

EXTENDED ABSTRACT

The Effect of Soil-Structure Interaction on The Seismic Response of Optimized Structures with Multiple Mass Dampers

Reza Sobhanian, Jamshid Sabouri *, Rouzbeh Dabiri

Department of Civil Engineering, Tabriz branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

Received: 25 April 2023; **Reviewed:** 05 August 2023; **Accepted:** 03 September 2023

Keywords:

Passive control of structure, Seismic response, Soil-structure interaction, Multiple mass dampers, Optimal position of dampers.

1. Introduction

Tuned mass damper (TMD) is a type of passive damping system that is connected to the main structure as a secondary mass and through spring and damping, it reduces the dynamic response of the structure, which is widely used to control engineering systems and other engineering structures are used. The purpose of this research is to determine the optimal parameters of the dampers and their position in order to reduce the drift and acceleration response of the roof story. For this reason, a 20-story structure is modeled and after designing structural components, multiple adjustable mass dampers are placed on all stories of the structure. Then, based on the MOPSO optimization algorithm, the mass, stiffness and damping of the TMD's along with their optimal position have been determined. In the following, the effect of soil-structure interaction on the seismic response of the optimized structure has been discussed.

2. Methodology

When the TMD is used for seismic applications, the TMD is usually set for the main vibration mode of the structure. The equation of motion governing the system with a mass damper is relation. In this article, the ratio of mass, stiffness, damping and the placement of dampers in the stories are variables.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\}+[K]\{x(t)\}=-[M]\{r\}\ddot{x}_g+\{P(t)\} \quad (1)$$

The plan of the structure has shown in Fig. 1. It has 5 spans to the length of 5 meters in both directions with a story height of 3.2 meters for a of 20 stories with special ductility. Additionally, Fig. 2 schematically shows the distribution of dampers in the stories.

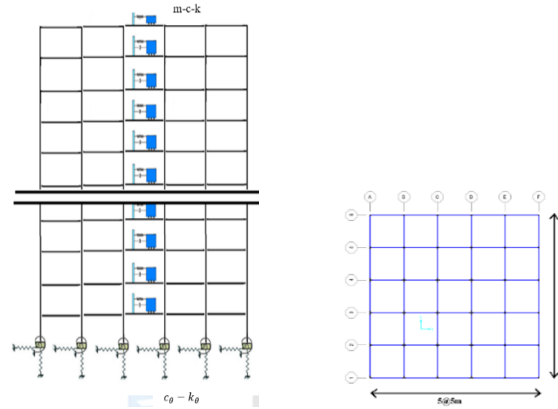


Fig. 1. Plans and views of modeled structures for review

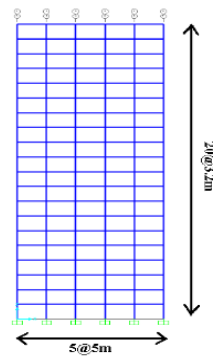


Fig. 2. Schematic of the structure with optimized dampers considering the interaction between the soil and the structure

To investigate the effects of soil-structure interaction, a direct modeling method has been used, and sandy soil has been modeled using Pressure Independent Multi Yield materials in Opensees software. Seismic response of the system under the 7 records of earthquakes near and far from the fault have been obtained. In the “multi-objective optimization” algorithm used in this research, the cost used to optimize the acceleration and drift of the roof story of 20-story structures under the Elcentro earthquake. The variable used in optimizing is mass percentage of dampers compared to the mass of the structure. The mass of the damper in each story is considered as a variable.

3. Results and discussion

Based on the results, it can be seen that the acceleration and drift of the roof story in models with optimized mass dampers (MTMD) in all earthquake records is less than the structure without dampers. Considering soil-structure interaction (MTMD-Soil) has reduced the acceleration value of the roof story compared to the case without dampers and has caused a slight change compared to the model with dampers (MTMD). Based on the numerical results of Fig. 3 and Fig. 4, it can be seen that the use of optimized dampers (MTMD) has caused a significant reduction in the amount of relative displacement of the roof story. Applying the interaction of soil and structure to optimized structures with mass dampers (MTMD-S) has caused changes in the seismic response and the relative displacement of the story, so that in some records it decreased by about 3% and in others it increased by about 2%.

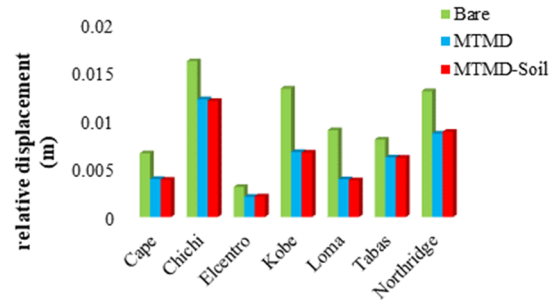


Fig. 3. The maximum relative displacement of the roof floor of the optimized structure with multiple mass dampers (with and without soil-structure interaction) and without dampers

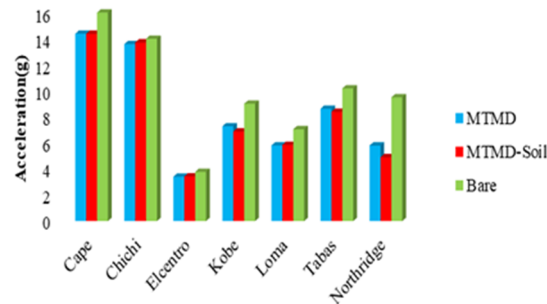


Fig. 4. The maximum acceleration of the roof floor of the optimized structure with multiple mass dampers (with and without soil-structure interaction)

4. Conclusions

The optimization results show that multiple tuned mass dampers (MTMD) should not be distributed uniformly in all stories. As can be seen, in a 20-story structure, in the optimal state, the amount of mass allocated to the damper of the fifteenth story was more than the other stories. Acceleration and relative displacement in optimized structures with mass dampers (MTMD) in all earthquake records are lower than structures without dampers. The maximum reduction in acceleration and drift is about 23% for earthquakes Tabas, and 56% for the Loma earthquake. Considering the soil-structure interaction for the structure with optimized damper (MTMD-Soil) has reduced the amount of acceleration and relative displacement of the roof story in some records and increased it in others, which was 3% and 2%, respectively.

