مجله علمی- پژوهشی
«عمـــران مـــدرس»
دوره دوازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۱

روشی بر پایه استفاده از الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی چندگانه تحت ارتعاش زلزله

محتشم محبی[1]*، کاظم شاکری[2]، حسین مجذوب[3]

۱- استادیار دانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲- استادیاردانشکده فنی، دانشگاه محقق اردبیلی
۳- مربی دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ملکان

E-mail: mohebbi@uma.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۰۷

چکیده- برای بهبود کارایی و توانایی میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD) در سازه‌های خطی و غیرخطی، استفاده از میراگر جرمی چندگانه (MTMD) با مشخصات دینامیکی متفاوت برای میراگرهای جرمی، پیشنهاد شده است. در این پژوهش یک روش مؤثر برای تعیین پارامترهای بهینه‌ی MTMD در سازه‌های چند درجه‌آزادی خطی پیشنهاد شده که بر پایه‌ی تعریف یک مسئله بهینه‌سازی است که در آن کمینه کردن بیشینه پاسخ سازه به‌عنوان تابع هدف و پارامترهای TMD به‌عنوان متغیرهای مسئله در نظر گرفته شده است. برای حل مسئله بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شده است. برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، یک قاب برشی ۱۰طبقه تحت ارتعاش اغتشاش سفید قرار گرفته و برای مقادیر مختلف درصد جرمی و تعداد مختلف TMD، سامانه میراگر جرمی چندگانه‌ی بهینه طراحی و کارکرد آن در مقابل تحریک‌های لرزه‌ای دورگسل و نزدیک‌گسل آزموده شده است. نتایج به‌دست آمده ساده و مؤثر بودن روش پیشنهاد شده را در طراحی بهینه MTMD، تحت هر ارتعاش خارجی نشان می‌دهد. همچنین بهبود کارایی ساز و کار MTMD با افزایش درصد جرمی آشکار است.

واژگان کلیدی: کنترل غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم‌شده ، میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی چندگانه، بهینه‌سازی.

۱- مقدمه

میراگر جرمی تنظیم‌شده[1] (TMD) یکی از ابزارهای کنترل غیرفعال است که از یک جرم، فنر و میراگر تشکیل شده است. این ساز و کار، انرژی را از سازه اصلی به خود انتقال داده و زمینه اتلاف انرژی را فراهم می‌سازد. مطالعات و بررسی‌های زیادی روی رفتار میراگرهای جرمی تنظیم‌شده و نحوه‌ی کارکرد آن‌ها روی ساختمان‌ها برای کنترل ارتعاشات ناشی از بارهای جانبی انجام شده است [۱]. با وجود این‌که در بسیاری از موارد، TMD یک سامانه مؤثر و عملی برای کنترل ارتعاشات سازه‌ای است؛ ولی کارایی این سامانه کنترلی غیرفعال در تحریکات لرزه‌ای، به‌طور قطعی مشخص نشده است، چون این سامانه در واکنش به تحریکات پایه‌ای زودگذر با دوره‌ی زمانی بسیار کوتاه،

1- Tuned mass damper (TMD)

ناتوان است. کارایی ساز و کار TMD منفرد نسبت به فرکانس طبیعی سازه یا درصد میرایی TMD بسیار حساس است که تنظیم نشدن فرکانس یا بهینه نبودن میرایی، به‌طور چشم‌گیری از کارایی سامانه کنترلی TMD منفرد می‌کاهد. برای برطرف کردن این اشکالات، به‌کارگرفتن میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی چندگانه[1] (MTMD) با مشخصات دینامیکی متفاوت برای هر TMD، پیشنهاد شده است [۲].

میراگرهای جرمی تنظیم‌شده‌ی چندگانه (MTMD) از چندین میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد (TMD) تشکیل شده که این میراگرها می‌توانند به دو شکل موازی و سری، طراحی و در سازه نصب شوند؛ همچنین در یک سامانه سازه‌ای به هر دو حالت یکپارچه (مجتمع در یک مکان) یا توزیع‌شده (پخش‌شده در فضای سازه) به‌کار روند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که کارکرد MTMD به مقدار جرم، تعداد TMDها و دامنه فرکانس طراحی و نحوه توزیع آن‌ها بستگی دارد [۳]. میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی چندگانه برای مودهای مختلف قابل تنظیم است که برای افزایش کارایی لرزه‌ای، میراگرها در موقعیت‌های مختلفی در سازه اصلی کار گذاشته می‌شوند. چنین سامانه‌هایی علاوه بر بهبود کارایی، اغلب نیازمند یک فضای اختصاص داده‌شده برای قرار دادن میراگر نیست. با توجه به سبکی وزن میراگرها در این سامانه، استفاده‌ی نادرست از هر میراگر جرمی تنظیم‌شده سبب ایجاد آثار مضر در پاسخ سازه‌ای نخواهد شد. همچنین کارایی میراگرهای جرمی تنظیم‌شده‌ی چندگانه حساسیت کمتری نسبت به قطعیت پارامترهای سامانه دارد [۵، ٤].

در تحقیقات گذشته برای طراحی MTMD، روش‌ها و رویکردهای گوناگونی وجود داشته است. در مراحل اولیه‌ی طراحی MTMDها برای سادگی تحلیل و روند طراحی، محدودیت‌هایی مانند فرض جرم و نسبت میرایی یکسان برای TMDها در نظر گرفته شده است. با اعمال این محدودیت‌ها مطالعاتی برای بررسی اثر پارامترهای TMDها در کارایی سامانه MTMD در سازه‌های یک‌درجه آزادی تحت تحریک هارمونیک انجام شده است [٤]. در مراحل بعدی، با عمومی‌سازی مسئله طراحی بهینه با چشم‌پوشی از محدودیت‌های طراحی در مورد جرم و نسبت میرایی TMDها، MTMDهایی برای سازه یک‌درجه آزادی تحت نیروی باند- پهن طراحی شده است [٦]. Jangid [۷] روشی را برای تعیین پارامترهای بهینه MTMDها در یک سازه نامیرا تحت تحریک هارمونیک پیشنهاد داد. این روش بر اساس کمینه کردن تغییر مکان سازه‌ی اصلی با روش جست و جوی عددی بود. در روش طراحی پیشنهادشده به‌وسیله‌ی Wu و Chen [۸] یک سامانه MTMD به چندین گروه تقسیم شده که هر گروه شامل چندین میراگر توزیع‌شده در طبقات مختلف است. Chen و Wu [۹] طراحی TMDهای چندگانه در سازه‌های چند درجه‌آزادی را تحت بارهای لرزه‌ای که در آن MTMDها بر اساس چندین مود ارتعاشی سازه تنظیم شده، مطالعه کردند. در روش پیشنهادشده، تعداد میراگرها بر اساس تعداد مودهایی که برای کنترل انتخاب شده بودند تعیین می‌شد. Li [۱۰] کارایی پنج حالت مختلف سامانه MTMD را که شامل ترکیب‌های متفاوتی از پارامترهای TMDها (جرم، سختی و میرایی) بود، با هدف کمینه کردن ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی تغییر مکان و ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی شتاب یک سازه تحت شتاب زمین، مطالعه کرد. Zuo و Nayfeh [۱۱] با طراحی بهینه‌ی میراگر جرمی چندگانه با روش حل عددی، اثر تعداد TMDها و درصد جرمی MTMD بر نحوه کارکرد این سامانه را بررسی کردند. نتایج به دست‌آمده نشان داد که در سامانه کنترلی MTMD با وجود این‌که افزایش تعداد TMDها فقط تا تعداد مشخصی از TMD در

1- Multiple tuned mass damper (MTMD)

