



طراحی و ارزیابی رفتار لرزه‌ای میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMD) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی (MVO)

میلاد همتی

کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

میراگرهای جرمی تنظیم شونده، گروهی از ابزارهای کنترل غیرفعال سازه‌ها می‌باشند که متشکل از جرم وزنه، سختی فنر و میرایی ویسکوز هستند. با انتخاب یک ترکیب بهینه از مقادیر مولفه‌های این میراگر می‌توان رفتار لرزه‌ای سازه را بطور مناسبی بهبود بخشید. برای حل مسئله بهینه‌سازی در طراحی میراگرها از الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی (MVO) استفاده شد. به عنوان یک تابع هدف و معیار بهینه‌سازی از تابعی بر مبنای نسبت پاسخ‌های لرزه‌ای در حالت‌های کنترل نشده و کنترل شده با میراگر جرمی استفاده شد. به منظور کنترل غیرفعال سازه از سناریوهای مبتنی ساختار میراگرهای جرمی در ۳ حالت میراگر جرمی تنظیم شونده TMD منفرد و میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMD) با الگوی سری و موازی استفاده گردید. سپس رفتار لرزه‌ای سازه تحت این سه سناریو از میراگر جرمی مورد ارزیابی قرار گرفت. رفتار لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگرهای جرمی و الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی (MVO) با استفاده از کدهای دستوری در محیط برنامه MATLAB شبیه‌سازی شدند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که برای حل مسئله طراحی بهینه اجزای مکانیکی میراگرهای جرمی تنظیم شونده، الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی (MVO) از عملکرد مناسبی برای دستیابی به پاسخ‌های لرزه‌ای کمتر برخوردار می‌باشد. این الگوریتم در فاز اکتشاف و استخراج، سرعت همگرایی بالایی در یافتن نقطه بهینه دارا می‌باشد. در حالت کلی میراگرهای جرمی به ازای تمام الگوهای ساختاری اعم از میراگر جرمی ساده (TMD) و میراگرهای جرمی چندگانه (MTMD) با ترکیب سری و موازی منجر به بهبود رفتار لرزه‌ای و کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای می‌گردد. استفاده از میراگرهای جرمی مرکب (MTMD) در مقایسه با نوع ساده آن از توانایی بیشتری برای کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه برخوردار هستند. همچنین در این بین، میراگر جرمی چندگانه با ترکیب موازی دارای بهترین عملکرد در کاهش پاسخ سازه تحت تحریکات لرزه‌ای می‌باشد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی (MVO)، کنترل سازه، میراگر جرمی (TMD)

۱- مقدمه

روش‌های مختلفی برای کنترل ارتعاش سازه‌ها تحت نیروهای جانبی (Soong and Constantinou, 2014) و (Cheng et al, 2008) توسعه یافته است. در این میان، میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) به عنوان یک مکانیسم کنترل سازه غیرفعال شامل اجزای مکانیکی جرم-فنر-میرایی برای کاهش پاسخ سازه، به ویژه در برج‌ها و ساختمان‌های بلند عمل می‌کند (Luft, 1979). دن‌هارتوگ در اصل مفهوم اساسی کنترل ارتعاش با TMD را بنا نمود، که تحت فرض ساده یک سازه بدون میرایی در معرض بارگذاری هارمونیک عمل می‌کند (Den Hartog, 1985). بعدها، رویکردهای مختلفی برای ارزیابی نحوه عملکرد پارامترهای TMD بر عملکرد ساختارهای کنترل شده مورد بررسی قرار گرفت (Warburton, 1982)، (Sadek et al, 1997)، (Hadi and Arfiadi, 1998) و (Lee et al, 2006). مطالعات جدید از تکنیک‌های تکاملی برای بهینه‌سازی پارامترهای TMD استفاده کرده‌اند (Bekdaş and Nigdeli, 2011)، (Kaveh et al, 2015)، (Bekdaş et al, 2018)، (Yucel et al, 2019) و (Fahimi and Kaveh, 2020). علاوه بر این، پیکربندی‌های TMD متعددی برای افزایش اثربخشی سازه‌های کنترل شده ابداع شده است (De Domenico et al, 2020)، (De Domenico et al, 2018)، (Rajana et al, 2023)، (Wang and Giaralis, 2021)، (Petrini et al, 2020) و (De Domenico, 2018).

عملکرد میراگر جرمی تنظیم شونده کاملاً تحت تاثیر مقدار پارامترهای جرم، سختی و میرایی میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) می‌باشد. در نتیجه برای طراحی بهینه سازه‌های مجهز به میراگر جرمی تنظیم شونده از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. از این رو طراحی سیستم‌های کنترل سازه در چارچوب مسائل بهینه‌سازی مطرح می‌شود (Cheng et al, 2008). کارایی سامانه TMD منفرد نسبت به فرکانس طبیعی سازه یا درصد میرایی TMD بسیار حساس است که تنظیم نشدن فرکانس یا بهینه نبودن میرایی، بطور چشم‌گیری از کارایی سامانه کنترلی TMD منفرد می‌کاهد. برای برطرف کردن این اشکالات، بکارگرفتن میراگر جرمی تنظیم شده چندگانه (MTMD) با مشخصات دینامیکی متفاوت برای هر TMD پیشنهاد شده است (Luft, 1979). میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه (MTMD) از چندین میراگر جرمی تنظیم شده منفرد (TMD) تشکیل شده که این میراگرها می‌توانند به دو شکل موازی و سری، طراحی و در سازه نصب شوند؛ همچنین کارایی میراگرهای جرمی تنظیم شده چندگانه حساسیت کمتری نسبت به قطعیت پارامترهای سامانه دارد.

استراتژی‌های حل مسائل بهینه‌سازی معمولاً به دو طبقه‌بندی اولیه تقسیم می‌شوند: استراتژی‌های مبتنی بر گرادیان و مبتنی بر جستجو. از آنجایی که پیشرفت‌ها در علوم کامپیوتر موضوعات محاسباتی را ساده‌تر کرده است، روش‌های بهینه‌سازی ظهور کرده‌اند. الگوریتم‌های فراابتکاری زیرمجموعه‌ای از استراتژی‌های بهینه‌سازی را تشکیل می‌دهند که از پدیده‌های طبیعی یا اصول فیزیکی برای کشف راه حل بهینه جهانی الهام می‌گیرند (Kaveh and Eslamlou, 2020). می‌توان به برخی از الگوریتم‌های فراکاوشی معروف مانند بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Kennedy and Eberhart, 1995)، بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها (Dorigo et al, 1996)، جستجوی سیستم ذرات باردار (Kaveh and Talatahari, 2010)، انفجار بزرگ-انقباض بزرگ (Erol and Eksin, 2006)، الگوریتم بهینه‌سازی ملخ (Saremi et al, 2017) و بهینه‌سازی بازی آشوب (Talatahari and Azizi, 2021) اشاره کرد.