تأثیر اندرکنش خاک و سازه در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بهینه شده با میراگرهای جرمی چندگانه

رضا سبحانیان¹، جمشید صبوری^{2*}، روزبه دبیری³

¹ دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد تبریز دانشگاه آزاد اسلامی

² استادیار گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی

³ دانشیار گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی

دریافت: 1402/2/5، بازنگری: 1402/5/14، پذیرش: 1402/6/12، نشر آنلاین: 1402/6/12

چکیده

امروزه استفاده از میراگرهای انرژی در ساختمان‌ها برای مقابله با زلزله رو به افزایش است. در این میان میراگرهای جرمی به دلیل داشتن تکنولوژی ساده کاربرد بیشتری دارند. معمولاً استفاده از یک میراگر جرمی در طبقه بام یا توزیع یکنواخت چندین میراگر در طبقات، با کاهش بهینه جابه‌جایی و شتاب همراه نیست. به همین دلیل تعیین موقعیت بهینه میراگرها در طبقات سازه، به‌طوری‌که بیشترین تأثیر را در کاهش مقادیر پاسخ لرزه‌ای داشته باشد، از مسائل مهم در کاربرد آن‌هاست. یکی از پارامترهای مؤثر در تعیین موقعیت بهینه میراگرهای جرمی در ارتفاع سازه، مشخصات بهینه میراگرها است که در این تحقیق مورد بحث قرار گرفته تا مقادیر جرم، سختی و میرایی که سه پارامتر تعیین کننده در مشخصات میراگرهای جرمی هستند، به‌گونه‌ای در ارتفاع توزیع شوند که پاسخ‌های لرزه‌ای سازه به‌صورت بهینه کنترل گردد. شتاب و جابه‌جایی طبقه بام به‌عنوان هدف برای بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند بدین‌منظور میراگرهای جرمی چندگانه در سازه 20 طبقه با الگوریتم MOPSO بهینه‌یابی شده و در ادامه، تأثیر اندرکنش خاک و سازه (SSI) نیز در پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها تحت بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از میراگرهای جرمی در موقعیت بهینه در طبقات سازه (MTMD) نسبت به حالت بدون میراگر (Bare) باعث کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها شده است و همچنین اعمال اندرکنش خاک و سازه به سازه‌های بهینه شده با میراگرهای جرمی (MTMD-Soil) باعث تغییرات در شتاب و تغییر مکان نسبی طبقه گردیده است. به‌طوری‌که در برخی رکوردها حدود 3% کاهش و در برخی دیگر حدود 2% افزایش یافته است.

کلید واژه‌ها: کنترل غیرفعال سازه، پاسخ لرزه‌ای، اندرکنش خاک و سازه، میراگرهای جرمی چندگانه، موقعیت بهینه میراگرها.

1- مقدمه

سازه می‌شود که به‌طور گسترده برای کنترل سیستم‌های مهندسی و سایر سازه‌های مهندسی استفاده می‌شود. استفاده از سیستم‌های کنترلی غیرفعال مانند میراگرها، معمولاً بر اساس سختی و یا میرایی که به سازه اضافه می‌نمایند در کنترل پاسخ‌هایی از سازه مؤثر هستند که وابسته به میرایی و سختی سازه است. بعضی از میراگرها با اضافه نمودن سختی به سازه، مقدار تغییر مکان جانبی را کاهش و میزان برش پایه را افزایش می‌دهند. از طرفی بعضی از میراگرها با اعمال میرایی به سازه، باعث کاهش هم‌زمان برش پایه و تغییر مکان جانبی می‌گردند. بنابراین کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای از جمله اهداف استفاده از سیستم‌های کنترلی غیرفعال در سازه است.

در زمان وقوع زلزله، انرژی وارد شده به سازه با تغییر مکان و ارتعاش سازه مستهلک می‌گردد. سازه‌های بلند برای کنترل ارتعاش به وسایل میرایی نیاز دارند. روش‌های مختلف کنترل ارتعاش شامل میراگرهای غیرفعال، نیمه‌فعال، فعال و هیبریدی می‌باشد. فاکتورهای مختلفی از قبیل کارایی، وزن، هزینه اجرا، نگهداری و ایمنی روی انتخاب وسیله کنترل ارتعاش اثر می‌گذارد. میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) یک نوع سیستم میرایی غیرفعال است که به‌عنوان یک جرم ثانویه به سازه اصلی متصل می‌شود و از طریق فنر و میرایی، باعث کاهش پاسخ دینامیکی



دینامیکی خاک پی ساختمان وجود دارد. و عملکرد PTMD با افزایش جرم آن بهبود یافته است. طراحی PTMD و بهینه‌سازی شده با روش پیشنهادی ارتعاشات را کاهش داده و توسعه پلاستیسیته را کنترل کرده است و از سازه به‌ویژه در زلزله‌های با شدت کم و متوسط محافظت کرده است.

در پژوهشی که توسط Kaveh و Javadi (2020) انجام شده، به بررسی تنظیم بهینه پارامترهای آزاد TMD های غیرفعال و فعال پرداخته‌اند. الگوریتم جدید بهینه‌سازی آشوب (COA) برای تعیین پارامترهای بهینه برای سیستم‌های TMD استفاده شده است. این الگوریتم بر روی یک قاب 10 طبقه تحت حرکات لرزه‌ای قوی و همچنین کنترل پاسخ باد یک برج اداری بتنی 76 طبقه آزمایش شده است. نتایج عددی نشان داده است که میراگرهای جرمی تنظیم‌شده با پارامترهای بهینه قابلیت خوبی در تضعیف پاسخ‌های سیستم سازه‌ای تحت تحریک‌های مختلف دارند.

در تحقیقات Khatibinia و همکاران (2016)، پارامترهای TMD با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه بهینه‌یابی شده‌اند. نتایج عددی نشان می‌دهد که اثرات SSI تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی پارامترهای بهینه TMD دارد و باید در طراحی بهینه سیستم TMD در نظر گرفته شود.

در مطالعه انجام شده توسط Mohebbi و همکاران (2014) تأثیر میراگرهای جرمی کنترل‌شونده در کاهش تغییر مکان جانبی نسبی سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که با استفاده از MTMD در سازه، حداکثر دررفت می‌تواند کمتر شود و این مقدار کاهش به نسبت جرم TMD ها و تعداد آن‌ها و همچنین به خصوصیات رکورد زلزله بستگی دارد.

در تحقیقات انجام شده توسط Zahraib و Nazarimofrad (2018)، عملکرد لرزه‌ای سازه نامتقارن مجهز شده به میراگر ATMD با در نظر گرفتن اثر SSI مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده این است که، در حالت خاک نرم جابه‌جایی‌ها در جهت X و Y و پیچش در جهت Z کاهش می‌یابد و تأثیر ATMD در کاهش پاسخ‌ها نسبت به حالت rigid-base بهتر می‌باشد.

در مطالعه انجام شده توسط Nateghi و Tarbali (2015)، رفتار لرزه‌ای قاب‌های فلزی مقاوم با استفاده از میراگرها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با نصب TMD خرابی در اکثر طبقات می‌تواند کاهش پیدا کند.

