

## کاهش پاسخ سازه‌های غیرخطی هیستریسیس با استفاده از میراگر جرمی چندگانه‌ی بهینه\*

محتمم محبی<sup>(۱)</sup> حسین شعبانی<sup>(۲)</sup> سولماز مرادپور<sup>(۳)</sup>

**چکیده** در این پژوهش به بررسی کارایی میراگر جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه (MTMD) در کاهش ارتعاشات سازه‌های غیرخطی هیستریسیس پرداخته شده است که پارامترهای بهینه‌ی MTMD براساس کمینه کردن بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی نسبی تعیین شده است. برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شده است. برای آنالیز عددی، قاب برشی ۸ طبقه با منحنی هیستریسیس دوخطی تحت ارتعاش اغتشاش سفید قرار گرفته و به طراحی بهینه‌ی مکانیزم MTMD پرداخته شده است. نتایج به دست آمده مؤثر بودن روش پیشنهادی را در طراحی MTMD روی سازه‌های غیرخطی نشان می‌دهد. هم‌چنین می‌توان گفت که MTMD در صورت طراحی بهینه می‌تواند خرابی را در سازه‌های غیرخطی کاهش دهد که میزان کاهش وابسته به مشخصات زلزله‌ی ورودی و درصد جرمی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی** کنترل غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم شده، میراگر جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه، قاب برشی غیرخطی، بهینه‌سازی.

## Reducing the Seismic Response of Nonlinear Hysteretic Structures Using Optimal Multiple Tuned Mass Dampers

M. Mohebbi H. Shabani S. Moradpour

**Abstract** In this research, the effectiveness of multiple tuned mass dampers (MTMDs) in mitigating the response of nonlinear hysteretic structures has been studied where the optimal parameters of MTMDs have been determined based on minimization of maximum relative displacement (drift) of structure. For solving the optimization problem the genetic algorithm (GA) has been used successfully. For numerical analysis, an eight-storey bilinear hysteretic shear frame subjected to a white noise excitation and optimal MTMDs have been designed. The results of numerical simulations have shown the effectiveness of the proposed method in designing optimal MTMDs for nonlinear structures. Also, it can be said that the damage of structure can be reduced using optimal MTMDs where the performance has been affected by earthquake characteristics and mass ratio.

**Keywords** Passive Control, Tuned Mass Damper (TMD), Multiple Tuned Mass Dampers (MTMDs), Nonlinear Shear Frame, Optimization.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۸/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۳/۲۰ می‌باشد.

- (۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی.
- (۲) کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی.
- (۳) کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی.

### مقدمه

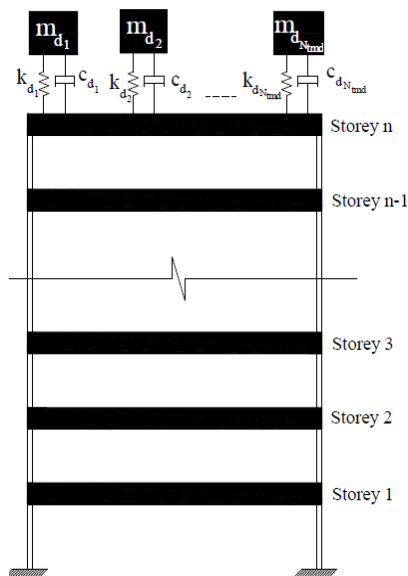
استفاده از سیستم‌های کنترل سازه یکی از فن‌آوری‌های نسبتاً جدید در زمینه‌ی طراحی مقاوم سازه‌ها در برابر زلزله می‌باشد و بررسی‌های زیادی در مورد عملکرد سیستم‌های کنترل سازه‌ها انجام گرفته است [1]. میراگر جرمی تنظیم شده ( Tuned Mass Damper-TMD) یکی از ابزارهای کنترل غیرفعال انرژی است که این وسیله با جذب کردن مقداری از انرژی وارد شده از بار دینامیکی به سازه، میزان تقاضا برای استهلاک انرژی را در سازه‌ی اصلی کاهش می‌دهد [2]. ساده‌ترین جرم میراگر هماهنگ شده، سیستمی شامل جرم، فنر و میراگر ویسکوز است که به سازه‌ی اصلی اضافه می‌گردد. سرآغاز طرح این میراگرها بر پایه‌ی مطالعاتی است که بر روی ضربه‌گیرهای ارتعاشات دینامیکی توسط فراهم انجام شده است که نتایج آن در سال ۱۹۰۹ منتشر گردید [3]. بیشاپ و ولبورن مسأله‌ی ضربه‌گیرهای ارتعاشی را با در نظر گرفتن اثر وجود میرایی در سازه‌ی اصلی مورد بحث قرار دادند [4]. در سال ۱۹۶۷، فالکون و همکاران به طرح مسأله‌ی بهینه‌سازی پارامترهای جرم میراگر پرداختند [5]. طراحی میراگر جرمی هماهنگ شده با فرض رفتار غیرخطی سازه‌ها هم مورد مطالعه قرار گرفته است. کی نیا و همکارانش در سال ۱۹۸۱ یک بررسی مقدماتی بر روی تأثیر لرزه‌ای TMD در سازه‌های یک درجه آزادی با رفتار الاستو-پلاستیک تحت یک مجموعه از زلزله‌های ثبت شده در ناحیه‌ی غربی ایالات متحده انجام دادند که نتایج به دست آمده نشان دهنده‌ی کاهش اندکی در ماکزیمم جابه‌جایی سازه می‌باشد [6]. برنال در سال ۱۹۹۶ رفتار سازه‌های یک درجه آزادی غیرارتجاعی مجهز به جرم میراگر هماهنگ شده را تحت زلزله‌ی ۱۹۸۵ مکزیکوسیتی که از نوع زلزله‌های باند باریک با طول مدت بلند است، مورد بررسی قرار داد و به این نتیجه رسید که کاهش در جابه‌جایی ماکزیمم سازه با افزایش یافتن شدت رفتار غیرارتجاعی سازه کاهش می‌یابد [7]. جغتایی و محبی نحوه‌ی تعیین پارامترهای بهینه‌ی TMD برای

سازه‌های غیرخطی با رفتار برشی را مورد بررسی قرار دادند [8]. میراگر جرمی تنظیم شده در صورتی که به درستی تنظیم شود، می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای ارتعاشات لرزه‌ای یک سازه را کاهش دهد. با این حال یک TMD منفرد، به علت حساسیت بالای آن به تنظیم نشدن فرکانس‌ها یا تفاوت نسبت میرایی میراگر، ممکن است در کاربرد واقعی به طور قابل ملاحظه‌ای کارایی خود را از دست بدهد [9]. بررسی‌های انجام شده نشان داده است که میراگر منفرد حتی ممکن است پاسخ مودهای بالاتر را در اثر هم‌زمانی بین مود اصلی و مودهای بالاتر تقویت کند [10]. با توجه به مطالعات انجام گرفته در مورد میراگر جرمی تنظیم شده، عملکرد لرزه‌ای TMD تنها زیاد قابل اعتماد نیست.

برای رفع محدودیت‌های مکانیزم‌های کنترل غیرفعال در سال‌های اخیر سیستم‌های کنترل فعال پیشنهاد شده است که شامل مکانیزم‌های مختلفی نظیر تاندون فعال، میراگر جرمی فعال، میراگر ستون مایع فعال، ... می‌باشد [11,12]. در سیستم‌های کنترل فعال با اندازه‌گیری پاسخ سازه و ارتعاش خارجی در هر لحظه و براساس قانون کنترل، نیروهایی در نقاط مختلف سازه از طریق محرک‌ها به منظور کاهش پاسخ سازه وارد می‌شود. برای کنترل فعال سازه‌های خطی و غیرخطی الگوریتم‌های مختلفی پیشنهاد شده و کارایی آنها مورد بررسی قرار گرفته است [13,14]. میراگرهای جرمی فعال که ترکیب میراگر جرمی هماهنگ شده با یک سیستم کنترل فعال هستند به عنوان یکی از مکانیزم‌های کنترل فعال در سازه‌های عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶ و ۱۵]. از مزیت‌های عمده‌ی میراگرهای جرمی فعال نسبت به حالت غیرفعال می‌توان به قابل استفاده بودن حتی در صورت عدم تنظیم مناسب پارامترها و قابلیت عملکرد مناسب برای دامنه‌های فرکانسی بیشتر اشاره کرد. مطالعات زیادی بر روی سیستم ATMD انجام شده است که می‌توان به استفاده از ATMD برای ساختمان‌های بلند تحت تحریک باد [17]، بهینه کردن پارامترهای ATMD برای

سازه‌های خطی مطالعات قابل توجهی صورت گرفته است که می‌توان به بررسی اثر پارامترهای TMDها در کارایی MTMD در سازه‌های یک درجه آزادی تحت تحریک هارمونیک با فرض جرم و نسبت میرایی یکسان برای TMDها [27]، طراحی MTMDها برای سازه‌ی یک درجه آزادی تحت نیروی باند پهن بدون در نظر گرفتن جرم و نسبت میرایی یکسان برای TMDها [28]، تعیین پارامترهای بهینه‌ی MTMDها در یک سازه‌ی نامیرا تحت تحریک هارمونیک براساس کمینه کردن تغییر مکان سازه‌ی اصلی با روش جست و جوی عددی [29] و بررسی کارایی پنج حالت مختلف سامانه MTMD با هدف کمینه کردن ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی تغییر مکان و ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی شتاب یک سازه‌ی تحت شتاب زمین به‌ازای ترکیب‌های متفاوتی از پارامترهای TMDها اشاره کرد [30]. زو و نایفه با طراحی بهینه‌ی میراگر جرمی چندگانه، به این نتیجه رسیدند که در مکانیزم MTMD با وجود این‌که افزایش تعداد TMDها فقط تا تعداد مشخصی از TMD در بهبود کارایی MTMD مؤثر است، لیکن با افزایش تعداد TMDها قابلیت اعتماد و مقاوم بودن سامانه در مقابل تغییر پارامترهای سازه افزایش می‌یابد [31]. اثر موازی یا سری قرار دادن TMDها با تابع هدف کمینه‌سازی پاسخ فرکانسی سازه تحت اثر بار هارمونیک توسط Carneiro و همکاران [32] و تأثیر سیستم MTMDهای توزیع شده در ارتفاع سازه‌ها توسط Moon [33] بررسی شده است. Mohebbi و همکاران روشی مبتنی بر استفاده از الگوریتم ژنتیک را برای تعیین پارامترهای MTMD برای سازه‌های چند درجه آزادی خطی ارائه دادند [34]. مشابه مکانیزم میراگر جرمی فعال، جهت بهبود عملکرد MTMD تحت اثر ارتعاش زلزله، از این مکانیزم به‌صورت میراگر جرمی تنظیم شده‌ی فعال چندگانه (AMTMD) استفاده گردیده است. سیستم AMTMD شامل تعدادی ATMD با جرم‌های کوچک‌تر می‌باشد که به‌منظور بهبود کارایی MTMD مورد استفاده قرار می‌گیرد [35-37].