۲- الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی

براساس نظریه انفجار بزرگ، جهان ما با یک انفجار عظیم شروع گردید که منشا همه چیز در این جهان است. نظریه چندجهانی نشان می‌دهد که بیش از یک انفجار بزرگ وجود دارد و هر انفجار بزرگ باعث تولد یک جهان می‌شود. اصطلاح چندجهانی در مقابل کیهان قرار دارد که به وجود جهان‌های دیگر علاوه بر جهانی که همه ما در آن زندگی می‌کنیم اشاره دارد. در نظریه چندجهانی، جهان‌های چندگانه برهم کنش دارند و حتی ممکن است با یکدیگر برخورد کنند. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر نظریه چندجهانی مطابق با سه مفهوم اصلی این نظریه به‌عنوان سفیدچاله‌ها، سیاهچاله‌ها و کرم‌چاله‌ها فرمول‌بندی شده است. فیزیکدانان انفجار بزرگ را یک سفیدچاله می‌دانند و سفیدچاله‌ها جزء اصلی تولد یک جهان هستند. سیاهچاله‌ها با نیروی گرانشی بسیار بالای خود همه چیز از جمله پرتوهای نور

را جذب می کنند. کرم چاله ها بخش های مختلف جهان را به هم متصل می کنند و به عنوان تونل های سفر در زمان/فضا عمل می کنند که در آن اجسام می توانند فوراً بین هر گوشه ای از جهان حرکت کنند (Mirjalili et al, 2016).

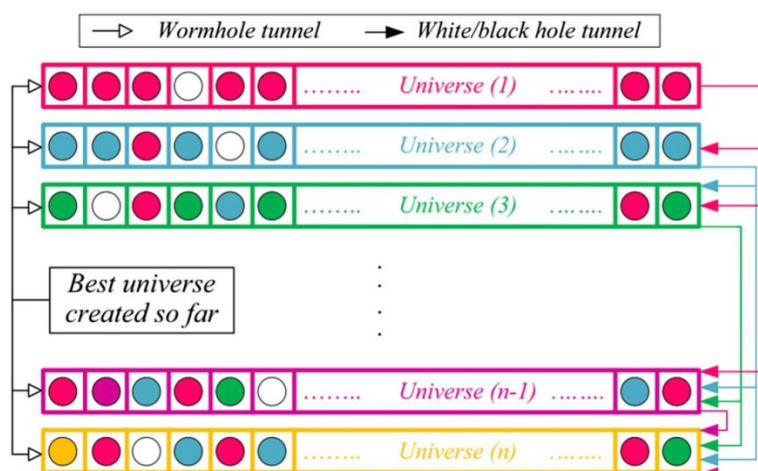
الگوریتم بهینه سازی چند جهانی یک الگوریتم فراکاوشی مبتنی بر جمعیت می باشد که فرآیند جستجو را به دو مرحله اکتشاف و بهره برداری تقسیم می کند. مفاهیم سفیدچاله و سیاهچاله به منظور اکتشاف در فضاهای جستجو استفاده می شود. کرم چاله ها نیز به بهره برداری از فضاهای جستجو کمک می کنند. در این الگوریتم، هر راه حل مشابه یک جهان است و هر متغیر متناظر با یک شی در آن جهان می باشد. علاوه بر این، یک نرخ تورم به هر جهان اختصاص داده می شود که متناسب با مقدار تابع هدف راه حل متناظر است. در این الگوریتم، اجسام اجازه دارند از طریق تونل های سفید/سیاهچاله بین جهان های مختلف حرکت کنند. هنگامی که یک تونل سفید/سیاه بین دو جهان ایجاد می شود، جهانی با نرخ تورم بالاتر به عنوان دارای سفیدچاله در نظر گرفته می شود، در حالی که جهانی با نرخ تورم کمتر، صاحب سیاهچاله ها است. سپس اجسام از سفیدچاله های جهان مبدأ به سیاهچاله های جهان مقصد منتقل می شوند. مدل شماتیکی از الگوریتم چند جهانی در شکل ۲ نشان داده شده است.

به منظور مدل سازی ریاضی تونل های سفید/سیاهچاله و تبادل اجسام جهان ها، مکانیزم چرخ رولت انتخاب می شود. در هر تکرار، جهان ها براساس نرخ تورم شان دسته بندی می شوند و یکی از آنها توسط چرخ رولت انتخاب می شود تا یک سفیدچاله داشته باشد. فرض می شود U کل جهان است.

$$U = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \dots & x_1^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \dots & x_n^d \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$x_i^j = \begin{cases} x_k^j & r_1 < NI(U_i) \\ x_i^j & r_1 \geq NI(U_i) \end{cases} \quad (2)$$

که در آن d تعداد پارامترها (متغیرها)، n تعداد جهان ها (راه حل) است. عبارت x_i^j پارامتر j -ام جهان i را نشان می دهد، U_i جهان i -ام را نشان می دهد، $NI(U_i)$ نرخ تورم نرمال شده جهان i -ام است، r_1 یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین $[0, 1]$ است. و x_k^j پارامتر j -ام جهان k را نشان می دهد که توسط مکانیزم چرخ رولت انتخاب شده است.



شکل ۱: مدل شماتیک از الگوریتم بهینه سازی چند جهانی

برای ایجاد تغییرات محلی برای هر جهان و داشتن احتمال بالا برای بهبود نرخ تورم با استفاده از کرم‌چاله‌ها، تونل‌های کرم‌چاله همیشه بین یک جهان با بهترین جهانی که تاکنون شکل گرفته است ایجاد می‌شود. این مکانیسم به صورت رابطه (۳) فرمول‌بندی می‌شود:

$$x_i^j = \begin{cases} \left(X_j + TDR \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j) \right) & r_3 < 0.5 \\ \left(X_j + TDR \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j) \right) & r_3 \geq 0.5 \end{cases} \quad r_2 < WEP \quad (3)$$

$$x_i^j \quad r_2 \geq WEP$$

که در آن X_j پارامتر j -ام بهترین جهان تشکیل شده را نشان می‌دهد، lb_j کران پایینی متغیر j -ام، ub_j کران بالایی متغیر j -ام، x_i^j پارامتر j -ام جهان i را نشان می‌دهد. همچنین r_2 و r_3 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ می‌باشند. WEP (احتمال وجود کرم‌چاله) عاملی برای تعریف احتمال وجود کرم‌چاله در جهان‌ها است. همچنین TDR (نرخ مسافت سفر) عاملی برای تعریف نرخ مسافت است که یک جسم می‌تواند توسط یک کرم‌چاله به اطراف بهترین جهان به‌دست‌آمده از راه دور منتقل شود.

$$WEP = \min + l \times \left(\frac{\max - \min}{L} \right) \quad (4)$$

$$TDR = 1 - \frac{l^{1/p}}{L^{1/p}} \quad (5)$$

که در آن \min یک مقدار حداقل، \max یک مقدار حداکثر، l نشان دهنده تکرار فعلی، L نشان دهنده حداکثر تکرار، و p دقت بهره‌برداری در تکرار را تعریف می‌کند.

