

## تاثیر اندرکنش خاک و سازه در پاسخ لرزه ای سازه‌های بهینه شده با میراگرهای جرمی چندگانه

رضا سبحانیان<sup>۱</sup> و جمشید صبوری<sup>۲\*</sup> و روزبه دبیری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

(دریافت: ۰۰/۰۰/۰۰، بازنگری: ۰۰/۰۰/۰۰، پذیرش: ۰۰/۰۰/۰۰، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰)

### 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 جابجایی و شتاب همراه نیست به همین دلیل تعیین موقعیت بهینه میراگرها در طبقات سازه بطوریکه بیشترین تاثیر را در کاهش مقادیر پاسخ لرزه‌ای داشته باشد از مسایل مهم در کاربرد آنهاست. یکی از پارامترهای موثر در تعیین موقعیت بهینه میراگرهای جرمی در ارتفاع سازه، مشخصات بهینه میراگرها هست که در این تحقیق مورد بحث قرار گرفته تا مقادیر جرم، سختی و میرایی که سه پارامتر تعیین کننده در مشخصات میراگرهای جرمی هستند، به گونه‌ای در ارتفاع توزیع شوند که پاسخهای لرزه‌ای سازه به صورت بهینه کنترل گردد. شتاب و جابجایی طبقه بام بعنوان هدف برای بهینه سازی در نظر گرفته شده‌اند بدین منظور میراگرهای جرمی چندگانه در سازه ۲۰ طبقه با الگوریتم MOPSO بهینه یابی شده و در ادامه تاثیر 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 بطوریکه در برخی رکوردها حدود ۳٪ کاهش و در برخی دیگر حدود ۲٪ افزایش یافته است.

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

### ۱- مقدمه

سازه اصلی متصل می‌شود و از طریق فنر و میرایی، باعث کاهش پاسخ دینامیکی سازه می‌شود که بطور 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 موثر 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 می-

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، نیمه فعال، 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 به عنوان یک جرم ثانویه به

گردند. بنابراین کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای از جمله اهداف استفاده از سیستم‌های کنترلی غیرفعال در سازه است.

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 بنظر می‌آید که کاهش پاسخ سازه با یک TMD نمی‌تواند در تمام ارتفاع سازه موثر واقع شود و بایستی با استفاده از TMD چندگانه به این هدف دست یافت. همچنین در مطالعات صورت گرفته، بهینه‌یابی چند هدفه با TMD چندگانه مورد بررسی قرار نگرفته است که در این تحقیق ضمن بهینه‌یابی چند هدفه میراگرهای جرمی چندگانه، اثرات اندرکنش خاک و سازه (SSI) نیز مطالعه خواهد شد.

در مطالعه انجام شده توسط باقری و همکاران، برای بررسی سیستم کنترل لرزه‌ای جدید، یک فنر الاستوپلاستیک در یک میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) با حذف میراگر ویسکوز آن، بکار گرفته شده است. در این مطالعه به منظور کاهش پاسخ لرزه‌ای یک روش جدید برای پیدا کردن پارامترهای موثر میراگر جرمی تنظیم شونده 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، جابجایی‌ها و شتاب‌های حداکثر بهینه گردیده با مقادیر بدست آمده از سیستم‌های TMD مقایسه شده‌اند [۱]. در مطالعه انجام شده توسط Bekdas و همکاران، بهینه‌یابی میراگرهای جرمی تنظیم شونده 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 نشان دهنده‌ی کاهش جابجایی حداکثر بر اساس روش BA، ۲۱.۵۲٪ می‌باشد در حالیکه بر اساس روش HS، ۱۹.۷۱٪ است [۲]. در مطالعه انجام شده توسط اعتدالی و همکاران، 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 را در سازه‌های بلند ارائه دهد [۳]. در مطالعه انجام شده توسط García و همکاران، 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 دینامیکی خاک پی ساختمان وجود دارد. و عملکرد PTMD با افزایش جرم آن بهبود یافته است. طراحی PTMD بهینه سازی شده با روش پیشنهادی ارتعاشات را کاهش داده و توسعه پلاستیسیته را کنترل کرده است و از سازه به ویژه در زلزله‌های با شدت کم و متوسط محافظت کرده است [۴]. در مطالعه انجام شده توسط کاوه و همکاران، به بررسی تنظیم بهینه پارامترهای آزاد TMD های غیرفعال و فعال پرداخته‌اند. الگوریتم جدید بهینه سازی آشوب (COA) برای تعیین پارامترهای بهینه برای سیستم های TMD استفاده شده است. این الگوریتم بر روی یک قاب ۱۰ طبقه تحت حرکات لرزه‌ای قوی و همچنین کنترل پاسخ باد یک برج اداری بتنی ۷۶ طبقه آزمایش شده است. نتایج عددی نشان داده است که میراگرهای جرمی تنظیم شده با پارامترهای بهینه قابلیت خوبی در تضعیف پاسخ‌های سیستم سازه‌ای تحت تحریک‌های مختلف دارند [۵]. در مطالعه انجام شده توسط خطیبی نیا و همکاران، پارامترهای TMD با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه بهینه‌یابی شده‌اند. نتایج عددی نشان می‌دهد که اثرات SSI تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی پارامترهای بهینه TMD دارد و باید در طراحی بهینه سیستم TMD در نظر گرفته شود [۶]. در مطالعه انجام شده توسط محبی و همکاران، تاثیر میراگرهای جرمی کنترل شونده 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 هم چنین به خصوصیات رکورد زلزله بستگی دارد [۷]. در مطالعه انجام شده توسط نظری مفرد و همکاران، عملکرد لرزه‌ای سازه نامتقارن مجهز شده به میراگر ATMD با در نظر گرفتن اثر SSI مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان دهنده‌ی این است که، در حالت خاک نرم جابجایی‌ها در جهت X و Y و