ساختمان‌ها تحت تحریک باد [18]، استفاده از قانون کنترل فیدبک جابه‌جایی بهینه برای طراحی ATMD [19] و ارزیابی معیارهای مختلف نظیر موقعیت میراگر تا مرکز جرم، فرکانس، نسبت میرایی و مینیمم کردن جابه‌جایی انتقالی و پیچشی برای بهینه کردن پارامترهای ATMD در کاهش پاسخ سازه‌های نامتقارن [20] اشاره کرد. عیب عمده‌ی این مکانیزم نیاز آن به یک منبع بزرگ انرژی خارجی می‌باشد که ممکن است به‌هنگام زلزله در دسترس نباشند. روش دیگر برای کنترل ارتعاشات سازه استفاده از سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال نظیر میراگر جرمی هماهنگ‌شده‌ی نیمه‌فعال با میرایی یا سختی متغییر [21]؛ میراگر مگنتورئولوژیک (MR) [22,23] می‌باشد. در این مکانیزم‌ها، مشخصات سیستم نظیر میرایی یا سختی در هر لحظه براساس قانون کنترل تعیین می‌شود. برای بهبود عملکرد مکانیزم TMD تنها، گزینه‌ی دیگر کاربرد میراگرهای جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه (MTMD) می‌باشد که توسط Xu و Igusa پیشنهاد شد [24]. MTMD متشکل از چندین جرم میراگر تنظیم شده‌ی منفرد می‌باشند که این میراگرها می‌توانند به دو صورت موازی و سری طراحی و در سازه نصب شوند [25]. بررسی‌ها نشان می‌دهد کارکرد MTMD به مقدار جرم، تعداد TMDها و دامنه‌ی فرکانسی طراحی و نحوه‌ی توزیع آن‌ها بستگی دارد [26]. میراگر جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه MTMD برای مودهای مختلف قابل تنظیم می‌باشد که به‌منظور افزایش کارایی لرزه‌ای، میراگرها در موقعیت مکانی مختلف کار گذاشته می‌شوند. چنین سیستم‌هایی علاوه بر بهبود کارایی، اغلب نیازمند یک فضای اختصاصی داده شده برای قرار دادن میراگرهای کوچک نمی‌باشند. با توجه به سبکی وزن این میراگرها استفاده‌ی نادرست از هر جرم میراگر تنظیم شده باعث اثرات مضر در پاسخ سازه نخواهند شد. علاوه بر این، کارایی میراگرهای جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه حساسیت کمتری نسبت به عدم قطعیت پارامترهای سیستم دارد. در مورد بررسی کارایی و نحوه‌ی طراحی MTMD برای



شکل ۱ سیستم سازه-MTMD در حالت نصب موازی TMDها [34]

معادله‌ی حرکت سیستم سازه-MTMD به شکل

زیر نوشته می شود:

$$M\ddot{X}(t) + F_D(\dot{X}(t)) + F_S(X(t)) = Me\ddot{X}_g \quad (1)$$

که در آن  $t$  زمان،  $\ddot{X}_g$  شتاب زمین،  $X$  بردار جابه‌جایی،  $\dot{X}$  بردار سرعت،  $\ddot{X}$  بردار شتاب،  $M$  ماتریس جرم  $(n + N_{tmd}) \times (n + N_{tmd})$  بعدی،  $F_D$  بردار نیروی میرایی  $(n + N_{tmd})$  بعدی،  $F_S$  بردار نیروی مقاوم  $(n + N_{tmd})$  بعدی،  $e = [-1, -1, \dots, -1]^T$  بردار انتقال شتاب زمین  $(n + N_{tmd})$  بعدی می‌باشد.

مقدار نیروی‌های میرایی و سختی را در هر گام

زمانی می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$F_{Dk} = F_{D_{k-1}} + C_{k-1}^* [\dot{X}_k - \dot{X}_{k-1}] \quad (2)$$

$$F_{Sk} = F_{S_{k-1}} + K_{k-1}^* [X_k - X_{k-1}] \quad (3)$$

که  $k$  گام زمانی،  $K_{k-1}^*$  و  $C_{k-1}^*$  ماتریس سختی و ماتریس میرایی مماسی در زمان  $t = (k-1)\Delta t$

اکثر تحقیقاتی که بر روی عملکرد MTMD در کاهش پاسخ ماکزیمم سازه انجام شده است، با فرض رفتار خطی سازه بوده است. با توجه به این که سازه‌ها در مقابل زلزله‌های شدید وارد ناحیه‌ی غیرخطی می‌شوند لذا طراحی و بررسی عملکرد MTMD برای سازه‌های با رفتار غیرخطی حائز اهمیت می‌باشد. در سازه‌های با رفتار غیرخطی به دلیل متغیر بودن ماتریس سختی سازه در طول مدت ارتعاش نمی‌توان از روش‌های طراحی MTMD برای سازه‌های خطی که براساس سختی ثابت ارایه شده‌اند، استفاده نمود. در مطالعات قبلی بررسی کارایی سیستم MTMD بر روی سازه‌های با رفتار غیرخطی زیاد مورد توجه نبوده است، لذا در این پژوهش کارایی سیستم MTMD در سازه‌های غیرخطی تحت ارتعاش زلزله مورد بررسی قرار گرفته است که برای طراحی بهینه‌ی مکانیزم MTMD روش ارائه شده توسط محبی و همکارانش [34] به سازه‌های با رفتار غیرخطی توسعه داده شده و مورد استفاده قرار گرفته است.

در این پژوهش به طراحی بهینه‌ی سیستم MTMD برای قاب‌های برشی با رفتار هیستریسیس دوخطی پرداخته شده و تأثیر عوامل مختلف مانند تعداد TMDها، درصد جرمی و رکورد زلزله‌های مختلف در کارایی MTMD در سازه‌های غیرخطی بررسی شده است.

### معادله‌ی حرکت سیستم سازه-MTMD

سیستمی متشکل از سازه‌ی اصلی به صورت قاب برشی با  $n$  درجه آزادی با رفتار غیرخطی، تحت شتاب پایه  $\ddot{X}_g$  به همراه تعداد  $N_{tmd}$  میراگر جرمی منفرد با مشخصات دینامیکی متفاوت را مطابق شکل (۱) در نظر بگیرید که میراگرهای جرمی در طبقه‌ی آخر سازه‌ی اصلی و به صورت موازی نصب شده است. پارامترهای  $i$  امین TMD شامل سختی  $(k_{d_i})$ ، میرایی  $(c_{d_i})$  و جرم  $(m_{d_i})$  است.

برای شبیه‌سازی عددی در این مقاله در هر گام زمانی نیاز به شتاب ارتعاش زمین می‌باشد که از ارتعاش اغتشاش سفید و رکورد زلزله‌های واقعی استفاده شده است. در کاربردهای عملی در هر گام زمانی نیاز به پاسخ طبقات سازه می‌باشد که توسط حسگرها اندازه‌گیری می‌شود.

### تعیین پارامترهای بهینه‌ی MTMD بر مبنای کمینه کردن ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه

در این مقاله برای طراحی MTMD بهینه، روش ارائه شده توسط محبی و همکاران [34] که برای طراحی این مکانیزم در سازه‌های خطی ارائه شده است، در جهت استفاده در طراحی MTMD برای سازه‌های غیرخطی توسعه داده شده است. این روش مبتنی بر تعریف یک مسئله‌ی بهینه‌سازی است که کاهش بیشینه‌ی پاسخ سازه به‌عنوان تابع هدف و پارامترهای TMD به‌عنوان متغیرهای مسئله در نظر گرفته می‌شود. تابع هدف مسئله‌ی بهینه‌سازی براساس هدف مورد نظر از کاربرد سیستم کنترل نظیر کاهش ماکزیمم تغییر مکان جانبی، تغییر مکان جانبی نسبی طبقات و شتاب می‌تواند انتخاب شود. در این مقاله به‌منظور کاهش خرابی سازه‌های غیرخطی، کاهش ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده است. مسئله‌ی بهینه‌سازی در حالتی که تغییر مکان بیشینه‌ی TMDها و پارامترهای آنها به‌ترتیب از مقادیر حدی  $X_L$ ،  $m_{d_{max}}$ ،  $k_{d_{max}}$ ،  $c_{d_{max}}$  تجاوز نکند به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Find: } m_{d_1}, c_{d_1}, k_{d_1}, \dots, m_{d_{N_{TMD}}}, c_{d_{N_{TMD}}}, k_{d_{N_{TMD}}} \quad (13)$$

