

## طراحی بهینه میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه فعال برای سازه‌های غیر خطی

### هیسترسیس

محتشم محبی<sup>۱\*</sup>، حسین شعبانی<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۱۰	این مقاله، به طراحی بهینه و بررسی کارایی میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه-ی فعال (AMTMD) در کاهش ارتعاشات سازه‌های غیرخطی هیسترسسیس پرداخته است. برای کنترل فعال سازه‌های غیرخطی از الگوریتم کنترل بهینه‌ی آنی بر پایه روش عددی نیومارک استفاده شده است. پارامترهای بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شده چندگانه و مقادیر ماتریس‌های وزنی تابع عملکرد کنترل فعال با هدف کمینه‌کردن بیشینه‌ی نیروی کنترل مورد نیاز برای کاهش ماکزیمم تغییرمکان جانبی سازه تا یک حد مشخص تعیین شده است. برای حل مسأله‌ی بهینه‌سازی با توجه به تعداد زیاد متغیرها از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده می‌شود. برای آنالیز عددی، قاب ۸ طبقه‌ی برشی با منحنی هیسترسسیس دو خطی تحت ارتعاش اغتشاش سفید قرار گرفته و برای مقادیر مختلف درصد جرمی و تعداد مختلف ATMD به طراحی بهینه‌ی مکانیزم AMTMD پرداخته شده است. همچنین کارایی این سیستم در مقابل زلزله‌های دورگسل و نزدیک گسل آزموده شده است. نتایج بدست آمده موثر بودن روش پیشنهادی را در طراحی AMTMD روی سازه‌های غیرخطی نشان می‌دهد. همچنین می‌توان گفت که مکانیزم AMTMD در صورت طراحی بهینه می‌تواند خرابی را در سازه‌های غیرخطی تا حد زیادی کاهش دهد. میزان کاهش وابسته به درصد جرمی، تعداد TMDها و مشخصات زلزله ورودی می‌باشد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۱/۲۶	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
کنترل فعال، میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه، میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه‌ی فعال، قاب برشی غیر خطی، بهینه‌سازی.	

### ۱- مقدمه

یکی از ابزارهای کنترل غیر فعال، میراگر جرمی تنظیم شده (Tuned Mass Damper-TMD) است که مقداری از انرژی وارد شده از بار دینامیکی نظیر باد و زلزله به سازه را جذب می‌کند [۱]. ایراد اصلی TMD منفرد حساسیت بالای آن به تنظیم نشدن فرکانسها می‌باشد. بررسی‌های انجام شده نشان داده است که میراگر جرمی منفرد حتی ممکن است پاسخ موده‌های بالاتر را تقویت کند [۲]. بنابراین TMD

تنها زیاد قابل اعتماد نیست و کاربرد بیش از یک TMD با خواص دینامیکی متفاوت برای بهبود کارایی آن پیشنهاد گردید [۳]. میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه (MTMD) متشکل از چندین میراگر جرمی تنظیم شده منفرد TMD می‌باشد. در طراحی می‌توان توزیع یکنواخت فرکانس‌های طبیعی برای TMDها در نظر گرفت [۴]. بررسی‌ها نشان می‌دهد کارکرد MTMD به مقدار جرم، تعداد TMDها و دامنه فرکانسی طراحی و نحوه‌ی توزیع آن‌ها بستگی دارد [۵]. مکانیزم MTMD علاوه بر بهبود

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mohebbi@uma.ac.ir

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی  
۲. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی زلزله، دانشگاه محقق اردبیلی

پارامترهای ATMD در کاهش پاسخ سازه‌های معرفی کردند که شامل موقعیت میراگر تا مرکز جرم، فرکانس، نسبت میرایی و مینیمم کردن جابجایی انتقالی و پیچشی می‌باشد [۱۵]. سیستم AMTMD که شامل تعدادی ATMD با جرم‌های کوچکتر نسبت به یک ATMD با جرم بزرگتر می‌باشد جهت بهبود کارایی، ساخت و نگهداری ATMD توسط لی و همکارانش پیشنهاد شد [۱۶]. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که سیستم AMTMD نسبت به سیستم ATMD موقعی که باید یک نیروی کنترلی بزرگی تولید شود خیلی موثرتر و کارا تر است. Li و Liu با روش جست و جوی عددی نشان دادند کارایی AMTMD با افزایش نسبت جرم و تعداد کل جرم تا یک حد مشخصی افزایش می‌یابد [۱۷]. لی و ژو نشان دادند در طراحی بهینه‌ی AMTMD، نسبت میرایی متوسط بهینه در حالتی که الگوریتم کنترل حلقه باز استفاده شود کمتر از حالتی است که الگوریتم حلقه بسته-باز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸]. کومر و همکارانش نشان دادند استفاده از الگوریتم کنترل بهینه مدرن در AMTMD پاسخ سازه را نسبت به تئوری کنترل بهینه آنی بیشتر کاهش می‌دهد [۱۹]. لی و همکارانش [۲۰] به طراحی AMTMD در سازه‌های نامتقارن و طراحی بهینه‌ی پارامترهای AMTMD در سازه‌های نامتقارن ساخته شده بر روی خاک نرم [۲۱] پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت که AMTMD در کاهش پاسخ سازه‌های نامتقارن موثرتر از ATMD بوده و همچنین در طراحی بهینه‌ی AMTMD باید اثر ساختار خاک و لنگر پیچشی لحاظ شود. اکثر تحقیقاتی که بر روی عملکرد AMTMD انجام شده است با فرض رفتار خطی سازه بوده است، در حالیکه سازه‌ها تحت اثر ارتعاشات شدید وارد ناحیه‌ی غیرخطی می‌شوند. بنابراین نیاز است که به طراحی بررسی عملکرد AMTMD برای سازه‌های با رفتار غیرخطی پرداخته شود. کوین و همکارانش الگوریتم کنترل بهینه آنی را با استفاده از روش سعی و خطا برای کنترل سازه‌های غیرخطی استفاده کردند [۲۲]. میائو و کوین از الگوریتم کنترل بهینه آنی پیش‌بینی شده برای کنترل سازه‌های غیرخطی استفاده کردند و نشان دادند در این الگوریتم استفاده از سرعت زمین لرزه بجای شتاب زمین مناسبتر می‌باشد [۲۳]. با توجه به اینکه در مورد کارایی سیستم AMTMD بر روی سازه‌های با رفتار غیرخطی مطالعات

کارآیی، اغلب نیازمند یک فضای اختصاصی داده شده برای قرار دادن میراگرهای کوچک نمی‌باشد. 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، کارآیی میراگرهای جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه حساسیت کمتری نسبت به عدم قطعیت پارامترهای سیستم دارد [۶]. لی [۷] کارایی پنج حالت مختلف سامانه MTMD را که شامل ترکیب‌های متفاوتی از پارامترهای TMD (جرم، سختی، و میرایی) بود، با هدف کمینه کردن ضریب بزرگ نمایی دینامیکی تغییر مکان و ضریب بزرگ نمایی دینامیکی شتاب یک سازه تحت شتاب زمین، مطالعه کرد. ژو و نایفه با طراحی بهینه‌ی میراگر جرمی چندگانه با روش حل عددی، اثر تعداد TMD ها و درصد جرمی MTMD بر نحوه‌ای کارکرد این سامانه را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که در سامانه کنترلی MTMD با وجود اینکه افزایش تعداد TMDها فقط تا تعدادی 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 [۸]. محبی و همکارانش روشی مبتنی بر استفاده از الگوریتم ژنتیک را برای تعیین پارامترهای MTMD برای سازه‌های چند درجه آزادی خطی ارائه دادند [۹]. با توجه به اینکه استفاده از روش‌های کنترل فعال برای افزایش قابلیت مکانیزمهای کنترل غیرفعال در کاهش پاسخ سازه‌ها پیشنهاد شده است، بنابراین جهت بهبود عملکرد TMD و MTMD تحت اثر ارتعاش زلزله، از این مکانیزم‌ها بصورت میراگر جرمی تنظیم شده‌ی فعال (ATMD) استفاده گردیده است. در این روش بهبود پاسخ دینامیکی سازه با تأمین نیروهای فعال در سازه صورت می‌گیرد. کاهش بیشتر جابجایی و شتاب سازه با در نظر گرفتن یک نیروی کنترل فعال بین سازه و سیستم TMD بهبود می‌یابد [۱۰]. مطالعات زیادی توسط محققین بر روی سیستم ATMD انجام شده است که می‌توان به استفاده از ATMD برای ساختمان‌های بلند تحت تحریک باد [۱۱]، بهینه کردن پارامترهای ATMD برای ساختمان‌ها تحت تحریک باد [۱۲]، استفاده از قانون کنترل فیدبک جابجایی بهینه برای طراحی ATMD [۱۳] و طراحی ATMD با استفاده از کنترل فازی [۱۴] اشاره کرد. Li و همکارانش چهار معیار ارزیابی جهت بهینه کردن