بهبود کارایی ساز و کار MTMD مؤثر است، لیکن با افزایش تعداد TMDها قابلیت اعتماد و مقاوم بودن[1] سامانه در مقابل تغییر پارامترهای سازه افزایش می‌یابد. Carneiro *و همکاران* [۱۲] اثر موازی یا سری قراردادن TMDها در ساز و کار MTMD با تابع هدف کمینه‌سازی پاسخ فرکانسی سازه تحت اثر بار هارمونیک را بررسی کردند. در مطالعه *اعتماد سعید و همکاران* [۱۳] مقادیر پارامترهای TMDها در ساز و کار MTMD تحت اثر بار هارمونیک با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و استنتاج فازی پیش‌بینی شد. Moon [۱٤] تأثیر سامانه MTMDهای توزیع‌شده در ارتفاع سازه‌ها را بررسی کرد. تئوری MTMDهای توزیع‌شده در ارتفاع سازه، نه تنها برای کنترل مود اول بلکه برای کنترل کردن مودهای بالاتر نیز استفاده می‌شود که مکان توزیع عمودی TMD برای هر مود بر اساس شکل مودی مربوط تعیین می‌شود. توزیع عمودی TMDهای سامانه MTMD در ارتفاع سازه، سبب افزایش قابلیت اعتماد سامانه کنترلی شده و فضای اشغال‌شده در طبقات بالای سازه‌های بلند مرتبه را که در صورت استفاده از TMD منفرد مورد نیاز است به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد. Dehghan-Niri و همکاران [۱۵] روشی برای طراحی بهینه ساز و کار MTMD با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای سازه، تحت اثر بار هارمونیک ارائه دادند. در این روش برای بررسی کارایی MTMD، کمینه‌سازی بیشینه‌ی ضریب بزرگ‌نمایی تغییر مکان جانبی به‌عنوان تابع هدف انتخاب شده است. همچنین در این مطالعه روشی برای طراحی بهینه MTMD با هدف افزایش مقاوم بودن این سامانه ارائه شده است.

در بیشتر تحقیقات انجام‌شده در رابطه با طراحی بهینه MTMD، عموماً روش‌های طراحی با یک سری فرضیات درباره‌ی پارامترهایی مانند توزیع جرم، سختی و میرایی TMDها و همچنین ارتعاش ورودی به سازه همراه بوده و در حل مسئله بهینه‌سازی نیز از روش‌های تقریبی - استفاده شده است. در این پژوهش روش جامع‌تری برای طراحی بهینه MTMD برای کاهش پاسخ سازه تحت هر ارتعاش خارجی پیشنهاد شده که مبتنی بر تعریف یک مسئله بهینه‌سازی است. در این روش کمینه‌سازی بیشینه پاسخ‌های سازه به‌عنوان تابع هدف و پارامترهای TMDها به‌عنوان متغیرهای مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. این روش نسبت به روش‌های ارائه‌شده در پژوهش‌های پیشین نوآوری‌هایی دارد؛ مانند: ۱) روشی کلاسیک برای طراحی MTMD است که به سادگی برای هر نوع بارگذاری می‌توان از آن استفاده کرد. ۲) برعکس بیشتر روش‌های قبلی، نیازی به در نظر گرفتن محدودیت در تعیین پارامترهای TMDها نیست؛ بنابراین روش به بهینه‌سازی واقعی‌تری منجر می‌شود. ۳) هر نوع تابع هدف (شامل کمینه‌سازی یک پاسخ مشخص یا ترکیبی از چندین پاسخ) را در طراحی میراگر جرمی چندگانه می‌توان به سادگی در نظر گرفت. ٤) این روش را می‌توان برای طراحی بهینه MTMD در سازه‌های غیر خطی هم استفاده کرد که در مطالعات قبلی زیاد به این مقوله پرداخته نشده است.

با توجه به تعداد زیاد متغیرهای مسئله در طراحی بهینه MTMD، استفاده از روش‌های معمولی بهینه‌سازی حجم بالایی از محاسبات دارد؛ بنابراین استفاده از روش‌های جدید بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک[2]، می‌تواند مؤثرتر باشد. پس در این پژوهش تصمیم به طراحی بهینه سامانه MTMD با استفاده از الگوریتم ژنتیک [۱۷،۱٦] گرفته شده است. در این مقاله ضمن طراحی میراگر جرمی چندگانه با استفاده از روش پیشنهادی، تأثیر عوامل مختلف مانند تعداد TMDها، درصد جرم و رکود زلزله‌های مختلف، در کارایی

1- Robustness

2- Genetic Algorithm (GA)

MTMD بررسی شده است.

۲- معادله حرکت سازه – MTMD

سیستمی متشکل از سازه اصلی به‌صورت قاب برشی n درجه‌آزادی با رفتار خطی، تحت شتاب پایه $\ddot{X}_g$، همراه تعداد N_{tmd} میراگر جرمی منفرد با مشخصات دینامیکی متفاوت در شکل (۱) نشان داده شده است که میراگرهای جرمی در طبقه آخر سازه اصلی و به‌صورت موازی نصب شده است.

پارامترهای jامین TMD شامل سختی (k_{d_j})، میرایی (c_{d_j}) و جرم (m_{d_j})است و هر کدام از TMDها به‌عنوان یک سامانه یک درجه آزادی (SDOF) در نظر گرفته می‌شود. بنابراین درجه آزادی کل سامانه برابر $n+N_{tmd}$ است. معادله‌ی حرکت سامانه سازه–MTMD را می‌توان به‌شکل زیر نوشت:

$$[M]\ddot{X}(t)+[C]\dot{X}(t)+[K]X(t)=[M]e\,\ddot{X}_g \qquad (۱)$$

$e^T=[-1 \;\; -1 \;\; \cdots \;\; -1]_{1\times(n+N_{tmd})}$، بردار انتقال شتاب پایه به جرم‌ها، $X(t)$ بردار تغییر مکان جانبی و ماتریس‌های M، C و K به‌ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سامانه سازه–MTMD است که به‌صورت معادلات زیر تعریف می‌شوند:

$$M=\begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_{n-1} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & m_n & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & m_{d_1} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & m_{d_2} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & m_{d_{N_{tmd}-1}} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & m_{d_{N_{tmd}}} \end{bmatrix} \qquad (۲)$$

$$K=\begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & k_{n-1}+k_n & -k_n & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & -k_n & k_n+\sum_{i=1}^{N_{tmd}} k_{d_i} & -k_{d_1} & -k_{d_2} & \cdots & -k_{d_{N_{tmd}-1}} & -k_{d_{N_{tmd}}} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -k_{d_1} & k_{d_1} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -k_{d_2} & 0 & k_{d_2} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -k_{d_{N_{tmd}-1}} & 0 & 0 & \cdots & k_{d_{N_{tmd}-1}} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -k_{d_{N_{tmd}}} & 0 & 0 & \cdots & 0 & k_{d_{N_{tmd}}} \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

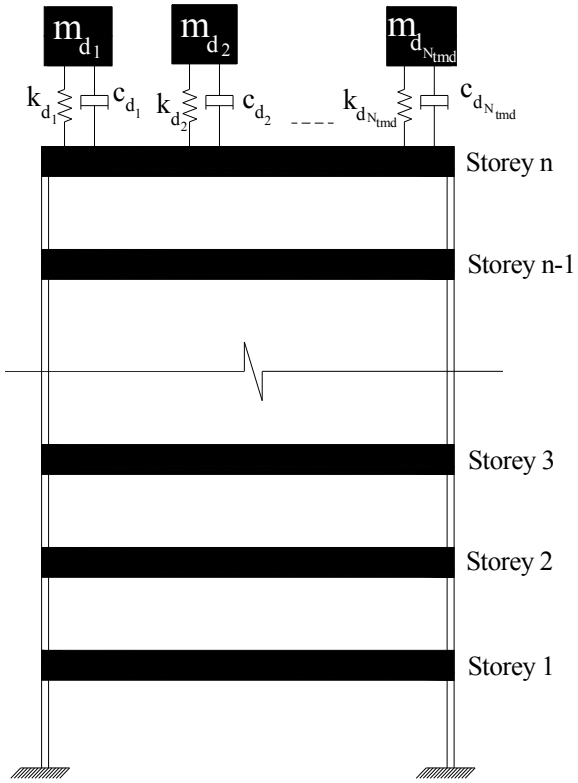
$$C=\begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & c_{n-1}+c_n & -c_n & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & -c_n & c_n+\sum_{i=1}^{N_{tmd}} c_{d_i} & -c_{d_1} & -c_{d_2} & \cdots & -c_{d_{N_{tmd}-1}} & -c_{d_{N_{tmd}}} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -c_{d_1} & c_{d_1} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -c_{d_2} & 0 & c_{d_2} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -c_{d_{N_{tmd}-1}} & 0 & 0 & \cdots & c_{d_{N_{tmd}-1}} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -c_{d_{N_{tmd}}} & 0 & 0 & \cdots & 0 & c_{d_{N_{tmd}}} \end{bmatrix} \qquad (٤)$$

برای حل عددی معادلات حرکت سازه–MTMD، می‌توان از روش‌های عددی مختلفی استفاده کرد که در این مقاله روش Wilson $-\theta$ به‌کار رفته است [۱۸].