Minimize:

$$Y_{\max} = \max \left( |y_k(i)|, k=1,2,\dots,k_{\max} \right), \quad i=1,2,\dots,n \quad (14)$$

$$\text{Subject to: } X_{\max(TMD)} \leq X_L \quad (15)$$

$$0 \leq m_{d_i} \leq m_{d_{max}} \quad i=1,2,\dots,N_{TMD} \quad (16)$$

می‌باشد. معادله‌ی (1) را در زمان‌های  $t = (k-1)\Delta t$  و  $t = k\Delta t$  می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$M\ddot{X}_{k-1} + F_{D_{k-1}} + F_{S_{k-1}} = Me\ddot{X}_{g_{k-1}} \quad (4)$$

$$M\ddot{X}_k + F_{D_k} + F_{S_k} = Me\ddot{X}_{g_k} \quad (5)$$

معادله‌ی نموی حرکت در فاصله‌ی زمانی  $(k-1)\Delta t$  تا  $k\Delta t$  از کم کردن معادله‌ی (4) از (5) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$M\Delta\ddot{X}(t) + C^*\Delta\dot{X}(t) + K^*\Delta X(t) = \Delta P(t) \quad (6)$$

$$\Delta\ddot{X}(t) = \ddot{X}_k - \ddot{X}_{k-1} \quad (7)$$

$$\Delta\dot{X}(t) = \dot{X}_k - \dot{X}_{k-1} \quad (8)$$

$$\Delta X(t) = X_k - X_{k-1} \quad (9)$$

$$\Delta P(t) = P_k - P_{k-1} \quad (10)$$

$$P_k = Me\ddot{X}_{g_k} \quad (11)$$

$$P_{k-1} = Me\ddot{X}_{g_{k-1}} \quad (12)$$

در معادله‌ی فوق، ماتریس جرم و میرایی ثابت است ولی ماتریس سختی در هر لحظه تغییر می‌کند. نحوه‌ی تشکیل ماتریس‌های  $M$ ،  $K$ ،  $C$  بستگی به آرایش TMDها در سازه دارد. در این مقاله حالت نصب TMDها در طبقه‌ی آخر سازه و به‌صورت موازی مورد استفاده قرار گرفته است. مقدار نیروهای میرایی و سختی که میراگرهای جرمی به طبقه‌ی آخر سازه وارد می‌کنند نیروهای کنترلی هستند که باعث کاهش پاسخ سازه می‌گردند. مقدار این نیروها وابسته به سختی و میرایی میراگرها است که باید مقداری بهینه برای آنها تعیین شود که در قسمت بعدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای حل معادله‌ی نموی حرکت (معادله‌ی 6) می‌توان از روش‌های عددی مختلف استفاده کرد. در این مقاله برای آنالیز غیرخطی از روش  $\beta$ -Newmark [38] استفاده شده است که برای این منظور یک برنامه‌ی آنالیز غیرخطی در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است.

روش در بهینه‌سازی و حل مسائل گسترش می‌یابد. در الگوریتم ژنتیک، طی مرحله‌ی تولید مثل از عملگرهای ژنتیکی استفاده می‌شود که با تأثیر این عملگرها بر روی یک جمعیت، نسل بعدی آن جمعیت تولید می‌شود. عملگرهای انتخاب، برش و جهش معمولاً بیشترین کاربرد را در الگوریتم ژنتیک دارند. در این پژوهش برای حفظ بهترین جمعیت از فرآیند نخبه‌گرایی استفاده شده است که درصد کوچکی از جمعیت نسل بعد مستقیماً از جمعیت نسل قبل کپی می‌شود. در این مقاله از نمونه‌برداری تصادفی تک‌مرحله‌ای [40] برای عملگر انتخاب استفاده شده است که در آن احتمال انتخاب هر کروموزوم برابر است با:

$$P(x_i) = \frac{F(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_{ind}} F(x_i)} \quad (23)$$

$P(x_i)$  احتمال انتخاب کروموزوم  $i$  ام،  $F(x_i)$  شایستگی کروموزوم  $i$  ام و  $N_{ind}$  تعداد کروموزوم در هر جمعیت است. برای عملگر تولید مثل در این پژوهش، روش تولید مثل داخلی انتخاب شده است که نوزاد براساس ترکیب خطی دو کروموزوم والد با استفاده از معادلات زیر نوشته می‌شود:

$$O_{1,2} = P_1 + \alpha(P_2 - P_1) \quad (24)$$

$P_1$  و  $P_2$  متغیرهای کروموزوم‌های والد،  $O_{1,2}$  ژن‌های کروموزوم نوزاد و  $\alpha$  ضریب مقیاس است که به‌طور تصادفی و معمولاً در فاصله‌ی  $[-0.25, 1.25]$  برای تعیین هر متغیر کروموزوم نوزاد انتخاب می‌شود [41]. اگر  $m_r$ ، درصد جهش ژن‌ها و  $N_{var}$  و  $N_{new}$  به ترتیب نشانگر تعداد متغیرها و کروموزوم‌های تولید شده باشند، در این حالت تعداد ژن‌هایی که دچار جهش می‌شوند از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$N_{Mutated} = m_r \times N_{var} \times N_{new} \quad (25)$$

### مثال عددی

برای بررسی کارایی MTMD در کاهش پاسخ سازه‌ی

$$0 \leq k_{d_i} \leq k_{d_{max}} \quad i=1,2,\dots,N_{tmd} \quad (17)$$

$$0 \leq c_{d_i} \leq c_{d_{max}} \quad i=1,2,\dots,N_{tmd} \quad (18)$$

$k_{max}$  بیشینه‌ی گام زمانی تحلیل و  $y_k(i)$  تغییر مکان جانبی نسبی طبقه  $i$  ام در گام زمانی  $k$  ام می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} y_k(i) = x_k(i) - x_k(i-1) & i=2,3,\dots,n \\ y_k(1) = x_k(1) \end{cases} \quad (19)$$

اعمال محدودیت در  $m_{d_{max}}$ ،  $k_{d_{max}}$  و  $c_{d_{max}}$  عملکرد MTMD را تحت تأثیر قرار می‌دهد لذا باید مقدار مناسبی برای این پارامترها انتخاب شود. در کاربردهای عملی، این مقادیر براساس مشخصات ساخت این میراگرها تعیین می‌شود. در صورتی که از جرم یکسان برای همه‌ی TMDها استفاده شود در این حالت مسئله‌ی بهینه‌سازی با اعمال محدودیت نامساوی به صورت تابع جریمه در تابع هدف به یک مسئله‌ی بهینه‌سازی بدون محدودیت به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\text{Find : } c_{d_1}, k_{d_1}, \dots, c_{d_{N_{tmd}}}, k_{d_{N_{tmd}}} \quad (20)$$

$$\text{Minimize: } F(T) = \alpha X_{max} + \beta \max[0, g_i] \quad (21)$$

$$g_i = \frac{X_{maxTMD}}{X_L} - 1 \quad (22)$$

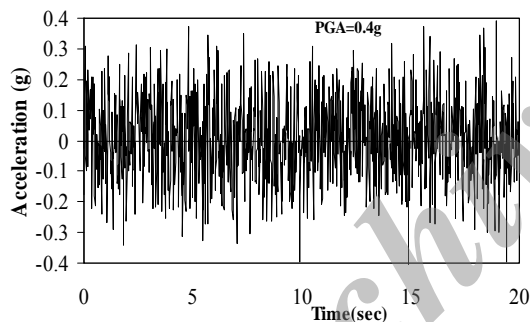
مقادیر  $m_{d_i}$ ،  $k_{d_i}$ ،  $c_{d_i}$  از دامنه‌ی تعریف شده برای آنها انتخاب می‌شوند، بنابراین نیازی به اعمال محدودیت‌های مربوط به پارامترهای TMD به صورت تابع جریمه در مسئله‌ی بهینه‌سازی نیست.  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب تابع جریمه می‌باشند که باید به صورت مناسبی توسط طراح و براساس مشخصات مسئله‌ی مورد مطالعه انتخاب شوند [39].

### الگوریتم ژنتیک (Genetic-Algorithm)

محدوده‌ی کاربرد الگوریتم ژنتیک بسیار وسیع است و با پیشرفت روزافزون علوم و تکنولوژی، استفاده از این

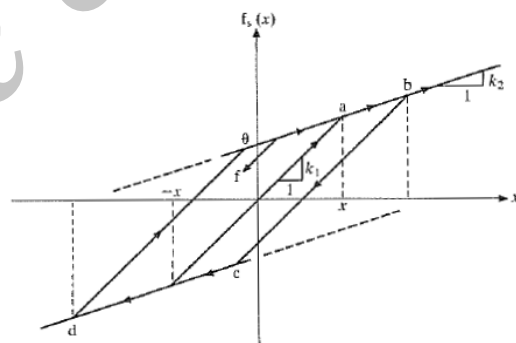
### زلزله‌ی طراحی

در صورتی که طراحی MTMD برای یک زلزله‌ی خاص انجام شود ممکن است مکانیزم MTMD در مقابل زلزله‌های دیگر مؤثر نباشد. بنابراین برای این که پارامترهای بهینه‌ی به دست آمده برای TMDها، در زلزله‌های مختلف مؤثر باشند لذا تحریک پایه برای طراحی MTMD به صورت اغتشاش سفید در نظر گرفته شده است. در این مقاله سازه در مقابله‌ی تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید،  $w_1(t)$ ، با بیشینه‌ی شتاب ارتعاش برابر  $PGA=0.4g$  مطابق شکل (۳)، قرار گرفته و به طراحی بهینه‌ی MTMD پرداخته شده است. جدول (۱) پاسخ‌های ماکزیمم سازه‌ی کنترل نشده را تحت ارتعاش  $w_1(t)$  نشان می‌دهد. تحت اثر ارتعاش  $w_1(t)$  طبقات ۱، ۲ و ۳ دارای تغییر مکان جانبی نسبی بزرگ‌تر از  $Y_{yielding} = 2.4 \text{ cm}$  هستند و وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده‌اند.