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 بدست آمده از روش پیشنهادی در کاهش پاسخ دینامیکی سازه ساختمان بسیار موثر است [۱۲].

هدف از این تحقیق تعیین پارامترهای بهینه میراگرها و موقعیت آنها به منظور کاهش پاسخ دررفت و شتاب طبقه بام است. به همین جهت یک سازه ۲۰ 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.

## ۲- معادلات حاکم بر مسئله

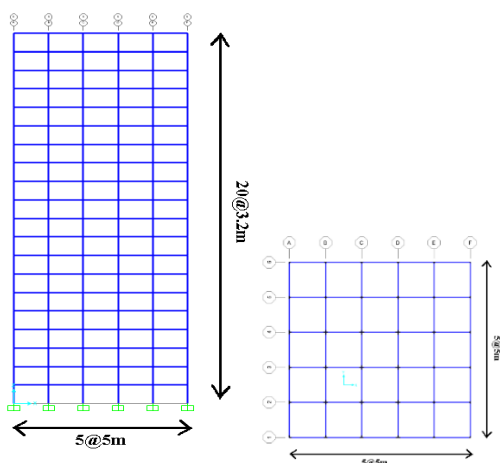
وقتی که از TMD برای کاربردهای لرزه‌ای استفاده می‌شود، معمولاً TMD برای مود ارتعاشی اصلی سازه تنظیم می‌گردد. معادله حرکت حاکم بر سیستم دارای میراگر جرمی رابطه (۱) هست [۱۳].

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

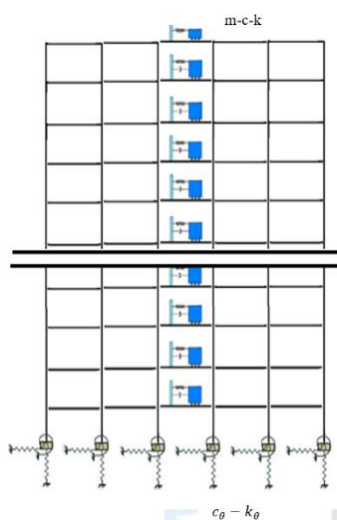
در مقاله حاضر نسبت جرم، سختی و میرایی و محل قرارگیری میراگرها در طبقات از متغیرهای تحقیق هستند. نسبت جرم، نسبت جرم میراگر به جرم کل سازه تابعی از فضای موجود جهت اجرای سیستم کنترل و حداکثر وزن قابل تحمل توسط سازه می‌باشد. نسبت میرایی میراگر تابعی از سخت افزارها موجود در طرح کنترل می‌باشد. با مطالعه رفتار 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 ۰/۰۵ برای میراگر و نسبت میرایی ۰/۰۵ برای سازه‌های مدل شده در نظر

پیچش در جهت Z کاهش می‌یابد و تاثیر ATMD در کاهش پاسخ‌ها نسبت به حالت rigid-base بهتر می‌باشد [۸]. در مطالعه انجام شده توسط ناطقی و همکاران، 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 [۹]. در مطالعه انجام شده توسط Ramadan و همکاران، اثرات اندرکنش خاک و سازه در مشخصات دینامیکی و پاسخ لرزه‌ای سیستم در سازه قاب خمشی بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد مقادیر برش پایه بدست آمده از ساختمان با تکیه گاه ثابت و ساختمان با لحاظ نمودن اندرکنش خاک و سازه تفاوت‌های زیادی دارند که این تفاوتها می‌تواند تا سه الی چهار برابر در مورد ساختمان ۷ الی ۱۰ طبقه باشد [۱۰]. در مطالعه انجام شده توسط Salvi و همکاران، تاثیر اثرات اندرکنش خاک بر روی عملکردهای لرزه‌ای TMDهای بهینه مورد ارزیابی قرار گرفته است. بطور کلی می‌توان گفت که برای دو سازه مورد مطالعه تحت تحریکات مختلف لرزه‌ای و شرایط خاک متفاوت، نسبت فرکانس حساس تر از نسبت میرایی بوده و وجود خاک نرم تمایل به تغییر تنظیمات پارامترهای بهینه TMD را ایجاد می‌کند و برای سازه بلند مرتبه قابل ملاحظه تر می‌باشد [۱۱]. در مطالعه انجام شده توسط Baki, Ozturk و همکاران یک مکان یابی عمودی بهینه و روش طراحی برای میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMD) به منظور 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 بدست می‌آیند. به منظور تعیین مکان و پارامترهای بهینه هر میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) که شامل جرم، سختی و ضریب میرایی است، در روش بهینه سازی 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. بمنظور درک عملکرد روش