که  $k$  تکرار گام زمانی،  $K_{k-1}^*$  و  $C_{k-1}^*$  ماتریس سختی و ماتریس میرایی مماسی در زمان  $t = (k-1)\Delta t$  می‌باشد. معادله (۱) را در زمان  $t = (k-1)\Delta t$  و  $t = k\Delta t$  می‌توان بصورت زیر نوشت.

$$M\ddot{X}_{k-1} + F_{D_{k-1}} + F_{S_{k-1}} = Me\ddot{X}_{g_{k-1}} + Du_{k-1} \quad (۴)$$

$$M\ddot{X}_k + F_{D_k} + F_{S_k} = Me\ddot{X}_{g_k} + Du_k \quad (۵)$$

معادله نمودی حرکت در فاصله زمانی  $(k-1)\Delta t$  تا  $k\Delta t$  بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$M\Delta\ddot{X}(t) + C^*\Delta\dot{X}(t) + K^*\Delta X(t) = \Delta P(t) \quad (۶)$$

$$\Delta\ddot{X}(t) = \ddot{X}_k - \ddot{X}_{k-1} \quad (۷)$$

$$\Delta\dot{X}(t) = \dot{X}_k - \dot{X}_{k-1} \quad (۸)$$

$$\Delta X(t) = X_k - X_{k-1} \quad (۹)$$

$$\Delta P(t) = p_k - P_{k-1} \quad (۱۰)$$

$$P_k = Me\ddot{X}_{g_k} + Du_k \quad (۱۱)$$

$$P_{k-1} = Me\ddot{X}_{g_{k-1}} + Du_{k-1} \quad (۱۲)$$

در معادله فوق، ماتریس میرایی مماسی ( $C^*$ ) و ماتریس جرم ( $M$ ) جرم ثابت بوده ولی ماتریس سختی مماسی ( $K^*$ )، در هر لحظه تغییر می‌کند. برای حل معادله نمودی حرکت از روشهای مختلف عددی می‌توان استفاده کرد که در این مقاله از روش  $\beta$ -Newmark استفاده شده است [۲۴].

### ۳- الگوریتم تعیین بردار نیروی کنترل

در این مقاله از الگوریتم کنترل بهینه آنی توسعه داده شده توسط جغتایی و محبی [۲۵] برای تعیین نیروی کنترل سازه‌های با رفتار غیرخطی استفاده شده است. در این روش بردار نیروی کنترل در هر لحظه بصورت تابعی از جابجایی، سرعت و شتاب سازه بصورت زیر نوشته می‌شود.

بسیار محدود بوده و همچنین در طراحی این سیستم پارامترهای TMDها بر اساس یکسری فرضیات خاص بوده است، بنابراین در این مقاله به طراحی و بررسی کارایی مکانیزم AMTMD در قابهای غیرخطی پرداخته شده است. جهت طراحی بهینه‌ی این سیستم، روش بهینه‌سازی ارائه شده توسط محبی و همکارانش [۹] برای طراحی بهینه‌ی MTMD در سازه‌های خطی، به منظور طراحی سیستم کنترلی AMTMD در سازه‌های غیرخطی توسعه داده شده است. برای این منظور قاب برشی ۸ طبقه با رفتار دو خطی هیستریسیس تحت اثر زلزله‌ی اغتشاش سفید قرار گرفته و به طراحی AMTMD پرداخته شده است. همچنین تأثیر عوامل مختلف مانند تعداد ATMDها، درصد جرم و رکود زلزله‌های مختلف، در کارایی AMTMD در سازه‌های غیرخطی بررسی شده است.

### ۲- معادله حرکت سیستم سازه-AMTMD

#### AMTMD

سیستمی متشکل از سازه‌ی اصلی به صورت قاب برشی  $n$  درجه آزادی با رفتار غیرخطی، تحت شتاب پایه  $\ddot{X}_g$  به همراه تعداد  $N_{md}$  میراگر جرمی منفرد با مشخصات دینامیکی متفاوت که میراگرهای جرمی در طبقه آخر سازه اصلی و به صورت موازی نصب شده‌اند، در نظر گرفته شده است. معادله حرکت به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$M\ddot{X}(t) + F_D(\dot{X}(t)) + F_S(X(t)) = Du(t) + Me\ddot{X}_g \quad (۱)$$

که در آن  $t$  زمان،  $\ddot{X}_g$  شتاب زمین،  $X$  بردار جابجایی،  $\dot{X}$  بردار سرعت،  $\ddot{X}$  بردار شتاب،  $M$  ماتریس جرم  $(n+N_{md}) \times (n+N_{md})$  بعدی،  $F_D$  بردار نیروی میرایی  $(n+N_{md})$  بعدی،  $F_S$  بردار نیروی مقاوم  $(n+N_{md})$  بعدی،  $e = [-1, -1, \dots, -1]^T$  بردار تبدیل شتاب زمین  $(n+N_{md})$  بعدی،  $D$  ماتریس موقعیت TMDها  $(n) \times (N_{md})$  بعدی و  $u(t)$  بردار نیروی کنترل  $(N_{md})$  بعدی می‌باشد. مقدار نیروی‌های میرایی و سختی را در هر گام می‌توان بصورت زیر بیان کرد.

$$F_{D_k} = F_{D_{k-1}} + C_{k-1}^* [\dot{X}_k - \dot{X}_{k-1}] \quad (۲)$$

$$F_{S_k} = F_{S_{k-1}} + K_{k-1}^* [X_k - X_{k-1}] \quad (۳)$$

یک درصد جرمی مشخص بوده بطوریکه ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه تا یک حد معینی کاهش یابد. در این حالت طراحی بهینه‌ی AMTMD به صورت یک مساله بهینه‌سازی نوشته می‌شود که در آن پارامترهای TMDها (شامل سختی و میرایی) و ماتریسهای وزنی بعنوان متغیرهای مساله‌ی بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. در صورتیکه پارامترهای  $i$  امین TMD شامل سختی  $k_{d_j}$ ، میرایی  $c_{d_j}$  و جرم  $m_{d_j}$  باشد و از جرم یکسان برای TMDها استفاده شود، همچنین ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه و ATMDها، بعنوان محدودیت در مساله‌ی بهینه‌سازی اعمال و در این حالت مساله بهینه‌سازی بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$\text{Find: } c_{d_1}, k_{d_1}, \dots, c_{d_{N_{TMD}}}, k_{d_{N_{TMD}}}, Q_1, Q_2, Q_3, R \quad (17)$$

$$\text{Minimize: } F_{\max} \quad (18)$$

$$\text{Subject to: } Y_{\max} \leq D_{L1} \quad (19)$$

$$Y_{\max(TMD)} \leq D_{L2} \quad (20)$$

که:

$$F_{\max} = \max \left( |U_k(i)|, k=1,2,\dots,k_{\max} \right), \quad i=1,2,\dots,N_{TMD}$$