شکل ۳ تاریخچه‌ی زمانی ارتعاش  $w_1(t)$

غیرخطی، قاب برشی ۸ طبقه با فرض رفتار هیستریسیس دو خطی مطابق شکل (۲) و با مشخصات یکسان برای همه‌ی طبقات شامل سختی الاستیک  $k_1 = 340400 \text{ kN/m}$ ، سختی ثانویه  $k_2 = 34040 \text{ kN/m}$ ، جرم  $m = 345.6 \text{ ton}$ ، ضریب میرایی ویسکوز خطی  $c = 734.3 \text{ kN sec/m}$  در نظر گرفته شده است. در تغییر مکان جانبی نسبی  $Y_{yielding} = 2.4 \text{ cm}$  تسلیم در طبقات اتفاق می‌افتد و فرکانس طبیعی سازه براساس سختی اولیه‌ی سازه برابر  $f_{initial} = 0.92 \text{ HZ}$  می‌باشد. در این پژوهش هدف طراحی و بررسی عملکرد MTMD بر روی سازه‌های غیرخطی بوده که به منظور سادگی آنالیزها و تمرکز روی موضوع اصلی مقاله سازه‌ی غیرخطی از نوع برشی انتخاب شده است. برای سازه‌های غیرخطی دیگر نظیر قاب‌های خمشی روش مورد استفاده در این مقاله به طور کامل قابل استفاده است و اختلاف فقط در ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه خواهد بود.



شکل ۲ منحنی هیستریسیس دوخطی

جدول ۱ پاسخ سازه‌ی کنترل نشده و کنترل شده با MTMD به ازای  $\mu=4\%$  تحت ارتعاش  $w_1(t)$

طبقه	ماکزیمم جابجایی کل سازه (cm)		ماکزیمم جابجایی نسبی سازه (cm)		ماکزیمم شتاب سازه ( $\text{cm/sec}^2$ )	
	کنترل نشده	کنترل شده	کنترل نشده	کنترل شده	کنترل نشده	کنترل شده
1	4.78	1.52	4.78	1.52	614.13	574.8
2	8.6	2.96	3.38	1.45	649.6	562.5
3	10.38	4.25	2.43	1.37	658.9	559.4
4	12.37	5.39	2.18	1.38	669.8	578.5
5	14.05	6.37	1.75	1.34	758.1	595.9
6	15.42	7.41	1.44	1.12	836.9	607.4
7	16.42	8.18	1.11	0.84	839.2	529
8	16.93	8.66	0.64	0.61	797.3	639.7

شد. در نمونه‌های عملی این مقدار براساس مشخصات کارخانه‌ی سازنده‌ی میراگر انتخاب می‌شود. شکل (۴) نحوه‌ی همگرایی الگوریتم ژنتیک را برای سه بار حل مسئله نشان می‌دهد. از نتایج معلوم می‌شود که مقدار تابع هدف (جابه‌جایی جانبی نسبی سازه) با افزایش تعداد نسل کاهش یافته یا ثابت بوده است که این امر به خاطر حفظ بهترین جمعیت در هر نسل و انتقال به جمعیت بعدی است. هم‌چنین هر سه بار اجرا به جواب بهینه‌ی نهایی تقریباً یکسانی رسیده است.

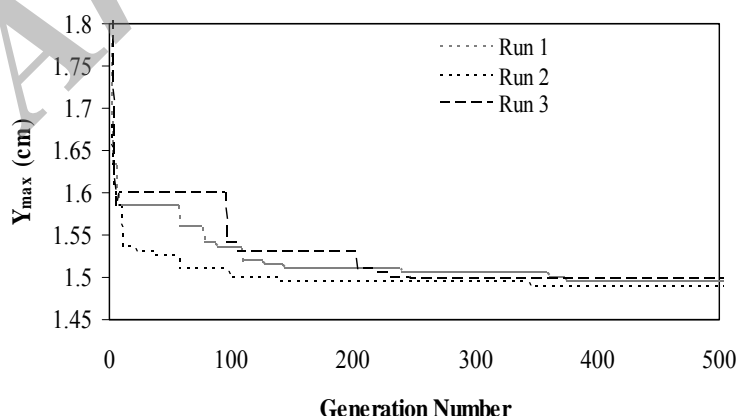
در شکل (۵) سختی و میرایی بهینه‌ی TMDها به ازای  $\mu = 4\%$  تحت تحریک  $w_1(t)$  نشان داده شده است. با توجه به نتایج می‌توان گفت که علی‌رغم یکسان بودن جرم TMDها، مقدار میرایی و سختی آنها دارای اختلاف قابل توجهی می‌باشند. جدول (۱) مقادیر ماکزیمم پاسخ سازه‌ی کنترل‌شده را به ازای  $\mu = 4\%$  و  $N_{tmd} = 5$  تحت تحریک  $w_1(t)$  نشان می‌دهد. هم‌چنین در شکل (۶) و (۷) به ترتیب تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان جانبی نسبی و منحنی هیسترسیس سازه‌ی کنترل‌نشده و کنترل‌شده برای طبقات اول، دوم و سوم آورده شده است.

#### طراحی MTMD با $N_{tmd} = 5$ و $\mu = 4\%$

برای توضیح روش پیشنهادی برای طراحی بهینه‌ی MTMD، سازه‌ی ۸ طبقه تحت ارتعاش  $w_1(t)$  قرار گرفته است، در حالتی که پنج میراگرجرمی با درصد جرمی برابر  $\mu = 4\%$ ، در طبقه‌ی آخر به صورت موازی قرار گرفته است که  $\mu$  برابر نسبت جرم MTMD به جرم کل سازه می‌باشد. در این حالت مسئله‌ی بهینه‌سازی ۱۰ متغیر دارد که با استفاده از الگوریتم ژنتیک با پارامترهای زیر حل شده است.

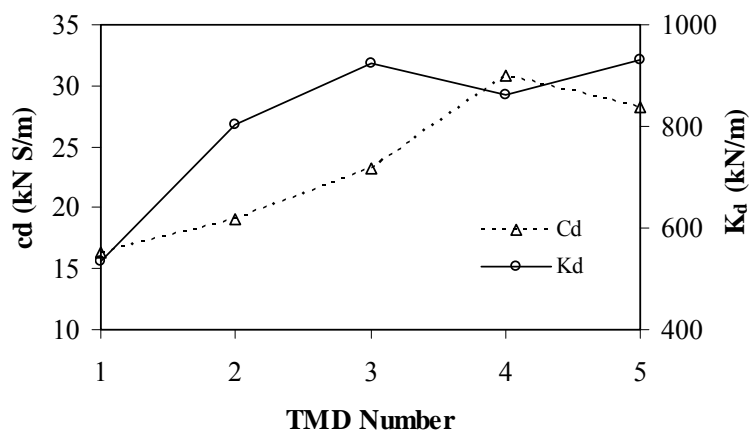
$0.05 =$  درصد جهش،  $1.0 =$  درصد احتمال برش،  $1.0 =$  شکاف نسل،  $0.9 =$  درصد جایگزینی، تعداد جمعیت برابر 25،  $500 =$  تعداد کل نسل‌ها، مکانیزم برش: روش تولید مثل داخلی، مکانیزم انتخاب: روش نمونه‌برداری تصادفی تک مرحله‌ای. برای حل مسائل بهینه‌سازی از برنامه‌ی نوشته شده در محیط نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

هم‌چنین حداکثر تغییرمکان جانبی TMDها برابر  $X_L = 150$  cm در نظر گرفته شده است. اعمال محدودیت برای حداکثر تغییرمکان جانبی میراگرها،  $X_L$ ، کارایی مکانیزم MTMD را تحت تأثیر قرار می‌دهد به طوری که افزایش مقدار این پارامتر تا یک مقدار مشخصی باعث بهبود عملکرد MTMD خواهد

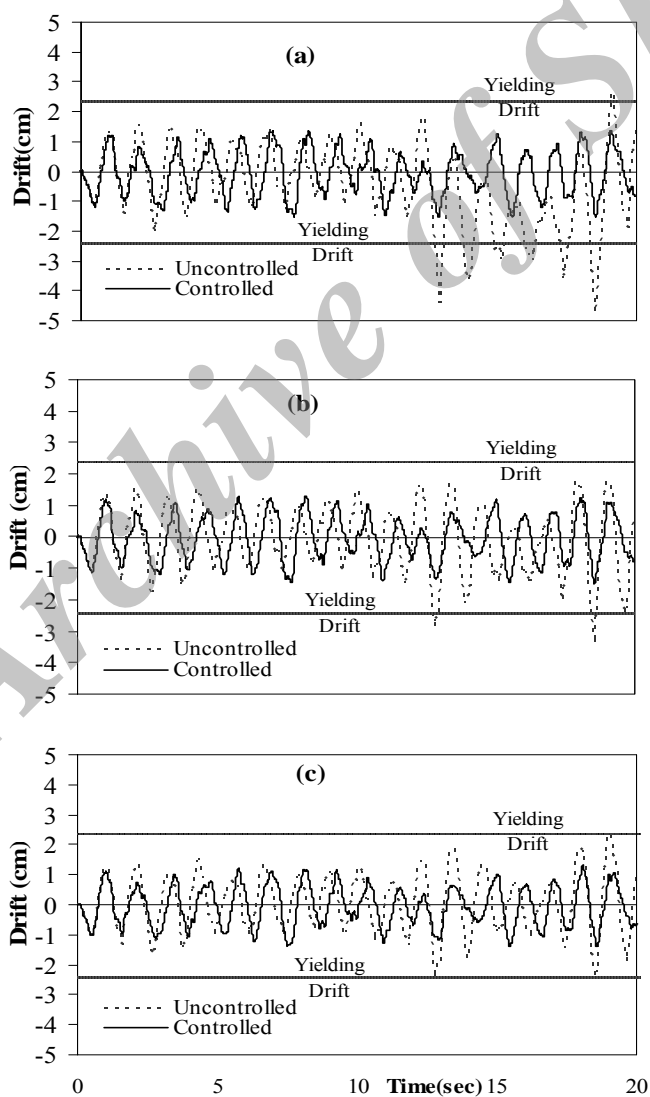


شکل ۴ هم‌گرایی الگوریتم ژنتیک در نسل‌های مختلف برای سه بار حل مسئله به ازای  $\mu = 4\%$