شکل پذیری ویژه طراحی شده‌اند. در طراحی المانهای سازه‌ای پایه ستونها گیردار فرض شده‌اند. برای اینکه سازه‌های مورد بررسی دارای مشخصات واقعی و نزدیک به واقعیت داشته باشند، ابتدا براساس روش مبتنی بر نیرو طراحی شده‌اند. برای تعیین مشخصات مقاطع تمام ضوابط لرزه‌ای سازه‌ها اعم از کنترل فشردگی مقاطع، مشخصات لاغری و ... در نظر گرفته شده است. مطابق جدول ۱ برای تیرها از مقاطع HEB و برای ستونها از Box استفاده شده است. پلان و قاب سازه‌ها مطابق شکل ۱ در هر دو جهت دارای ۵ دهانه ۵ متری با ارتفاع طبقات ۳.۲ متر به تعداد ۲۰ طبقه با شکل پذیری ویژه بصورت دو بعدی در نظر گرفته شده است و شکل ۲ نیز بصورت شماتیک نحوه توزیع میراگرها در طبقات را نشان میدهد



شکل ۱: پلان و نمای سازه‌های مدل شده برای بررسی



شکل ۲: شماتیک سازه با میراگرهای بهینه شده

با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه

گرفته می شود که براساس ASCE2010 ارائه شده است. جهت تعیین پارامترهای MTMD از روابط (۲) الی (۵) که برای سازه های چند درجه آزادی ارائه شده، به عنوان مقادیر اولیه و نمونه استفاده گردیده است [۱۳].

$$f = \frac{1}{1+\mu\phi} \left[ 1 - \beta \sqrt{\frac{\mu\phi}{1+\mu\phi}} \right] \quad (۲)$$

$$\xi = \phi \left[ \frac{\beta}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right] \quad (۳)$$

$$M_n = \frac{(\sum_i^n m_i \phi_{i,n})^2}{\sum_i^n m_i \phi_{i,n}^2} \quad (۴)$$

$$m_{TMD} = \mu \cdot M_n \quad (۵)$$

$$K_{TMD} = \omega_0^2 f^2 m_{TMD} \quad (۶)$$

$$C_{TMD} = 2\xi\omega_0 f m_{TMD} \quad (۷)$$

که در روابط فوق  $f$  فرکانس بهینه که نسبت فرکانس میراگر به فرکانس سازه است،  $\xi$  درصد میرایی بهینه،  $\mu$  نسبت جرمی که نسبت جرم میراگر به جرم سازه است،  $\phi$  دامنه شکل مود در مکان قرارگیری TMD بطوریکه ضریب سهم مودی برابر واحد باشد،  $M_n$  جرم موثر مود اول یا هر مود که میراگر برای کنترل آن تنظیم شده است،  $m_{TMD}$ ،  $K_{TMD}$ ،  $C_{TMD}$  بترتیب میرایی، سختی و جرم میراگر TMD است.

### ۳- فرضیات و مشخصات مدل های مورد بررسی

#### ۳-۱ فرضیات طراحی

فولاد مصرفی ST37 در نظر گرفته شده است که تنش تسلیم مورد انتظار ( $F_{ye}$ ) برابر  $2640 \text{ kg/cm}^2$ ، تنش نهایی مورد انتظار ( $F_{ue}$ ) برابر  $4070 \text{ kg/cm}^2$ ، ضریب پواسون ( $\nu$ ) برابر ۰.۳، تنش نهایی ( $F_u$ ) برابر  $3700 \text{ kg/cm}^2$ ، تنش تسلیم ( $F_y$ ) برابر  $2400 \text{ kg/cm}^2$  و مصالح طبق FEMA-356 در نظر گرفته شده است. بار مرده طبقات  $600 \text{ kgf/m}^2$  و بار زنده طبقات  $200 \text{ kgf/m}^2$  فرض شده است.

تحلیل استاتیکی خطی جهت تعیین مشخصات المانهای سازه‌ای در نرم افزار Sap2000.v.19.2 انجام شده و سپس مطابق استاندارد AISC360-10 با اعمال ضوابط لرزه‌ای آیین نامه با

جدول ۱: مقاطع مورد استفاده در مدل

story	Beam section (HEB-mm)	Column section (BOX-mm)
1-2	700	650
3-4-5	700	600
6	650	500
7	650	450
8	650	400
9	550	400
10-11	550	320
12-13-14	550	320
15-16-17	450	320
18-19-20	400	320

نیروها در این المان بر اساس انتگرال گیری گوس و ۵ نقطه گوسی در طول المان بدست می‌آید. لازم به ذکر 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.