در الگوریتم MVO، فرآیند بهینه‌سازی با ایجاد مجموعه‌ای از جهان‌های تصادفی آغاز می‌شود. در هر تکرار، اجسامی در جهان‌های با نرخ تورم بالا تمایل دارند از طریق سفید/سیاه چاله‌ها به جهان‌هایی با نرخ تورم پایین حرکت کنند. در همین حال، هر جهان منفرد با انتقال تصادفی در اجسام خود از طریق کرم‌چاله‌ها به سمت بهترین جهان مواجه است. این فرآیند تا برآورده شدن معیارهای همگرایی تکرار می‌شود. هر دو معادله نرخ‌های اکتشاف و بهره‌برداری از الگوریتم اصلی (MVO) را نشان می‌دهند.

۳- مدل‌سازی سازه‌های دارای میراگرهای جرمی

برای یک مدل ساختمان برشی با یک TMD در بالای سازه، جرم، سختی و ضریب میرایی و تغییرمکان افقی i امین طبقه به ترتیب با M_i ، K_i و C_i نشان داده می‌شود. اگر $i=1,2,\dots,N$ باشد برای TMD نصب شده در بالای یک سازه با m_d ، k_d و c_d جرم، سختی و ضریب میرایی می‌باشند. تغییرمکان میراگر TMD نسبت به زمین x_d می‌باشد (شکل ۲). در معادله حرکت سازه مجهز به میراگر جرمی TMD، مشخصات دینامیکی سازه (ماتریس جرم، سختی، میرایی و بردار تغییرمکان) به صورت زیر نشان داده می‌شوند:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & m_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & \\ & -k_3 & & & \\ & & & k_n + k_d & -k_d \\ & & & -k_d & k_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & \\ & -c_3 & & & \\ & & & c_n + c_d & -c_d \\ & & & -c_d & c_d \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$X(t) = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n \quad x_d] \quad (9)$$

میراگر جرمی تنظیم شونده مرکب سری (S-MTMD) متشکل از دو میراگر جرمی (TMD) متصل به هم می باشد که هر یک دارای یک وزنه، فنر و میراگر می باشد و با عملکرد مرکب موجب کاهش بیشتر در پاسخهای سازه می شود. شکل ۲ تصویر شماتیکی از یک میراگر جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMD) را با ترکیبهای سری نشان می دهد. اجزای یک میراگر جرمی مرکب شامل پارامترهای میراگر جرمی اولیه (اصلی)، متشکل از جرم وزنه (m_{d1})، سختی فنر (k_{d1}) و میرایی میراگر (c_{d1}) و پارامترهای میراگر جرمی ثانویه، شامل جرم وزنه (m_{d2})، سختی فنر (k_{d2}) و میرایی میراگر (c_{d2}) می باشد.

جهت تعیین معادلات حاکم بر حرکت سازه های مجهز به یک میراگر جرمی مرکب به ازای هر یک از جرم های میراگر اصلی و میراگر کمکی، یک درجه آزادی اختصاص می یابد. مشخصات دینامیکی سازه های مجهز به میراگر جرمی مرکب MTMD مانند جرم، سختی و میرایی به صورت زیر خواهد بود:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & m_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_{d1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & m_{d2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & \\ & -k_3 & & & & \\ & & & -k_n & & \\ & & & k_n + k_{d1} & -k_{d1} & \\ & & & -k_n & -k_{d1} & k_{d1} + k_{d2} & -k_{d2} \\ & & & & & -k_{d2} & k_{d2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & \\ & -c_3 & & & & \\ & & & -c_n & & \\ & & & c_n + c_{d1} & -c_{d1} & \\ & & & -c_n & -c_{d1} & c_{d1} + c_{d2} & -c_{d2} \\ & & & & & -c_{d2} & c_{d2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$X(t) = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n \ x_{d1} \ x_{d2}] \quad (13)$$

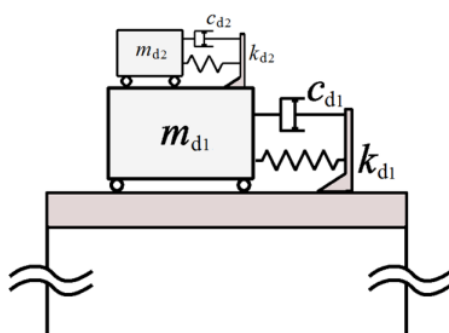
در شکل ۲-ج تصویر شماتیکی از یک میراگر جرمی تنظیم شونده چندگانه با ترکیب‌های موازی (P-MTMD) را نشان می‌دهد. اجزای یک میراگر جرمی مرکب از دو میراگر موازی شامل پارامترهای میراگر جرمی ۱، متشکل از جرم وزنه (m_{d1})، سختی فنر (k_{d1}) و میرایی میراگر (c_{d1}) و پارامترهای میراگر جرمی ۲، شامل جرم وزنه (m_{d2})، سختی فنر (k_{d2}) و میرایی میراگر (c_{d2}) می‌باشد. مشخصات دینامیکی سازه‌های مجهز به میراگر جرمی مرکب موازی مانند جرم، سختی و میرایی به صورت زیر خواهد بود:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & m_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_{d1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & m_{d2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

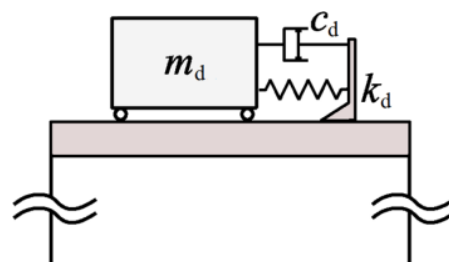
$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & & \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & & & \\ & -k_3 & & & & \\ & & & -k_n & & \\ & & & k_n + k_{d1} + k_{d2} & -k_{d1} & -k_{d2} \\ & & & -k_{d1} & k_{d1} & 0 \\ & & & -k_{d2} & 0 & k_{d2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & \\ & -c_3 & & & & \\ & & & -c_n & & \\ & & & c_n + c_{d1} + c_{d2} & -c_{d1} & -c_{d2} \\ & & & -c_{d1} & c_{d1} & 0 \\ & & & -c_{d2} & 0 & c_{d2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