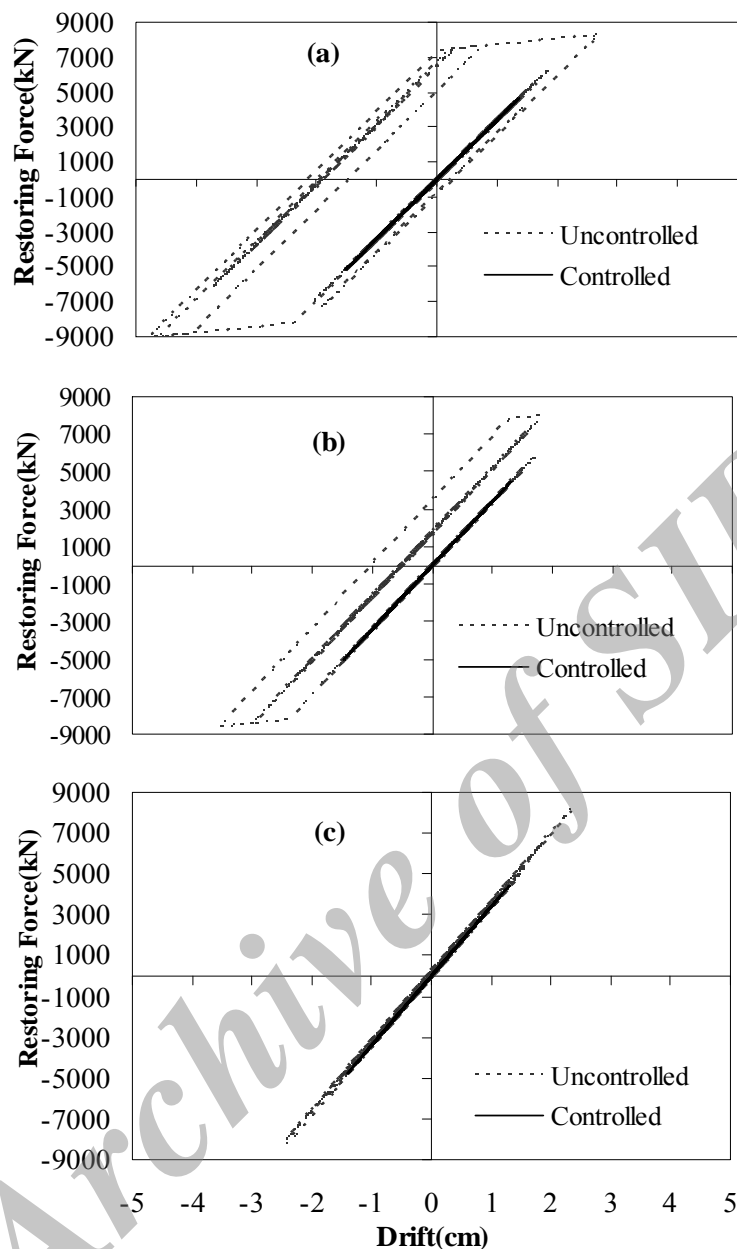




شکل ۵ (a) میرایی TMDها (b) سختی TMDها در حالت بهینه برای  $\mu=4\%$



شکل ۶ تغییر مکان جانبی سازه‌ی کنترل نشده و کنترل شده (a) طبقه‌ی اول، (b) طبقه‌ی دوم و (c) طبقه‌ی سوم



شکل ۷ منحنی هیستریسیس سازه‌ی کنترل‌نشده و کنترل‌نشده: (a) طبقه‌ی اول، (b) طبقه‌ی دوم، (c) طبقه‌ی سوم

کنترل‌نشده در طبقات ۱، ۲ و ۳ دارای رفتار غیرخطی بوده است. از طرف دیگر علاوه بر کاهش بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی که تابع هدف مسئله بوده است بیشینه‌ی جابه‌جایی کل و شتاب هم کاهش قابل‌ملاحظه‌ای داشته‌اند. با دقت در شکل (۷) می‌توان گفت که حلقه‌های

با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت که ماکزیمم جابه‌جایی نسبی، ماکزیمم جابه‌جایی کل و ماکزیمم شتاب سازه در حالت کنترل شده به ترتیب حدود ۶۸، ۴۸ و ۳۷ درصد کاهش داشته است. هم‌چنین معلوم می‌شود که با استفاده از MTMD سازه‌ی کنترل‌شده در ناحیه‌ی خطی نگه داشته شده است در حالی که سازه‌ی

بیانگر اثر منفی MTMD روی پاسخ مورد نظر در سازه است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی نسبی که مربوط به طبقه‌ی اول است و به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده است، برای همه‌ی زلزله‌های تست (چه نزدیک‌گسل و چه دورگسل) کاهش داشته است در حالی که تغییر مکان جانبی نسبی در بعضی از طبقات تحت زلزله‌های نزدیک‌گسل افزایش داشته است. هم‌چنین سایر پاسخ‌های سازه مانند بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی کل و شتاب طبقات نیز کاهش داشته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که کارایی MTMD برای زلزله‌های مختلف متفاوت می‌باشد به‌گونه‌ای که در مثال بررسی شده، بهترین کارکرد مربوط به تغییر مکان جانبی نسبی (Drift) تحت اثر زلزله‌ی Hachinohe بوده است.

با توجه به این‌که عملکرد MTMD وابسته به مشخصات زلزله‌ی ورودی می‌باشد، لذا در کاربردهای عملی برای دست‌یابی به عملکرد بهتر و مؤثرتر مکانیزم MTMD، بایستی در طراحی MTMD از رکورد زلزله‌ی مناسبی نظیر رکورد طراحی منطقه یا ترکیبی از زلزله‌های متناسب با شرایط لرزه‌خیزی منطقه طبق آیین‌نامه‌های زلزله استفاده نمود.

هیسترسیس در سازه‌ی کنترل‌شده دارای کاهش قابل توجهی می‌باشند که این مسئله منجر به کاهش انرژی هیسترسیس انباشته شده و خرابی سازه می‌گردد.

### تست MTMD بهینه شده تحت زلزله‌های

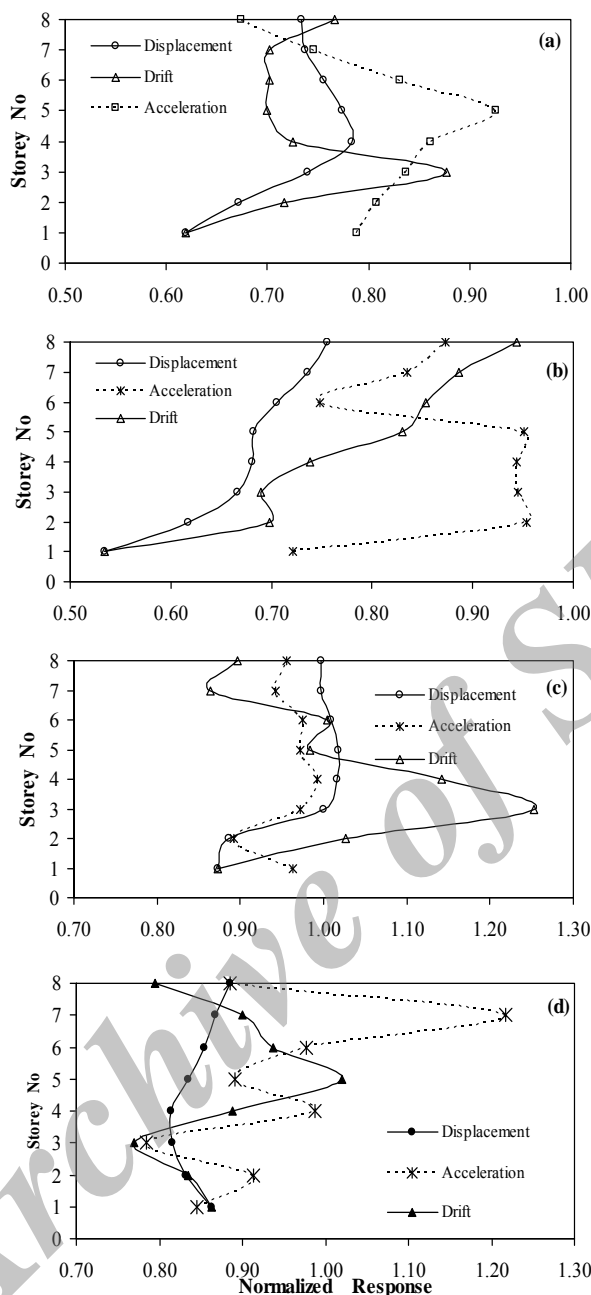
#### غیر طرح

برای بررسی کارایی MTMD بهینه شده در مقابل زلزله‌های دیگر که متفاوت از زلزله‌ی طرح  $w_1(t)$  است، سیستم سازه - MTMD طراحی شده در برابر زلزله‌های دورگسل و نزدیک‌گسل قرار گرفته است. رکوردهای El-Centro (1940 ; PGA=0.34g) و Hachinohe (1968 ; PGA=0.23g) به‌عنوان زلزله‌های دورگسل و زلزله‌های Kobe (1995 ; PGA=0.83g) و Northridge (1994 ; PGA=0.84g) به‌عنوان زلزله‌های نزدیک‌گسل انتخاب گردیده‌اند که در جدول (۲) مقادیر ماکزیمم پاسخ سازه‌ی کنترل‌نشده در مقابل زلزله‌های تست نشان داده شده است.