### ۳-۳ بهینه یابی موقعیت ارتفاعی میراگرها (توزیع میزان جرم میراگرها در طبقات)

در این تحقیق الگوریتم «بهینه‌یابی چند هدفه» برای بهینه‌یابی شتاب و دریافت طبقه بام سازه ۲۰ طبقه تحت زلزله السنترو بکار گرفته شده است. متغیرهای مورد استفاده در بهینه یابی میزان جرم (درصد جرمی میراگرها نسبت به جرم سازه) می‌باشد. بدین ترتیب که میزان جرم میراگر در هر طبقه به عنوان متغیر در نظر گرفته شده است. مشخصات سختی و میرایی میراگرها با کد نویسی در برنامه Opensees محاسبه شده اند. برای سازه میرایی ۵٪ در نظر گرفته شده است. برای هر سازه ۱۰۰ تکرار و در هر تکرار ۵۰ ذره استفاده شده است. برای بدست آوردن هزینه (بیشترین شتاب طبقه بام تحت زلزله ال سنترو) مدل سازه ها در Opensees ایجاد و آنالیز غیرخطی تاریخچه زمانی انجام شده است. مقادیر مشخصات و پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم بهینه یابی چند هدفه در ادامه نشان داده شده اند. لازم به ذکر است این مقادیر پس از چندین مرحله سعی و خطا و بررسی نتایج بدست آمده اند.

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

به منظور انجام بهینه یابی، در مرحله اول و شروع الگوریتم ۵۰ مجموعه میراگر N تایی (N = تعداد طبقات) با جرمهای مختلف به صورت تصادفی مابین ۰ و ۵ درصد جرم سازه ایجاد شده و شتاب طبقه بام به عنوان پاسخ سازه برای هر ذره و پاسخ تابع هدف محاسبه میشوند. در چرخه های متوالی (مجموعاً برابر ۱۰۰ چرخه) با استفاده از نتایج بدست آمده از چرخه های پیشین و بهترین دسته میراگر حاصل (دسته N تایی) ۵۰ مجموعه دیگر تشکیل می شوند در نهایت بهترین پاسخ حاصل از چرخه نهایی به عنوان پاسخ نهایی در نظر گرفته

### ۳-۲ - اندرکنش خاک و سازه

در اکثر مطالعات گذشته خاک زیر فونداسیون صلب فرض شده است و به دلیل اینکه 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 می‌کند. بطور کلی اثرات اندرکنش خاک و سازه زمانی اهمیت می‌یابد که سازه‌های سخت بر روی خاک نرم قرار گیرد و هر چقدر نسبت سختی سازه به خاک افزایش یابد این اثر پر رنگتر می‌شود. لذا در این تحقیق برای بررسی اثرات اندرکنش خاک و سازه در پاسخ سازه‌های دارای میراگرهای جرمی چندگانه بهینه شده رفتار خاک نیز در نظر گرفته شده و از روش مستقیم جهت مدلسازی اندرکنش خاک و سازه استفاده شده است.

برای مدلسازی خاک ماسه‌ای از مصالح Pressure Independ Multi Yield استفاده شده است. این ماده برای شبیه سازی پاسخ یک جهته و دوره‌ای موادی که رفتار برشی آنها به تغییر محصورشدگی غیرحساس است، به کار می‌رود. خاک زیر سازه با المانهای چهار گرهی مدلسازی می‌شود. همچنین جهت مدلسازی ناحیه دور(بینهایت) از روش مرز انتقالی لایسمر و کوهمیر 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 غیر خطی گسترده در طول المان استفاده شده است تغییر شکلها و

$$\text{present}[] = \text{percent}[] + v[] \quad (۷)$$

در معادلات ۶ و ۷،  $v$  سرعت ذرات،  $\text{present}$  ذره فعلی (راه حل) است.  $\text{pbest}$  و  $\text{gbest}$  قبلاً تعریف شده اند.  $\text{rand}$  یک عدد تصادفی بین (۰،۱) است.  $C1$  و  $C2$  عامل یادگیری هستند. معمولاً  $C1=C2=2$  هستند. مطابق توضیحات فلوچارت مورد استفاده برای الگوریتم بهینه‌یابی چند هدفه در شکل ۳ نشان داده شده است. موقعیت بهینه میراگرهای چندگانه در طبقات و مقدار جرم اختصاص داده شده برای هر میراگر در هر طبقه در شکل ۴ نشان داده شده است بطوریکه مجموع جرم میراگرهای توزیع شده در طبقات برابر با ۵ درصد جرم کل سازه در نظر گرفته شده است این ۵ درصد می‌توانست برای پیدا کردن حالت بهینه در طبقه بام و یا طبقات دیگر قرار بگیرد اما جرم‌هایی که به هر کدام از میراگرها در طبقات اختصاص داده شده حالت بهینه برای توزیع میراگر در کل طبقات سازه را نشان می‌دهد بطوریکه در این توزیع جرم پاسخ‌های لرزه‌ای سازه در کمترین حالت ممکن قرار دارند بعبارتی ۵ درصدی که برای کل میراگرها در نظر گرفته شده است بصورت بهینه بین طبقات توزیع گردیده است تا در آرایش ارائه شده برای میراگرها، پاسخ سازه به بهترین حالت ممکن کنترل شود.