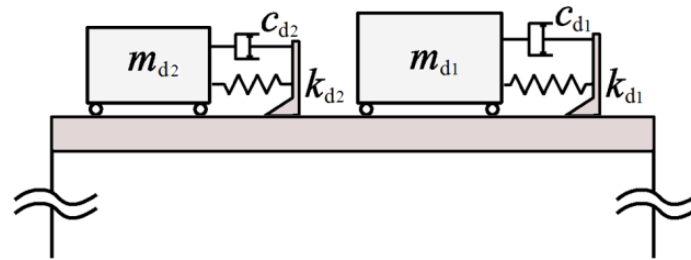
$$X(t) = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n \ x_{d1} \ x_{d2}] \quad (17)$$



(ب) حالت MTMD سری



(الف) حالت TMD منفرد



(ج) حالت MTMD موازی

(شکل ۲) تصویر شماتیکی از جزئیات ساختار ترکیب میراگرهای جرمی و متغیرهای طراحی

۴) مسئله بهینه‌سازی طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شونده

میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) متشکل از اجزای جرم وزنه، سختی فنر و میرایی ویسکوز می‌باشد. بمنظور دستیابی به عملکرد مناسب میراگر جرمی و رفتار لرزه‌ای بهینه سازه ساختمانی نیاز به طراحی بهینه پارامترهای جرم وزنه (m_d)، سختی فنر (k_d) و میرایی ویسکوز (c_d) می‌باشد. در نتیجه سه مولفه جرم وزنه (m_d)، سختی فنر (k_d) و میرایی میراگر (c_d) به عنوان متغیرهای طراحی در مسئله بهینه‌سازی طراحی میراگرهای جرمی (TMD) انتخاب می‌شوند. همچنین به منظور طراحی بهینه یک میراگر جرمی تنظیمی چندگانه (MTMD) نیاز به بهینه‌سازی اجزای میراگر جرمی اصلی (اولیه) و میراگر جرمی کمکی (ثانویه) می‌باشد. با در نظر گرفتن سه پارامتر برای هر یک از میراگرهای اصلی و کمکی در مجموع شش پارامتر به عنوان متغیرهای طراحی میراگر جرمی چندگانه (MTMD) انتخاب می‌شوند.

مسئله بهینه‌سازی برای طراحی میراگر جرمی ساده در فرم ریاضیاتی به صورت زیر قابل بیان است:

$$\text{For TMD: Find } X = \{m_d \quad k_d \quad c_d\} \quad (18)$$

$$\text{For S-MTMD: Find } X = \{m_{d1} \quad k_{d1} \quad c_{d1} \quad m_{d2} \quad k_{d2} \quad c_{d2}\}$$

$$\text{For P-MTMD: Find } X = \{m_{d1} \quad k_{d1} \quad c_{d1} \quad m_{d2} \quad k_{d2} \quad c_{d2}\}$$

$$\text{which minimizes Objective Function: } f(X) = J_1 + J_2 + J_3$$

برای بررسی عملکرد یک سیستم کنترل سازه‌ای نیاز به تعریف معیارهایی است تا کارایی این سیستم‌ها و ابزارهای کنترلی مورد استفاده را در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها مشخص نماید. این معیارها در قالب شاخص‌هایی تعریف می‌شوند که شاخص عملکرد نامیده می‌شوند. شاخص‌های عملکرد بر مبنای پاسخ‌های لرزه‌ای مانند تغییر مکان جانبی، دریف نسبی، شتاب طبقات و در حالات حداکثر پاسخ‌ها و نرم پاسخ‌ها تعریف می‌شوند. شاخص‌های عملکرد مبتنی بر حداکثر پاسخ‌های تغییر مکان جانبی، دریف نسبی، شتاب طبقات به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$J_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Max}(d_{i,\text{Controlled}})}{\text{Max}(d_{i,\text{Uncontrolled}})} \quad (19)$$

$$J_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Max}(drift_{i,\text{Controlled}})}{\text{Max}(drift_{i,\text{Uncontrolled}})}$$

$$J_3 = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Max}(\ddot{d}_{i,\text{Controlled}})}{\text{Max}(\ddot{d}_{i,\text{Uncontrolled}})}$$

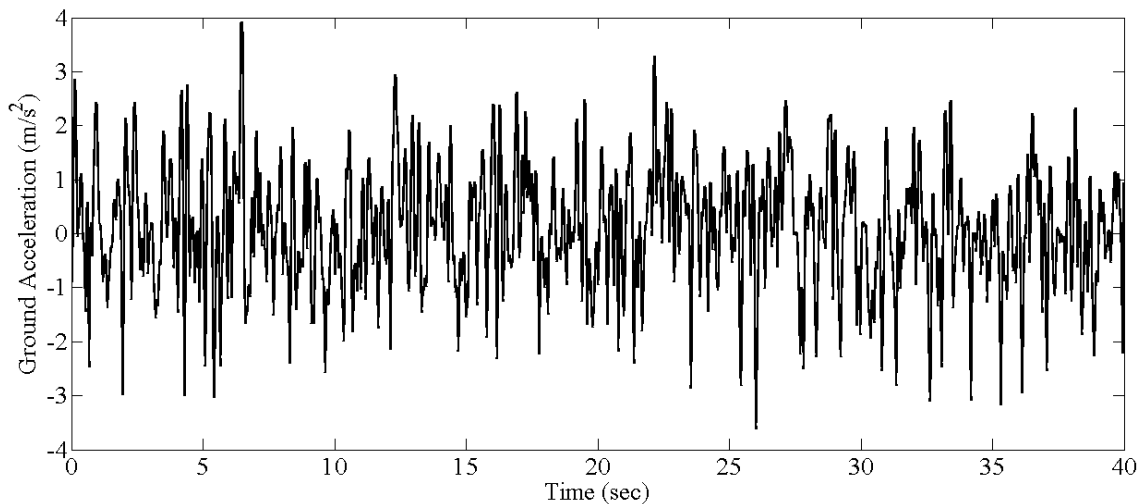
در این رابطه d_i جابجایی جانبی طبقه i ، $drift_i$ جابجایی نسبی (دریفت) طبقه i ، \ddot{d}_i شتاب طبقه i و n تعداد طبقات می‌باشد.