در مطالعه انجام شده توسط Ramadan و همکاران (2015)، اثرات اندرکنش خاک و سازه در مشخصات دینامیکی و پاسخ لرزه-ای سیستم در سازه قاب خمشی بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد مقادیر برش پایه به‌دست آمده از ساختمان با تکیه‌گاه ثابت و ساختمان با لحاظ نمودن اندرکنش

آنچه که در مطالعات گذشته برای بهینه‌یابی چند هدفه میراگرهای جرمی تنظیم شونده با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه صورت گرفته است، صرفاً میراگر در طبقه بام قرار داشته و موقعیت آن تغییر ننموده است به‌نظر می‌آید که کاهش پاسخ سازه با یک TMD نمی‌تواند در تمام ارتفاع سازه مؤثر واقع شود و بایستی با استفاده از TMD چندگانه به این هدف دست یافت. همچنین در مطالعات صورت‌گرفته، بهینه‌یابی چند هدفه با TMD چندگانه مورد بررسی قرار نگرفته است که در این تحقیق ضمن بهینه‌یابی چندهدفه میراگرهای جرمی چندگانه، اثرات اندرکنش خاک و سازه (SSI) نیز مطالعه خواهد شد.

در پژوهشی که توسط Bagheri و Rahmani-Dabbagh (2018) انجام شده، برای بررسی سیستم کنترل لرزه‌ای جدید، یک فنر الاستوپلاستیک در یک میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) با حذف میراگر ویسکوز آن، به‌کار گرفته شده است. در این مطالعه به‌منظور کاهش پاسخ لرزه‌ای یک روش جدید برای پیدا کردن پارامترهای مؤثر میراگر جرمی تنظیم‌شونده الاستوپلاستیک (P-TMD) شامل سختی/فرکانس اولیه و مقاومت تسلیم آن ارائه شده است. پارامترها برای محاسبه پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های مختلف در قالب سیستم‌های یک درجه آزادی با P-TMD ارائه شده تحت تحریکات لرزه‌ای مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای بررسی کارایی روش ارائه شده و روش تنظیم، جابه‌جایی‌ها و شتاب‌های حداکثر بهینه گردیده با مقادیر به‌دست آمده از سیستم‌های TMD مقایسه شده‌اند.

در مطالعه انجام شده توسط Bekdas و Nigdeli (2017)، بهینه‌یابی میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده با در نظر گرفتن اثر SSI مورد بررسی قرار گرفته شده است در این مطالعه از دو الگوریتم بهینه‌یابی Harmony search و Bat Algorithm استفاده شده است. نتایج نشان‌دهنده کاهش جابه‌جایی حداکثر بر اساس روش BA، 21/52٪ می‌باشد درحالی‌که بر اساس روش HS، 19/71٪ است.

در پژوهش انجام شده توسط Etedali و همکاران (2019)، به طراحی بهینه پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم شده اصطکاکی (FTMD) که نوع جدید و توسعه یافته‌ای از میراگرهای جرمی تنظیم شده (TMD) می‌باشد، پرداخته شده است. نتایج کلی نشان می‌دهد که نادیده گرفتن اثرات SSI ممکن است نتایج نادرست و تخمین غیرواقعی از پاسخ‌های لرزه‌ای و عملکرد TMD و FTMD را در سازه‌های بلند ارائه دهد.

در تحقیق انجام شده توسط García و همکاران (2021)، یک میراگر جرمی تنظیم شده (PTMD) را برای کاهش ارتعاشات سازه‌هایی که رفتار الاستوپلاستیک در معرض تحریک حرکت زمین از خود نشان می‌دهند، تجزیه و تحلیل کرده‌اند. نتایج نشان داده است که وابستگی شدید پارامترهای PTMD بهینه به خواص

2- معادلات حاکم بر مسئله

وقتی که از TMD برای کاربردهای لرزه‌ای استفاده می‌شود، معمولاً TMD برای مود ارتعاشی اصلی سازه تنظیم می‌گردد. معادله حرکت حاکم بر سیستم دارای میراگر جرمی رابطه (1) هست Sadek و همکاران (1997).

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{\ddot{x}_g\} + \{P(t)\} \quad (1)$$

در پژوهش حاضر نسبت جرم، سختی و میرایی و محل قرارگیری میراگرها در طبقات از متغیرهای تحقیق هستند. نسبت جرم، نسبت جرم میراگر به جرم کل سازه تابعی از فضای موجود جهت اجرای سیستم کنترل و حداکثر وزن قابل تحمل توسط سازه می‌باشد. نسبت میرایی میراگر تابعی از سخت افزارها موجود در طرح کنترل می‌باشد. با مطالعه رفتار سازه کنترل شده توسط سیستم TMD مشاهده می‌شود که نسبت میرایی سازه کنترل شده متأثر از نسبت تنظیم میراگر می‌باشد. پارامترهای فرکانس تنظیم و نسبت میرایی میراگر جرمی تنظیم شده پارامترهایی هستند که کارایی میراگر جرمی تنظیم شده نسبت به آن‌ها حساس می‌باشد. در این تحقیق، نسبت جرمی 0/05 برای میراگر و نسبت میرایی 0/05 برای سازه‌های مدل شده در نظر گرفته می‌شود که براساس ASCE2010 ارائه شده است. جهت تعیین پارامترهای MTMD از روابط (2) تا (5) که برای سازه‌های چند درجه آزادی ارائه شده، به‌عنوان مقادیر اولیه و نمونه استفاده گردیده است Sadek و همکاران (1997).

$$f = \frac{1}{1+\mu\phi} \left[1 - \beta \sqrt{\frac{\mu\phi}{1+\mu\phi}} \right] \quad (2)$$

$$\xi = \phi \left[\frac{\beta}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right] \quad (3)$$

$$M_n = \frac{(\sum_i^n m_i \phi_{i,n})^2}{\sum_i^n m_i \phi_{i,n}^2} \quad (4)$$

$$m_{TMD} = \mu \cdot M_n \quad (5)$$

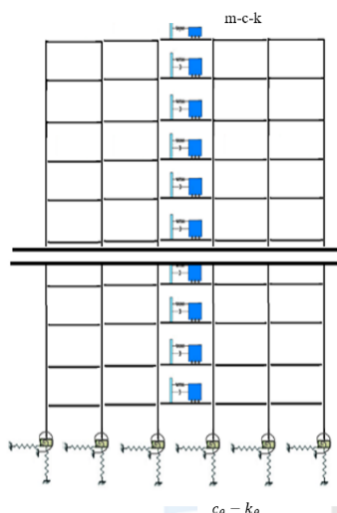
$$K_{TMD} = \omega_0^2 f^2 m_{TMD} \quad (6)$$

$$C_{TMD} = 2\xi\omega_0 f m_{TMD} \quad (7)$$

که در روابط فوق، f فرکانس بهینه که نسبت فرکانس میراگر به فرکانس سازه است، ξ درصد میرایی بهینه، μ نسبت جرمی که نسبت جرم میراگر به جرم سازه است، ϕ دامنه شکل مود در مکان قرارگیری TMD به‌طوری که ضریب سهم مودی برابر واحد باشد، M_n جرم مؤثر مود اول یا هر مود که میراگر برای کنترل آن تنظیم شده است، C_{TMD} ، K_{TMD} و m_{TMD} به‌ترتیب میرایی، سختی و جرم میراگر TMD است.