می‌شود. نحوه محاسبه پاسخ سازه برای هر مجموعه (که شامل  $N$  مقدار مختلف برای درصدهای جرمی میراگر می‌باشد) با استفاده از نرم افزار  $\text{opensees}$  به صورت زیر انجام می‌شود.

۱- حذف میراگرها برای طبقات دارای نسبت جرم کمتر از ۰.۰۰۲ به دلیل مسایل همگرایی در آنالیز

۲- تشکیل فایل اسکریپت ( $\text{Script}$ ) که شامل محاسبه مشخصات سختی و میرایی و مصالح برای هر درصد جرمی و اختصاص میراگر به صورت المانهای با طول صفر برای هر طبقه (هر میراگر شامل دو فنر موازی برای سختی و میرایی به صورت جداگانه با مصالح الاستیک و ویسکوز تعریف می‌شوند)

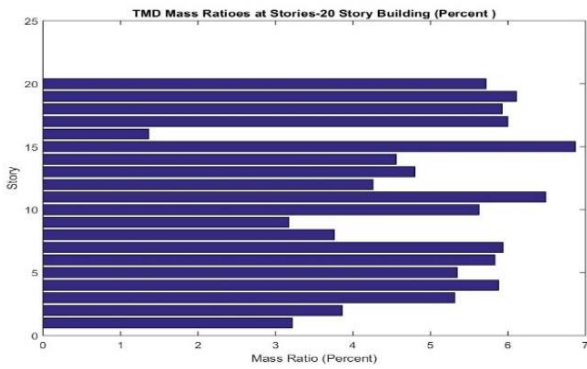
۳- فراهوانی مدل دو بعدی از داخل فایل اصلی که شامل مدل اصلی و سه بعدی سازه بدون میراگر می‌باشد

۴- انجام آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی با رکورد زلزله السنترو

۵- استخراج بیشترین شتاب بام در طول زلزله

لازم بذکر است به منظور مدلسازی  $\text{TMD}$  از دو المان  $\text{zero length}$  با استفاده از مصالح  $\text{uniaxial Elastic}$  و  $\text{uniaxial viscous}$  به ترتیب برای اعمال سختی و میرایی به صورت فنرهای موازی، استفاده شده است. جرم  $\text{TMD}$  در انتهای آزاد این فنرها اعمال شده است. الگوریتم  $\text{MOPSO}$  با گروهی از ذرات تصادفی (راه حل) آغاز می‌شود و سپس با به روز رسانی 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 بدست آورده است. این ارزش  $\text{pbest}$  نامیده می‌شود. یکی دیگر از "بهترین‌ها" ارزشی است که تا کنون توسط هر ذره در جمعیت به دست آمده است. این بهترین ارزش جهانی بهترین است و به نام  $\text{gbest}$  است. هنگامی که یک ذره بخشی از جمعیت را به عنوان همسایگان توپولوژیکی خود می‌گیرد، بهترین ارزش محلی است و به نام  $\text{lbest}$  نامیده می‌شود. پس از پیدا کردن بهترین مقادیر  $\text{pbest}$  و  $\text{gbest}$  ذره سرعت و موقعیت خود را با معادله زیر به روز می‌کند.

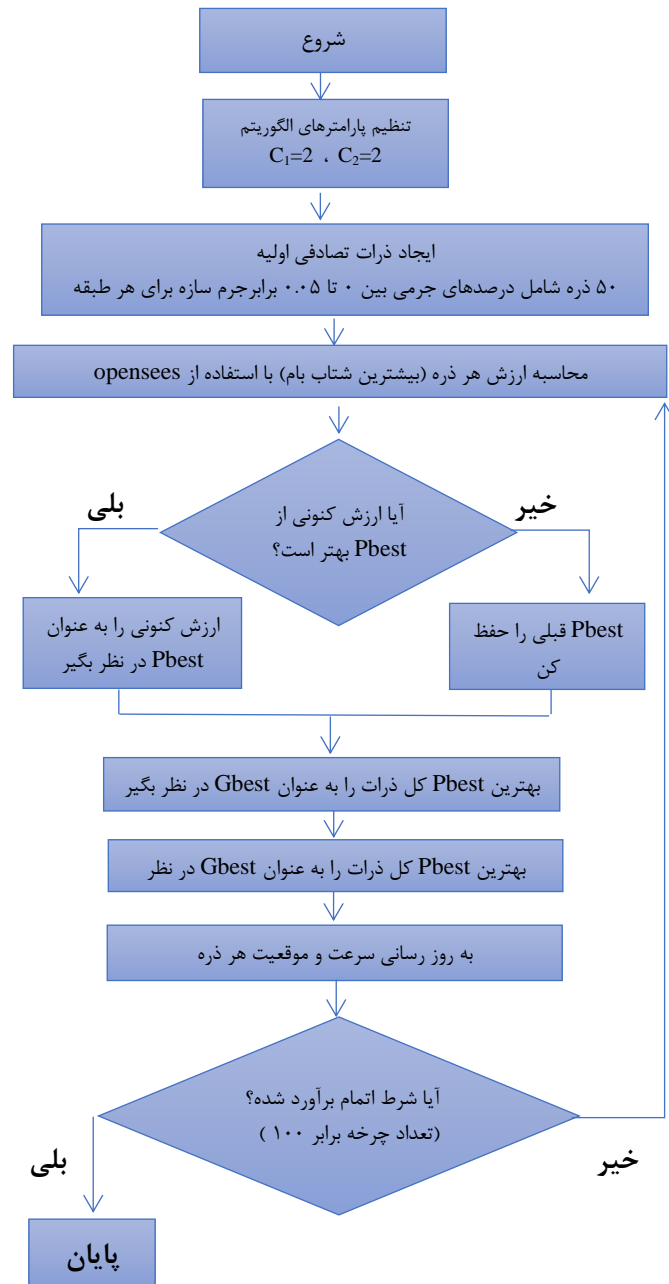
$$v[] = v[] + c1 * \text{rand}() * (\text{pbest}[] - \text{present}[]) + c2 * \text{rand}() * (\text{gbest}[] - \text{present}[]) \quad (۶)$$