مدل سازه‌ای مورد مطالعه یک مدل ساختمانی مبنا با ارتفاع ۱۰ طبقه می‌باشد که به عنوان مبنا و مرجعی برای پژوهش‌های کنترل سازه با میراگر جرمی تنظیم شونده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش به عنوان صحت‌سنجی روش‌های مدل‌سازی و تحلیل لرزه‌ای از این مدل سازه‌ای استفاده گردید که ارزیابی دقت پاسخ‌ها نشان دهنده صحت روش مدل‌سازی می‌باشد. این مدل سازه‌ای دارای سیستم قاب برشی دو بعدی با جرم متمرکز می‌باشد. مشخصات دینامیکی مدل سازه‌ای مورد مطالعه، در جدول ۱ ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می‌شود، مشخصات دینامیکی مدل سازه‌ای مورد استفاده برای مسئله مطالعه عددی مانند جرم، سختی و میرایی برای تمام طبقات سازه یکسان و مشابه می‌باشند. این مدل سازه‌ای در سه حالت استفاده از میراگر جرمی ساده TMD و میراگر جرمی مرکب MTMD با الگوی ترکیب موازی و سری کنترل خواهد شد.

جدول (۱) مشخصات دینامیکی مدل سازه‌ای مرجع جهت صحت‌سنجی

طبقه	جرم (ton)	سختی (10^3 KN/m)	میرایی (10^3 KN.s/m)
۱	۳۶۰	۶۵۰	۶.۲
۲	۳۶۰	۶۵۰	۶.۲
۳	۳۶۰	۶۵۰	۶.۲
۴	۳۶۰	۶۵۰	۶.۲
۵	۳۶۰	۶۵۰	۶.۲
۶	۳۶۰	۶۵۰	۶.۲
۷	۳۶۰	۶۵۰	۶.۲
۸	۳۶۰	۶۵۰	۶.۲
۹	۳۶۰	۶۵۰	۶.۲
۱۰	۳۶۰	۶۵۰	۶.۲

طراحی میراگرهای جرمی تحت بارگذاری ناشی از تحریک زمین انجام می‌شود. برای تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت شتاب‌نگاشت حرکت زمین استفاده می‌شود. برای تحریک ناشی از حرکت زمین می‌توان از شتاب‌نگاشت زمین‌لرزه‌های پیشین و یا زلزله‌های مصنوعی استفاده کرد. در این پژوهش از شتاب‌نگاشت تولید شده بوسیله روش تصادفی نویز سفید گوسی با دوره زمانی ۴۰ ثانیه و بیشینه شتاب $0.4g$ استفاده خواهد شد. شکل ۳ تصویر شتاب‌نگاشت تولید شده $(W_N(t))$ را نشان می‌دهد.



شکل ۳) تاریخچه زمانی شتاب زمین در حالت زلزله مصنوعی با نویز تصادفی ($WN(t)$)

۵- بحث و بررسی نتایج

در این بخش تاثیر ساختار و الگوی ترکیب میراگر جرمی تنظیم شونده بر رفتار و پاسخ لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی مورد ارزیابی و مقایسه قرار می‌گیرد. از این رو پاسخ‌های لرزه‌ای مدل سازه‌ای ۱۰ طبقه در حالت‌های کنترل نشده و کنترل شده با میراگر جرمی تنظیم شونده TMD، میراگر جرمی مرکب با الگوهای سری (S-MTMD) و میراگر جرمی مرکب با الگوی موازی (P-MTMD) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. پاسخ‌های لرزه‌ای در حالت سازه کنترل شده با میراگر جرمی به ازای مقادیر بهینه طراحی شده با الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی (MVO) ارائه می‌گردد. این پاسخ‌ها شامل پاسخ دریافت حداکثر طبقات، جابجایی جانبی حداکثر طبقات و شتاب حداکثر طبقات می‌باشد که برای حالات مختلف کنترل سازه با میراگر جرمی مقایسه می‌شوند تا کارایی هر نوع از میراگرهای جرمی تنظیم شونده مورد بررسی قرار گیرد. جدول ۲ پارامترهای طراحی شده برای انواع ترکیب میراگر جرمی با الگوریتم چند جهانی (MVO) نشان می‌دهد.

جدول ۲) پارامترهای طراحی شده برای انواع ترکیب میراگر جرمی با

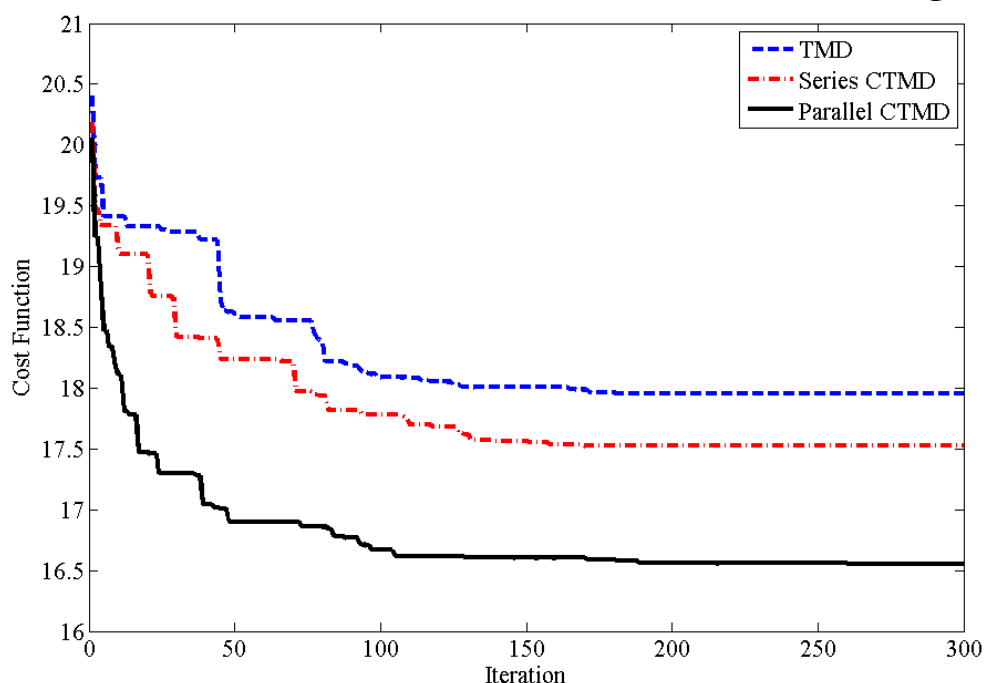
نوع ترکیب	زیر بخش	جرم (ton)	سختی (kN/m)	میرایی ($kN.s/m$)
TMD	میراگر اصلی	۱۰۹۰۰۷	۴۲۴۴۰۹	۲۲۱۰۳۱
MTMD سری	میراگر اصلی	۹۰۰۹۶۴	۶۵۱۹۰۴	۹۳۰۷۲۸
	میراگر کمکی	۵۹۰۳۹۴	۱۲۴۸۰۵	۴۶۲۰۶۲
MTMD موازی	میراگر جرمی ۱	۷۷۰۰۷۷	۳۵۱۰۰۹	۵۸۰۹۵۸
	میراگر جرمی ۲	۶۹۰۶۲۲	۱۶۲۳۰۲	۲۲۰۷۰۷

