبقه	جرم ($10^6 kg$)	سختی ($10^8 N/m$)
۱	۲/۱۱	۲/۱۶	۶	۱/۹۷	۰/۵۹	۱۱	۱/۶۴	۰/۲۵
۲	۲/۱۵	۱/۳۶	۷	۱/۹۵	۰/۵۱	۱۲	۱/۳۵	۰/۱۹
۳	۲/۱۳	۱/۰۲	۸	۱/۹۴	۰/۴۳	۱۳	۱/۸	۰/۱
۴	۲/۱۳	۰/۸۲	۹	۱/۸۷	۰/۳۷	۱۴	۰/۷۴	۰/۰۷
۵	۲/۰۴	۰/۶۹	۱۰	۱/۷۴	۰/۳۱	۱۵	۰/۵۱	۰/۰۴



شکل ۱- مدل برشی N درجه آزادی مجهز به میراگر جرمی متوازن با لحاظ اندرکنش سازه و خاک [۱۹]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{m}^* \ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

که در آن $\mathbf{M}$ ، $\mathbf{C}$ و $\mathbf{K}$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی با ابعاد $N+3$ و $\ddot{x}_g(t)$ ، $\dot{x}(t)$ و $x(t)$ به ترتیب

معادله حرکت ساختمان برشی مجهز به میراگر جرمی متوازن با لحاظ اندرکنش خاک و سازه بصورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

بردارهای شتاب، سرعت و جابجایی با ابعاد $N+3$ و $\ddot{x}_g(t)$ جرم، میرایی، سختی و پارامترهای مربوط به آنها در روابط نیز شتاب زلزله وارد بر تکیه‌گاه سازه می‌باشد. ماتریس‌های (۲) تا (۶) ارائه شده است.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} [M_f] & [M_v] & [MZ] \\ [M_v]^T & m_o + \sum_{i=1}^N m_i + m_d & \sum_{i=1}^N m_i z_i + m_d z_N \\ [MZ]^T & \sum_{i=1}^N m_i z_i + m_d z_N & \sum_{i=1}^N (m_i z_i^2) + m_d z_N^2 + I_o + \sum_{i=1}^N I_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_v = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{N-1} \\ m_N \\ m_d \end{bmatrix}, [MZ] = \begin{bmatrix} m_1 z_1 \\ m_2 z_2 \\ \vdots \\ m_{N-1} z_{N-1} \\ m_N z_N \\ m_d z_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} [C_f] & 0 & 0 \\ 0 & c_s & 0 \\ 0 & 0 & c_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} [K_f] & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & k_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$m^* = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{N-1} \\ m_N \\ m_d \\ m_o + \sum_{i=1}^N m_i + m_d \\ \sum_{i=1}^N m_i z_i + m_d z_N \end{bmatrix}, X(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{N-1} \\ x_N \\ x_d \\ x_o \\ \theta_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در این روابط M_f ، C_f و K_f ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه با میراگر جرمی، بدون اندرکنش خاک و سازه می‌باشد. m_i و l_i به ترتیب جرم و ارتفاع طبقه i ام، m_d جرم میراگر، m_o جرم پی، I_i و I_o به ترتیب

ممان اینرسی طبقات و پی می‌باشد. C_s و C_r به ترتیب میرایی افقی و دورانی خاک، k_s و k_r نیز به ترتیب سختی افقی و سختی دورانی خاک است. سختی و میرایی برای هر خاک متراکم و نرم در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- پارامترهای سختی و میرایی خاک [۲۸]

نوع خاک	میرایی افقی $C_s(N.s/m)$	میرایی دورانی $C_r(N.s/m)$	سختی افقی $K_s(N/m)$	سختی دورانی $K_r(N/m)$
متراکم	4.99×10^8	1.65×10^{10}	3.31×10^{10}	3.63×10^{12}
نرم	7.48×10^7	2.47×10^9	1.1×10^9	1.43×10^{11}

الگوریتم جستجوی تقابلی متناوب، کار را با جمعیتی تصادفی از n نقطه در فضای جستجو آغاز می کند. سپس طی حلقه تکراری زیر تا حصول به شرط همگرایی، هر بار نقطه کاندید جدیدی را به ازای هر عضو فعلی جمعیت X^i ایجاد و در صورت بهبود تابع هدف با آن جایگزین می نماید: (الف) تولید بردار شبه میانگین $\tilde{Y}$ با کاربرد حافظه موجود و تابع $q(n)$ که مولد اعداد طبیعی تصادفی ۱ تا n باشد.

$$Y_j = X_j^{q(n)} \quad (11)$$

(ب) محاسبه نقطه متقابل آن $\tilde{Y}$ طبق رابطه (۱۱)

(پ) انتساب بردار Y یا $\tilde{Y}$ به بردار Z ، به تناوب

(ت) کاربرد رابطه زیر برای ایجاد نقطه کاندید X^{new}

$$X^{new} = X^i + r \times (X^{Gb} - X^i) + r \times (\tilde{X}^i - X^{Gb}) + r \times (X^{Gb} - Z) \quad (12)$$

(ث) برآورد تابع هدف نقطه کاندید برای جایگزینی با

عضو شماره i در جمعیت فعلی در صورت بهبود

مقدار تابع

(ج) کنترل شرط توقف الگوریتم و اعلام حل بهینه

در رابطه (۱۲)، r تابع تولیدکننده بردار اعداد تصادفی در محدوده صفر تا ۱ است. X^{Gb} بهنگام شده بهترین نقطه دریافتی در فرآیند جستجو می باشد که نهایتاً بعنوان حل بهینه اعلام خواهد شد. شکل ۲ گردش نمای الگوریتم جستجوی تقابلی متناوب^۲ را نمایش می دهد.