شکل ۴: نتایج بهینه یابی جرم میراگرها در طبقات

### ۴-۳- مشخصات رکوردهای زلزله

آنالیزهای تاریخیچه پاسخ به ویژگی شتاب‌نگاشتهای مورد استفاده وابسته‌اند و تغییرات جزئی در این شتاب‌نگاشتها به اختلاف زیادی در پاسخ‌ها منجر می‌شود. یکی از مسائل مهم مرتبط با آنالیز تاریخیچه پاسخ، انتخاب زلزله‌های مناسب است. مطابق با ضوابط آیین نامه لرزه‌ای NEHRP شتاب‌نگاشتهای مورد استفاده بایستی متعلق به زلزله‌هایی باشند که دارای ویژگیهای (بزرگ، فاصله از گسل محرک و شرایط خاک محل) مشابه با شرایط زلزله طرح در محل باشند. در این تحقیق برای تعیین میزان تاثیر سیستم کنترلی، ۷ رکورد مربوط به زلزله‌هایی از حوزه‌های نزدیک و دور انتخاب شده‌اند که مشخصات رکوردهای انتخابی از سایت لرزه‌نگاری peer انتخاب و در جدول ۲ آورده شده است. در انتخاب شتاب‌نگاشتها سعی شده است از شتاب‌نگاشتها متنوع استفاده شود، بطوریکه زلزله‌ها-ی با PGA زیاد و کم در شتاب‌نگاشتها انتخابی وجود داشته باشد تا تاثیرات محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله نیز در نظر گرفته شوند

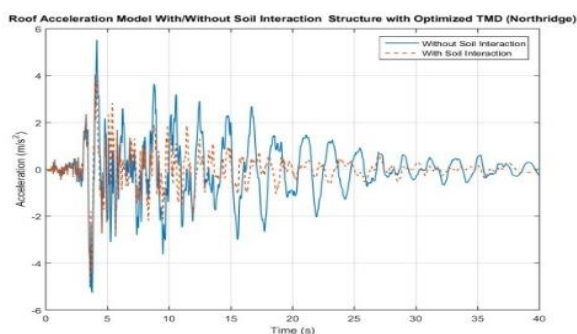


شکل ۳: فلوچارت بهینه‌یابی چند هدفه

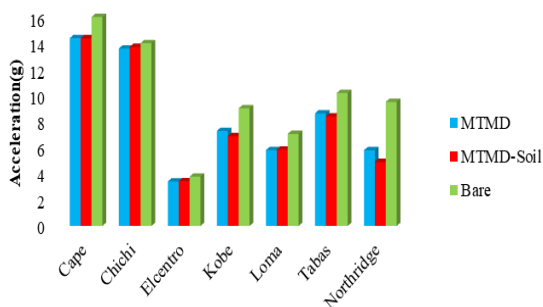
جدول ۲: مشخصات زلزله‌های انتخاب شده

Duration(sec)	Ts(sec)	Energy(J)	Arians(m/sec)	PGV(cm/s)	Mag	Dis(km)	PGA(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

طبقه بام در شکل ۹ و بیشینه دریفت ماندگار طبقه بام در شکل ۱۰ آورده شده است.



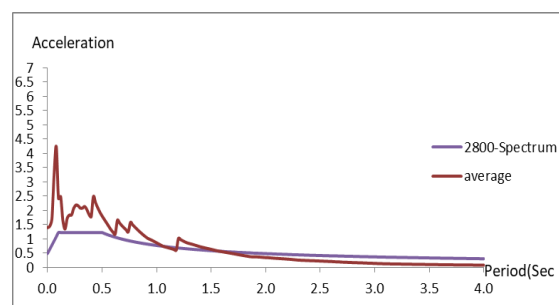
شکل ۶: شتاب طبقه بام سازه بهینه شده با میراگرهای چندگانه (در حالت با و بدون اندرکنش خاک و سازه تحت زلزله (Northridge)



شکل ۷: 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 تغییر جزئی نسبت به مدل دارای میراگر (MTMD) شده است که این تغییرات بر اساس محتوای فرکانسی رکوردهای زلزله متفاوت هستند.