۳- تعیین پارامترهای بهینه MTMD بر مبنای کمینه کردن بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی سازه

در این پژوهش روش پیشنهادی برای طراحی MTMD بهینه، مبتنی بر تعریف یک مسئله بهینه‌سازی است که کمینه‌سازی بیشینه‌ی پاسخ سازه به‌عنوان تابع هدف و پارامترهای TMDها به‌عنوان متغیرهای مسئله در نظر گرفته می‌شود. این‌که کمینه‌سازی کدام پاسخ به‌عنوان تابع هدف انتخاب شود بستگی به هدف مورد نظر از کاربرد MTMD دارد. در این پژوهش برای توضیح روش، کمینه‌سازی بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی به‌عنوان معیار ایمنی‌سازه برای تابع هدف انتخاب شده است؛ در صورتی‌که کاهش بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی طبقات، مورد نظر باشد،

به‌طوری‌که تغییر مکان بیشینه‌ی TMDها و همچنین پارامترهای آن به‌ترتیب از مقادیر حدی X_L، $m_{d_{\max}}$، $k_{d_{\max}}$ و $c_{d_{\max}}$ تجاوز نکند، در این حالت مسئله بهینه‌سازی برای تعیین پارامترهای TMDها به‌صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل (۱) مدل سامانه سازه–MTMD در حالت نصب موازی TMDها

$$\text{Find: } m_{d_1}, c_{d_1}, k_{d_1}, \ldots, m_{d_{N_{tmd}}}, c_{d_{N_{tmd}}}, k_{d_{N_{tmd}}} \qquad (۵)$$

$$\text{Minimize: } X_{\max} = \max\left(\left| x_k(i) \right| , \; k = 1,2,..,k_{\max} \right) \;, \; i = 1,2,..,n \qquad (۶)$$

$$\text{Subject to: } X_{\max(TMD)} \le X_L \qquad (۷)$$

$$0 < m_{d_i} < m_{d_{\max}} \quad i = 1,\ 2,\ \ldots,\ N_{tmd} \qquad (۸)$$

$$0 < k_{d_i} < k_{d_{\max}} \quad i = 1,\ 2,\ \ldots,\ N_{tmd} \qquad (۹)$$

$$0 < c_{d_i} < c_{d_{\max}} \quad i = 1,\ 2,\ \ldots,\ N_{tmd} \qquad (۱۰)$$

$$\mathrm{X}_{\max}(\mathrm{TMD}) = \max\left(\left| \mathrm{X}_{\mathrm{TMD}_i} \right| \right) \; i = 1,\ 2,\ \ldots,\ N_{tmd} \qquad (۱۱)$$

$k_{\max}$ بیشینه‌ی گام زمانی تحلیل و $X_k(i)$ تغییر مکان جانبی طبقه iام در گام زمانی kام است. پارامترهای TMDها دامنه‌ی مشخصی از تغییرات دارد که این دامنه بر اساس نظر طراح و برخی محدودیت‌های عملی تعریف می‌شود.

در صورتی‌که برای جرم کل MTMD محدودیت خاصی تعریف شود، به‌طوری‌که μ و M_{tot} به‌ترتیب درصد جرمی TMDها و جرم کل سازه باشد، در حالت توزیع غیریکنواخت جرم، یک قید دیگر نیز به‌صورت زیر به مسئله بهینه‌سازی اضافه می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{N_{tmd}} m_{d_i} = \mu . M_{tot} \qquad (۱۲)$$

در صورتی‌که جرم یکسان برای همه‌ی TMDها انتخاب شود، داریم:

$$m_{d_1} = m_{d_2} = \cdots = m_{d_{N_{tmd}}} = \mu . \frac{M_{tot}}{N_{tmd}} \qquad (۱۳)$$

برای حل مسئله بهینه‌سازی تعریف‌شده در معادلات (۵) تا (۱۱)، مسئله بالا با اعمال محدودیت نامساوی به‌صورت تابع جریمه در تابع هدف به یک مسئله بهینه‌سازی بدون محدودیت به‌صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\text{Find: } m_{d_1}, c_{d_1}, k_{d_1}, \ldots, m_{d_{N_{tmd}}}, c_{d_{N_{tmd}}}, k_{d_{N_{tmd}}} \qquad (۱۴)$$

$$\text{Minimize: } F(T) = \alpha X_{\max} + \beta \max[0 , g_1] \qquad (۱۵)$$

$$g_1 = \frac{X_{\max_{(TMD)}}}{X_L} - 1 \qquad (۱۶)$$

محدودیت‌های مربوط به پارامترهای TMD به این شکل در حل مسئله بهینه‌سازی اعمال شده که مقادیر k_{d_i}، c_{d_i}

و m_{d_i} از دامنه تعریف‌شده برای آن‌ها انتخاب می‌شوند؛ بنابر این نیازی به اعمال آن‌ها به‌صورت تابع جریمه نیست. α و β ضرایب مربوط به تابع جریمه است که این ضرایب باید به‌صورت مناسبی به وسیله‌ی طراح و بر اساس مشخصات مسئله مورد مطالعه انتخاب شوند [۱۹]. در این پژوهش، هدف طراحی بهینه MTMD برای یک درصد جرم مشخص است که جرم TMDها یکسان است. بنابراین متغیرهای مسئله در این حالت، میرایی و سختی TMDها است که از حل مسئله بهینه‌سازی زیر تعیین می‌شود:

$$\text{Find: } c_{d_1}, k_{d_1}, \ldots, c_{d_{N_{tmd}}}, k_{d_{N_{tmd}}} \qquad (۱۷)$$

$$\text{Minimize: } F(T) = \alpha X_{\max} + \beta \max[0, g_1] \qquad (۱۸)$$

٤- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک، نوع خاصی از الگوریتم‌های تکاملی است که از روش‌های زیست شناسی مانند وراثت و جهش برای یافتن روشی برای حل مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌کند. ترکیب واژه الگوریتم ژنتیک به وسیله‌ی جان هالند ارائه شده که در کتاب خود در سال ۱۹۷۵ اصول الگوریتم‌های ژنتیک ساده را شرح داده است [۲۰]. در یک مسئله بهینه‌سازی یک بردار طراحی به‌صورت یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شود که ژن‌های آن همان متغیرهای مسئله است. مقدار تابع هدف برای هر بردار طراحی نشانگر شایستگی آن کروموزوم است. الگوریتم ژنتیک با تعدادی از بردارهای طراحی (کروموزومها) شروع شده و با تولید نسل‌های بعدی تحت عملگرهای مشخص ادامه می‌یابد. الگوریتم ژنتیک سه عملگر اساسی دارد که عبارتند از: ۱) انتخاب ۲)، تولید مثل ۳) و جهش [١٦].