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

$$Y_{\max(TMD)} = \max \left( |Y_{TMD,i}| \right) i=1,2,\dots,N_{TMD}$$

$Y_{\max}$  حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی سازه و  $y(i)$  تغییر مکان نسبی طبقه  $i$  ام می‌باشد.  $k_{\max}$  بیشینه‌ی گام زمانی تحلیل،  $Y_{\max(TMD)}$  حداکثر تغییر مکان جانبی نسبی TMDها،  $D_{L1}$  و  $D_{L2}$  محدودیتی است که بترتیب برای ماکزیمم جابجایی جانبی نسبی سازه و TMDها در نظر گرفته می‌شود. اعمال محدودیت برای حداکثر تغییر مکان جانبی میراگرها،  $D_{L2}$ ، کارایی مکانیزم AMTMD را تحت تاثیر قرار می‌دهد، طوریکه افزایش مقدار این پارامتر تا یک مقدار مشخصی باعث بهبود عملکرد AMTMD خواهد شد. در نمونه‌های عملی این مقدار بر اساس مشخصات کارخانه‌ی سازنده‌ی میراگر انتخاب می‌گردد. همچنین

$$U_k = -R^{-1} D^T K_{n_k}^{*-T} (Q_1 X_k + a_4 Q_2 \dot{X}_k + a_1 Q_3 \ddot{X}_k) \quad (13)$$

$$K_{n_k}^* = a_1 M + a_4 C_{k-1}^* + K_{k-1}^* \quad (14)$$

$$a_1 = \frac{1}{\delta(\Delta t)^2}; a_2 = \frac{1}{\delta \Delta t}; a_3 = \frac{1}{2\delta} \quad (15a,b,c)$$

$$a_4 = \frac{\gamma}{\delta \Delta t}; a_5 = \frac{\gamma}{\delta}; a_6 = \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\delta} - 1 \right) \quad (16a,b,c)$$

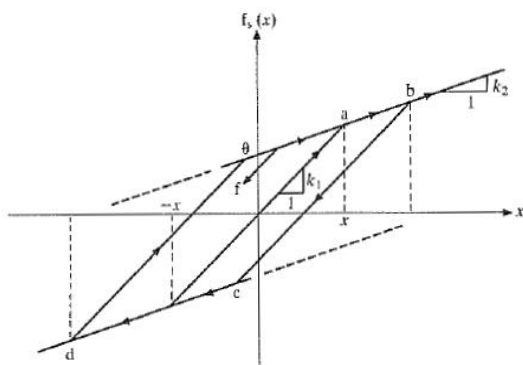
در معادله  $\delta$  و  $\gamma$  پارامترهای روش نیومارک می‌باشند که باید بصورت مناسبی جهت پایداری در حل معادلات ارتعاش انتخاب شوند [۲۳]. حرف (T) به منظور ترانسپوز کردن بردار،  $Q_3, Q_2, Q_1$  ماتریس‌های وزنی نیمه مثبت معین  $(n + N_{TMD})$  بعدی و  $R$  ماتریس وزنی مثبت معین  $(N_{TMD} \times N_{TMD})$  بعدی می‌باشند. در معادله فوق مقدار  $K_{n_k}^*$  در هر گام زمانی تغییر می‌کند. مقدار نیروی کنترل در معادله‌ی فوق وابسته به مقادیر ماتریس‌های وزنی می‌باشد که برای بدست آوردن ماتریس‌های وزنی استراتژیهای مختلفی ارائه شده است [۲۶-۲۷]. جفتائی و محبی از تکنیک بهینه‌سازی برای تعیین ماتریس‌های وزنی استفاده کردند که ویژگی این روش سیستماتیک بودن و همچنین مینیمم کردن ماکزیمم نیروی کنترل مورد نیاز برای کاهش پاسخ سازه تا یک حد مشخصی می‌باشد [۲۵]. در این مقاله هم برای تعیین ماتریس‌های وزنی از این روش استفاده شده است.

#### ۴- طراحی بهینه‌ی AMTMD

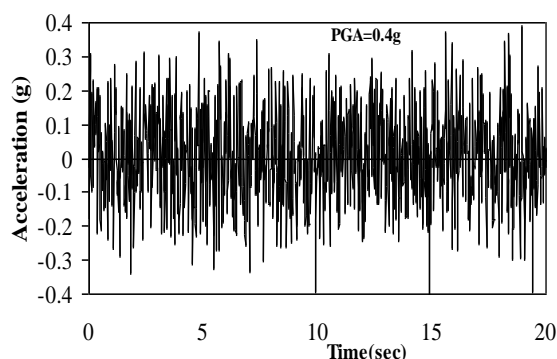
طراحی مکانیزم AMTMD می‌تواند بر اساس معیارهای مختلفی صورت پذیرد. با توجه به اینکه در سازه‌های با رفتار غیرخطی تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه به عنوان معیار خرابی در نظر گرفته می‌شود لذا در این پژوهش از معیار کنترل تغییر مکان جانبی نسبی طبقات سازه به عنوان معیار ایمنی در طراحی AMTMD استفاده شده است. در طراحی این مکانیزم، کاهش تغییر مکان جانبی نسبی طبقات همزمان با مینیمم کردن ماکزیمم نیروی کنترل مورد نیاز در محرکها می‌باشد. بنابراین در این مقاله، تابع هدف در طراحی مکانیزم AMTMD مینیمم کردن ماکزیمم نیروی کنترل مورد نیاز ATMDها،  $F_{\max}$  به ازای

برابر  $PGA=0.4g$ ، مطابق شکل (۲)، قرار گرفته و به طراحی بهینهی AMTMD پرداخته شده است.

جدول (۱) ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی 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  $Y_{yielding} = 2.4 \text{ cm}$  بوده و وارد ناحیه غیرخطی شده‌اند.



شکل ۱- منحنی هیستریسیس دو خطی



شکل ۲- تاریخچه زمانی ارتعاش  $w_1(t)$

### ۱-۵ طراحی AMTMD با $N_{tmd} = 5$ و درصد جرمی $\mu = 2.5\%$

برای توضیح روش پیشنهادی برای طراحی بهینهی AMTMD، قاب ۸ طبقه تحت ارتعاش  $w_1(t)$  در حالتی که پنج میراگر جرمی با درصد جرمی برابر  $\mu = 2.5\%$  در طبقه‌ی آخر به صورت موازی قرار گرفته‌اند، در نظر گرفته شده است که  $\mu$  برابر نسبت جرم AMTMD به جرم کل سازه می‌باشد. در صورتیکه این مکانیزم بصورت غیرفعال طراحی شود به ازای مقادیر مختلف درصد جرمی، ماکزیمم جابجایی جانبی نسبی طبقات سازه در جدول (۱) آورده

انتخاب مقدار برای  $DL_1$  بر اساس هدف مورد نظر از کاربرد سیستم کنترل تعیین می‌شود.

برای حل مسأله‌ی بهینه‌سازی فوق با توجه به تعداد زیاد متغیرها و همچنین غیرخطی بودن معادلات از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در این مقاله، با توجه به اینکه تابع هدف در طراحی مکانیزم AMTMD مینیمم کردن ماکزیمم نیروی کنترل مورد نیاز ATMDها برای کاهش ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه تا یک حد معینی میباشد، لذا حداکثر نیروی کنترل بستگی به افزایش مقدار تقاضا جهت کاهش ماکزیمم جابجایی نسبی سازه، به ازای یک درصد جرمی مشخص دارد که ممکن است از ظرفیت محرک‌ها بیشتر باشد. معادلات فوق با فرض عدم اشباع ظرفیت محرک‌ها نوشته شده است. در صورت اشباع ظرفیت محرک‌ها، برای حل این مشکل در روش مورد استفاده در این مقاله می‌توان ظرفیت محرک را به عنوان محدودیت در مسأله بهینه‌سازی اعمال نمود.

### ۵- مثال عددی

جهت توضیح روش پیشنهادی برای طراحی بهینهی AMTMD و همچنین بررسی کارایی AMTMD در کاهش پاسخ سازه‌های غیرخطی، قاب برشی ۸ طبقه‌ی با رفتار هیستریسیس دو خطی مطابق شکل (۱) در نظر گرفته شده است. برای همه طبقات سختی الاستیک  $k_1 = 340400 \text{ kN/m}$ ، سختی ثانویه  $k_2 = 34040 \text{ kN/m}$ ، جرم  $m = 345.6 \text{ ton}$ ، ضریب میرایی  $c = 734.3 \text{ kN Sec/m}$  می‌باشد. در تغییر مکان جانبی نسبی  $Y_{yielding} = 2.4 \text{ cm}$  تسلیم در طبقات اتفاق می‌افتد. نتایج بدست آمده از تحلیل غیر خطی سازه کنترل نشده و سازه کنترل شده با TMD و MTMD و سیستم کنترل فعال انطباق مناسبی با نتایج مراجع [۲۸-۳۰] دارد که صحت مدل سازی و تحلیل‌های انجام شده را نشان می‌دهد. این مقایسه‌های مربوط به صحت سنجی به علت محدودیت در حجم در متن مقاله گنجانیده نشده است.