شکل (۸) پاسخ‌های نرمال شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده (یعنی نسبت پاسخ سازه‌ی کنترل‌شده به پاسخ همسان سازه‌ی کنترل‌نشده) را تحت زلزله‌های تست نشان می‌دهد. پاسخ نرمال شده بزرگ‌تر از ۱،

جدول ۲ ماکزیمم پاسخ سازه‌ی کنترل‌نشده در مقابل زلزله‌های تست

تحریک	ماکزیمم جابجایی کل (cm)	ماکزیمم جابجایی نسبی (cm)	ماکزیمم شتاب (cm/s <sup>2</sup> )
Hachinohe	15.95	3.82	899
El-Centro	17.72	4.26	1010
Northridge	29.97	12.42	1523
Kobe	30.08	9.95	1997



شکل ۸. پاسخ‌های نرمال‌شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده با  $\mu=4\%$  تحت زلزله‌های تست (a) Kobe (b) El-Centro (c) Hachinohe (d) Northridge

و به صورت موازی قرار گرفته است با فرض  $X_L = 150$  cm به طراحی بهینه‌ی MTMD بر روی سازه‌ی ۸ طبقه‌ی غیرخطی پرداخته شده است. شکل (۹) پاسخ‌های نرمال‌شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده را برای مقادیر مختلف درصد جرمی تحت ارتعاش  $w_1(t)$  نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که (۱)

### بررسی اثر جرم و تعداد TMD بر کارایی MTMD

برای بررسی اثر درصد جرمی میراگرها بر کارکرد MTMD در کاهش پاسخ‌های سازه‌ی غیرخطی، مشابه روش توضیح داده شده در بخش قبل، برای درصد‌های جرمی مختلف در حالتی که پنج TMD در طبقه‌ی آخر

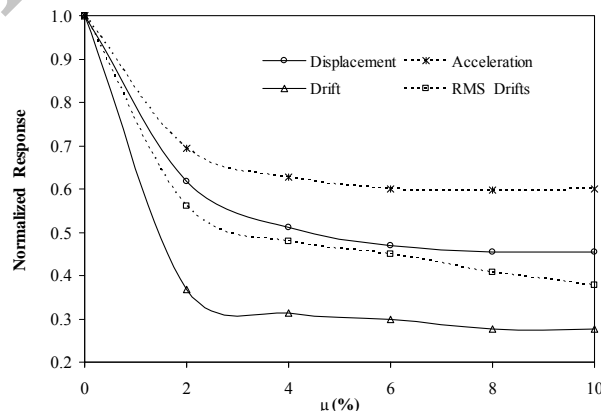
باقی بماند. به عنوان مثال پنج طبقه‌ی پایین سازه‌ی کنترل نشده در مقابل زلزله‌ی El-Centro وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده‌اند که در حالت کنترل شده با  $\mu = 2\%$  فقط دو طبقه‌ی پایین وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده‌اند و با افزایش درصد جرمی به  $8\% = \mu$  کلیه‌ی طبقات در ناحیه‌ی خطی باقی می‌ماند.

برای بررسی اثر تعداد TMDها در عملکرد MTMD، برای تعداد مختلف TMDها در حالتی که در طبقه‌ی آخر سازه و به صورت موازی قرار گرفته باشند، برای درصدهای جرمی مختلف مکانیزم سازه - MTMD تحت اثر زلزله‌ی  $w_1(t)$  قرار گرفته و به طراحی بهینه‌ی MTMD پرداخته شده است.

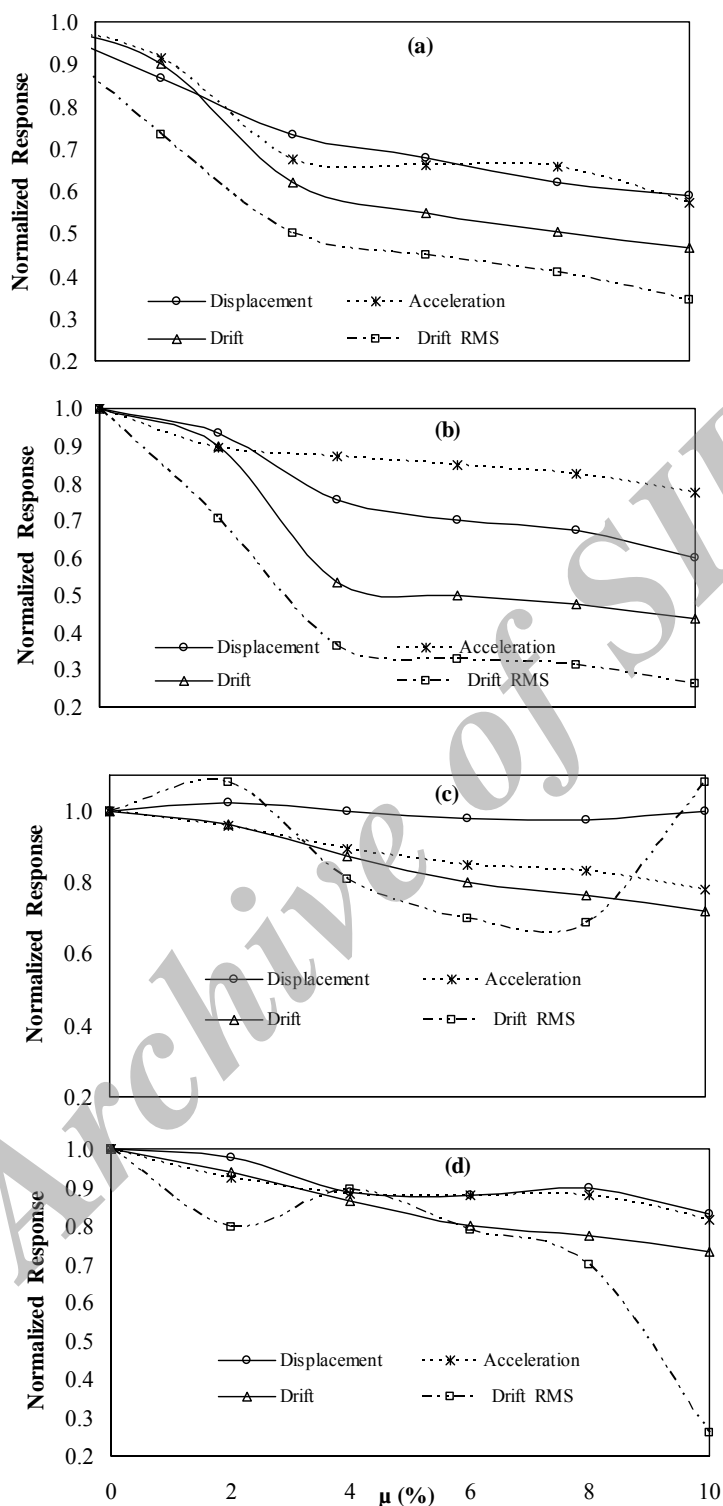
در شکل (۱۱) بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی نسبی نرمال شده‌ی سازه‌ی کنترل شده برای تعداد مختلف TMD و درصدهای جرمی متفاوت نشان داده شده است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در این مطالعه با فرض جرم یکسان برای TMDها و قرارگیری به صورت موازی در طبقه‌ی آخر، با افزایش تعداد میراگرهای جرمی، تغییر چشم‌گیری در کارایی MTMD نسبت به TMD منفرد تحت ارتعاش طراحی و زلزله‌های تست مشاهده نمی‌شود. این نتیجه‌گیری با نتایج حاصل از کاربرد MTMD بر روی سازه‌های با رفتار خطی مطابقت دارد [31, 42].

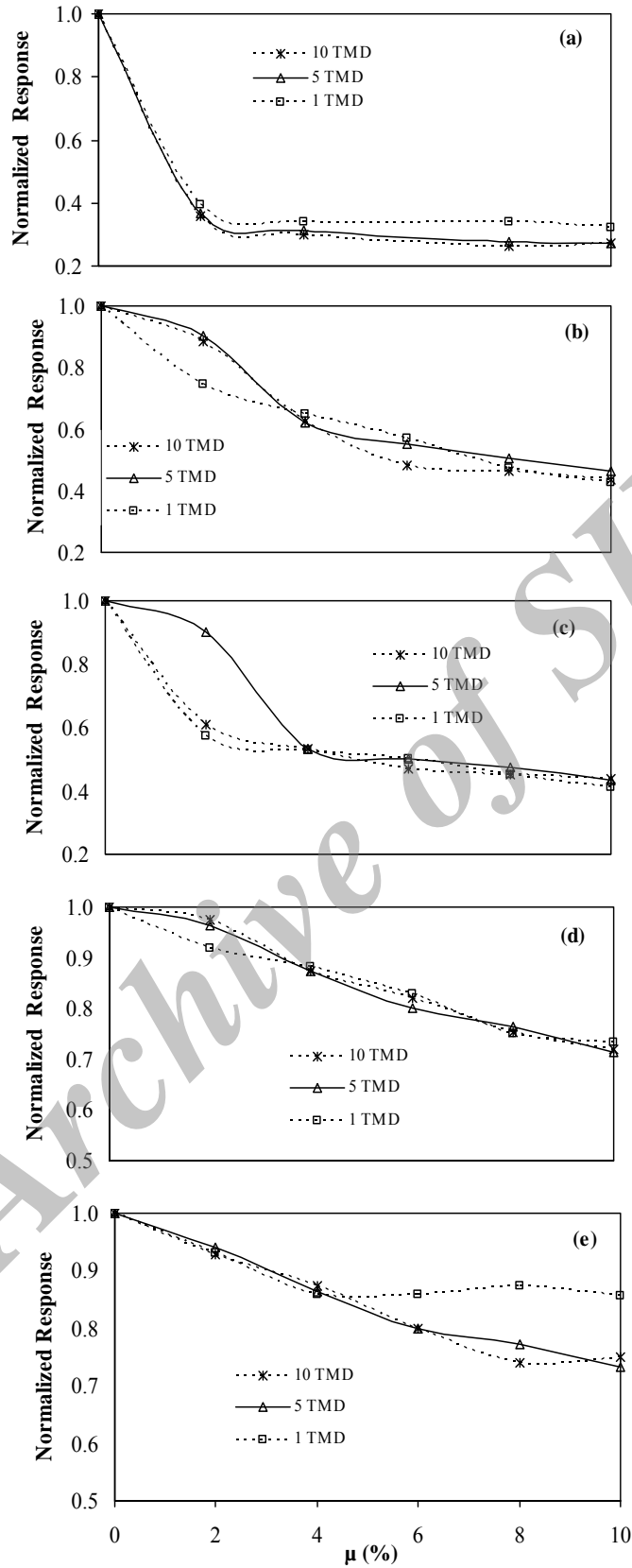
عموماً افزایش درصد جرمی MTMD باعث کاهش بیشتر پاسخ‌های سازه شده است که این مسئله بیانگر افزایش کارایی MTMD با افزایش درصد جرمی است، (۲) برای درصدهای جرمی مختلف با توجه به این که تابع هدف کمینه کردن بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی نسبی بوده است ولی مقدار بیشینه‌ی جابه‌جایی کل و شتاب هم با افزایش درصد جرمی، بیشتر کاهش می‌یابد، (۳) با توجه به نتایج می‌توان گفت که حساسیت کارایی MTMD به درصد جرمی، در مقادیر کمتر  $\mu$  بیشتر می‌باشد. نتیجه‌گیری (۱) تا (۳) مشابه نتایج حاصل از کاربرد MTMD بر روی سازه‌های با رفتار خطی می‌باشد [34]، (۴) در دامنه‌ی مورد بررسی برای  $\mu$  (۲٪ تا ۱۰٪) سازه‌ی کنترل شده در ناحیه‌ی خطی باقی مانده است در حالی که سازه‌ی کنترل نشده در طبقات ۱، ۲، ۳ دارای رفتار غیرخطی بوده است. در شکل (۱۰) پاسخ‌های نرمال شده‌ی سازه‌ی کنترل شده برای درصدهای جرمی مختلف برای MTMD، تحت اثر زلزله‌های تست نشان داده شده است. نتایج به دست آمده تحت زلزله‌های تست نشان می‌دهد که کارایی MTMD با افزایش درصد جرمی بهبود می‌یابد که میزان کاهش پاسخ‌های سازه برای مقادیر مختلف درصد جرمی، وابسته به مشخصات زلزله ورودی است. در بین زلزله‌های تست، کارایی MTMD در کاهش تابع هدف در برابر زلزله‌های دورگسل عموماً بهتر بوده است. همچنین افزایش درصد جرمی باعث می‌شود سازه‌ی غیرخطی در مقابل زلزله‌های تست در ناحیه‌ی خطی