الگوریتم با تولید یک جمعیت اولیه کاملاً تصادفی با اندازه‌ی دلخواه، آغاز می‌شود. بعد از این مرحله با به‌کارگیری عملگر تولید مثل، اقدام به تولید کروموزوم‌های جدید، موسوم به نوزاد کرده و پس از آن شایسته‌ترین کروموزوم‌ها را برای نسل بعد انتخاب می‌کند به‌گونه‌ای که فرایند انتخاب مبتنی بر شایستگی هر ژن است. در الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این پژوهش برای حفظ بهترین جمعیت از فرایند نخبه‌گرایی[1] استفاده شده است که درصد کوچکی از جمعیت نسل بعد مستقیماً از جمعیت نسل قبل کپی می‌شود.

در این مقاله از نمونه‌برداری تصادفی تک‌مرحله‌ای [۲۱] به‌عنوان ساز و کار انتخاب، استفاده شده که در آن احتمال انتخاب هر کروموزوم برابر است با:

$$P(X_i) = \frac{F(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_{ind}} F(x_i)} \qquad (۱۹)$$

که در آن، $P(x_i)$ احتمال انتخاب کروموزوم iام، $F(x_i)$ شایستگی کروموزوم iام و N_{ind} تعداد کروموزوم در هر جمعیت است.

ساز و کار تولید مثل استفاده شده در این پژوهش، روش تولید مثل داخلی است که در این روش نوزاد بر اساس ترکیب خطی دو کورموزوم والد به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$O_{1,2}=P_1+\alpha(P_2-P_1) \qquad (۲۰)$$

P_1 و P_2 متغیرهای کروموزوم‌های والد، $O_{1,2}$ ژن‌های کروموزوم نوزاد و α ضریب مقیاس است که به‌طور تصادفی و معمولاً در فاصله‌ی [1.25 -0.25] برای تعیین هر متغیر (ژن) کروموزوم نوزاد انتخاب می‌شود [۲۲].

عملگر جهش، یاریگر الگوریتم ژنتیک برای رهایی از نقطه کمینه محلی و تضمینی برای جست و جوی تمامی مقادیر است. نحوه اعمال جهش به نحوه کدگذاری کرموزوم‌ها

1- Elite

بستگی داشته و بیشتر درصد ژن‌هایی که جهش در آن‌ها اتفاق می‌افتد عدد بسیار پایینی است. اگر m_r، درصد جهش ژن‌ها و N_{var} و N_{new} به‌ترتیب نشانگر تعداد متغیرها و کروموزوم‌های تولیدشده باشند، در این حالت تعداد ژن‌هایی که دچار جهش می‌شوند از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$N_{Mutated} = m_r \times N_{var} \times N_{new} \qquad (۲۱)$$

در مراحل اولیه استفاده از الگوریتم ژنتیک، متغیرها به‌صورت سامانه دودویی بیان می‌شدند. باوجود کاربرد زیاد کدگذاری دودویی در مسائل بهینه‌سازی پیچیده، این سامانه کدگذاری در مسائل با پارامترهای پیوسته مشکلاتی دارد. بررسی‌ها نشان داده است که برای مسائل بهینه‌سازی با پارامترهای پیوسته، استفاده از کدگذاری حقیقی مزایایی مانند سادگی در برنامه‌نویسی، نیاز به حافظه‌ی کمتر و امکان استفاده از عملگرهای مختلف ژنتیک دارد [۲۳]. بنابراین در مسائل مربوط به کنترل سازه‌ها مانند این مقاله که دامنه متغیرها از قبل معلوم نبوده و دامنه وسیع‌تری دارد؛ استفاده از سامانه کدگذاری دودویی اشکالاتی دارد؛ بنابراین استفاده از کدگذاری حقیقی مناسب‌تر است [۲٤].

۵- مثال عددی

برای آنالیز عددی و بررسی کارایی روش پیشنهادی در طراحی بهینه MTMD و تأثیر پارامترهای TMDها بر پاسخ سازه، ساختمان ۱۰طبقه برشی با رفتار خطی، با جرم، سختی و میرایی به ترتیب ۳٦۰ ton، ٦۵۰ MN/m و MN.s/m ٦/۲ (یکسان برای طبقات) در نظر گرفته شده است.

۵-۱- زلزله‌ی طراحی

در صورتی‌که پارامترهای بهینه TMDها برای یک زلزله‌ی خاص تعیین شود ممکن است سامانه MTMD در مقابل زلزله‌های دیگر مؤثر نباشد. برای رفع نسبی این ایراد، در این مقاله، سازه در مقابل تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید[1] (W.N) قرار گرفته و به طراحی MTMD بهینه پرداخته شده است. W.N به‌عنوان یک فرایند تصادفی با چگالی توان طیفی یکنواخت به شدت S_0 روی دامنه‌ی همه‌ی فرکانس‌ها است. با توجه به این‌که W.N ایجادشده خالص است؛ برای استفاده از این اغتشاش به‌عنوان تحریک پایه برای یک سازه، استفاده از فیلتری که بتواند خاصیت عبور امواج از خاک را روی آن مدل‌سازی کند ضروری است. فیلتر کانای-تاجیمی[2] [۲۵]، یکی از فیلترهای مناسب در این زمینه است که با تابع چگالی طیفی زیر تعریف می‌شود:

$$S_g = \frac{1+4\xi_g^2\left(\omega/\omega_g\right)^2}{\left(1-\left(\omega/\omega_g\right)^2\right)^2+4\xi_g^2\left(\omega/\omega_g\right)^2}S_0 \qquad (۲۲)$$

ξ_g و ω_g به‌ترتیب میرایی و فرکانس زمین است که برای خاک‌های مختلف، دارای مقادیر متفاوتی دارد و معمولاً در محدوده‌ی زیر است:

$$\begin{aligned} &20 \le \omega_g \le 120 \quad rad/\sec \\ &0.3 \le \xi_g \le 0.75 \end{aligned} \qquad (۲۳)$$

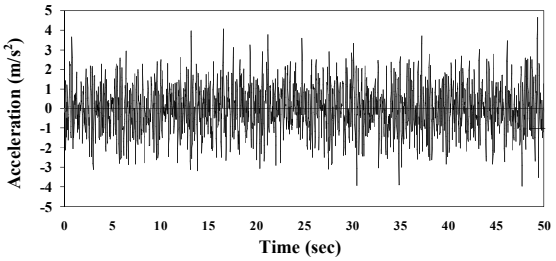
تابع انتقال فیلتر کانای-تاجیمی به‌شکل زیر است:

$$F(s) = \frac{2\xi_g\omega_g s+\omega_g^2}{s^2+2\xi_g\omega_g s+\omega_g^2} \qquad (۲٤)$$

W.N خالص تولیدشده به وسیله‌ی این تابع انتقال به یک زلزله مصنوعی برای تحریک پایه سازه تبدیل می‌شود. در این مقاله، $\xi_g = 0.3$ و $\omega_g = 37.3 \ \ rad/\sec$، مربوط به خاک معمولی، در نظر گرفته شده است. تاریخچه زمانی رکورد تولیدشده با فیلتر کانای-تاجیمی ($W_1(t)$)، مطابق

1- White noise (W.N)
2- Kanai-Tajimi

شکل (۲) است که بیشینه‌ی شتاب ارتعاش برابر $PGA = 0.475g$ است.



شکل (۲) تاریخچه زمانی ارتعاش $W_1(t)$

۵-۲- طراحی MTMD بهینه برای تعداد TMDهای $N_{tmd} = 5$ و درصد جرمی $\mu = 2\ \%$

برای توضیح روش پیشنهادی برای طراحی بهینه MTMD، سازه ۱۰طبقه تحت ارتعاش $W_1(t)$ در حالتی‌که پنج میراگر جرمی با درصد جرمی برابر ۲ درصد، در طبقه‌ی آخر به‌صورت موازی قرار گرفته‌است، در نظر گرفته شده است. در این مقاله به‌عنوان نمونه، جرم‌های میراگر در طبقه‌ی آخر و به‌صورت موازی قرار گرفته است. مقوله تعیین موقعیت بهینه‌ی آن‌ها در سازه، خارج از موضوع این مقاله است.