برای اینکه مکانیزم AMTMD در مقابل زلزله‌های مختلف مؤثر باشد در این مقاله سازه در مقابله تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید،  $w_1(t)$ ، با بیشینه‌ی شتاب ارتعاش

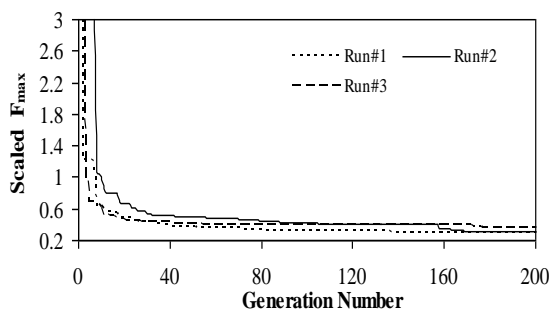
$$P(x_i) = \frac{F(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_{ind}} F(x_i)} \quad (24)$$

که در آن  $P(x_i)$  احتمال انتخاب کروموزوم  $\lambda_m$ ،  $F(x_i)$  شایستگی کروموزوم  $\lambda_m$  و  $N_{ind}$  تعداد کروموزوم در هر جمعیت است. برای عملگر تولید مثل، روش تولید مثل داخلی استفاده شده است که در این روش نوزاد براساس ترکیب خطی دو کروموزوم والد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$O_{1,2} = P_1 + \alpha(P_2 - P_1) \quad (25)$$

$P_1$  و  $P_2$  متغیرهای کروموزوم‌های والد،  $O_{1,2}$  ژن‌های کروموزوم نوزاد و  $\alpha$  ضریب مقیاس است که به طور تصادفی و معمولا در فاصله‌ی  $[-0.25, 1.25]$  برای تعیین هر متغیر کروموزوم نوزاد انتخاب می‌شود [۳۲]. پارامترهای الگوریتم ژنتیک بصورت زیر انتخاب شده است:

0.05=درصد جهش، 0.9=درصد جایگزینی، تعداد جمعیت در هر نسل برابر 25، 200=تعداد کل نسل‌ها. همچنین حداکثر تغییر مکان جانبی TMDها برابر  $D_{L2} = 150$  cm در نظر گرفته شده است. شکل (۳) نحوه‌ی همگرایی الگوریتم ژنتیک را برای سه بار حل مساله نشان می‌دهد. همانطوریکه از نتایج مشخص می‌شود علی‌رغم تعداد زیاد متغیرها (۲۸ متغیر)، الگوریتم ژنتیک در تعداد نسل پایین و در نتیجه سرعت همگرایی زیاد به جواب بهینه رسیده است. مقدار تابع هدف (ماکزیمم نیروی کنترل ATMDها) با افزایش تعداد نسل، کاهش یافته یا ثابت بوده است که به خاطر استفاده از استراتژی نخه‌گرایی می‌باشد. همچنین هر سه بار اجرا به جواب بهینه‌ی تقریباً نهایی یکسانی رسیده است.



شکل ۳- همگرایی الگوریتم ژنتیک در نسل‌های مختلف برای سه بار حل مساله

شده است. مشاهده می‌شود حداکثر جابجایی نسبی سازه با استفاده از میراگر جرمی چندگانه (MTMD) بازای درصد جرمی  $\mu=8\%$  به  $Y_{max}=1.35$  cm کاهش یافته است. برای توضیح روش پیشنهادی برای طراحی بهینه‌ی AMTMD، این مکانیزم طراحی می‌شود که بازای درصد جرمی  $\mu=2.5\%$  و حداقل نیروی کنترل، ماکزیمم جابجایی نسبی سازه به  $Y_{max}=1.35$  cm کاهش یابد. برای حل مساله، ماتریس‌های وزنی  $Q_1, Q_2, Q_3$  به شکل قطری با درایه‌های غیرمنفی  $q_i$  زیر در نظر گرفته شده‌اند.

$$Q_1 = [q_i] \quad (21)$$

$$q_i = q_1 \quad i=1,2,\dots,n$$

$$q_i = q_{1-i} \quad i=n+1, n+2, \dots, n+N_{tmd}$$

$$Q_2 = [q_i] \quad (22)$$

$$q_i = q_2 \quad i=1,2,\dots,n$$

$$q_i = q_{2-i} \quad i=n+1, n+2, \dots, n+N_{tmd}$$

$$Q_3 = [q_i] \quad (23)$$

$$q_i = q_3 \quad i=1,2,\dots,n$$

$$q_i = q_{3-i} \quad i=n+1, n+2, \dots, n+N_{tmd}$$

همچنین ماتریس R بصورت  $R = \Gamma [I]_{N_{TMD} \times N_{TMD}}$  انتخاب شده است که که [I] ماتریس واحد می‌باشد. در این مقاله مقدار  $\Gamma$  برابر  $5 \times 10^{-7}$  در نظر گرفته شده است. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از پیکربندی‌های متفاوت برای ماتریس‌های وزنی زیاد در نتایج حاصله تغییر ایجاد نمی‌کند [۲۵]. در این مقاله جهت سادگی محاسبات، بدون ایجاد مشکل در کلیت مساله، ماتریس‌های وزنی به شکل ماتریس قطری در نظر گرفته شده‌اند.

در این حالت مساله بهینه‌سازی ۲۸ متغیر دارد که با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل شده است. در این مقاله، در الگوریتم ژنتیک برای حفظ بهترین جمعیت از فرایند نخه‌گرایی استفاده شده است که درصد کوچکی از جمعیت نسل بعد مستقیماً از جمعیت نسل قبل کپی می‌شود. برای عملگر انتخاب از نمونه برداری تصادفی تک مرحله‌ای [۳۱] استفاده شده که در آن احتمال انتخاب هر کروموزوم برابر است با:

شکل (۵) و منحنی هیستریسیس طبقه اول سازه‌ی کنترل نشده و کنترل شده در شکل (۶) آورده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی نسبی طبقه اول سازه‌ی کنترل شده حدود ۷۰ درصد کاهش داشته است و سازه در ناحیه‌ی خطی نگه داشته شده است.

### ۵-۲- تست AMTMD بهینه شده تحت زلزله‌های غیر طرح

برای بررسی کارایی AMTMD بهینه شده در مقابل زلزله‌های دیگر که متفاوت از زلزله‌ی طرح  $w_1(t)$  است، سیستم سازه-AMTMD طراحی شده تحت  $w_1(t)$ ، در برابر زلزله‌های دورگسل و نزدیک‌گسل قرار گرفته است. رکوردهای El-Centro (PGA=0.34g;1940) و Hachinohe (PGA=0.23g;1968) به عنوان زلزله‌های دور گسل و زلزله‌های Kobe (PGA=0.83g;1995) و Northridge (PGA=0.84g;1994) به عنوان زلزله‌های نزدیک گسل انتخاب گردیده‌اند. در جدول (۳) مقادیر ماکزیمم پاسخ سازه‌ی کنترل نشده در مقابل زلزله‌های تست نشان داده شده است. شکل‌های (۷) و (۸) بترتیب پاسخ‌های نرمال شده سازه‌ی کنترل شده و منحنی هیستریسیس طبقه اول سازه‌ی کنترل نشده و کنترل شده را تحت زلزله‌های تست نشان می‌دهد. پاسخ نرمال شده بزرگتر از ۱، بیانگر اثر منفی روی پاسخ مورد نظر در سازه است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی نسبی که به عنوان تابع هدف انتخاب شده بود، برای همه‌ی زلزله‌های تست (چه نزدیک‌گسل و چه دورگسل) کاهش داشته است. همچنین سایر پاسخ‌های سازه مانند بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی کل و شتاب طبقات نیز کاهش داشته است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که کارکرد AMTMD برای زلزله‌های مختلف متفاوت بوده است به گونه‌ای که در مثال بررسی شده، بهترین کارکرد مربوط به تغییر مکان جانبی نسبی (Drift) تحت اثر زلزله-ی El-Centro بوده است.