خاک و سازه تفاوت‌های زیادی دارند که این تفاوت‌ها می‌تواند تا سه الی چهار برابر در مورد ساختمان 7 الی 10 طبقه باشد. در مطالعه انجام شده توسط Salvi و همکاران (2018)، تأثیر اثرات اندرکنش خاک بر روی عملکردهای لرزه‌ای TMDهای بهینه مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌طور کلی می‌توان گفت که برای دو سازه مورد مطالعه تحت تحریکات مختلف لرزه‌ای و شرایط خاک متفاوت، نسبت فرکانس حساس‌تر از نسبت میرایی بوده و وجود خاک نرم تمایل به تغییر تنظیمات پارامترهای بهینه TMD را ایجاد می‌کند و برای سازه بلند مرتبه قابل ملاحظه‌تر می‌باشد. در پژوهشی که توسط Ozturk و همکاران (2022) انجام شده، یک مکان‌یابی عمودی بهینه و روش طراحی برای میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMD) به‌منظور کاهش پاسخ سازه‌های ساختمانی تحت تحریک لرزه‌ای پیشنهاد شده است. معادلات حاکم در حوزه فرکانس از نظر تئوری ارتعاش تصادفی و روش تحریک بحرانی احتمالی به‌دست می‌آیند. به‌منظور تعیین مکان و پارامترهای بهینه هر میراگر جرمی تنظیم‌شونده (TMD) که شامل جرم، سختی و ضریب میرایی است، در روش بهینه‌سازی فرض بر این است که در مرحله اولیه در هر طبقه یک TMD وجود دارد. در طول بهینه‌سازی، اگر پارامترهای جرم یا سختی در یک طبقه خاص به صفر همگرا شوند، TMD حذف می‌شود، بنابراین می‌توان به جایگذاری بهینه دست یافت. مجموع اثرات بحرانی متناظر با پهنای باند انتخابی در نواحی پیک فرکانس اول، دوم و سوم سازه در نظر گرفته شده است، بنابراین رفتارهای حالت بالا نیز کنترل می‌شوند. به‌منظور درک عملکرد روش پیشنهادی، مدل ساختمان برشی با TMD چندگانه با استفاده از سوابق مختلف شتاب زلزله آزمایش شده و یافته‌ها با برخی از مطالعات دیگر موجود در ادبیات مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که طراحی بهینه MTMD به‌دست آمده از روش پیشنهادی در کاهش پاسخ دینامیکی سازه ساختمان بسیار مؤثر است.

هدف از این تحقیق تعیین پارامترهای بهینه میراگرها و موقعیت آن‌ها به‌منظور کاهش پاسخ دریافت و شتاب طبقه بام است. به‌همین جهت یک سازه 20 طبقه مدل‌سازی شده و بعد از تعیین مشخصات مقاطع المان‌ها، میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه در روی تمام طبقات سازه قرار گرفته و سپس براساس الگوریتم بهینه‌یابی MOPSO، مشخصات جرم، سختی و میرایی میراگرهای توزیع شده در ارتفاع ارزیابی و موقعیت بهینه میراگرها تعیین شده است. در این الگوریتم تعیین موقعیت بهینه میراگرها در ارتفاع سازه برای حالت بدون اندرکنش خاک و سازه تعیین شده و نتایج در حالت با اندرکنش و بدون اندرکنش ارزیابی و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.



شکل 2- شماتیک سازه با میراگرهای بهینه شده با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه

جدول 1- مقاطع مورد استفاده در مدل

مقطع ستون (قوطی - میلی متر)	مقطع تیر HEB - میلی متر	طبقه
650	700	2-1
600	700	5-4-3
500	650	6
450	650	7
400	650	8
400	550	9
320	550	11-10
320	550	14-13-12
320	450	17-16-15
320	400	20-19-18

3-2- اندرکنش خاک و سازه

در اکثر مطالعات گذشته، خاک زیر فونداسیون صلب فرض شده است و به دلیل این که در واقعیت خاک زیر فونداسیون صلب نیست در این حالت اثر اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته نشده و فرض صورت گرفته، خطاهایی را ایجاد می کند. به طور کلی اثرات اندرکنش خاک و سازه زمانی اهمیت می یابد که سازه های سخت بر روی خاک نرم قرار گیرد و هرچقدر نسبت سختی سازه به خاک افزایش یابد، این اثر پررنگ تر می شود. لذا در این تحقیق برای بررسی اثرات اندرکنش خاک و سازه در پاسخ سازه های دارای میراگرهای جرمی چندگانه بهینه شده، رفتار خاک نیز در نظر گرفته شده و از روش مستقیم جهت مدل سازی اندرکنش خاک و سازه استفاده شده است.

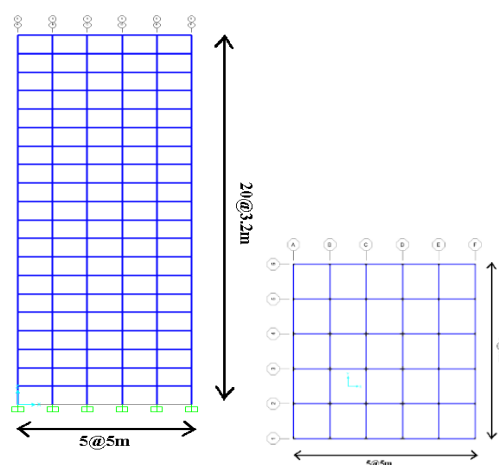
برای مدل سازی خاک ماسه ای از مصالح Pressure Independ Multi Yield استفاده شده است. این ماده

3- فرضیات و مشخصات مدل های مورد بررسی

3-1- فرضیات طراحی

فولاد مصرفی ST37 در نظر گرفته شده است که تنش تسلیم مورد انتظار (F_{ye}) برابر 2640 kg/cm^2 ، تنش نهایی مورد انتظار (F_{ue}) برابر 4070 kg/cm^2 ضریب پواسون (ν) برابر $0/3$ ، تنش نهایی (F_u) برابر 3700 kg/cm^2 ، تنش تسلیم (F_y) برابر 2400 kg/cm^2 و مصالح طبق FEMA-356 در نظر گرفته شده است. بار مرده طبقات 600 kgf/m^2 و بار زنده طبقات 200 kgf/m^2 فرض شده است.