در صورتی‌که هدف از کاربرد MTMD در سازه، کاهش بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی باشد، سختی و میرایی بهینه‌شده TMDها (با فرض توزیع یکنواخت جرم برای آن‌ها) از حل مسئله بهینه‌سازی تعریف‌شده در معادلات (۱۷) تا (۱۸) با انتخاب مقادیر زیر برای پارامترهای مختلف به‌دست می‌آید:

$$\mu\,(\%) = 2 \quad , \quad X_L = 50\ \text{cm} \quad , \quad N_{tmd} = 5$$
$$k_{d_{max}} = 20\ \text{MN/m} \quad , \quad c_{d_{max}} = 2\ \text{MN-s/m}$$
$$\alpha = \frac{1}{X_{\max_{(Uncon)}}} = \frac{1}{14.03\ (\text{cm})} \quad , \quad \beta = 150$$

همچنین پارامترهای مربوط به الگوریتم ژنتیک نیز به صورت زیر انتخاب شده است:

$N_{ind} = 25$ (تعداد جمعیت در هر نسل)

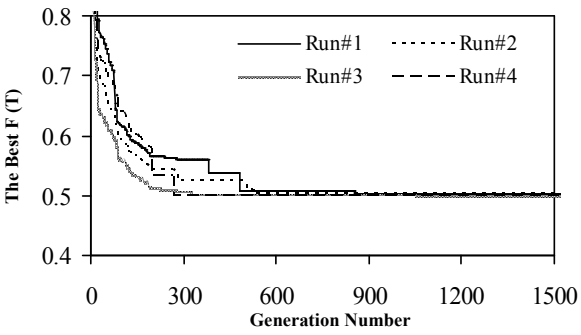
$N_{Elite} = 5$ (تعداد برگزیده‌ها) ، $m_r = 4\%$ (درصد جهش)

$N_{new} = 25$ (تعداد جمعیت تولید شده در هر نسل)

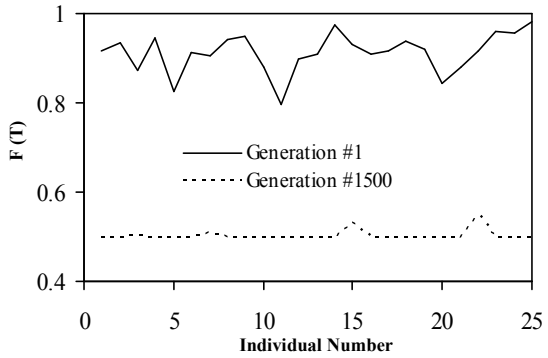
در این حالت، مسئله بهینه‌سازی ۱۰ متغیر دارد که با استفاده از الگوریتم ژنتیک با پارامترهای بالا و تعداد کل نسل‌ها برابر ۱۵۰۰، چندین بار حل شده تا از درستی جواب نهایی اطمینان حاصل شود. شکل (۳)، نحوه همگرایی الگوریتم ژنتیک را برای چهار بار حل مسئله نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار تابع هدف با افزایش تعداد نسل، کاهش یافته یا این‌که در مقاطعی ثابت بوده است که به‌خاطرحفظ بهترین جمعیت در هر نسل و انتقال به جمعیت بعدی است. همچنین مشاهده می‌شود که هر چهار بار حل (Run) به جواب بهینه یکسانی رسیده اما سرعت همگرایی مختلف دارد. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهاد شده دقت و سرعت همگرایی قابل قبولی در طراحی بهینه MTMD دارد.

در شکل (٤)، مقدار تابع هدف برای جمعیت نسل‌های اول و آخر با هم مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نسل آخر بیشتر اعضا شایستگی یکسان دارند.

در جدول (۱)، مقادیر پارامترهای TMDها در حالت بهینه نشان داده شده است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده می‌توان گفت که میراگرهای جرمی بهینه، مشخصات متفاوتی دارند.



شکل (۳) همگرایی الگوریتم ژنتیک در نسل‌های مختلف برای ٤ بار حل مسئله بهینه‌سازی برای $\mu = 2\ \%$



شکل (٤) مقدار تابع هدف برای جمعیت نسل اول و آخر

جدول(۱) پارامترهای بهینه‌ی میراگرهای جرمی برای $N_{tmd} = 5$ و درصد جرمی $\mu = 2\ \%$

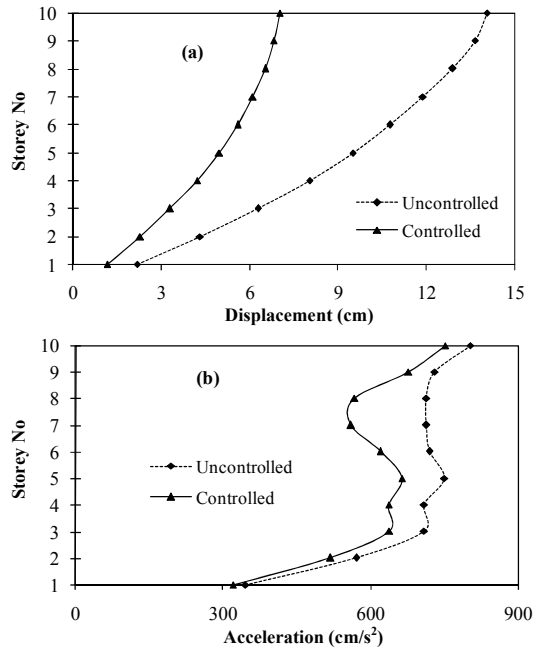
TMD	m_d (tons)	k_d (kN/m)	c_d (kN.sec/m)
1	١٤/٤	٦٨٥/٢٦	٥/٧٥٠
2	١٤/٤	٥٤٨/٣٥	٧/٦٥٠
3	١٤/٤	٦٠٢/٨٢	١٢/٠٢٣
4	١٤/٤	٣٨٣/٧٤	٦/٥٦٤
5	١٤/٤	٣٨٢/٨٩	٥/٨٩٢

سازه کنترل‌شده با MTMD بهینه در مقابل ارتعاش $W_1(t)$ قرار گرفته است. در شکل (۵) بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی و شتاب سازه کنترل‌نشده و کنترل‌شده تحت اثر ارتعاش $W_1(t)$ برای طبقات مختلف نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی حدود ۵۰ درصد کاهش داشته است؛ همچنین با وجود این‌که هدف از کاربرد MTMD کاهش بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی بوده، بیشینه‌ی شتاب نیز حدود ۱۰ درصد کاهش داشته است.

۵-۳- تست MTMD بهینه شده تحت زلزله‌های غیرطرح

برای بررسی کارایی MTMD بهینه‌شده در مقابل زلزله‌های دیگر که متفاوت از زلزله‌ی طرح $W_1(t)$ است، سامانه سازه-MTMD طراحی‌شده تحت اثر $W_1(t)$، 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 Northridge;1994;PGA=0.84g و Kobe;1995;PGA=0.83g به‌عنوان زلزله‌های نزدیک‌گسل انتخاب شده است.