مسئله بهینه سازی در این مطالعه به کمینه سازی نرم H_∞ تابع تبدیل جابجایی طبقه بام می پردازد. هدف این کنترل مقاوم، کاهش حساسیت طراحی به خطاهای مدلسازی و اغتشاشهای خارجی می باشد. نرم بی نهایت مطابق با رابطه (۱۳) تعریف می شود:

$$\begin{aligned} \min_x \|G(j\omega; X)\|_\infty \\ s.t. \\ X^L \leq X \leq X^U \end{aligned} \quad (13)$$

برای مدلسازی و تحلیل دینامیکی سیستم معادلات حاکم بر حرکت آن را می توان در فضای حالت مطابق با رابطه (۷) تعریف نمود که در آن بردار حالت، A و B نیز براساس روابط (۸) و (۹) به ترتیب ماتریس های سیستم و موقعیت می باشند.

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + B\ddot{X}_g(t) \quad (7)$$

$$\dot{Z}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}m^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

همچنین نماد 0 ماتریس صفر و نماد I ماتریس همانی با ابعاد متناسب را نشان می دهند.

۳- فرمول بندی مسئله و طراحی بهینه میراگر جرمی متوازن

برای بهینه یابی در پژوهش حاضر الگوریتم فراابتکاری جستجوی تقابلی متناوب بکار رفته که اخیراً ابداع شده است [۲۵ و ۲۷]. پارامترهای کنترلی الگوریتم مطابق با جدول ۳ می باشد.

جدول ۳- پارامترهای کنترلی الگوریتم بهینه سازی

الگوریتم	اندازه جمعیت	تعداد فراخوانی تابع هدف ^۱
OSS	۳۰	۴۰۰۰

مشابه روشهای یادگیری تقابلی، این روش بطور همزمان از یک عامل جستجوگر و نسخه متقابل آن بهره می گیرد تا بهبود همگرایی و افزایش کیفیت جستجو را تامین کند.

مفهوم تقابل با تعاریف مختلف ارائه شده است. طبق تعریف پژوهش حاضر اگر X بردار متغیرهای طراحی در یک مسئله با حدود بالا و پایین به ترتیب برابر با X^U و X^L باشد، آنگاه نقطه متقابل عبارت خواهد بود از:

$$\tilde{X} = X^U + X^L - X \quad (10)$$

² Opposition-Switching Search

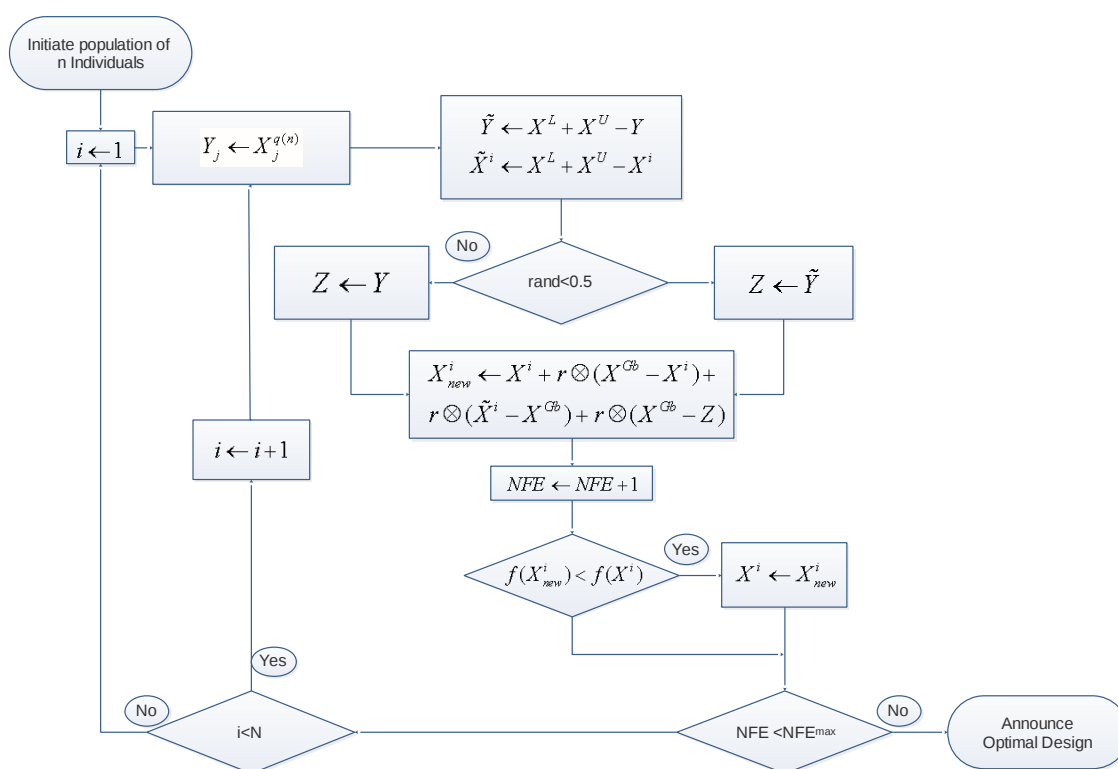
¹ Number of Function Evaluations (NFE)