تحلیل استاتیکی خطی جهت تعیین مشخصات المان های سازه ای در نرم افزار Sap2000.v.19.2 انجام شده و سپس مطابق استاندارد AISC360-10 با اعمال ضوابط لرزه ای آیین نامه با شکل پذیریری ویژه طراحی شده اند. در طراحی المان های سازه ای پایه ستون ها گیردار فرض شده اند. برای این که سازه های مورد بررسی دارای مشخصات واقعی و نزدیک به واقعیت داشته باشند، ابتدا براساس روش مبتنی بر نیرو طراحی شده اند. برای تعیین مشخصات مقاطع تمام ضوابط لرزه ای سازه ها اعم از کنترل فشردگی مقاطع، مشخصات لاغری و ... در نظر گرفته شده است. مطابق جدول (1) برای تیرها از مقاطع HEB و برای ستون ها از Box استفاده شده است. پلان و قاب سازه ها مطابق شکل (1) در هر دو جهت دارای 5 دهانه 5 متری با ارتفاع طبقات $3/2$ متر به تعداد 20 طبقه با شکل پذیریری ویژه به صورت دوبعدی در نظر گرفته شده است و شکل (2) نیز به صورت شماتیک نحوه توزیع میراگرها در طبقات را نشان می دهد.



شکل 1- پلان و نمای سازه های مدل شده برای بررسی

محاسبه می‌شوند. در چرخه‌های متوالی (مجموعاً برابر 100 چرخه) با استفاده از نتایج به‌دست آمده از چرخه‌های پیشین و بهترین دسته میراگر حاصل (دسته N تایی) 50 مجموعه دیگر تشکیل می‌شوند در نهایت بهترین پاسخ حاصل از چرخه نهایی به‌عنوان پاسخ نهایی در نظر گرفته می‌شود. نحوه محاسبه پاسخ سازه برای هر مجموعه (که شامل N مقدار مختلف برای درصدهای جرمی میراگر می‌باشد) با استفاده از نرم‌افزار opensees به‌صورت زیر انجام می‌شود:

- (1) حذف میراگرها برای طبقات دارای نسبت جرم کمتر از 0/002 به‌دلیل مسائل همگرایی در آنالیز
 - (2) تشکیل فایل اسکریپت⁴ که شامل محاسبه مشخصات سختی و میرایی و مصالح برای هر درصد جرمی و اختصاص میراگر به‌صورت المان‌های با طول صفر برای هر طبقه (هر میراگر شامل دو فنر موازی برای سختی و میرایی به‌صورت جداگانه با مصالح الاستیک و ویسکوز تعریف می‌شوند).
 - (3) فراخوانی مدل دوبعدی از داخل فایل اصلی که شامل مدل اصلی و سه‌بعدی سازه بدون میراگر می‌باشد.
 - (4) انجام آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی با رکورد زلزله السنترو
 - (5) استخراج بیشترین شتاب بام در طول زلزله
- لازم به‌ذکر است به‌منظور مدل‌سازی TMD از دو المان zero length با استفاده از مصالح Uniaxial Elastic و Uniaxial Viscous به‌ترتیب برای اعمال سختی و میرایی به‌صورت فنرهای موازی، استفاده شده است. جرم TMD در انتهای آزاد این فنرها اعمال شده است. الگوریتم MOPSO با گروهی از ذرات تصادفی (راه حل) آغاز می‌شود و سپس با به‌روزرسانی ذره‌ها جستجو می‌کند. در هر تکرار، هر ذره با دو ارزش "بهترین" به-روزرسانی می‌شود. اولین مورد بهترین راه حل (تابع تناسب) است که تاکنون به‌دست آورده است. این ارزش pbest نامیده می‌شود. یکی دیگر از "بهترین‌ها" ارزشی است که تاکنون توسط هر ذره در جمعیت به‌دست آمده است. این بهترین ارزش جهانی بهترین است و به نام gbest است. هنگامی که یک ذره بخشی از جمعیت را به‌عنوان همسایگان توپولوژیکی خود می‌گیرد، بهترین ارزش محلی است و به نام lbest نامیده می‌شود. پس از پیدا کردن بهترین مقادیر pbest و gbest ذره سرعت و موقعیت خود را با معادله زیر به‌روز می‌کند:

$$v[] = v[] + c1 * rand() * (pbest[] - present[]) + c2 * rand() * (gbest[] - present) \quad (6)$$

$$present[] = present[] + v[] \quad (7)$$

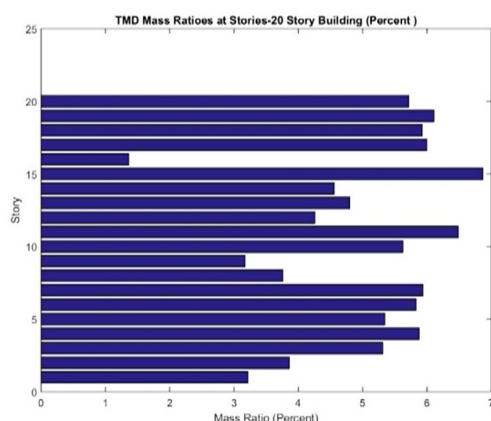
برای شبیه‌سازی پاسخ یک جهته و دوره‌ای موادی که رفتار برشی آن‌ها به تغییر محصورشدگی غیرحساس است، به‌کار می‌رود. خاک زیر سازه با المان‌های چهار گرهی مدل‌سازی می‌شود. همچنین جهت مدل‌سازی ناحیه دور (بی‌نهایت) از روش مرز انتقالی لایسمر¹ و کوه‌میر² استفاده گردیده است. برای مدل‌سازی خواص فولاد مصرفی در مقاطع تیرها و ستون‌ها از مصالح Steel01 استفاده شده است. در این تحقیق برای مدل نمودن تیرها و ستون‌های سازه از المان Nonlinear Beam/Column که یک المان غیرخطی با خاصیت غیرخطی گسترده در طول المان استفاده شده است تغییر شکل‌ها و نیروها در این المان بر اساس انتگرال‌گیری گوس و 5 نقطه گوسی در طول المان به‌دست می‌آید. لازم به‌ذکر است تنش تسلیم 240MPa و مدول الاستیسیته 210GPa می‌باشد. خاک مصرفی دارای چگالی (γ) 14kPa و مدول برشی (G) 61740kPa و چسبندگی (C) 40kPa و زاویه اصطکاک (φ) 5 درجه و سرعت موج برشی (V) 210m/s و ضریب پواسون (ν) 0/4 می‌باشد.