محدوده زمان تناوب های 0.2T و 1.5T مقایسه می‌شود؛ بطوری‌که طبق آئین نامه ۲۸۰۰، طیف متوسط باید ۱/۴ برابر بیشتر از طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ قرار گیرد. بعد از آنکه طیف پاسخ رکوردهای زلزله تهیه شدند، متوسط آنها با طیف استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شده و مقیاس گشته است که نتیجه آن در شکل ۵ آورده شده است.



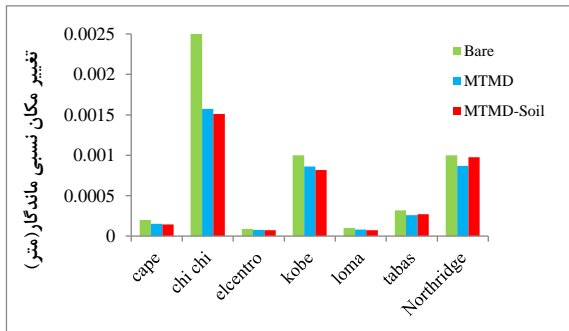
شکل ۵: مقایسه متوسط طیف پاسخ رکوردهای زلزله با طیف استاندارد ۲۸۰۰

#### ۴- تاثیر اندرکنش خاک و سازه (SSI) در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بهینه شده با میراگرهای جرمی چندگانه (MTMD)

بعد از بهینه یابی و یافتن بهترین موقعیت و نسبت جرمی هر میراگر در طبقات، آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی توسط Opensees برای ۷ زلزله (دارای اندرکنش و بدون اندرکنش) انجام و نتایج حاصل از آنها در این بخش نشان داده شده‌اند. در این اشکال پاسخ شتاب و دریفت سازه در طبقه بام برای حالت بدون میراگر (Bare)، میراگرهای بهینه شده چندگانه بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه (MTMD) و میراگرهای بهینه شده چندگانه 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 تاثیر اندرکنش خاک و سازه در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های دارای میراگر بهینه شده مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مورد بررسی، تاریخچه شتاب و دریفت طبقه بام می‌باشد. نتایج تحت ۷ رکورد زلزله ارزیابی شده است. نتایج تاریخچه شتاب در شکل ۶، بیشینه شتاب طبقه بام در شکل ۷، تاریخچه دریفت طبقه بام در شکل ۸، بیشینه دریفت



یافته است. که می‌توان این تغییرات را به محتوای فرکانسی رکورد زلزله‌ها مرتبط دانست.



شکل ۱۰: بیشینه تغییر مکان نسبی ماندگار طبقه بام سازه بهینه شده با میراگرهای چندگانه (درحالت‌های با و بدون اندرکنش خاک و سازه) و حالت بدون میراگر.

جدول ۴: نتایج عددی مربوط به شکل ۱۰

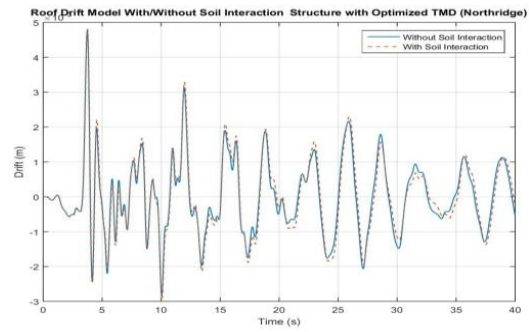
Record	Bare	MTMD	MTMD-S	Result
	Relative disp (m)*10 <sup>-5</sup>			
Cape	250	190	180	-5.26%
Chichi	100	63	60	-4.76%
Elcentro	20	17	16	-5.88%
Kobe	32	27	26	-3.70%
Loma	10	8	7	-12.50%
Tabas	9	7	7	0.00%
North	100	97	99	2.06%

براساس نتایج عددی جدول ۴ و شکل ۱۰ مشاهده می‌شود میراگرهای جرمی چندگانه علاوه بر کاهش مقدار تغییر مکان نسبی و شتاب طبقه بام، تغییر مکان 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.

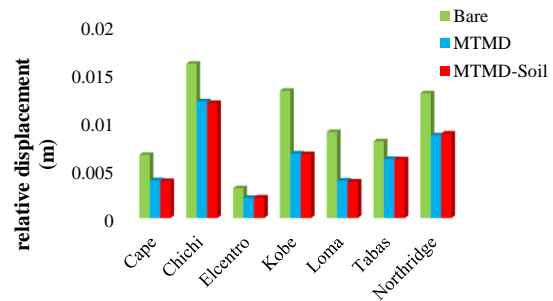
### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله سازه‌های ۲۰ طبقه (با و بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه) بعنوان نمونه‌ای از سازه‌های بلند، مدل سازی و بررسی شده‌اند و مشخص گردید که استفاده از میراگرهای جرمی چندگانه با نسبت جرمی یکسان در تمام طبقات منجر به پاسخ‌های لرزه‌ای بهینه نمی‌گردد و در کل نتایج بررسی برای سازه ۲۰ طبقه بصورت زیر ارایه می‌گردد.