شکل (۵) پاسخ سازه کنترل‌شده و کنترل‌نشده تحت ارتعاش $W_1(t)$
a) بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی b) بیشینه‌ی شتاب طبقات

شکل (a)٦ تا (d)٦ پاسخ‌های نرمال‌شده سازه کنترل‌شده (یعنی نسبت پاسخ سازه کنترل‌شده به پاسخ همسان سازه کنترل‌نشده) را تحت زلزله‌های تست نشان می‌دهد. پاسخ نرمال‌شده بزرگ‌تر از ۱، بیانگر اثر منفی روی پاسخ مورد نظر در سازه است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی که به‌عنوان 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 نسبی، شتاب طبقات و جذر میانگین مربعات پاسخ‌ها[1] (RMS) نیز کاهش داشته است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت که کارکرد

1- Root-Mean-Square (RMS)

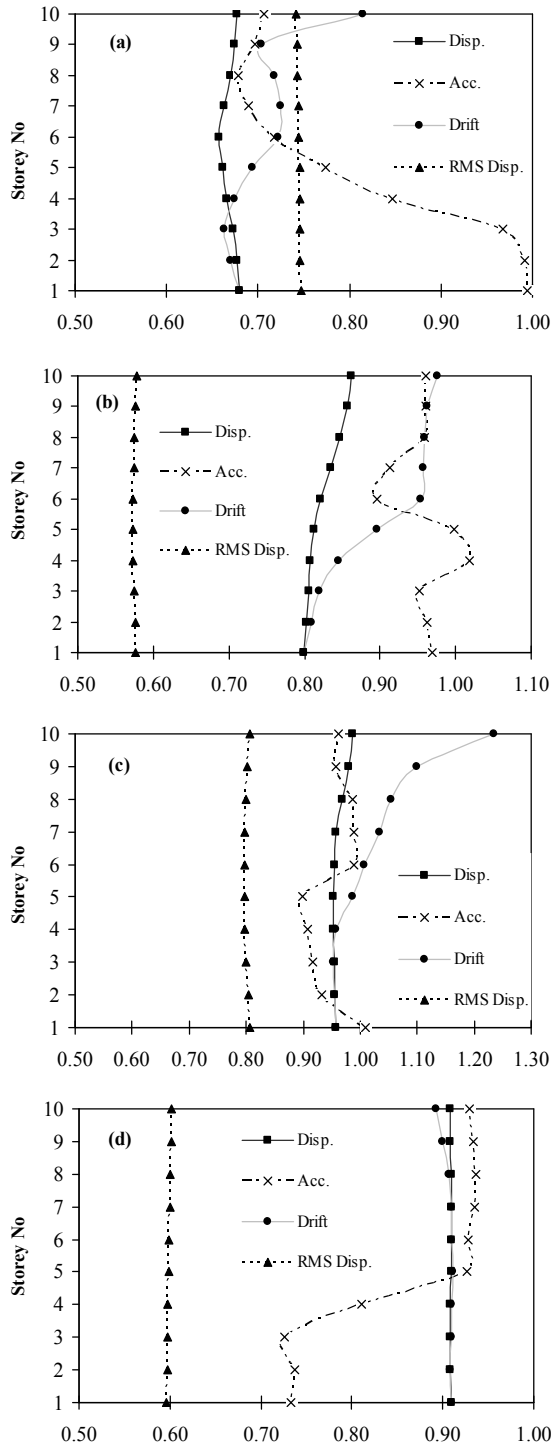
MTMD بـرای زلزلـه‌هـای مختلـف، متفـاوت بـوده اسـت به‌گونه‌ای که در مثال بررسی شده، بهترین کارکرد مربوط به RMS تغییرمکان جانبی تحت اثر زلزله Hachinohe بوده کـه یک زلزله‌ی دورگسل است.

۵-٤- بررسی اثر جرم و تعداد TMD بر کارآیی MTMD

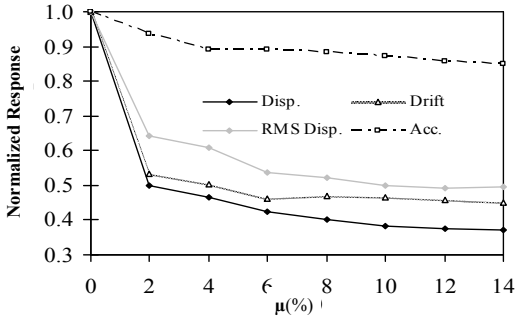
بـرای بررسـی تـأثیر درصـد جرمـی میراگرهـا بـر کارکرد MTMD در کاهش پاسخ‌های سازه، مشـابه روش توضیح داده‌شده در بخش قبل، برای درصـدهای جرمـی مختلف در حالتی‌که پنج TMD در طبقه آخر و به‌صورت موازی قرار گرفته است به طراحی بهینه MTMD پرداخته شـده اسـت. شـکل (۷)، پاسـخ‌هـای نرمـال‌شـده سـازه کنترل‌شده را برای مقادیر مختلف درصـد جرمـی تحـت ارتعاش $W_1(t)$ نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج می‌توان گفـت کـه عمومـاً افـزایش درصد جرمی MTMD باعث کاهش بیشتر پاسخ‌های سازه شده است که این مسئله بیانگر افـزایش کـارایی سـامانه MTMD با افزایش درصد جرمی است. برای درصـدهای جرمی مختلف با اینکه تابع هدف کمینه کردن بیشـینه‌ی تغییر مکان جانبی بوده ولی مقدار شتاب بیشـینه هـم بـا افزایش درصد جرمی، بیشتر کاهش می‌یابد.

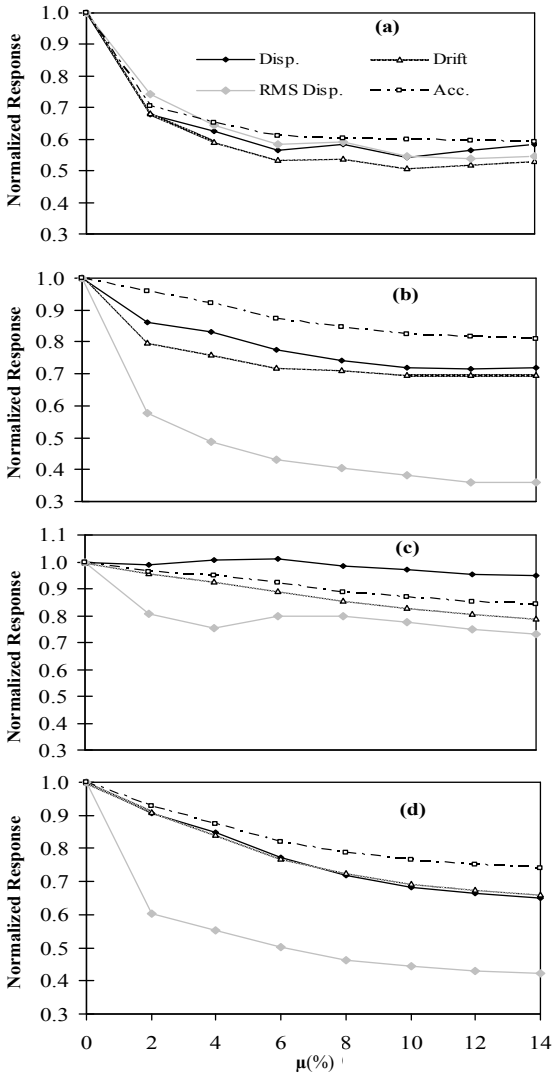
در شکل (۸)، پاسخ‌های نرمـال‌شـده سـازه کنتـرل‌شـده برای درصدهای جرمی مختلـف بـرای MTMD، تحـت اثـر زلزله‌های تست نشان داده شده است. نتـایج بـه‌دسـت‌آمـده تحت زلزله‌های تست نشان می‌دهد که کـارایی MTMD، بـا افزایش درصد جرمی بهبود می‌یابد. همچنین میـزان کـاهش پاسخ‌های سازه برای مقادیر مختلف درصد جرمـی، وابسـته به مشخصات زلزله ورودی اسـت کـه در بـین زلزلـه‌هـای تست، کارایی MTMD در کاهش تابع هدف در برابر زلزله-های دورگسل عموماً بهتر بوده است.