3-3- بهینه‌یابی موقعیت ارتفاعی میراگرها (توزیع میزان جرم میراگرها در طبقات)

در این تحقیق، الگوریتم «بهینه‌یابی چند هدفه» برای بهینه‌یابی شتاب و دریافت طبقه بام سازه 20 طبقه تحت زلزله السنترو³ به‌کار گرفته شده است. متغیرهای مورد استفاده در بهینه‌یابی میزان جرم (درصد جرمی میراگرها نسبت به جرم سازه) می‌باشد. بدین ترتیب که میزان جرم میراگر در هر طبقه به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده است. مشخصات سختی و میرایی میراگرها با کد نویسی در برنامه Opensees محاسبه شده‌اند. برای سازه میرایی 5% در نظر گرفته شده است. برای هر سازه 100 تکرار و در هر تکرار 50 ذره استفاده شده است. برای به‌دست آوردن هزینه (بیشترین شتاب طبقه بام تحت زلزله السنترو) مدل سازه‌ها در Opensees ایجاد و آنالیز غیرخطی تاریخیچه زمانی انجام شده است. مقادیر مشخصات و پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم بهینه‌یابی چندهدفه در ادامه نشان داده شده‌اند. لازم به‌ذکر است این مقادیر پس از چندین مرحله سعی و خطا و بررسی نتایج به‌دست آمده‌اند.

$$C_1=2 \quad C_2=2 \quad n=\text{Number of Particles}=50 \quad \text{Number of Iterations}=100$$

به‌منظور انجام بهینه‌یابی، در مرحله اول و شروع الگوریتم 50 مجموعه میراگر N تایی (N=تعداد طبقات) با جرم‌های مختلف به‌صورت تصادفی مابین 0 و 5 درصد جرم سازه ایجاد شده و شتاب طبقه بام به‌عنوان پاسخ سازه برای هر ذره و پاسخ تابع هدف



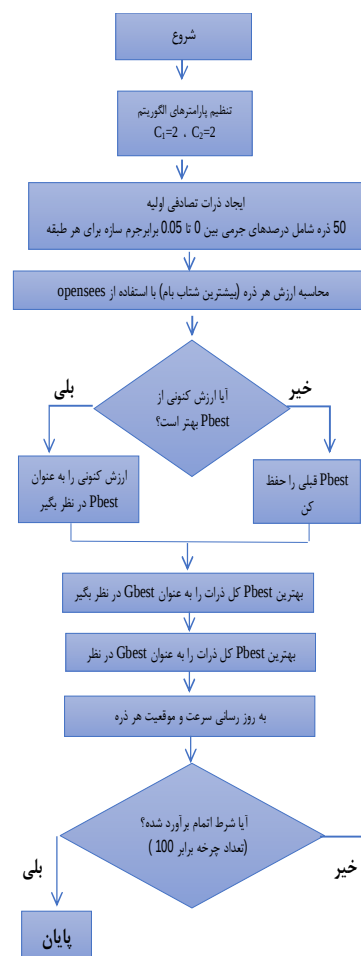
شکل 4- نتایج بهینه‌یابی جرم میراگرها در طبقات

4-3- مشخصات رکوردهای زلزله

آنالیزهای تاریخیچه پاسخ به ویژگی شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده وابسته‌اند و تغییرات جزئی در این شتاب نگاشت‌ها به اختلاف زیادی در پاسخ‌ها منجر می‌شود. یکی از مسائل مهم مرتبط با آنالیز تاریخیچه پاسخ، انتخاب زلزله‌های مناسب است. مطابق با ضوابط آیین‌نامه لرزه‌ای NEHRP شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده بایستی متعلق به زلزله‌هایی باشند که دارای ویژگی‌های (بزرگا، فاصله از گسل محرک و شرایط خاک محل) مشابه با شرایط زلزله طرح در محل باشند. در این تحقیق برای تعیین میزان تأثیر سیستم کنترلی، 7 رکورد مربوط به زلزله‌هایی از حوزه‌های نزدیک و دور انتخاب شده‌اند که مشخصات رکوردهای انتخابی از سایت لرزه‌نگاری peer انتخاب و در جدول (2) آورده شده است. در انتخاب شتاب نگاشت‌ها سعی شده است از شتاب نگاشت‌های متنوع استفاده شود، به‌طوری‌که زلزله‌های با PGA زیاد و کم در شتاب نگاشت‌های انتخابی وجود داشته باشد تا تأثیرات محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله نیز در نظر گرفته شوند.

طبق استاندارد 2800 زلزله، شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده برای تحلیل سازه هم‌پایه شده‌اند. بدین منظور بعد از مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها نسبت به حداکثر مقدار خود (PGA)، طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها برای میرایی 5٪ تهیه گشته و از طیف‌های به‌دست آمده متوسط‌گیری شده و در محدوده زمان تناوب‌های 0.2T و 1.5T مقایسه می‌شود؛ به‌طوری‌که طبق آیین‌نامه 2800، طیف متوسط باید 1/4 برابر بیشتر از طیف طرح استاندارد 2800 قرار گیرد. بعد از آن که طیف پاسخ رکوردهای زلزله تهیه شدند، متوسط آن‌ها با طیف استاندارد 2800 مقایسه شده و مقیاس گشته است که نتیجه آن در شکل (5) آورده شده است.

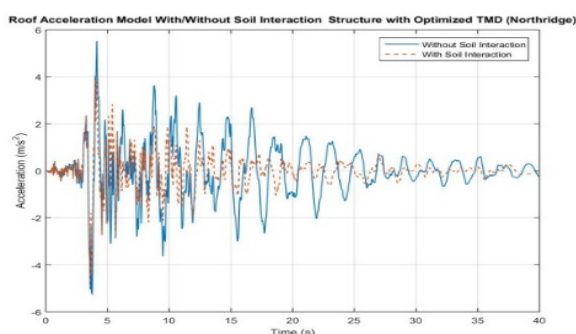
در معادلات (6) و (7)، v سرعت ذرات، present ذره فعلی (راه حل) است. pbest و gbest قبلاً تعریف شده‌اند. rand یک عدد تصادفی بین (0,1) است. $C1$ و $C2$ عامل یادگیری هستند. معمولاً $C1=C2=2$ هستند. مطابق توضیحات فلوچارت مورد استفاده برای الگوریتم بهینه‌یابی چند هدفه در شکل (3) نشان داده شده است. موقعیت بهینه میراگرهای چندگانه در طبقات و مقدار جرم اختصاص داده شده برای هر میراگر در هر طبقه در شکل (4) نشان داده شده است به‌طوری‌که مجموع جرم میراگرهای توزیع شده در طبقات برابر با 5 درصد جرم کل سازه در نظر گرفته شده است این 5 درصد می‌توانست برای پیدا کردن حالت بهینه در طبقه بام و یا طبقات دیگر قرار بگیرد اما جرم‌هایی که به هرکدام از میراگرها در طبقات اختصاص داده شده حالت بهینه برای توزیع میراگر در کل طبقات سازه را نشان می‌دهد به‌طوری‌که در این توزیع جرم پاسخ‌های لرزه‌ای سازه در کمترین حالت ممکن قرار دارند به‌عبارتی 5 درصدی که برای کل میراگرها در نظر گرفته شده است به‌صورت بهینه بین طبقات توزیع گردیده است تا در آرایش ارائه شده برای میراگرها، پاسخ سازه به بهترین حالت ممکن کنترل شود.