جدول ۱- ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه‌ی کنترل شده با مکانیزم MTMD به ازای درصد جرم‌های  $\mu=2, 4, 8$

طبقه	ماکزیمم جابجایی نسبی سازه کنترل نشده (cm)	ماکزیمم جابجایی جانبی نسبی سازه‌ی کنترل شده (cm)		
		$\mu=2\%$	$\mu=4\%$	$\mu=8\%$
1	4.78	1.8	1.52	1.35
2	3.38	1.7	1.45	1.32
3	2.43	1.67	1.37	1.30
4	2.18	1.65	1.38	1.28
5	1.75	1.48	1.34	1.19
6	1.44	1.12	1.12	0.97
7	1.11	0.92	0.84	0.81
8	0.64	0.55	0.61	0.58

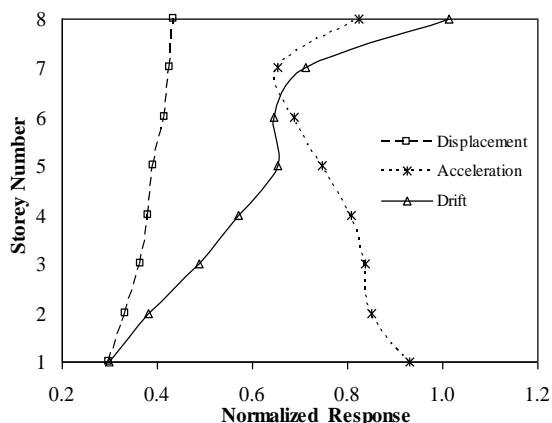
در جدول (۲) مقادیر ماکزیمم پاسخ سازه‌ی کنترل نشده و کنترل شده به ازای  $\mu=2.5\%$  و  $N_{tmd}=5$  تحت ارتعاش  $w_1(t)$  نشان داده شده است. با توجه به نتایج جداول (۱) و (۲) می‌توان گفت که مکانیزم AMTMD با درصد جرم پایین‌تری می‌تواند به همان کارایی مکانیزم MTMD برسد. بدیهی است که می‌توان با افزایش نیروی کنترل به درصدهای کاهش پایین‌تری هم در سیستم AMTMD دست یافت درحالی‌که همانطوریکه از جدول (۱) مشخص است قابلیت MTMD در کاهش پاسخها محدود می‌باشد.

جدول ۲- پاسخ سازه کنترل نشده و کنترل شده با AMTMD به ازای  $\mu=2.5\%$

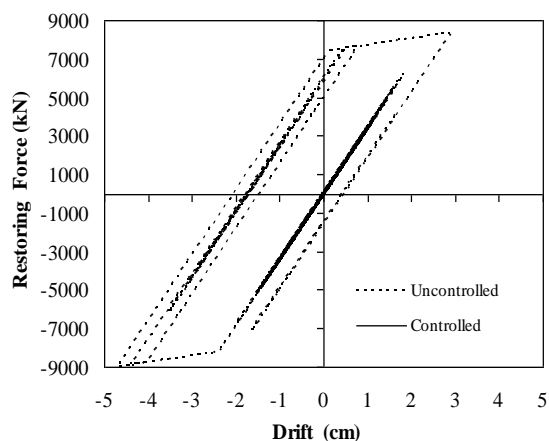
طبقه	ماکزیمم جابجایی جانبی کل سازه (cm)		ماکزیمم جابجایی جانبی نسبی سازه (cm)		ماکزیمم شتاب سازه (cm/sec <sup>2</sup> )	
	کنترل نشده	کنترل شده	کنترل نشده	کنترل شده	کنترل نشده	کنترل شده
	1	4.78	1.35	4.78	1.35	620
2	8.11	2.48	3.37	1.22	663	532
3	10.4	3.49	2.43	1.08	667	549
4	12.37	4.42	2.18	1.00	676	535
5	14.05	5.23	1.75	0.91	766	596
6	15.42	5.92	1.44	0.77	839	642
7	16.42	6.44	1.11	0.63	837	567
8	16.95	6.7	0.63	0.62	797	632

تاریخچه‌ی زمانی نیروی کنترل ATMDها در شکل (۴)، ماکزیمم پاسخ‌های نرمال شده سازه‌ی کنترل شده (نسبت پاسخ سازه‌ی کنترل شده به پاسخ متناظر سازه‌ی کنترل نشده) برای طبقات مختلف تحت اثر ارتعاش  $w_1(t)$  در

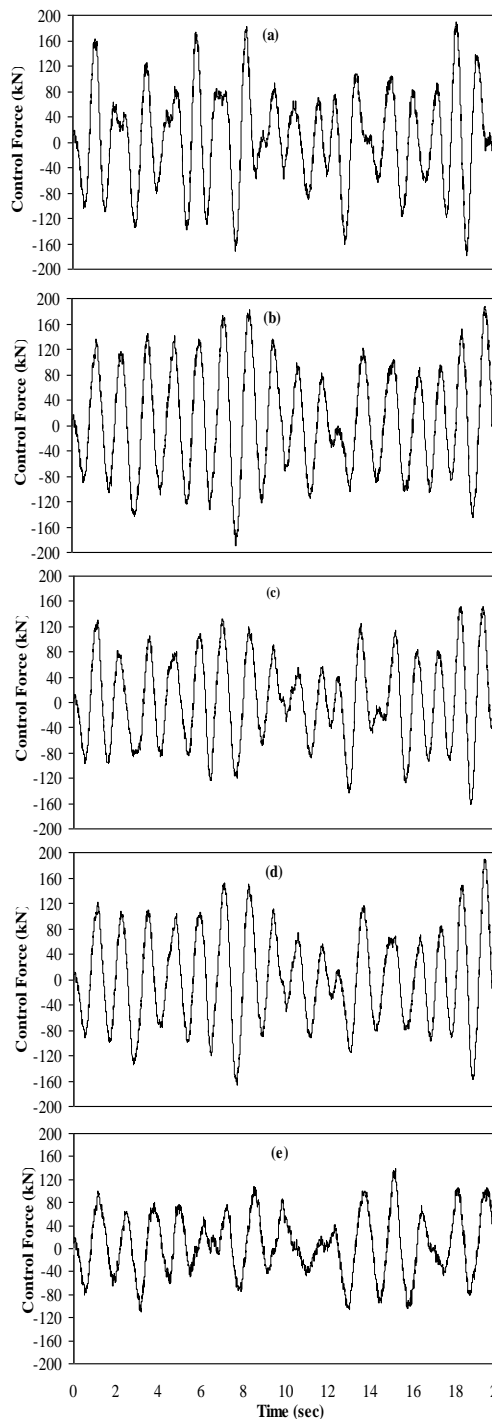
طراحی منطقه یا ترکیبی از زلزله‌های متناسب با شرایط لرزه‌خیزی منطقه طبق آیین‌نامه‌های زلزله استفاده نمود. در سازه‌ی کنترل نشده تحت زلزله‌های تست Hachinohe، El-Centro، Northridge و Kobe بترتیب ۴،۵،۴ و ۷ طبقه اول وارد ناحیه غیرخطی شده و در حالت کنترل شده تحت ارتعاش Hachinohe و El-Centro کلیه طبقات در ناحیه خطی باقی مانده‌اند و تحت ارتعاش Northridge و Kobe بترتیب ۴ و ۵ طبقه اول وارد ناحیه غیرخطی شده‌اند.