شکل (٦) پاسخ‌های نرمال‌شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده تحت زلزله‌های تست: a) El-Centro، b) Hachinohe، c) Northridge، d) Kobe



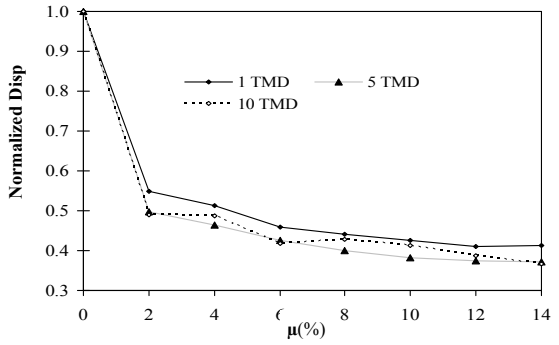
شکل (۷) پاسخ‌های نرمال‌شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده برای درصدهای جرمی مختلف MTMD تحت ارتعاش $W_1(t)$



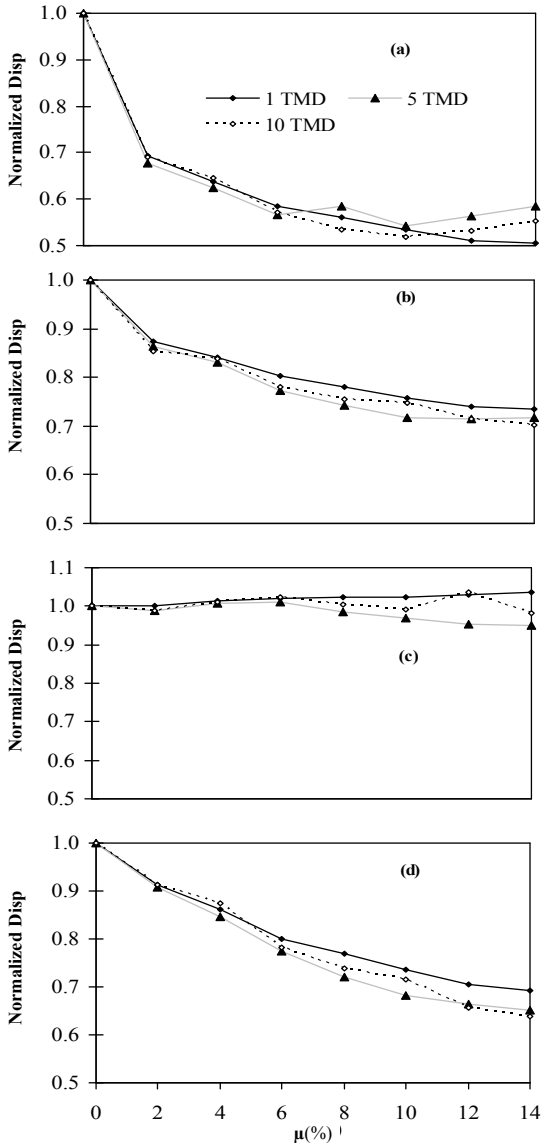
شکل (۸) پاسخ‌های نرمال‌شده‌ی سازه‌ی کنترل شده برای درصد جرم‌های مختلف برای MTMD تحت زلزله‌های تست: a) El-Centro، b) Hachinohe، c) Northridge، d) Kobe

برای بررسی اثر تعداد TMDها در کارکرد سامانه MTMD، برای تعداد مختلف TMDها در حالتی‌که در طبقه آخر سازه و به‌صورت موازی قرار گرفته باشند، برای درصدهای جرمی مختلف، سامانه سازه–MTMD تحت اثر زلزله $W_1(t)$ قرار گرفته و به طراحی بهینه MTMD پرداخته شده است. شکل (۹)، بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی نرمال‌شده سازه کنترل‌شده را برای تعداد مختلف TMDها و درصدهای جرمی متفاوت نشان می‌دهد. در شکل (۱۰)، نسبت بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی سازه کنترل‌شده به سازه کنترل‌نشده برای تعداد مختلف TMDها تحت اثر زلزله‌های تست، نشان داده شده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در این مطالعه با فرض جرم یکسان برای TMDها و قرارگیری به‌صورت موازی در طبقه آخر، با افزایش تعداد میراگرهای جرمی، تغییر چشم‌گیری در کارایی MTMD نسبت به TMD منفرد تحت ارتعاش طراحی و زلزله‌های تست مشاهده نمی‌شود. در پژوهش‌های قبلی که با فرضیات متفاوت برای پارامترهای میراگرهای جرمی و در حالت‌های نصب موازی و سری TMDها انجام شده است، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که افزایش تعداد TMDها تا تعداد مشخصی، کارایی MTMD را بهبود می‌بخشد ولی بعد از این تعداد، دیگر تأثیر آن ثابت بوده [۱۱] و یا حتی سبب کاهش کارایی می‌شود [۲۶].



شکل (۹) بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی نرمال‌شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده برای تعداد مختلف TMD تحت ارتعاش $W_1(t)$



شکل (۱۰) بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی نرمال‌شده‌ی سازه‌ی کنترل‌شده برای تعداد مختلف TMD تحت زلزله‌های تست: a) El-Centro، b) Hachinohe، c) Northridge و d) Kobe

همان‌گونه که در پژوهش‌های قبلی هم نشان داده شده است [۱٤]، با وجود تأثیر ناچیز افزایش تعداد TMD در کارایی ساز و کار MTMD در حالت استفاده از تعداد بیشتر TMD، می‌توان از جرمها و در نتیجه حجم کوچک‌تری برای TMDها نسبت به TMD منفرد استفاده کرد که منجر به کاهش فضای مورد نیاز برای نصب و راحتی نصب و نگه‌داری در کاربردهای عملی می‌شود. همچنین افزایش تعداد میراگرهای جرمی باعث افزایش قابلیت اعتماد و مقاوم بودن ساز و کار میراگر جرمی چندگانه می‌شود[۱۱و۲۷].

٦- نتایج

در این مقاله روشی برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای TMDها در ساز و کار MTMD، ارائه شده که مبتنی بر تعریف یک مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف کمینه کردن بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی سازه است که برای حل آن از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. با استفاده از روش پیشنهادی ضمن طراحی میراگر جرمی چندگانه، تأثیر پارامترهای مختلفی مانند درصد جرم MTMD، تعداد TMDها و محتوای فرکانسی زلزله‌ها بر کارکرد این سامانه بررسی شده است.

برای توضیح روش پیشنهادی، یک سازه ۱۰طبقه با رفتار خطی و از نوع قاب برشی، تحت اثر زلزله‌ی اغتشاش سفیدِ فیلترشده قرار گرفته و MTMD بهینه طراحی شده است. بر اساس تحلیل‌های عددی می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- روش پیشنهادی برای طراحی بهینه MTMD با استفاده از الگوریتم ژنتیک، روشی موفق برای تعیین پارامترهای TMDها است که دقت و سرعت همگرایی بالایی دارد. در این روش به‌راحتی می‌توان برای هر تعداد TMD، مسئله را حل کرد.

۲- در این مقاله با وجود این‌که تابع هدف برای طراحی بهینه MTMD، کاهش بیشینه‌ی تغییرمکان جانبی سازه بوده است، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در مقابل ارتعاش طرح و همچنین زلزله‌های تست، بیشینه‌ی شتاب سازه (به‌عنوان معیار راحتی ساکنین) نیز کاهش داشته که این

میزان کاهش، کمتر از مقدار کاهش بیشینه‌ی تغییر مکان جانبی است.

۳- تست ساز و کار MTMD بهینه تحت اثر زلزله‌های دورگسل و نزدیک‌گسل نشان می‌دهد که کارایی این سامانه در کاهش پاسخ سازه، وابسته به محتوای فرکانسی زلزله است به‌گونه‌ای که برای زلزله‌های با شدت بالا و تاریخچه زمانی کوتاه، چندان مؤثر واقع نشده و در مواردی اثر منفی نیز داشته است.

٤- با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از طراحی بهینه MTMD برای درصد جرم‌های مختلف (از ۲ تا ١٤ درصد)، می‌توان گفت که عموماً افزایش درصد جرمی میراگرها سبب کاهش بیشتر پاسخ سازه شده که این مسئله بیانگر افزایش کارایی سامانه MTMD با افزایش درصد جرمی است؛ به‌ویژه برای درصد جرم‌های پایین که افزایش جرم تأثیر زیادتری دارد.