مقایسه‌ای از نتایج بدست آمده برای حداقل تابع هدف، حداکثر پاسخ‌های لرزه‌ای سازه و میانگین کاهش در پاسخ‌های سازه در جدول ۳ برای حالت‌های کنترل نشده، TMD منفرد، MTMD سری و MTMD موازی ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که میراگر جرمی مرکب MTMD با ترکیب موازی از قابلیت بهتری در کاهش حداکثر پاسخ‌ها و نرخ کاهش در پاسخ برخوردار می‌باشد.

جدول ۳) مقایسه پاسخ‌های حداکثر و میزان کاهش پاسخ‌ها

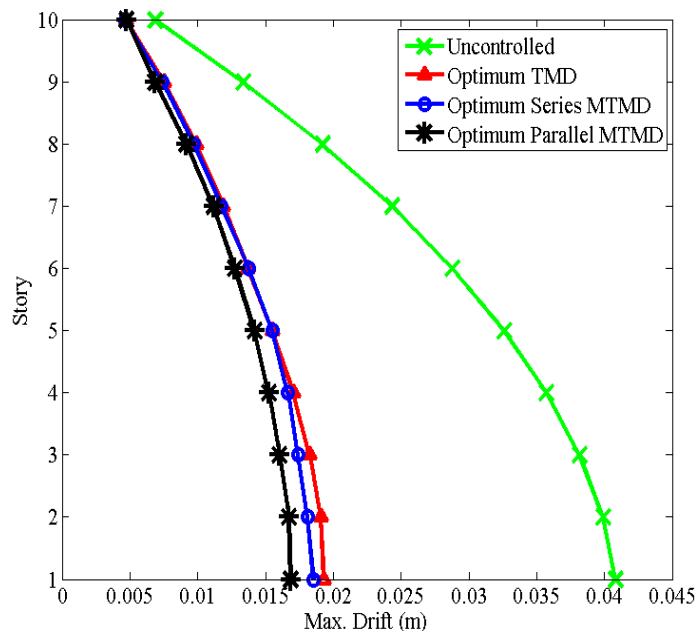
نوع میراگر جرمی	کنترل نشده	TMD	MTMD سری	MTMD موازی
تابع هدف	-	۱۷.۹۵۰۱	۱۷.۵۲۱۹	۱۶.۵۵۱۵
پاسخ حداکثر	دریافت (cm)	۴.۰۸۱	۱.۸۵۵	۱.۰۶۸۷
	جابجایی (cm)	۲۷.۹۸	۱۲.۹۰	۱۱.۹۶
	شتاب (m/s^2)	۱۲.۴۱	۶.۷۸	۶.۷۹
میانگین کاهش	دریافت (cm)	-	۴۹.۸۸	۵۲.۹۹
	جابجایی (cm)	-	۵۴.۶۹	۵۸.۳۳
	شتاب (m/s^2)	-	۱۹.۶۷	۲۲.۶۱

تاریخچه همگرایی تابع هدف بر مبنای مجموع نسبت پاسخ‌های لرزه‌ای کنترل شده به پاسخ‌های سازه‌ی کنترل نشده برای مسئله بهینه‌سازی طراحی میراگرهای جرمی در شکل ۵ مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میراگر جرمی مرکب MTMD موازی از توانایی بالایی نسبت به میراگر جرمی TMD و میراگر جرمی مرکب سری در کاهش تابع هدف برخوردار می‌باشد. مطابق با این نمودار ملاحظه می‌شود که استفاده از میراگر جرمی چندگانه با ترکیب موازی موجب می‌شود که تابع هدف در مسئله بهینه‌سازی طراحی میراگرهای جرمی به مقدار کمتری دست یابد.