شکل ۵ - پاسخ‌های نرمال شده‌ی سازه‌ی کنترل شده با  $\mu = 2.5$  تحت ارتعاش  $w_1(t)$



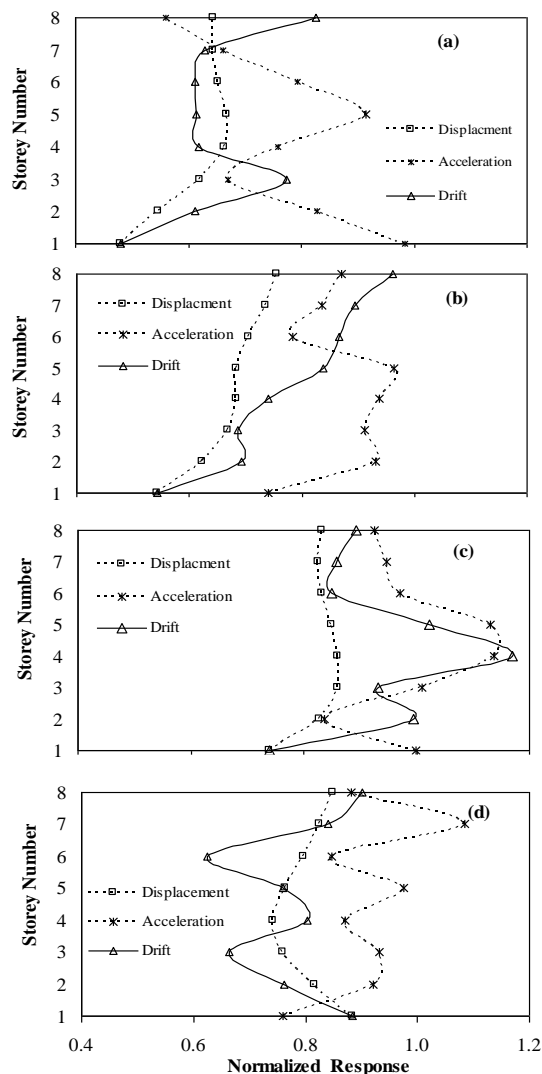
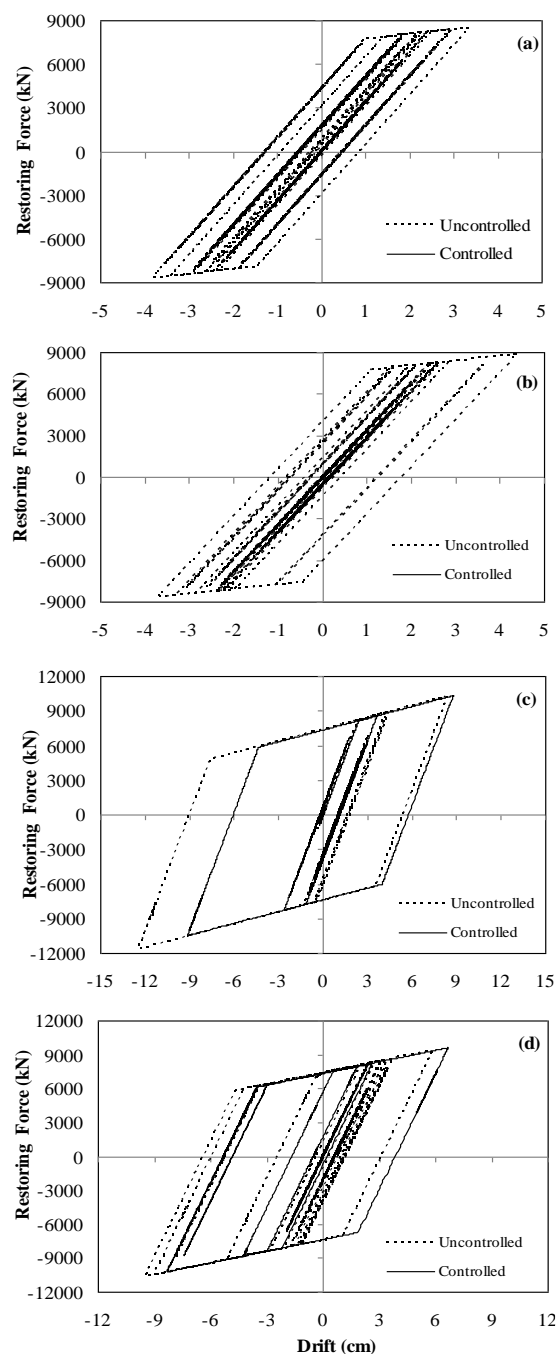
شکل ۶ - منحنی هیستریسیس طبقه اول سازه‌ی کنترل شده و کنترل نشده تحت ارتعاش  $w_1(t)$



شکل ۴ - تاریخچه زمانی نیروهای کنترل ATMDها  
TMD#1(a) TMD#2(b) TMD#3(c) TMD#4(d) TMD#5(e)

با توجه به اینکه عملکرد AMTMD وابسته به مشخصات زلزله ورودی می‌باشد، لذا در کاربردهای عملی برای دست-یابی به عملکرد بهتر و موثرتر مکانیزم AMTMD، بایستی در طراحی AMTMD از رکورد زلزله‌ی مناسبی نظیر رکورد





شکل ۷- پاسخ‌های نرمال شده‌ی سازه‌ی کنترل شده با  $\mu = 2.5$  تحت زلزله‌های تست Kobe (d) Northridge (c) Hachinohe (b) El-Centro (a)

جدول ۳- مقادیر ماکزیمم پاسخ سازه کنترل نشده در مقابل زلزله‌های تست

تحریک	ماکزیمم جابجایی کل (cm)	ماکزیمم جابجایی نسبی (cm)	ماکزیمم شتاب ( $cm/s^2$ )
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

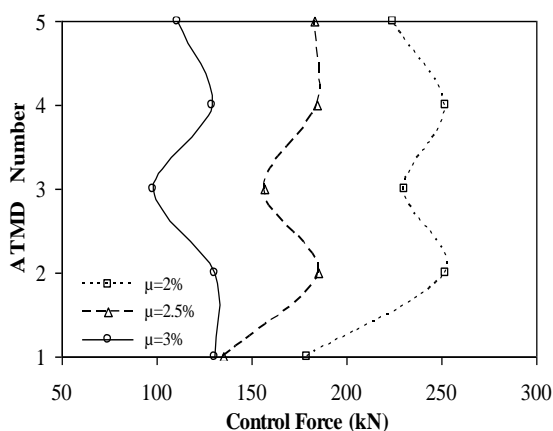
شکل ۸- منحنی‌های هیسترسیس طبقه اول سازه کنترل نشده و کنترل شده به ازای درصد جرم  $\mu = 2.5\%$  تحت زلزله‌های (a) Hachinohe (b) El-Centro (c) Northridge (d) Kobe

### ۵-۳- بررسی اثر جرم و تعداد TMD بر کارایی

#### AMTMD

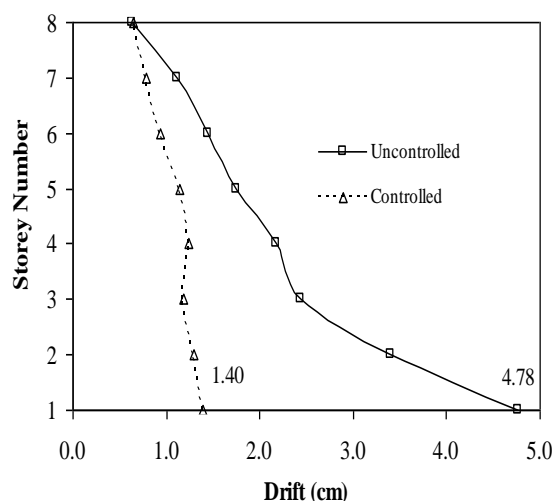
برای بررسی تاثیر درصد جرم بر عملکرد مکانیزم AMTMD و مقدار نیروی کنترل، مشابه روش توضیح داده شده در بخش قبل، برای  $\mu = 2, 2.5, 3$  در حالتی که پنج TMD در طبقه آخر و به صورت موازی قرار گرفته