هدف بهینه‌سازی در این مقاله، به حداقل رساندن نرم H_{∞} تابع تبدیل جابجایی طبقه بام است. پارامترهای بهینه میراگر جرمی، مستقل از محتوای فرکانسی تحریک خارجی و منطبق بر روش کنترل مقاوم می‌باشد. در این مطالعه نسبت جرم μ بعنوان پارامتر ثابت و نسبت‌های میرایی ζ_d و فرکانسی f_d به عنوان متغیرهای طراحی مسئله فرض شده اند. طبق جدول ۴ حدود متغیرهای بهینه‌یابی با $X^L = \langle 10^{-5}, 0 \rangle$ و $X^U = \langle 2, 2 \rangle$ مشخص می‌شوند. هرگاه متغیری از این حدود خارج شود با نزدیکترین مقدار در حد پایین X^L یا بالا X^U جایگزین می‌گردد.

شکل ۳ معرف نمودارهای حاصل از الگوریتم جستجوی تقابلی متناوب برای ساختمان مجهز به میراگر جرمی برای هر حالت اندرکنشی می‌باشد. مشاهده می‌شود

در هر سه حالت نقطه بهینه پس از همگرایی مناسب تابع هدف بدست آمده است. جدول ۵ پارامترهای بهینه را برای هر سه حالت پی صلب، خاک متراکم و نرم نشان می‌دهد. به لحاظ ماهیت احتمالاتی الگوریتم فراابتکاری نتایج اخیر طی ۱۰ مرتبه اجرای مستقل حاصل شده و نشان می‌دهند با نرم‌تر شدن خاک پارامتر نسبت میرایی، کاهش یافته است.

شکل ۴ مقدار تابع تبدیل جابجایی طبقه بام را برای ساختمان کنترل شده با TMD و کنترل نشده^۱ (UnC) نشان داده است. مشاهده می‌شود میراگر جرمی متوازن در فرکانس‌های پایین توانسته است تحت همه حالت‌های خاک، پاسخ را نسبت به ساختمان کنترل نشده کاهش دهد.

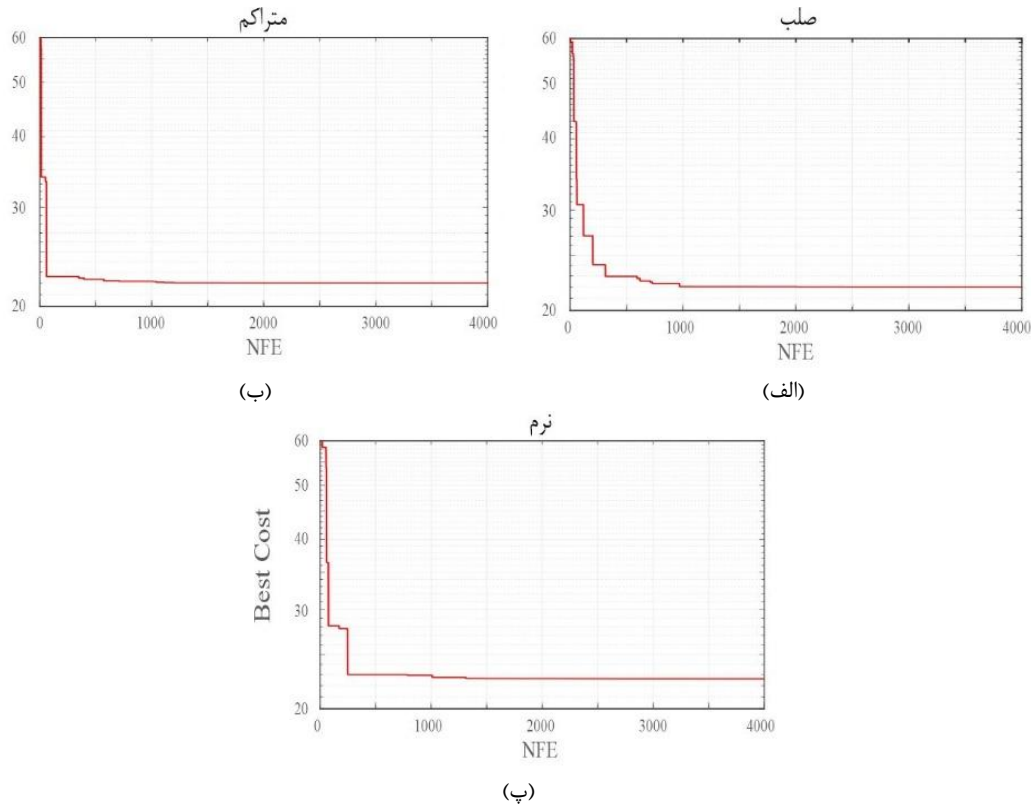


شکل ۲- گردش نمای الگوریتم جستجوی تقابلی متناوب

جدول ۴- پارامترهای موثر در طراحی میراگر جرمی متوازن

پارامتر ثابت	بردار متغیرهای طرح	متغیرهای طراحی	محدوده متغیرهای طرح
$\mu = 0.01$	$X = \langle f_d, \zeta_d \rangle$	$f_d = \frac{\omega_d}{\omega}$ و $\zeta_d = \frac{c_d}{2m_d\omega_d}$	$10^{-5} \leq f_d \leq 2$ $0 \leq \zeta_d \leq 2$