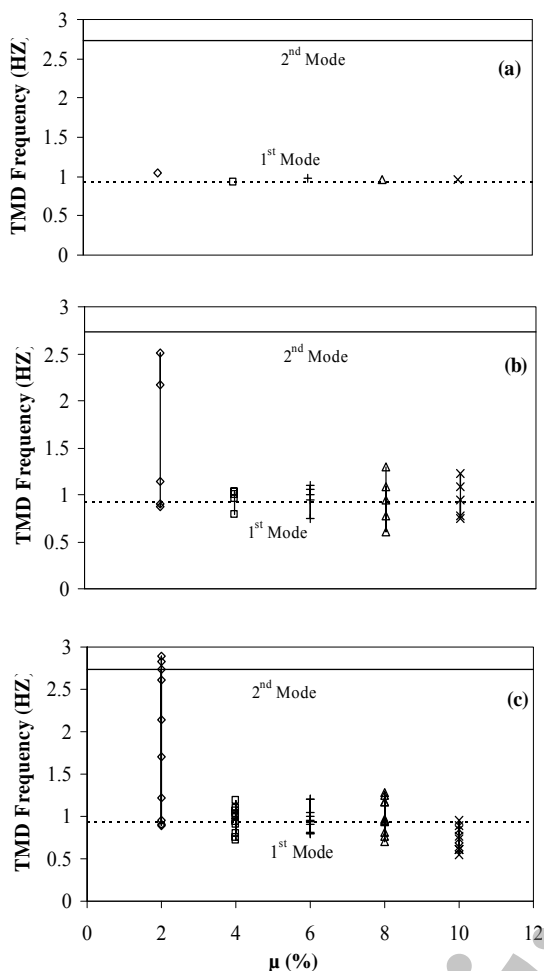
شکل ۹ پاسخ‌های نرمال شده‌ی سازه‌ی کنترل شده با درصد جرم‌های مختلف برای MTMD تحت ارتعاش  $w_1(t)$



شکل ۱۰. پاسخ‌های نرمال‌شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده با درصد جرم‌های مختلف برای MTMD تحت ارتعاش زلزله‌های تست Kobe (d) Northridge (c) Hachinohe (b) El-Centro (a)



شکل ۱۱ بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی نسبی نرمال شده‌ی سازه کنترل شده برای تعداد مختلف TMD تحت ارتعاش زلزله‌های مختلف (a)  $w_1(t)$  (b) Northridge (c) El-Centro (d) Hachinohe (e) Kobe



شکل ۱۲ فرکانس TMDها به‌ازای درصد جرم‌های مختلف در حالت: (a)  $N_{tmd}=1$  (b)  $N_{tmd}=5$  (c)  $N_{tmd}=10$

مقایسه‌ی فرکانس TMDها با فرکانس مود اول و دوم سازه نشان می‌دهد که در اکثر موارد (به‌ازای مقادیر مختلف درصد جرمی و تعداد میراگرهای جرمی) فرکانس TMDها در مقایسه با فرکانس موده‌های مختلف سازه، نزدیک‌تر به فرکانس مود اول سازه می‌باشد گرچه در برخی از موارد به فرکانس مود دوم سازه هم نزدیک‌تر شده است. این نتیجه‌گیری در طراحی MTMD برای سازه‌ی غیرخطی که به‌خاطر تغییر سختی، فرکانس ارتعاشی در حال تغییر می‌باشد قابل توجه می‌باشد که مشابه سازه‌های خطی، اکثر TMDها تمایل به هماهنگی با فرکانس مود اول سازه که براساس سختی اولیه‌ی سازه محاسبه شده است، دارند. بنابراین می‌توان گفت که در طراحی

### بررسی تغییر مکان جانبی MTMDها

در طراحی بهینه‌ی MTMD، تغییر مکان ماکزیمم TMDها به‌صورت محدودیت در مسئله‌ی بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است به‌طوری‌که حداکثر تغییر مکان TMDها بایستی از  $X_L=150\text{cm}$  کمتر باشد. ماکزیمم جابه‌جایی TMDها به‌ازای درصد جرم‌های مختلف در حالت نصب یک TMD و پنج TMD در جداول (۳) و (۴) آورده شده است.

با توجه به نتایج جداول (۳) و (۴) می‌توان گفت که در مثال مورد بررسی در حالت نصب یک TMD و پنج TMD مقدار انتخاب شده برای حداکثر تغییر مکان جانبی TMDها زیادتر از مقدار لازم است و با کاهش مقدار آن تا حد  $X_L=100\text{cm}$  کارایی MTMD تغییر نمی‌کند. مقدار ماکزیمم برای  $X_L$  براساس مشخصات ساخت TMDها انتخاب می‌شود و در مواردی ممکن است که کارایی این مکانیزم را محدود کند [43].

جدول ۳ ماکزیمم تغییر مکان جانبی TMDها بر حسب سانتی‌متر در حالت نصب یک TMD

TMD	$\mu=2\%$	$\mu=4\%$	$\mu=8\%$	$\mu=10\%$
1	42.5	23	22	19.5

جدول ۴ ماکزیمم تغییر مکان جانبی TMDها بر حسب سانتی‌متر در حالت نصب پنج TMD

TMD	$\mu=2\%$	$\mu=4\%$	$\mu=8\%$	$\mu=10\%$
1	12.5	33.5	36.8	28
2	12.4	34	29	34
3	17.6	31.5	29	28
4	30.4	27	31	27
5	100	28	16	26

### فرکانس TMDهای بهینه

فرکانس TMDهای بهینه به‌ازای درصد جرم و تعداد مختلف TMD و هم‌چنین فرکانس مود اول و دوم سازه که براساس سختی اولیه‌ی سازه‌ی غیرخطی محاسبه شده است در شکل (۱۲) آورده شده است.



افزایش درصد جرمی عموماً افزایش می‌یابد. مثلاً ماکزیمم جابه‌جایی نسبی سازه‌ی کنترل‌شده تحت تحریک زلزله‌ی El-Centro به‌ازای درصد جرمی‌های  $\mu = 2\%$ ،  $\mu = 4\%$  و  $\mu = 8\%$  به‌ترتیب 9.8، 38 و 49.5 درصد کاهش داشته است.

۴- بررسی کارایی MTMD در کاهش پاسخ سازه تحت اثر زلزله‌های دورگسل و نزدیک‌گسل نشان می‌دهد که کارایی این مکانیزم در کاهش پاسخ سازه، وابسته به محتوای فرکانسی زلزله و میزان غیرخطی شدن سازه می‌باشد. مثلاً برای درصد جرمی یکسان  $\mu = 4\%$  بیشینه‌ی جابه‌جایی نسبی سازه تحت زلزله‌ی Northridge و El-Centro به‌ترتیب 38 و 13 درصد کاهش داشته است.

۵- نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد MTMD علاوه بر کاهش بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی نسبی سازه که به‌عنوان معیار خرابی سازه‌ی غیرخطی در طراحی بهینه‌ی این مکانیزم استفاده شده، سایر پاسخ‌های سازه را نیز کاهش داده است. مثلاً جابه‌جایی کل و شتاب سازه‌ی کنترل‌شده با  $\mu = 4\%$  تحت تحریک زلزله El-Centro به‌ترتیب 27 و 33 درصد کاهش داشته است.

۶- در این مطالعه با فرض توزیع یکسان جرم برای میراگرهای جرمی و قرارگیری موازی آنها در طبقه‌ی آخر برای طراحی بهینه‌ی مکانیزم MTMD برای تعداد مختلف TMD شامل (۱، ۵ و ۱۰) نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد TMD تأثیر چشم‌گیری در افزایش کارایی MTMD در مقایسه با TMD منفرد ندارد که این نتیجه‌گیری مشابه سازه‌های خطی می‌باشد.