۱- نتایج بهینه یابی نشان می‌دهد میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMD) نباید بصورت یکنواخت در همه



شکل ۸: تغییر مکان نسبی طبقه بام سازه بهینه شده با میراگرهای چندگانه (در حالت با و بدون اندرکنش خاک و سازه تحت زلزله Northridge)



شکل ۹: بیشینه تغییر مکان نسبی طبقه بام سازه بهینه شده با میراگرهای جرمی چندگانه (درحالت‌های با و بدون اندرکنش خاک و سازه) و حالت بدون میراگر.

جدول ۳: نتایج عددی مربوط به شکل ۹

Record	Bare	MTMD	MTMD-S	Result
	Relative disp (m)*10 <sup>-5</sup>			
Cape	658	394	385	-2.28%
Chichi	1608	1216	1198	-1.48%
Elcentro	310	209	213	1.91%
Kobe	1326	672	664	-1.19%
Loma	896	392	380	-3.06%
Tabas	799	614	612	-0.33%
North	1300	862	880	2.09%

براساس نتایج عددی جدول ۳ و شکل ۹ مشاهده می‌شود استفاده از میراگرهای بهینه شده (MTMD) باعث کاهش قابل توجه در مقدار تغییر مکان 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 تغییر مکان نسبی طبقه گردیده است بطوریکه در بعضی از رکوردهای حدود ۰.۳٪ کاهش و در بعضی دیگر حدود ۰.۲٪ افزایش

Interaction. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 6(4), 595-610.

[7] Mohebbi, M. and Moradpoura, S. and Ghanbarpoura, Y. (2014). Improving the Seismic Behavior of Nonlinear Steel Structures Using Optimal MTMDs. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 4(1):137-150.

[8] Nazarimofrada, E. and Zahraib, S.M. (2018). Fuzzy control of asymmetric plan buildings with active tuned mass damper considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*.

[9] Nateghi, F. and Tarbali, K. (2015). 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)*, Tehran, Iran.

[10] Ramadan, O. M. O. and Al-Anany Y. M. M. and Sanad A. M. (2015). Effects of Soil-Structure Interaction on Nonlinear Seismic Response of Buildings. 15 WCEE, The World Conference on Earthquake Engineering LISBOA.

[11] Salvi, J. and Pioldi, F. and Rizzi, E. (2018). Optimum Tuned Mass Dampers under seismic Soil-Structure Interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 576-597.

[12] Baki, Ozturk. Huseyin, Cetin. Ersin, Aydin. (2022). Optimum vertical location and design of multiple tuned mass dampers under seismic excitations. *Structures Engineering*, Volume 41, 1141-1163.

[13] Sadek, F. and Mohraz, B. and Taylor, A.W. and Chung, R.M. (1997). A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications. *Earthquake Engineering & Structural Dynamic*, Vol 26, pp 617-635.

طبقات پخش شوند. همانطور که مشاهده میگردد در یک سازه ۲۰ طبقه در حالت بهینه مقدار جرم اختصاص یافته به میراگر طبقه پانزدهم نسبت به بقیه طبقات بیشتر بوده است.

۲- نتایج نشان می‌دهد شتاب و تغییرمکان 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 دریفت به ترتیب حدود ۲۳٪ برای زلزله Tabas، و ۵۶٪ برای زلزله Loma می‌باشد.

۳- در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه برای سازه دارای میراگر بهینه شده (MTMD-Soil) مقدار شتاب و تغییرمکان نسبی طبقه بام را در برخی از رکوردها کاهش و در برخی دیگر افزایش داده است که میزان این تغییرات به ترتیب ۳٪ و ۲٪ بوده است.

#### ۶- منابع

[1] Bagheri, S. and Rahmani-Dabbagh, V. (2018). Seismic response control with inelastic tuned mass dampers. *Engineering Structures*, 172, 712-72.

[2] Bekdaş, G. and Nigdeli, S.M. (2017). Metaheuristic based optimization of tuned mass dampers under earthquake excitation by considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 443-461.

[3] Etedali, S. and Akbarib, 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, 36-50.

[4] García, V.J. and Duque, E.P. and Antonio Inaudi, J. and Márquez, C.O. and Mera, J.D. and Rios, A.C. (2021). Pendulum tuned mass damper: optimization and performance assessment in structures with elastoplastic behavior. *Heliyon*, 7, 6. 07221.

[5] Kaveh, A. and Javadi, S.M. and Mahdipour Moghanni, R. (2020) Optimal structural control of tall buildings using tuned mass dampers via chaotic optimization algorithm. *Structures*, 28, 2704-2713.

[6] Khatibinia, M. and Gholami, H. and Labbafi, S.F. (2016). Multi-Objective Optimization Of Tuned Mass Dampers Considering Soil-Structure