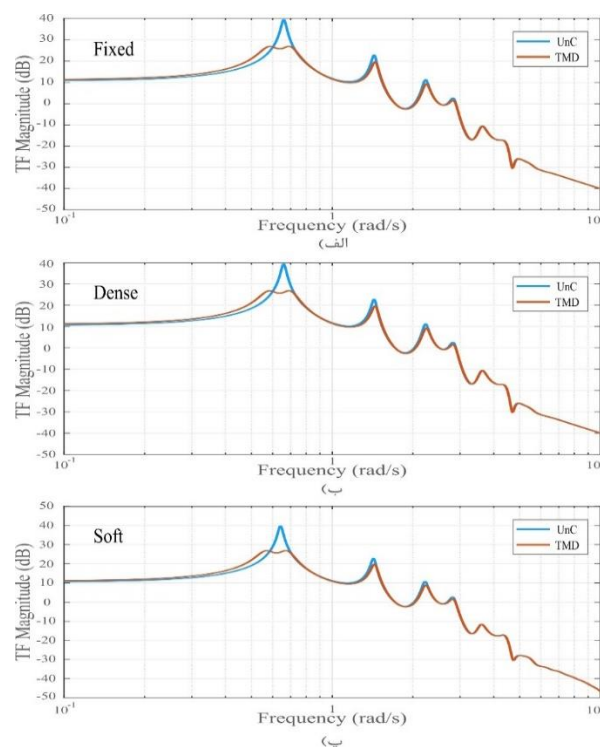
¹ Un Controlled



شکل ۳- نمودار همگرایی الگوریتم جستجوی تقابلی متناوب برای حالت‌های: (الف) پی صلب ب) خاک متراکم پ) خاک نرم

جدول ۵- حدود مقادیر تابع هدف و پارامترهای بهینه میراگر جرمی متوازن در سه حالت اندرکنش خاک و سازه به ازای $\mu=0.01$

خاک نرم			خاک متراکم			پی صلب		
H_{∞}	ζ_d	f_d	H_{∞}	ζ_d	f_d	H_{∞}	ζ_d	f_d
۲۲٫۶۱۲	۰٫۱۳۵	۰٫۹۵۱	۲۲٫۰۲۳	۰٫۱۳۷	۰٫۹۵۱	۲۱٫۹۶۴	۰٫۱۳۹	۰٫۹۵۱



شکل ۴- پاسخ فرکانسی میراگر جرمی متوازن (الف) حالت صلب ب) حالت متراکم پ) حالت نرم

۵- مدل‌سازی عددی

۱۹۶۸ (در حوزه دور) به علاوه کوبه ۱۹۹۵ و نورث‌ریج ۱۹۹۴

(درحوزه نزدیک) هستند. تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌های

انتخابی در شکل ۵ به نمایش درآمده اند.

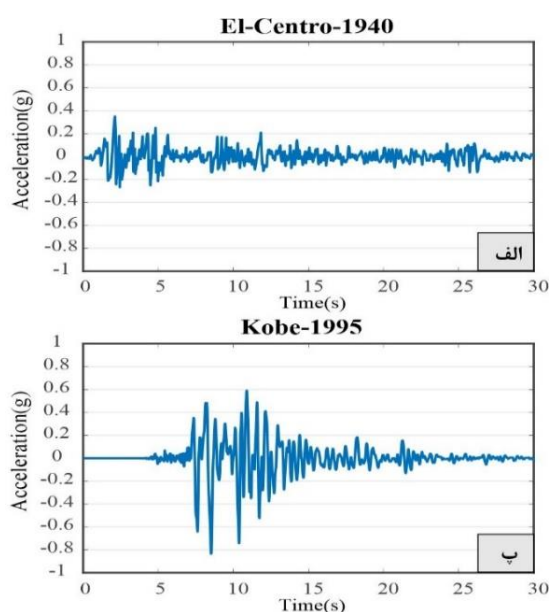
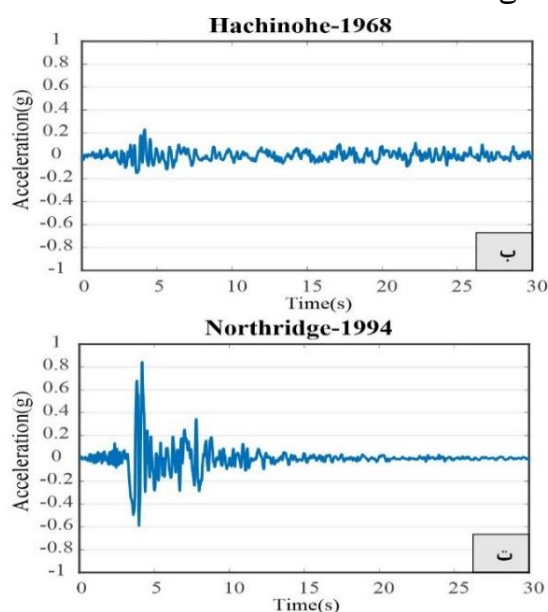
جدول ۶ حداکثر جابجایی نرمال طبقه بام (نسبت

پاسخ کنترل شده به کنترل نشده) را تحت تاریخچه

زمانی‌های شتاب زلزله‌های حوزه دور و نزدیک انتخابی برای

حالت‌های پی صلب، خاک متراکم و خاک نرم، گزارش

می‌کند.