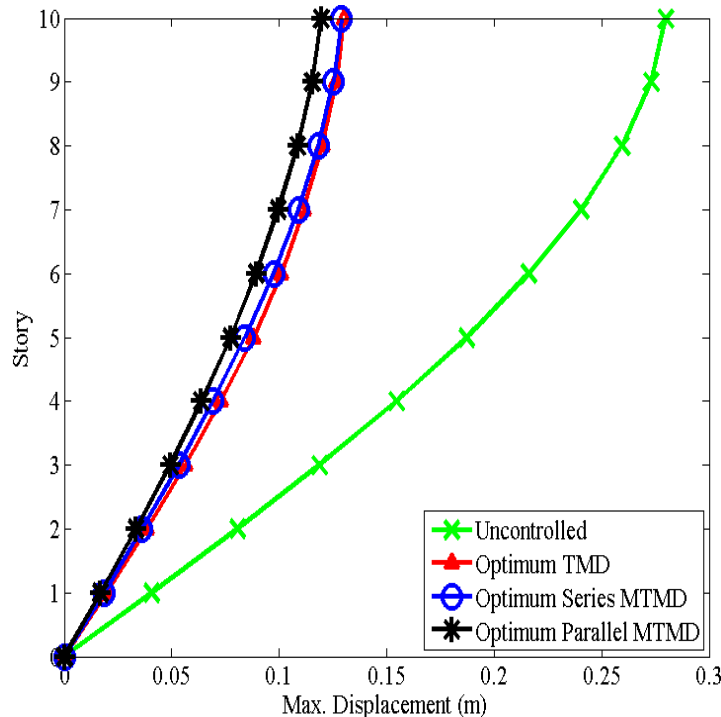


شکل ۴) مقایسه همگرایی تابع هدف برای بهینه‌سازی طراحی میراگر جرمی در حالات مختلف

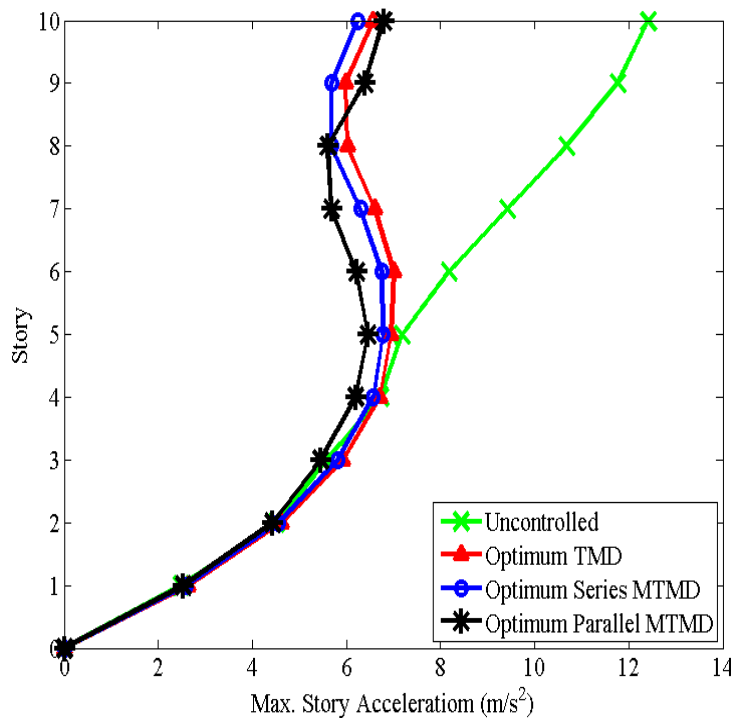
شکل‌های ۵ تا ۷ به ترتیب مقایسه پاسخ‌های دررفت، جابجایی جانبی و شتاب طبقات را برای مدل سازه‌ای ۱۰ طبقه در حالات مختلف نشان می‌دهد. مطابق با این اشکال ملاحظه می‌گردد که استفاده از میراگرهای جرمی در تمام حالات اعم از میراگر جرمی TMD و میراگر جرمی چندگانه MTMD با ترکیب سری و موازی موجب کاهش در پاسخ‌های لرزه‌ای جابجایی جانبی، دررفت و شتاب طبقات می‌شود. در این میان استفاده از میراگر جرمی چندگانه MTMD با ترکیب موازی موجب کاهش بیشتری در پاسخ‌های لرزه‌ای سازه می‌شود. به عبارتی سازه‌های مجهز به میراگرهای جرمی MTMD با ترکیب موازی از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد.



شکل ۵) مقایسه دررفت حداکثر برای سازه ۱۰ طبقه با در حالات مختلف از میراگر جرمی



شکل ۶) مقایسه جابجایی حداکثر برای سازه ۱۰ طبقه با در حالات مختلف از میراگر جرمی



شکل ۷) مقایسه شتاب حداکثر برای سازه ۱۰ طبقه با در حالات مختلف از میراگر جرمی

۶- نتیجه گیری

میراگرهای جرمی تنظیم شونده، گروهی از ابزارهای کنترل غیرفعال سازه‌ها می‌باشند که متشکل از جرم وزنه، سختی فنر و میرایی ویسکوز هستند. با انتخاب یک ترکیب بهینه از مقادیر مولفه‌های این میراگر می‌توان رفتار لرزه‌ای سازه را بطور مناسبی بهبود بخشید. از این رو در این پایان‌نامه طراحی بهینه مقادیر پارامترهای مکانیکی میراگر جرمی تنظیم شونده با بکارگیری روش‌های فراکاوشی مورد مطالعه قرار گرفت. برای حل مسئله بهینه‌سازی در طراحی میراگرها، الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی (MVO) مورد استفاده قرار گرفت. به عنوان یک تابع هدف و معیار بهینه‌سازی از تابعی بر مبنای نسبت پاسخ‌های لرزه‌ای مانند جابجایی جانبی، دریافت و شتاب در حالت‌های کنترل نشده و کنترل شده با میراگر جرمی استفاده شد.

به منظور کنترل غیرفعال سازه از سناریوهای مبتنی میراگرهای جرمی در ۳ حالت میراگر جرمی تنظیم شونده TMD و میراگرهای جرمی تنظیم شونده چندگانه (MTMD) با الگوی سری و موازی استفاده گردید. سپس رفتار لرزه‌ای سازه تحت این سه سناریو از میراگر جرمی مورد ارزیابی قرار گرفت. رفتار لرزه‌ای سازه‌های مجهز به میراگرهای جرمی و الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی (MVO) با استفاده از کدهای دستوری در محیط برنامه MATLAB شبیه‌سازی شدند. براساس فعالیت‌های انجام شده و نتایج بدست آمده، می‌توان به صورت زیر نتیجه‌گیری نمود:

- برای حل مسئله طراحی بهینه اجزای مکانیکی میراگرهای جرمی تنظیم شونده، الگوریتم بهینه‌سازی چند جهانی (MVO) از عملکرد مناسبی برای دستیابی به پاسخ‌های لرزه‌ای کمتر برخوردار می‌باشد. این الگوریتم در فاز اکتشاف و استخراج، سرعت همگرایی بالایی در یافتن نقطه بهینه دارا می‌باشد.
- در حالت کلی میراگرهای جرمی به ازای تمام الگوهای ساختاری اعم از میراگر جرمی ساده (TMD) و میراگرهای جرمی چندگانه (MTMD) با ترکیب سری و موازی منجر به بهبود رفتار لرزه‌ای و کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای می‌گردد.

- استفاده از میراگرهای جرمی مرکب (MTMD) در مقایسه با نوع ساده آن از توانایی بیشتری برای کاهش پاسخهای لرزه‌ای سازه برخوردار هستند. همچنین در این بین، میراگر جرمی چندگانه با ترکیب موازی دارای بهترین عملکرد در کاهش پاسخ سازه تحت تحریکات لرزه‌ای می‌باشد.
- برای پاسخ جابجایی جانبی، بکارگیری میراگر جرمی ساده TMD حداکثر پاسخ جابجایی جانبی سازه را ۵۳.۴۴ درصد کاهش می‌دهد، این در حالیست که میراگرهای جرمی چندگانه با ترکیب سری و موازی، حداکثر پاسخ جابجایی جانبی سازه را به ترتیب به میزان ۵۳.۸۹ و ۵۷.۲۷ درصد کاهش می‌دهند.
- استفاده از میراگر جرمی ساده TMD حداکثر پاسخ دررفت بین طبقات سازه را ۵۲.۶۴ درصد کاهش می‌دهد، در حالی که میراگرهای جرمی چندگانه با ترکیب سری و موازی، حداکثر پاسخ دررفت بین طبقات سازه را به ترتیب به میزان ۵۴.۵۴ و ۵۸.۶۷ درصد کاهش می‌دهند.
- بکارگیری میراگر جرمی ساده TMD حداکثر پاسخ شتاب طبقات سازه را از ۱۲.۴۱ به ۷.۰۲ متر بر مجذور ثانیه تقلیل می‌دهد، این در حالیست که میراگرهای جرمی چندگانه با ترکیب سری و موازی، حداکثر پاسخ شتاب جانبی طبقات را به ترتیب به مقدار ۶.۷۸ و ۶.۷۹ کاهش می‌دهند.