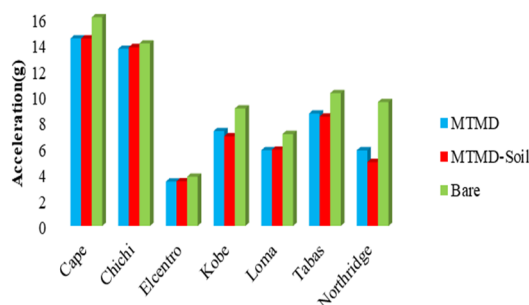
شکل 3- فلوچارت بهینه‌یابی چندهدفه

جدول 2- مشخصات زلزله‌های انتخاب شده

مدت زمان (ثانیه)	Ts (ثانیه)	انرژی (ژول)	شدت آریاس (m/sec)	ماکزیمم سرعت (cm/s)	شدت (ریشر)	فاصله (کیلومتر)	ماکزیمم شتاب (g)	رکورد	ردیف
12.48	0/42	365805	10/308	312	7/62	34/18	0/56	chi-chi	1
17.04	0/6	20778	18/515	110/64	6/9	7/08	0/14	kobe	2
12.48	0/14	24658	0.61	10/8	7/01	12/24	0/235	Cape	3
24.16	0/24	21838	0/2	79/5	7/35	91/14	0/1	tabas-ferdos	4
14.25	0/47	31256	0/3	117	6/93	41/86	0/65	Loma Prieta	5
11.2	0/23	27563	0/2	36/92	6/53	49/1	0/35	Elcentro	6
15.29	0/17	20356	1/5	150/3	6/69	8/66	0/59	Northridge	7

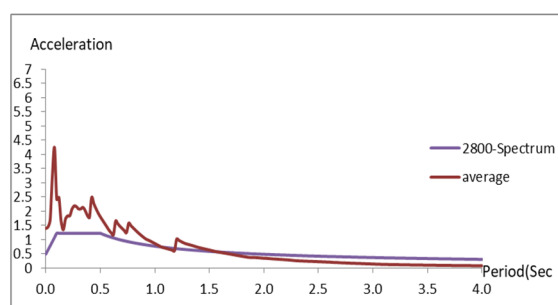


شکل 6- شتاب طبقه بام سازه بهینه شده با میراگرهای
چندگانه (در حالت با و بدون اندرکنش خاک و سازه تحت زلزله
(Northridge)



شکل 7- بیشینه شتاب طبقه بام سازه بهینه شده با میراگرهای
جرمی چندگانه (در حالت با و بدون اندرکنش خاک و سازه)

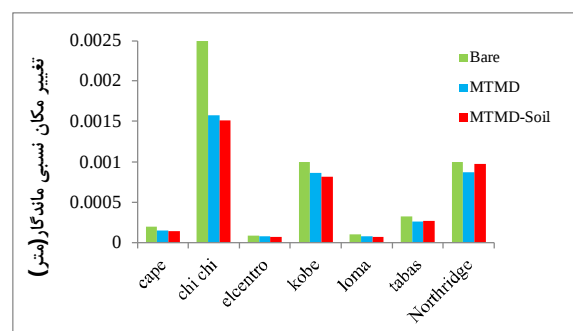
بر اساس نتایج حاصل شده از شتاب طبقه بام در مدل‌های دارای میراگرهای جرمی بهینه شده (MTMD) و بدون میراگر (Bare) مشاهده می‌گردد که مقدار شتاب طبقه بام برای سازه‌های دارای میراگرهای جرمی چندگانه بهینه شده در همه رکوردهای زلزله به مراتب کمتر از سازه بدون میراگر می‌باشد. در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه (MTMD-Soil) باعث کاهش مقدار شتاب طبقه بام نسبت به حالت بدون میراگر (Bare) شده است و باعث



شکل 5- مقایسه متوسط طیف پاسخ رکوردهای زلزله با طیف
استاندارد 2800

4- تأثیر اندرکنش خاک و سازه (SSI) در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بهینه‌شده با میراگرهای جرمی چندگانه (MTMD) بعد از بهینه‌یابی و یافتن بهترین موقعیت و نسبت جرمی هر میراگر در طبقات، آنالیز تاریخیچه زمانی غیرخطی توسط OpenSees برای 7 زلزله (دارای اندرکنش و بدون اندرکنش) انجام و نتایج حاصل از آن‌ها در این بخش نشان داده شده‌اند. در این اشکال پاسخ شتاب و دررفت سازه در طبقه بام برای حالت بدون میراگر (Bare)، میراگرهای بهینه شده چندگانه بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه (MTMD) و میراگرهای بهینه‌شده چندگانه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه (MTMD-S) با یکدیگر مقایسه شده است. سازه با میراگرهای چندگانه بهینه شده یک بار با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه و یک بار بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه بررسی شده‌اند. در این بخش تأثیر اندرکنش خاک و سازه در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های دارای میراگر بهینه شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مورد بررسی، تاریخیچه شتاب و دررفت طبقه بام می‌باشد. نتایج تحت 7 رکورد زلزله ارزیابی شده است. نتایج تاریخیچه شتاب در شکل (6)، بیشینه شتاب طبقه بام در شکل (7)، تاریخیچه دررفت طبقه بام در شکل (8)، بیشینه دررفت طبقه بام در شکل (9) و بیشینه دررفت ماندگار طبقه بام در شکل (10) آورده شده است.

توجه در مقدار تغییرمکان نسبی طبقه بام شده است. اعمال اندرکنش خاک و سازه به سازه‌های بهینه شده با میراگرهای جرمی (MTMD-S) باعث تغییرات در پاسخ لرزه‌ای و تغییرمکان نسبی طبقه گردیده است به طوری که در بعضی از رکوردهای حدود 3% کاهش و در بعضی دیگر حدود 2% افزایش یافته است. که می‌توان این تغییرات را به محتوای فرکانسی رکورد زلزله‌ها مرتبط دانست.



شکل 10- بیشینه تغییرمکان نسبی ماندگار طبقه بام سازه بهینه شده با میراگرهای چندگانه (در حالت‌های با و بدون اندرکنش خاک و سازه) و حالت بدون میراگر

جدول 4- نتایج عددی مربوط به شکل (10)

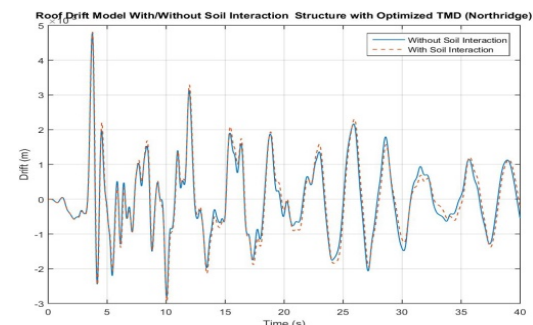
نتیجه	میراگر جرمی	میراگر	سازه	رکورد
	تنظیم شده	جرمی	بدون	
	چندگانه با	تنظیم شده	میراگر	
اندرکنش				
جابه‌جایی نسبی (متر)* 10-5				
5/26%-	180	190	250	Cape
4/76%-	60	63	100	Chichi
5/88%-	16	17	20	El Centro
3/70%-	26	27	32	Kobe
12/50%-	7	8	10	Loma
0/00%	7	7	9	Tabas
2/06%	99	97	100	North

براساس نتایج عددی جدول (4) و شکل (10) مشاهده می‌شود میراگرهای جرمی چندگانه علاوه بر کاهش مقدار تغییرمکان نسبی و شتاب طبقه بام، تغییرمکان نسبی ماندگار سازه‌ها را نیز کاهش داده است این مهم برای همه رکوردهای زلزله صادق بوده که میزان آن در بعضی از رکوردها کمتر و در بعضی دیگر بیشتر است.