شکل ۵- تاریخچه زمانی شتاب زلزله‌های حوزه دور و نزدیک انتخابی

جدول ۶- حداکثر جابجایی نرمال شده طبقه بام ساختمان ۱۵ طبقه مجهز به TMD تحت نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک در حالت‌های

مختلف

خاک نرم				خاک متراکم				پی صلب				نگاشت‌ها
N	K	H	E	N	K	H	E	N	K	H	E	
۰/۹۷۱۲	۰/۸۹۱۳	۰/۸۹۸۶	۰/۷۶۳۳	۰/۹۶۷۹	۰/۸۸۵۳	۰/۸۲۱۱	۰/۷۹۲۷	۰/۹۶۶۷	۰/۸۸۳۵	۰/۸۱۸۷	۰/۷۹۴۶	جابجایی نرمال

به منظور بررسی بهتر، شکل‌های ۶ تا ۸ تاریخچه

زمانی جابجایی طبقه بام را برای سیستم کنترل شده با

TMD در مقابل سیستم کنترل نشده تحت نگاشت‌های

حوزه دور و نزدیک انتخابی برای هر سه حالت خاک نشان

می‌دهند. طی این طراحی، میراگر برای به حداقل رساندن

نرم بی‌نهایت تابع تبدیل جابجایی طبقه بام تنظیم شده

است.

شتاب‌نگاشت‌های السنترو ۱۹۴۰ و هاچینوئه ۱۹۶۸

به ترتیب با E و H و شتاب نگاشت‌های کوبه ۱۹۹۵ و

نورث‌ریج ۱۹۹۴ با K و N نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود

در تمامی حالت‌ها میراگر جرمی متوازن توانسته است

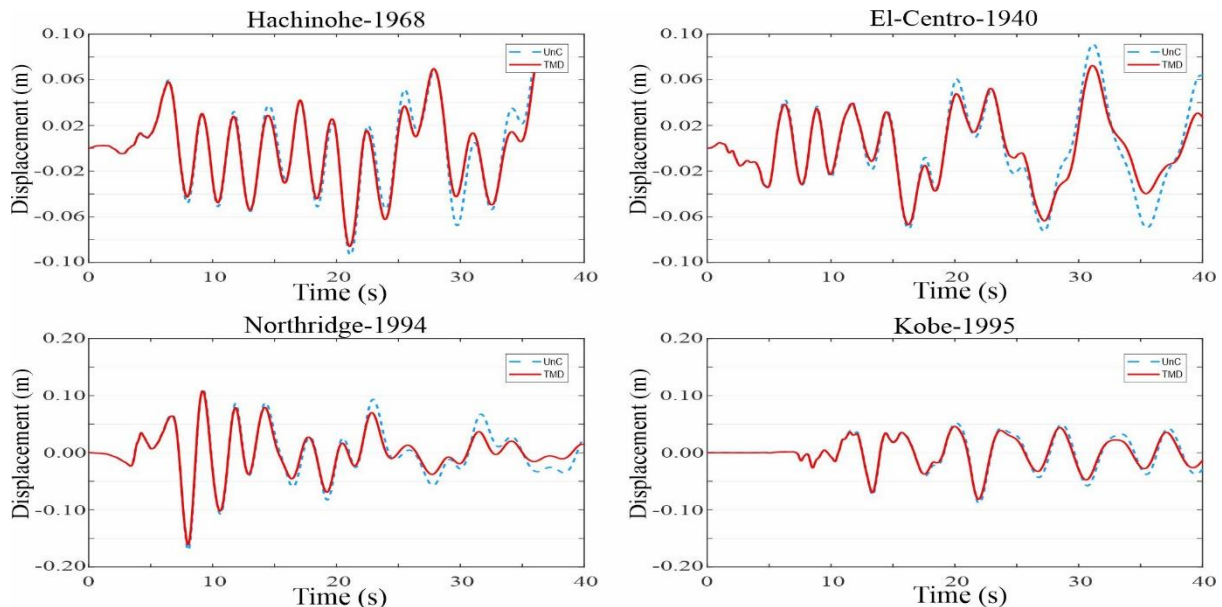
بیشینه پاسخ را نسبت به سازه کنترل نشده کاهش دهد.