ماکزیمم نیروی کنترل ATMDها، جهت کاهش ماکزیمم جابجایی جانبی نسبی سازه نظر تحت ارتعاش  $w_1(t)$  حل گردیده است. در جداول (۴) تا (۶) ماکزیمم جابجایی جانبی نسبی سازه و ماکزیمم نیروی کنترل ATMDها نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که طبق پیش-بینی، برای کاهش یکسان ماکزیمم جابجایی نسبی سازه به ازای یک درصد جرمی مشخص، افزایش تعداد ATMDها، باعث کاهش ماکزیمم نیروی کنترلی ATMDها می‌شود. بعنوان مثال AMTMD به ازای  $\mu = 2.5\%$  جهت کاهش ماکزیمم جابجایی نسبی به  $1.4 \text{ cm}$  در حالت نصب یک، سه و پنج ATMD به ترتیب به مقادیر ماکزیمم نیروی کنترل  $F_{\max(\text{ATMD})} = 730, 270, 190 \text{ kN}$  نیاز است. علاوه بر ماکزیمم نیروی کنترل مورد نیاز در مکانیزم AMTMD مقدار میانگین نیروی کنترل همه‌ی ATMDها می‌تواند به عنوان معیاری برای بررسی اثر افزایش تعداد ATMDها مورد استفاده قرار گیرد. بعنوان مثال همانطوریکه در جدول (۵) نشان داده شده است در سیستم AMTMD به ازای  $\mu = 2.5\%$  میانگین نیروی کنترل مورد نیاز برای تعداد یک، سه و پنج ATMD به ترتیب برابر  $F_{\text{average}(\text{ATMD})} = 198, 138, 98 \text{ kN}$  می‌باشد که نشان می‌دهد افزایش تعداد ATMD علاوه بر کاهش ماکزیمم نیروی کنترل، باعث کاهش میانگین نیروی کنترل و در نتیجه کاهش ظرفیت محرکها و انرژی مورد نیاز می‌گردد.



شکل ۱۰- ماکزیمم نیروی کنترل ATMDها به ازای درصد جرم‌های  $\mu = 2, 2.5, 3\%$  جهت کاهش ماکزیمم جابجایی نسبی به  $Y_{\max} = 1.4 \text{ cm}$

است به طراحی بهینه‌ی AMTMD برای کاهش یکسان ماکزیمم جابجایی نسبی سازه به  $Y_{\max} = 1.4 \text{ cm}$  پرداخته شده است. سازه‌ی مورد نظر تحت ارتعاش  $w_1(t)$  قرار گرفته است و پارامترهای بهینه‌ی سختی، میرایی و مقادیر ماتریس‌های وزنی تعیین شده‌اند. شکل (۹) ماکزیمم جابجایی نسبی طبقات سازه‌ی کنترل شده و کنترل نشده را تحت اثر زلزله‌ی  $w_1(t)$  نشان می‌دهد که ماکزیمم جابجایی نسبی حدود  $70\%$  درصد کاهش داشته است. در شکل (۱۰) ماکزیمم نیروی کنترل مورد نیاز ATMDها، به ازای  $\mu = 2, 2.5, 3\%$  جهت کاهش ماکزیمم جابجایی جانبی نسبی به  $1.4 \text{ cm}$  نشان داده شده است.



شکل ۹- ماکزیمم جابجایی نسبی طبقات در حالت کنترل شده و کنترل نشده

با توجه به شکل‌های (۹) و (۱۰) واضح است که جهت کاهش ماکزیمم جابجایی نسبی تا یک مقدار معین، افزایش درصد جرمی باعث کاهش ماکزیمم نیروی کنترل مورد نیاز ATMDها شده است بطوریکه برای  $\mu = 2, 2.5, 3\%$  ماکزیمم نیروی کنترل به ترتیب برابر  $252 \text{ kN}$ ،  $186$  و  $131$  می‌باشد.

برای بررسی اثر تعداد ATMDها بر کارایی مکانیزم AMTMD، به طراحی بهینه‌ی AMTMD در حالت نصب یک، سه و پنج ATMD به صورت موازی در طبقه آخر سازه، به ازای درصد جرم‌های  $\mu = 1.5, 2.5, 3\%$  پرداخته شده است. مساله‌ی بهینه‌سازی با هدف کمینه کردن

نصب کمتری همراه با راحتی نصب و هزینه های نگهداری کمتری می باشند. لذا قابلیت اطمینان بیشتری از نظر عملکرد نیز تضمین خواهد شد.

۶-

۷- نتیجه گیری

در این مقاله به طراحی بهینه و بررسی کارایی میراگر جرمی چندگانه‌ی فعال (AMTMD) در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های غیرخطی هیستریسیس پرداخته شده است. در طراحی بهینه‌ی مکانیزم AMTMD، تاثیر پارامترهای مختلفی نظیر جرم AMTMD، تعداد ATMD ها و محتوای فرکانسی زلزله‌ها بررسی شده است. برای تعیین مقادیر بهینه‌ی پارامترهای ATMD ها در سازه‌های چند درجه آزادی غیرخطی، روشی پیشنهاد شده که مبتنی بر تعریف یک مساله‌ی بهینه‌سازی با هدف مینیمم‌سازی ماکزیمم نیروی کنترل مورد نیاز ATMD ها جهت کاهش ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی سازه تا یک حد مشخص و حل آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌باشد. در مساله‌ی بهینه‌سازی، محدودیتهایی همچون مقید کردن ماکزیمم تغییر مکان جانبی نسبی ATMD ها به عنوان قیود مساله‌ی بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از طراحی AMTMD بهینه برای یک سازه‌ی ۸ طبقه‌ی قاب برشی تحت اثر ارتعاش اغتشاش سفید و تست آن تحت زلزله‌های مختلف و همچنین تحلیل‌های عددی مربوط به بررسی اثر جرم و تعداد ATMD ها می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد.

- روش پیشنهادی برای طراحی بهینه‌ی AMTMD با استفاده از الگوریتم ژنتیک، روشی موفق در تعیین پارامترهای ATMD ها بوده که دارای دقت و سرعت همگرایی بالایی در طراحی بهینه‌ی AMTMD با تعداد زیاد متغیرها می‌باشد.
- با توجه به طراحی بهینه‌ی AMTMD بازای درصد جرم‌های مختلف (( $\mu=2, 2.5, 3$ ))

جدول ۴- ماکزیمم نیروی کنترل و جابجایی نسبی به ازای  $\mu=1.5\%$  با هدف کمینه کردن ماکزیمم نیروی ATMD ها

تعداد ATMD ها	ماکزیمم جابجایی نسبی سازه‌ی کنترل نشده (cm)	ماکزیمم جابجایی نسبی سازه‌ی کنترل شده (cm)	ماکزیمم نیروی کنترل ATMD ها (kN)
1	4.7	2	100
3	4.7	1.99	84
5	4.7	2.02	50

جدول ۵- ماکزیمم نیروی کنترل و جابجایی نسبی به ازای  $\mu=2.5\%$  با هدف کمینه کردن ماکزیمم نیروی ATMD ها

تعداد ATMD ها	ماکزیمم جابجایی نسبی سازه‌ی کنترل نشده (cm)	ماکزیمم جابجایی نسبی سازه‌ی کنترل شده (cm)	ماکزیمم نیروی کنترل ATMD ها (kN)	میانگین نیروی کنترل ATMD ها (kN)
1	4.7	1.4	730	198
3	4.7	1.37	270	138
5	4.7	1.4	190	98

جدول ۶- ماکزیمم نیروی کنترل و جابجایی نسبی به ازای  $\mu=3\%$  با هدف کمینه کردن ماکزیمم نیروی ATMD ها

تعداد ATMD ها	ماکزیمم جابجایی نسبی سازه‌ی کنترل نشده (cm)	ماکزیمم جابجایی نسبی سازه‌ی کنترل شده (cm)	ماکزیمم نیروی کنترل ATMD ها (kN)
1	4.7	1	920
3	4.7	0.99	340
5	4.7	0.99	300

با توجه به نتایج فوق عیب عمده‌ی مکانیزم ATMD نیاز به یک منبع بزرگ انرژی خارجی می‌باشد که ممکن است به هنگام زلزله در دسترس نباشند، جهت بهبود عملکرد ATMD تحت اثر ارتعاش زلزله، از این مکانیزم بصورت میراگر جرمی تنظیم شده‌ی فعال چندگانه (AMTMD) استفاده گردیده است. همچنین افزایش تعداد ATMD ها در مکانیزم AMTMD در مقایسه با ATMD منفرد، علاوه بر این که باعث کاهش ماکزیمم نیروی کنترلی جهت کاهش ماکزیمم جابجایی نسبی سازه شده، منجر به استفاده از ATMD های با جرم و حجم کمتر شده است که بفضای