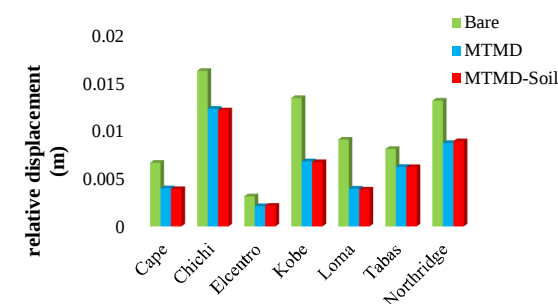
5- نتیجه‌گیری

در این مقاله سازه‌های 20 طبقه (با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه) به عنوان نمونه‌ای از سازه‌های بلند، مدل سازی و بررسی شده‌اند و مشخص گردید که استفاده از میراگرهای

تغییر جزئی نسبت به مدل دارای میراگر (MTMD) شده است که این تغییرات بر اساس محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله متفاوت هستند.



شکل 8- تغییرمکان نسبی طبقه بام سازه بهینه شده با میراگرهای چندگانه (در حالت با و بدون اندرکنش خاک و سازه تحت زلزله Northridge)



شکل 9- بیشینه تغییرمکان نسبی طبقه بام سازه بهینه شده با میراگرهای جرمی چندگانه (در حالت‌های با و بدون اندرکنش خاک و سازه) و حالت بدون میراگر

جدول 3- نتایج عددی مربوط به شکل (9)

نتیجه	میراگر جرمی		
	سازه	میراگر	تنظیم شده
	بدون	جرمی	چندگانه با
رکورد	میراگر	تنظیم شده	اندركنش
جابه‌جایی نسبی (متر)* 10~5			
2/28%	658	394	385
1/48%	1608	1216	1198
1/91%	310	209	213
1/19%	1326	672	664
3/06%	896	392	380
0/33%	799	614	612
2/09%	1300	862	880

براساس نتایج عددی جدول (3) و شکل (9) مشاهده می‌شود استفاده از میراگرهای بهینه شده (MTMD) باعث کاهش قابل

- Nateghi F, Tarbali K, "Reliability analysis of a steel moment-resisting frame an innovative response surface procedure to estimate equipped with tuned mass damper under earthquake excitation", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), 2015.
- Nazarimofrad E, Zahrai SM, "Fuzzy control of asymmetric plan buildings with active tuned mass damper considering soil-structure interaction", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115, 838-852.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.09.020>
- Ozturk B, Cetin H, Aydin E, "Optimum vertical location and design of multiple tuned mass dampers under seismic excitations", Structures, 2022, 41, 1141-1163.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.014>
- Ramadan OMO, Al-Anany YMM, Sanad AM, "Effects of Soil-Structure Interaction on Nonlinear Seismic Response of Buildings", The World Conference on Earthquake Engineering LISBOA., 15 WCEE, 2015.
- Sadek F, Mohraz B, Taylor AW, Chung RM, "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997, 26 (6), 617-635.
[https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9845\(199706\)26:6%3C617::aid-eqe664%3E3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9845(199706)26:6%3C617::aid-eqe664%3E3.0.co;2-z)
- Salvi J, Pioldi F, Rizzi E, "Optimum tuned mass dampers under seismic soil-structure interaction", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 114, 576-597.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.014>
- Yang F, Sedaghati R, Esmailzadeh E, "Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review", 2021, 28, 7-8. <https://doi.org/10.1177/1077546320984305>

جرمی چندگانه با نسبت جرمی یکسان در تمام طبقات منجر به پاسخهای لرزه‌ای بهینه نمی‌گردد و در کل نتایج بررسی برای سازه 20 طبقه به صورت زیر ارائه می‌گردد:

(1) نتایج بهینه‌یابی نشان می‌دهد میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMD) نباید به صورت یکنواخت در همه طبقات پخش شوند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در یک سازه 20 طبقه در حالت بهینه مقدار جرم اختصاص یافته به میراگر طبقه پانزدهم نسبت به بقیه طبقات بیشتر بوده است.

(2) نتایج نشان می‌دهد شتاب و تغییر مکان نسبی در سازه‌های بهینه شده با میراگرهای جرمی (MTMD) در همه رکوردهای زلزله به مراتب کمتر از سازه بدون میراگر (Bare) می‌باشد. این مقدار برای رکوردهای مختلف متفاوت می‌باشد که بیشترین مقدار کاهش شتاب و دریافت به ترتیب حدود 23% برای زلزله Tabas و 56% برای زلزله Loma می‌باشد.

(3) در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه برای سازه دارای میراگر بهینه شده (MTMD-Soil) مقدار شتاب و تغییر مکان نسبی طبقه بام را در برخی از رکوردها کاهش و در برخی دیگر افزایش داده است که میزان این تغییرات به ترتیب 3% و 2% بوده است.

6- مراجع

- Bagheri S, Rahmani-Dabbagh V, "Seismic response control with inelastic tuned mass dampers", Engineering Structures, 2018, 172, 712-72.
- Bekdaş G, Nigdeli SM, "Metaheuristic based optimization of tuned mass dampers under earthquake excitation by considering soil-structure interaction", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 92, 443-461.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.10.019>
- Etedali S, Akbari M, Seifi M, "MOCS-based optimum design of TMD and FTMD for tall buildings under near-field earthquakes including SSI effects", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 119, 36-50.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.12.027>
- García VJ, Duque EP, Inaudi JA, Márquez CO, Mera JD, Rios AC, "Pendulum tuned mass damper: optimization and performance assessment in structures with elastoplastic behavior", Heliyon, 2021, 7 (6), e07221.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07221>
- Kaveh A, Javadi SM, Mahdipour Moghanni R, "Optimal structural control of tall buildings using tuned mass dampers via chaotic optimization algorithm", Structures, 2020, 28, 2704-2713.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.002>
- Khatibinia M, Gholami H, Labbafi SF, "Multi-objective optimization of tuned mass dampers considering soil-structure interaction", Iran University of Science & Technology, 2016, 6 (4), 595-610.
- Mohebbi M, Moradpour S, Ghanbarpour Y, "Improving the seismic behavior of nonlinear steel structures using optimal MTMDs", Iran University of Science & Technology, 2014, 4 (1), 137-150.