منابع:

- Bekdaş G., S.M. Nigdeli, (2011). Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search, *Engineering Structures*, 33, 2716-2723.
- Bekdaş G., S.M. Nigdeli, X.-S. Yang, (2018). A novel bat algorithm based optimum tuning of mass dampers for improving the seismic safety of structures, *Engineering Structures*, 159, 89-98.
- Cheng F.Y., H. Jiang, K. Lou, (2008). *Smart structures: innovative systems for seismic response control*, CRC press.
- De Domenico D., H. Qiao, Q. Wang, Z. Zhu, G. Marano, (2020). Optimal design and seismic performance of Multi-Tuned Mass Damper Inerter (MTMDI) applied to adjacent high-rise buildings, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 29(14), e1781.
- De Domenico D., N. Impollonia, G. Ricciardi, (2018). Soil-dependent optimum design of a new passive vibration control system combining seismic base isolation with tuned inerter damper, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 105, 37-53.
- De Domenico D., G. Ricciardi, (2018). Optimal design and seismic performance of tuned mass damper inerter (TMDI) for structures with nonlinear base isolation systems, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 47, 2539-2560.
- Den Hartog J.P., (1985). *Mechanical vibrations*, Courier Corporation.
- Dorigo M., V. Maniezzo, A. Coloni, (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents, *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part b (cybernetics)*, 26, 29-41.
- Erol O.K., I. Eksin, (2006). A new optimization method: big bang-big crunch, *Advances in engineering software*, 37, 106-111.
- Fahimi Farzam M., A. Kaveh, (2020). Optimum design of tuned mass dampers using colliding bodies optimization in frequency domain, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44, 787-802.
- Hadi M.N., Y. Arfiadi, (1998). Optimum design of absorber for MDOF structures, *Journal of Structural Engineering*, 124, 1272-1280.
- Kaveh A., A.D. Eslamlou, (2020). *Metaheuristic optimization algorithms in civil engineering: new applications*, Springer.
- Kaveh A., S. Talatahari, (2010). A novel heuristic optimization method: charged system search, *Acta mechanica*, 213, 267-289.
- Kaveh A., S. Mohammadi, O.K. Hosseini, A. Keyhani, V. Kalatjari, (2015). Optimum parameters of tuned mass dampers for seismic applications using charged system search, *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering*, 39, 21.
- Kennedy J., R. Eberhart, (1995). Particle swarm optimization, in: *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, IEEE, pp. 1942-1948.

- Lee C.-L., Y.-T. Chen, L.-L. Chung, Y.-P. Wang, (2006). Optimal design theories and applications of tuned mass dampers, *Engineering structures*, 28, 43-53.
- Luft R.W., (1979). Optimal tuned mass dampers for buildings, *Journal of the Structural Division*, 105, 2766-2772.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Hatamlou, A. (2016). Multi-Verse Optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization. *Neural Computing and Applications*, 27, 495-513
- Petrini F., A. Giaralis, Z. Wang, (2020). Optimal tuned mass-damper-inerter (TMDI) design in wind-excited tall buildings for occupants' comfort serviceability performance and energy harvesting. *Engineering Structures*, 204, 109904.
- Rajana K., Z. Wang, A. Giaralis, (2023). Optimal design and assessment of tuned mass damper inerter with nonlinear viscous damper in seismically excited multi-storey buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(3), 1509-1539.
- Sadek F., B. Mohraz, A.W. Taylor, R.M. Chung, (1997). A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26, 617-635.
- Saremi S., S. Mirjalili, A. Lewis, (2017). Grasshopper optimisation algorithm: theory and application, *Advances in engineering software*, 105, 30-47.
- Soong T.T., M.C. Costantinou, (2014). *Passive and active structural vibration control in civil engineering*, Springer.
- Talatahari S., M. Azizi, (2021). Chaos game optimization: a novel metaheuristic algorithm, *Artificial Intelligence Review*, 54, 917-1004.
- Wang Z., A. Giaralis, (2021). Enhanced motion control performance of the tuned mass damper inerter through primary structure shaping. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(8), e2756.
- Warburton G.B., (1982). Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10, 381-401.
- Yucel M., G. Bekdaş, S.M. Nigdeli, S. Sevgen, (2019). Estimation of optimum tuned mass damper parameters via machine learning, *Journal of Building Engineering*, 26, 100847.

Design and evaluation of seismic behavior of multi-tuned mass dampers (TMD) using multiverse optimization (MVO) algorithm

Milad Hemmati

MSc of Civil Engineering, University of Tabriz

Abstract

Tuned mass dampers are a group of passive control tools for structures that consist of mass, spring, and damping. By choosing an optimal combination of the values of the components of this damper, the seismic behavior of the structure can be properly improved. Multi-verse optimization (MVO) algorithm was used to solve the optimization problem in the design of dampers. As an objective function and optimization criterion, a function based on the ratio of seismic responses in uncontrolled and controlled states with a mass damper was used. In order to passive control the structure, scenarios based on the structure of mass dampers were used in 3 modes of single TMD adjustable mass damper and multiple adjustable mass dampers (MTMD) with series and parallel patterns. Then the seismic behavior of the structure was evaluated under these three scenarios of the mass damper. The seismic behavior of structures equipped with mass dampers and multi-verse optimization algorithm were simulated using command codes in the MATLAB environment. The obtained results show that to solve the problem of optimal design of the mechanical components of adjustable mass dampers, the multi-verse optimization (MVO) algorithm has a suitable performance to achieve less seismic responses. This algorithm has a high convergence speed in finding the optimal point in the exploration and extraction phase. In general, mass dampers for all structural models, including simple mass damper (TMD) and multiple mass dampers (MTMD) with series and parallel combinations lead to improvement of seismic behavior and reduction of seismic responses. The use of composite mass dampers (MTMD) has a greater ability to reduce the seismic responses of the structure compared to its simple type. Also, in the meantime, the multiple mass damper with parallel combination has the best performance in reducing the response of the structure under seismic excitations.

Keywords: Optimization, multi-verse optimization algorithm (MVO), structure control, mass damper (TMD).