بیشترین کاهش پاسخ برای زلزله السنترو و کمترین کاهش

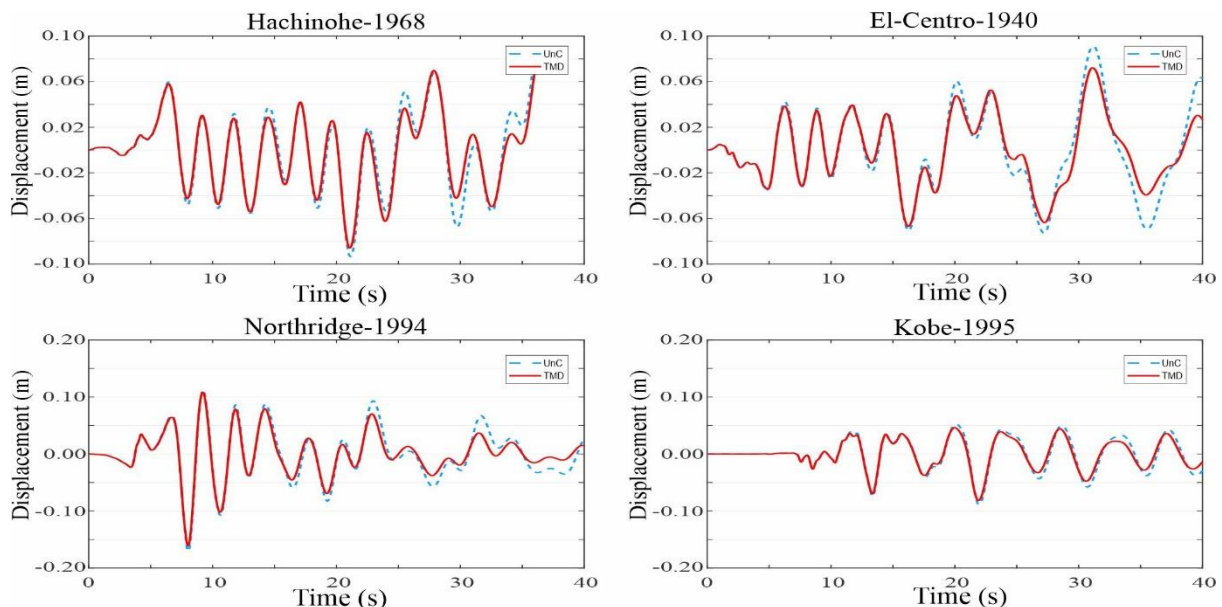
برای زلزله نورث‌ریج بوده است.

از نگاشتهای نزدیک گسل بوده است. بیشترین کاهش پاسخ تحت نگاشت زلزله حوزه دور السنترو و کمترین کاهش پاسخ نیز تحت نگاشت حوزه نزدیک نورثریج حاصل شده است.

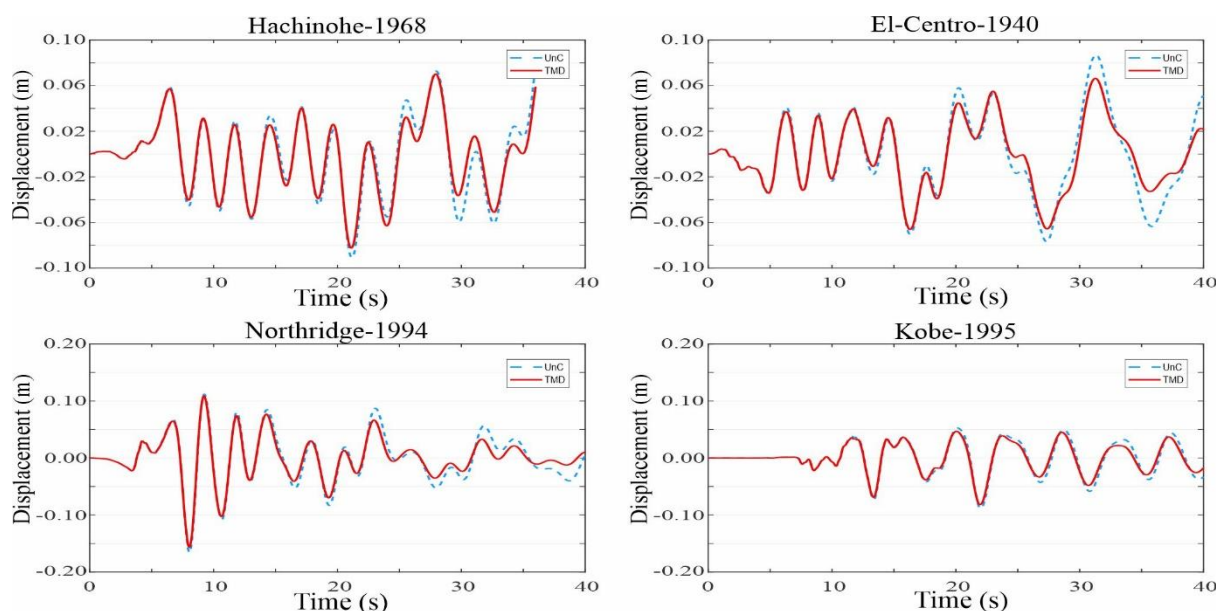
مطابق این شکلها، سیستم کنترل شده با میراگر جرمی متوازن توانسته است تحت نگاشتهای حوزه دور در هر سه حالت خاک پی صلب، متراکم و نرم با موفقیت جابجایی طبقه بام را نسبت به حالت کنترل نشده کاهش دهد و تحت نگاشتهای حوزه دور عملکرد این سیستم بهتر



شکل ۶- تاریخچه زمانی جابجایی بام ساختمان مجهز به میراگر جرمی با حالت پی صلب تحت نگاشتهای حوه دور و نزدیک



شکل ۷- تاریخچه زمانی جابجایی بام ساختمان مجهز به میراگر جرمی با حالت خاک متراکم تحت نگاشتهای حوه دور و نزدیک



شکل ۸- تاریخچه زمانی جابجایی بام ساختمان مجهز به میراگر جرمی با حالت خاک نرم تحت نداشت‌های حوضه دور و نزدیک

۴- نتیجه‌گیری

مختلف سختی خاک لزوم توجه به اندرکنش خاک-سازه را گوشزد می‌نماید.