۷- بررسی فرکانس میراگرهای جرمی در حالت بهینه نشان می‌دهد که علی‌رغم تغییر سختی و فرکانس ارتعاش سازه‌ی غیرخطی، در اکثر موارد (به‌ازای مقادیر مختلف درصد جرمی و تعداد میراگرهای جرمی) فرکانس TMDها در دامنه‌ای نزدیک به فرکانس مود اول سازه (با فرض سختی اولیه)

MTMD بهینه برای سازه‌های غیرخطی، با تقریب خوبی می‌توان TMDها را در دامنه‌ی فرکانسی نزدیک به مود اول سازه (با فرض سختی اولیه) توزیع نمود گرچه جزئیات کامل‌تر در رابطه با این نتیجه‌گیری نیاز به مطالعات عددی بیشتری دارد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی کارایی مکانیزم میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی چندگانه (MTMD) در کاهش پاسخ سازه‌های با رفتار غیرخطی پرداخته شده است. برای تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای MTMD از روشی مبتنی بر تعریف یک مسئله‌ی بهینه‌سازی با تابع هدف کمینه کردن ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه استفاده شده است که از الگوریتم ژنتیک (GA) برای حل مسئله استفاده کرده است. برای توضیح روش پیشنهادی، یک سازه‌ی ۸ طبقه با رفتار غیرخطی هیستریسیس و از نوع قاب برشی تحت اثر اغتشاش سفید قرار گرفته است و ضمن طراحی میراگر جرمی چندگانه، تأثیر پارامترهای مختلفی مانند درصد جرم MTMD، تعداد TMDها و محتوای فرکانسی زلزله‌ها بر کارکرد این مکانیزم بررسی شده است. براساس تحلیل‌های عددی می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- با توجه به این‌که برای طراحی MTMD روی سازه‌های غیرخطی روش مشخصی ارائه نشده است بنابراین الگوریتم مورد استفاده در این مقاله برای طراحی MTMD روی سازه‌های غیرخطی روش مناسب و کارا به لحاظ سادگی و دقت می‌باشد.

۲- نتایج نشان می‌دهد در صورت طراحی بهینه‌ی MTMD می‌توان پاسخ سازه‌ی غیرخطی و در نتیجه خرابی سازه را تا حد زیادی تحت زلزله‌ی مشخص کاهش داد به‌طوری‌که در مثال مورد بررسی برای درصد جرمی‌های مختلف امکان حفظ رفتار سازه در ناحیه‌ی خطی بوده است.

۳- مشابه سازه‌های با رفتار خطی، کارایی MTMD با

توزیع شده‌اند که این نتیجه‌گیری می‌تواند به‌عنوان روش مفید تقریبی برای طراحی MTMD روی سازه‌های غیرخطی مورد استفاده قرار گیرد.

### مراجع

1. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F. and Yao, J., "Structural control: past, present and future", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 123(9), pp. 897-966, (1997).
2. Soong, T. and Dargush, G.F., "Passive energy dissipation systems in structural engineering", John Wiley & Sons, Chichester, (1997).
3. Frahm, H., "Device for damping vibrations of bodies", US Patent, (1909).
4. Bishop, R. E. D and Welbourn, D. B., "The Problem of the dynamic vibration absorber", *Engineering*, Lond, (1952).
5. Falcon, K. C., Stone, B. J., Simcock, W. D and Andrew, C., "Optimization of vibration absorbers: a graphical method for use on idealized systems with restricted damping", *Journal of Mechanical Engineering Science*, 9, pp. 374-381, (1967).
6. Kaynia, A.B., Veneziano, D., Biggs, J.M., "Seismic effectiveness of tuned mass dampers", *Journal of Structural Division ASCE*, 107(8), pp. 1465-1484, (1981).
7. Bernal, R., "Influence of ground motion characteristics on the effectiveness of tuned mass dampers", *Proceedings of the 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, (1996).
8. Mohebbi, M. and Joghataie, A., "Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21(1), pp. 57-76, (2012).
9. Hong, N. and Waranitchai, P., "Design of multiple tuned mass dampers by using numerical optimizer", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34, pp. 125-144, (2005).
10. Chen, G. and Wu, J., "Optimal Placement of multiple tuned mass dampers for seismic structures", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 127(9), pp. 1054-1062, (2001).
11. Balendra, T., Wang, C. M. and Yan, N., "Control of wind-excited towers by active tuned liquid column damper", *Engineering Structure*, 23, pp. 1054-1067, (2001).
12. Spencer, B.F. and Nagarajaiah, S., "State of the art of structural control", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 129(7), pp. 845-856, (2003).
13. Joghataie, A. and Mohebbi, M., "Optimal controller of nonlinear frames by Newmark and distributed genetic algorithms", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21, pp. 77-95, (2012).
14. Bani-Hani, K. A., "Vibration control of wind-induced response of tall buildings with an active tuned mass damper using neural networks", *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, 14(1),

- pp. 83 – 108, (2007).
15. Shariatmadar, H., Golnargesi, S. and Akbarzadeh Totonchi, M.R. "Vibration control of buildings using ATMD against earthquake excitations through interval type-2 fuzzy logic controller", *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 15, pp.321-338, (2014).
  ۱۶. محبی، م. و شاکری، ک.، "استفاده از الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه‌ی جرم میراگر فعال در سازه‌های غیرخطی"، *مجله‌ی علمی-پژوهشی سازه و فولاد، شماره‌ی دوازدهم، (۱۳۹۱)*.
  17. Ankireddi S. and Yang, H.T.Y., "Simple ATMD control methodology for tall buildings subject to wind loads", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 122, pp. 83– 91, (1996).
  18. Yan, N., Wang, C.M. and Balendra, T., "Optimum damper characteristics of ATMD for buildings under wind loads", *Journal of Structural Engineering, ASCE*; 125, pp. 1376–1383, (1999).
  19. Nagashima, I., "Optimal displacement feedback control law for active tuned mass damper", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 30(8), pp. 1221–1242, (2001).
  20. Li, C., Jinhua, Li.,J. and Qu, Y., "An optimum design methodology of active tuned mass damper for asymmetric structures", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24, pp. 746–765, (2010).
  21. Lin, P.Y., Chung, L.L. and Loh, C.H.; "Semi-active control of building structures with semi-active tuned mass damper", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(1), pp. 35–51, (2005).
  22. Karamodin ,A., Haji Kazemi,H., Rowhanimanesh,A. and Akbarzadeh Totonchi, M.R. , "Semi-active control of structures using a neuro-inverse model of MR dampers" , *Scientia Iranica* ,16, pp. 256-263,(2009).
  23. Karamodin, A., Haji Kazemi, H. "Semi-active control of structures using neuro-predictive algorithm for MR dampers", *Structural Control and Health Monitoring*, 278, pp. 1002-1020,(2008).
  24. Xu, K. and Igusa T., "Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 21(12), pp. 1059–1070, (1992).
  25. Li, C., "Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29, pp. 1405-1421, (2000).
  26. Kareem, A, and Klein, S., "Performance of multiple tuned mass dampers under random loadings", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 121(2), pp. 348-361, (1995).
  27. Yamaguchi, H and.Harnpornchai, N., "Fundamental characteristics of multiple tuned mass dampers for suppressing harmonically forced oscillation", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 22, pp. 51-62, (1993).
  28. Igusa, T. and Xu, K., "Vibration control using multiple tuned mass damper", *Journal of Sound and Vibration*, 175, pp. 491-503 (1994).
  29. Jangid, R.S., "Optimum multiple tuned mass dampers for base excited undamped systems",

- Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 28, pp. 1041-1049, (1999).
30. Li, C., "Optimum multi tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on DDMF and ADMF", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31, pp. 897-919, (2002).
  31. Zuo, L. and Nayfeh, S.A., "Optimization of the individual stiffness and damping parameters in multiple-tuned-mass-damper systems", *Journal of Vibration and Acoustics*, Transactions of ASME, 127, pp. 77-83, (2005).
  32. Carneiro, R.B., Avila, S.M. and De Brito, J.L.V., "Parametric study on multiple tuned mass dampers using interconnected masses", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 8(1), pp. 187-202, (2008).
  33. Moon, K.S., "Vertically distributed multiple tuned mass dampers in tall buildings: performance and preliminary design", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 19, pp. 347-366, (2010).
  34. Mohebbi, M., Shakeri, K., Ghanbarpour Y. and Majzub, H., "Designing optimal multiple tuned mass dampers using Genetic Algorithms (GAs) for mitigating the seismic response of structures", *Journal of Vibration and Control*, 19(4), pp. 605-625, (2013).
  35. Li, C. and Yanxia, L., "Active multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, pp. 1041-1052, (2002).
  36. Li, C. and Liu, Y., "Active multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, pp. 1041-1052, (2002).
  37. Li, C. and Bilei, Zhu. "Investigation of response of systems with active multiple tuned mass dampers", *Structural Control and Health Monitoring*, 14, pp. 1138-1154, (2007).
  38. Li, C., Li, J., Yu, Z. and Qu, Y. "Performance and parametric study of active multiple tuned mass dampers for asymmetric structures under ground acceleration", *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 4(3), pp. 571-588, (2009).
  39. Bathe K.J., "Finite Element Procedures", Prentice-Hall, Inc.: New Jersey, USA, (1996).
  40. Joghataie, A. and Mohebbi, M., "Vibration controller for confined masonry walls by distributed genetic algorithms", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 134(2), pp. 300-309, (2008).
  41. Mühlenbein, H. and Schlierkamp-Voosen, D., "Predictive models for the breeder genetic algorithm: I. Continuous parameter optimization", *Evolutionary Computation*, 1(1), pp. 25-49, (1993).
  42. Baker, J.E., "Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm", *Proc. ICGA 2*, pp. 14-21, (1987).
  43. Li, C. and Liu, Y., "Further characteristics for multiple tuned mass dampers", *ASCE Journal of Structural Engineering* 128(10), pp. 1362- 1365, (2002).
  44. Lin, C. C., Wang, J. F., Lien, C.H., Chiang, H.W. and Lin, C.S., "Optimum design and experimental study of multiple tuned mass dampers with limited stroke", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39, pp. 1631-1651, (2010).