- جهت کاهش یکسان ماکزیمم جابجایی نسبی، نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد جرم منجر به کاهش ماکزیمم نیروی کنترل مورد نیاز ATMDها می‌شود که این مساله نشان دهنده‌ی افزایش کارایی سیستم AMTMD با افزایش درصد جرم می‌باشد. بطوریکه برای  $2, 2.5, 3 = \mu$  ماکزیمم نیروی کنترل به ترتیب برابر  $131, 186, 252$  kN می‌باشد.
- سیستم AMTMD با تعداد متفاوت ATMDها در مقایسه با ATMD منفرد جهت کاهش یکسان ماکزیمم جابجایی نسبی سازه به ازای درصد جرم مشخص، به ماکزیمم نیروی کنترلی کمتری نیاز دارد. بعنوان مثال مکانیزم AMTMD به ازای  $\mu = 2.5\%$ ، جهت کاهش ماکزیمم جابجایی نسبی به  $1.4$  cm در حالت نصب یک، سه و پنج ATMDها به ترتیب به ماکزیمم نیروی کنترل  $F_{\max(ATMD)} = 730, 270, 190$  kN نیاز دارد.
- تست AMTMD تحت اثر زلزله‌های دور گسل و نزدیک گسل نشان می‌دهد که کارایی این مکانیزم در کاهش پاسخ سازه، وابسته به محتوای فرکانسی زلزله می‌باشد. مثلا برای درصد جرمی یکسان  $\mu = 2.5\%$  بیشینه‌ی جابجایی نسبی سازه تحت تحریک زلزله El-Kobe و Northridge، Hachinohe، Centro بترتیب 45، 52، 26 و 12 درصد کاهش داشته است.
- افزایش تعداد ATMDها در مکانیزم AMTMD در مقایسه با ATMD منفرد، علاوه بر کاهش ماکزیمم نیروی کنترل مورد نیاز جهت کاهش یکسان ماکزیمم جابجایی نسبی سازه، باعث کاهش میانگین نیروی کنترل و در نتیجه کاهش انرژی مورد نیاز می‌گردد. بعنوان مثال به ازای  $\mu = 2.5\%$ ، میانگین نیروی کنترل مورد نیاز برای تعداد یک، سه و پنج ATMD به ترتیب برابر  $F_{\text{average(ATMD)}} = 198, 138, 98$  kN می‌باشد.

## ۸- مراجع

- [1] Soong, T., Dargush, G.F., (1997). "Passive energy dissipation systems in structural engineering". John Wiley & Sons, Chichester.
- [2] Chen, G., Wu, J., (2001). "Optimal placement of multiple tuned mass dampers for seismic structures". Journal of Structural Engineering, ASCE, 127, pp. 1054-1062.
- [3] Igusa, T., Xu, K., (1994). "Vibration control using multiple tuned mass damper". Journal of Sound and Vibration, 175, pp. 491-503.
- [4] Li, C., (2000). "Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration". Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29, pp. 1405-1421.
- [5] Kareem, A., Klein, S., (1995). "Performance of multiple tuned mass dampers under random loadings". Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(2), pp. 348-361.
- [6] Hong, N., Watanitchai, P., (2005). "Design of multiple tuned mass dampers by using numerical optimizer". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34, pp. 125-144.
- [7] Li, C., (2002). "Optimum multi tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on DDMF and ADMF". Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 31, pp. 897-919.
- [8] Zuo, L., Nayfeh, S.A., (2005). "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.

- [۹] محبی، م.، شاکری، ک و مجذوب، ح.، (۱۳۹۱). "روشی بر پایه استفاده از الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم شده‌ی چندگانه تحت ارتعاش زلزله"، مجله علمی - پژوهشی، عمران مدرس، دوره دوازدهم، شماره ۱.
- [10] Chang, JCH., Soong, TT., (1980) "Structural control using active tuned mas damper". Journal Engineering Mechanics, ASCE, 106, pp.1091-1098.
- [11] Ankireddi S., Yang HTY.,(1996) "Simple ATMD control methodology for tall buildings subject to wind loads". Journal of Structural Engineering, ASCE,122, pp.83- 91.
- [12] Yan, N., Wang, CM., Balendra, T.,(1999) "Optimum damper characteristics of ATMD for buildings under wind loads". Journal of Structural Engineering ASCE, 125, pp. 1376 -1383.
- [13] Nagashima, I., (2001) "Optimal displacement feedback control law for active tuned mass damper". Earthquake Engineering Structural Dynamics, 30(8), pp. 1221-1242.
- [14] Shariatmadar, H., Golnargesi, S., Akbarzadeh Totonchi, M.R. (2014) "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.
- [15] Li, Ch., Jinhua, Li., Yan, Qu., (2010) "An optimum design methodology of active tuned mass damper for asymmetric structures". Mechanical Systems and Signal Processing, 24, pp. 746-765.
- [16] Li, C. and Liu, Y., (2002) "Active multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, pp. 1041-1052.
- [17] Li, C. and Liu, Y., (2002) "Active multiple tuned mass dampers for structures under the ground acceleration". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, pp. 1041-1052.
- [18] Li, C., Bilei, Zhu., (2007) " Investigation of response of systems with active multiple tuned mass dampers". Structural Control and Health Monitoring, 14, pp.1138-1154.
- [19] Kumar, A., Poonam, B., Sainib., Sehgal, V.K., (2007) "Active vibration control of structures against earthquakes using modern control theory", ASIAN Journal of Civil Engineering (Building and Housing) Vol. 8(3) , pp. 283-299.
- [20] Li, Ch., Jinhun, Li., Zhiqiang, Yu., Yan, Qu., (2009) "Performance and parametric study of active multiple tuned mass dampers for asymmetric structures under ground acceleration". Journal of Mechanics of Materials and Structures, Vol. 4(3), pp.571-588.
- [21] Li, Ch., Jinhua, Li., Yan, Qu., (2010) " ( An optimum design methodology of active tuned mass damper for asymmetric structures". Mechanical Systems and Signal Processing, 24, pp. 746-765.
- [22] Kevin, K., Wong, F and Gary, C., (1997) "Active control of inelastic structural response during earthquakes". The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 6, pp. 125-149.
- [23] Miao, P., Kevin, F., (2006) "Predictive instantaneous optimal control of inelastic structures based on ground velocity". The Structural Design of Tall and Special Buildings, 15, pp. 307-324.
- [24] Bathe, KJ., (2006) "Finite element procedures". Prentice-Hall, Inc, New Jersey, USA.
- [25].Joghataie, A., Mohebbi, M., (2012) "Optimal controller of nonlinear frames by Newmark and distributed genetic algorithms". Structural Design of Tall and Special Buildings, 21, pp. 77-95.
- [26] Chang, CC., Yang, HTY., (1994) "Instantaneous optimal control of building frames". Journal of Structural Engineering, ASCE;120, pp. 1307-1326.
- [27] Yang, JN., Li, Z and Liu, SC., (1992) "Stable controllers for instantaneous optimal control". Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 118(8), pp. 1612-1630.
- [28] Mohebbi, M., Joghataie, A., (2012) " Designing optimal tuned mass dampers for nonlinear frames by distributed genetic algorithms ". Structural Design of Tall and Special Buildings, 21, pp. 57-76.
- [29] Mohebbi, M., Shakeri, K., Ghanbarpour, Y., Majzub, H., (2013) " Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms for mitigating the seismic response of structures ". Journal of Vibration and Control, 19(4), pp.605-625.
- [30].Joghataie, A., Mohebbi, M., (2011) " Optimal control of nonlinear frames by considering the effect of response feedback ". Scientia, Iranica, 18(6), pp.1170-1178.
- [31] Mühlenbein, H., Schlierkamp-Voosen, D., (1993) "Predictive models for the breeder genetic algorithm: I. Continuous parameter optimization". Evolutionary Computation, 1(1), pp. 25-49.
- [32] Baker, J.E., "Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm". Proc. ICGA, 2, pp. 14-21. [27] Yang, JN., Li, Z and Liu, SC., (1992) "Stable controllers for instantaneous optimal control". Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 118(8), pp. 1612-1630.