مطابق نتایج، میراگر جرمی متوازن توانست در هر دو حوزه زمان و فرکانس تحت سه حالت پی صلب، خاک متراک و خاک نرم با موفقیت جابجایی بام را کاهش دهد. در حوزه زمان، مقدار شاخص جابجایی نرمال حاصل از کنترل در زلزله‌ها و حالت‌های اندرکنشی مختلف از حدود ۷۹ تا ۹۷٪ تغییر کرد که کمترین آن تحت شتاب‌نگاشت E و بیشترین تحت شتاب‌نگاشت N می‌باشد. همچنین مشاهده شد سیستم بهینه شده کنترلی در حوزه زمان، تحت نداشت‌های حوزه دور عملکرد بهتری از نداشت‌های حوزه نزدیک مورد مطالعه داشت و در حالت خاک نرم تفاوت جابجایی بام در زلزله E, N بیشتر اما در سایر زلزله‌ها به هم نزدیکتر بوده است. چشم انداز پژوهش‌های آتی در گسترش مطالعه موردی حاضر، می‌تواند بررسی تعداد بیشتری از زلزله‌های واقعی و شبیه‌سازی ضمن اعمال اثرات اندرکنش بر سایر انواع سیستم‌های کنترلی سازه‌ها را شامل شود.

در این مطالعه، اثربخشی میراگر جرمی متوازن با طرح بهینه در کاهش پاسخ ساختمان در حضور اندرکنش سازه و خاک، ارزیابی شد. برای این منظور یک ساختمان برشی ۱۵ طبقه انتخاب و عملکرد آن در حوزه زمان و فرکانس ارزیابی گردید که برای بررسی عملکرد ساختمان در حوزه زمان از چهار رکورد زلزله حوزه دور و نزدیک استفاده شد. برای تنظیم بهینه میراگر از الگوریتم فراابتکاری جستجوی تقابلی متناوب با هدف به حداقل رساندن نرم بی‌نهایت تابع تبدیل جابجایی بام استفاده شد که به ازای نسبت جرم ۱ درصد، نسبت میرایی و نسبت فرکانس بهینه برای هر حالت بدست آمد.

نمودارهای حاصل همگرایی سریع الگوریتم جستجوی تقابلی متناوب را برای تنظیم بهینه میراگر را نشان می‌دهد که با شروع از ۱۵۰۰ و کمتر از ۴۰۰۰ ارزیابی تابع هدف در فضای پیوسته این مساله بهینه، به نتیجه رسیده است. تفاوت پارامترهای بهینه میراگر در حالت‌های

References

- [1] Farzam MF, Jalali HH, Gavgani SAM, Kayabekir AE, Bekdaş G. Current Trends in the Optimization Approaches for Optimal Structural Control. Studies in Systems Decision and Control. 2021; 326: 133-179. doi: 10.1007/978-3-030-61848-35
- [2] Kamgar R, Khatibinia M, Khatibinia M. Optimization criteria for design of tuned mass dampers including