۵- در این مطالعه با فرض توزیع یکسان جرم برای میراگرهای جرمی و قرارگیری موازی آن‌ها در طبقه آخر سازه، طراحی بهینه سامانه MTMD برای تعداد مختلف TMDها (شامل ۱، ۵، ۱۰ و ۱۵) نشان می‌دهد که افزایش تعداد TMD تأثیر چشم‌گیری در افزایش کارایی ساز و کار MTMD در مقایسه با TMD منفرد ندارد.

٦- از آن‌جا که در این پژوهش کاهش پاسخ کلی سازه به‌جای کاهش پاسخ یک مود خاص مدِ نظر بوده و با دانستن این‌که در سازه‌های بلندمرتبه، مودهای بالاتر می‌توانند در پاسخ کلی سازه نقش چشم‌گیری را داشته باشند، روش پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان روشی مفید برای طراحی سامانه MTMD در سازه‌های بلندمرتبه توصیه شود.

۷- مراجع

[1] Soong, T. and Dargush, G.F., Passive energy dissipation systems in structural engineering, John Wiley & Sons, Chichester, 1997

[2] Xu, K. and Igusa, T., "Dynamic characteristics of multiple substructures with closely spaced frequencies", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 21, 1992, 1059-1070.

[3] Kareem, A, and Klein, S., "Performance of multiple tuned mass dampers under random loadings", Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(2), 1995, 348-361.

[4] Yamaguchi, H. and Harnpornchai, N., "Fundamental characteristics of multiple tuned mass dampers for suppressing harmonically forced oscillation", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 22, 1993, 51-62.

[5] Abe, M. and Fujino, Y., "Dynamic characteristics of multiple tuned mass dampers and some design formula", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 23, 1994, 813-835.

[6] Igusa, T. and Xu, K., "Vibration control using multiple tuned mass damper", Journal of Sound and Vibration, 175, 1994, 491-503.

[7] Jangid, R.S., "Optimum multiple tuned mass dampers for base excited undamped systems", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 28, 1999, 1041-1049.

[8] Wu, J. and Chen, G., "Optimization of multiple tuned mass dampers for seismic response reduction", Proceeding of American Control Conference, Chicago, Illinois, USA, June 2000, 519-523.

[9] Chen, G. and Wu, J., "Optimal placement of multiple tuned mass dampers for seismic structures", Journal of Structural Engineering, ASCE, 127(9), 2001, 1054-1062.

[10] Li., C., "Optimum multi tuned mass dampers for structures under the ground acceleration based on DDMF and ADMF", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 31, 2002, 897-919.

[11] 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, 2005, 77-83.

[12] 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), 2008, 187-202.

[۱۳] اعتماد سعید، ل، نراقی س.ا و زهرایی س.م. "پیش بینی پارامترهای بهینه‌ی میراگرهای جرمی چندگانه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و استنتاج فازی"، چهارمین کنگره مهندسی عمران، ۱۳۸۷.

[14] Moon, K.S., "Vertically distributed multiple tuned mass dampers in tall buildings: performance and preliminary design", Structural Design of Tall and Special Buildings, 19, 2010, 347-366.

[15] Dehghan-Niri, E., Zahrai, S.M and Mohtat, A., "Effectiveness-robustness objectives in MTMD system design: An evolutionary optimal design methodology," Structural Control & Health Monitoring, 17(2), 2010, 218-238.

[16] Goldberg, D.E., Genetic algorithms in search, optimization and machine Learning, Addison - Wesley Publishing Co., Inc. Reading, Mass, 1989.

[17] Michalewicz, Z., Genetic algorithms + data structures=evolution programs, New York: Springer –Verlag, 1996

[18] Bathe, K. J., Finite element procedures, Prentice-Hall, Inc., 1996

[19] Joghataie, A. and Mohebbi, M., "Vibration controller for confined masonry walls by distributed genetic algorithms", Journal of Structural Engineering, ASCE, 134(2), 2008, 300-309

[20] Holland, J.H., Adaptation in natural and artificial systems, Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975

[21] Mühlenbein, H. and Schlierkamp-Voosen, D., "Predictive models for the breeder genetic algorithm: I. Continuous parameter optimization", Evolutionary Computation, 1(1), 1993, 25-49

[22] Baker, J.E., "Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm", Proc. ICGA 2, 1987, 14-21

[23] Jenkins, W.M., "A decimal-coded evolutionary algorithm for constrained optimization", Computer and Structure, 80, 2002, 471-480

[24] Arfiadi, Y. and Hadi, M.N.S., "Optimal direct (static) output feedback controller using real coded genetic algorithms", Computer and Structure, 79, 2001, 1625-1634

[25] Fan, F.G. and Ahmadi, G., "Nonstationary Kanai-Tajimi models for El-Centro 1940 and Mexico-City 1985 earthquakes", Probabilistic Engineering Mechanics, 5, 1990, 171-181

[26] Li, C. and Liu, Y., "Further characteristics for multiple tuned mass dampers," ASCE Journal of Structural Engineering 128(10), 2002, 1362-1365

[27] Li, C, "Performance of multiple tuned mass dampers for attenuating undesirable oscillations of structures under the ground acceleration," Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 29, 2000, 1405-1421.

Genetic Algorithm Based Approach for Optimal Design of Multiple Tuned Mass Dampers (MTMDs) under Earthquake Excitation

M. Mohebbi[1*], K. Shakeri[2], H. Majzoub[3]

1- Assistant Professor, Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2- Assistant Professor, Engineering Department, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
3- MSc, Engineering Department, Islamic Azad University, Malekan Branch, Malekan, Iran

mohebbi@uma.ac.ir

Abstract:
To improve the behavior of building structures subjected to lateral loads, such as wind and earthquake excitations, tuned mass damper (TMD) has been used extensively theoretically and experimentally in previous researches. To increase the effectiveness of TMD mechanism, different methods have been proposed to determine the optimal values of TMD parameters including its mass, stiffness and damping. In using single TMD on the structures subjected to external vibrations, the mistuning of TMD, variation of TMD damping and changes in structural dynamic characteristics cause significant reduction in the effectiveness of TMD.
Multiple tuned mass dampers (MTMDs) have been proposed to overcome the shortcomings of single TMD where each TMD has different dynamic characteristics. Based on the results of different researches, it has been concluded that the performance of MTMDs is less sensitive to uncertainty of structural dynamic parameters than that of a single TMD.
In the previous researches, for designing MTMDs on the linear structures subjected to various external excitations, several methods have been proposed based on different kinds of design criteria. In most of the proposed methods, to simplify the design procedure of MTMDs, some limitations such as identical masses and damping ratios for TMDs or uniform distribution for the frequency or damping of TMDs have been considered. Also these methods require extensive numerical analysis. To generalize the design problem of MTMDs, in this paper, an effective method has been proposed for optimal design of MTMDs on the multi-degree-of-freedom linear structures subjected to any desired excitation. In this method, an optimization problem is defined for designing the optimal MTMDs. The minimization of the maximum displacement of structure is considered as objective function and the parameters of TMDs are considered as variables. Since the design problem includes a large number of variables, hence, in this paper, it has been decided to use Genetic Algorithm (GA) for solving the optimization problem.
To illustrate the procedure of the proposed method and also to assess the effectiveness of MTMDs in improving the seismic behavior of structures, a ten–storey linear shear building frame was subjected to white noise excitation and for different values of TMDs mass ratio and TMDs number, optimal MTMDs were designed for minimizing the maximum displacement of structure. To focus on the main objective of this paper and avoid the complexity of the problem, TMDs were located on the top floor in parallel configuration. The results of numerical simulations showed the capability of GA in solving complex MTMDs

design problem with a large number of variables as well as the simplicity of the method under any desired external excitation. Also it was concluded that increasing of the mass ratio of TMDs could improve the effectiveness of MTMDs. To assess the performance of optimal MTMDs under other earthquakes, which are different in characteristics with design record, optimal structure-MTMDs was tested under near-fault and far-fault earthquakes and the results have been reported.

Keywords: Passive control, Tuned Mass Damper (TMD), Multiple Tuned Mass Damper (MTMD), Optimization.