- soil-structure interaction effect. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 2019 Apr 10; 9(2): 213-232.
- [3] Tehrani SM, Raissi Dehkordi M, Rajabi E. Seismic Vibration Control of the Special Truss Moment Frame (STMF) Using Buckling Restrained Braces and Tuned Mass Dampers. *Civil Infrastructure Researches*. 2025; 11(2): 17-30. doi: **10.22091/cer.2025.12392.1603** [In Persian]
- [4] Kaveh A, Rezazadeh Ardebili S. A Comparative Study of the Optimum Tuned Mass Damper for High-rise Structures Considering Soil-structure Interaction. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2021; 65: 1036-1049. doi: **10.3311/PPci.18386**
- [5] Fahimi Farzam M, Charkhtab Basim M, Maroofiazar R. Efficiency and Robustness of Optimally Designed Tuned Mass Dampers for Mid- and High-Rise Buildings Under Far and Near-Field Earthquakes. *Journal of Vibration Engineering and Technologies*. 2023; 11: 699-719. doi: **10.1007/s42417-022-00604-x**
- [6] Fahimi Farzam M, Hojat Jalali H. Tandem tuned mass damper inerter for passive control of buildings under seismic loads. *Structural Control and Health Monitoring*. 2022; 29(9): e2987. doi: **10.1002/stc.2987**
- [7] Hosseini Lavasani SH, Doroudi R. Meta heuristic active and semi-active control systems of high-rise building. *International Journal of Structural Engineering*. 2020; 10: 232-253. doi: **10.1504/IJSTRUCTE.2020.108529**
- [8] Etedali S, Rakhshani H. Optimum design of tuned mass dampers using multi-objective cuckoo search for buildings under seismic excitations. *Alexandria Engineering Journal*. 2018; 57: 3205-3218. doi: **10.1016/j.aej.2018.01.009**
- [9] Shahrouzi M, Salehi A. Enhanced imperialist competitive algorithm for optimal structural design. *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*. 2021 Aug 1; 28(4): 1973-1993. doi: **10.24200/sci.2020.53827.3441**
- [10] Faramarzi A, Heidarinejad M, Stephens B, Mirjalili S. Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm. *Knowledge-based systems*. 2020 Mar 5; 191: 105190. doi: **10.1016/j.knosys.2019.105190**
- [11] Aghajani R, Azizpour Miandoab O, Kourehli SS, Khodabandehlou A. Identification of Damage and Model Updating Using Residual Force Modal Analysis and Optimization Algorithms. *Civil Infrastructure Researches*. 2025; 11(1): 87-104. doi: **10.22091/cer.2025.11502.1584** [In Persian]
- [12] Shahrouzi M, Barzigar A, Rezazadeh D. Static and Dynamic Opposition-based Learning for Colliding Bodies Optimization. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 2019; 9: 499-523.
- [13] Shahrouzi M. Switching teams algorithm for sizing optimization of truss structures. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 2020; 10(3): 365-389.
- [14] Kaveh A, Hoseini Vaez SR, Hosseini P. Enhanced vibrating particles system algorithm for damage identification of truss structures. *Scientia Iranica*. 2019; 26(1): 246-256. doi: **10.24200/sci.2017.4265**
- [15] Kaveh A, Ilchi Ghazaan M. Vibrating particles system algorithm for truss optimization with multiple natural frequency constraints. *Acta Mechanica*. 2017; 228: 307-322. doi: **10.1007/s00707-016-1725-z**
- [16] Shahrouzi M, Kaveh A. An efficient derivative-free optimization algorithm inspired by avian life-saving manoeuvres. *Journal of Computational Science*. 2022; 57: 101483. doi: **10.1016/j.jocs.2021.101483**
- [17] Shahrouzi M, Fahimi-Farzam M, Gholizadeh J. Optimization of multiple tuned mass damper inerter by escaping bird search for seismic control of buildings. *International Journal of Dynamics and Control*. 2025; 13: 362. doi: **10.1007/s40435-025-01875-4**
- [18] Taghavi AM, Shahrouzi M. Optimal design of spatial structures by a novel meta-heuristic algorithm: Sound energy optimizer. *Structures*. 2024; 70: 107570. doi: **10.1016/j.istruc.2024.107570**
- [19] Bekdaş G, Kayabekir AE, Nigdeli SM, Toklu YC. Transfer function amplitude minimization for structures with tuned mass dampers considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019; 116: 552-562. doi: **10.1016/j.soildyn.2018.10.035**
- [20] Bekdaş G, Nigdeli SM. Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search. *Engineering Structures*. 2011; 33: 2716-2723. doi: **10.1016/j.engstruct.2011.05.024**
- [21] Roozbahan M, Turan G. Optimization of Tuned Mass Dampers by Considering Soil-Structure Interaction and Uncertainty in Soil Parameters. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*. 2025 Jun 1; 11(2): 04025010. doi: **10.1061/AJRUA6.RUENG-1504**
- [22] Shahrouzi M, Farzam MF, Gholizadeh J. Optimal design of double-TMDI for seismic control of buildings under soil-structure interaction. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 2025; 15(2): 203-219. doi: **10.22068/ijoce.2025.15.2.631**
- [23] Marian L, Giaralis A. Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2014; 38: 156-164. doi: **10.1016/j.probengmech.2014.03.007**
- [24] Pandit A, Ghiasi R, Malekjafarian A. On the optimization of Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) systems for buildings subjected to real ground motions using slime mould algorithm. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2024 Apr 1; 179: 108557. doi: **10.1016/j.soildyn.2024.108557**
- [25] Shahrouzi M. Optimal Spectral Matching of Strong Ground Motion by Opposition-Switching Search. *EngOpt*. 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization, Lisbon, Portugal:

- Springer International Publishing. 2019; 713-724. **doi: 10.1007/978-3-319-97773-7**
- [26] Rahnamayan S, Tizhoosh HR, Salama MMA. Quasi-oppositional differential evolution. 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2007 Sep 25; 2229-2236. **doi: 10.1109/CEC.2007.4424748**
- [27] Shahrouzi M, Salehi A. Design of Large-Scale Structures by an enhanced Metaheuristic utilizing Opposition-based Learning. 2020 4th Conference on Swarm Intelligence and Evolutionary Computation (CSIEC), Mashhad: IEEE. 2020 Sep 2; 027-031. **doi: 10.1109/CSIEC49655.2020.9237319**
- [28] Hosseini Lavassani SH, Shangapour S. Interval Type-2 Fuzzy Hybrid Control of a High-Rise Building Including Soil-Structure Interaction Under Near-Field and Far-Field Ground Motions. Structural Engineering International. 2022; 32: 316-327. **doi: 10.1080/10168664.2020.1838249**