



کد مقاله: ۱-۱۵۵

## کاربرد الگوریتم جستجوی هارمونی در بهینه سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شونده

حسین صابری<sup>۱</sup>، حسن صابری<sup>۲</sup>، غلامرضا هوائی<sup>۳</sup>، یزدان حیاتی<sup>۴</sup>

۱-دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، [h.saberi@aut.ac.ir](mailto:h.saberi@aut.ac.ir)

۲-کارشناس ارشد سازه، دانشگاه یزد

۳-عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

۴-دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

### چکیده

در مطالعه حاضر با بکارگیری الگوریتم جستجوی هارمونی، روشی جهت بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی در مورد سازه‌های چند درجه آزادی ارائه می‌شود. با در نظر گرفتن دو تابع هدف شامل تابع هدف پیشنهادی بکداس و نیگدلی و تابع هدف معرفی شده در این تحقیق، دو نوع میراگر جرمی طرح‌ریزی می‌شود. توابع انتقال مربوط به تغییر مکان و شتاب طبقات اول و دهم دو سازه برشی نشان می‌دهند که تابع هدف معرفی شده، از قابلیت اعتماد بالاتری نسبت به تابع هدف بکداس و نیگدلی برخوردار است. بعلاوه، در تمام زمین‌لرزه‌ها حداکثر جابجایی و نیروی تولید شده توسط میراگر در طرح مربوط به تابع هدف ارائه شده، نسبت به تابع هدف بکداس و نیگدلی کاهش قابل توجهی داشته است.

**کلمات کلیدی:** میراگر جرمی، جست و جوی هارمونی، فضای حالت، تحلیل مودال.

### ۱- مقدمه

میراگرهای جرمی تنظیم شونده در زمره وسایل کنترل غیر فعالی هستند که امروزه در سازه‌هایی نظیر ساختمان‌های بلند و پل‌های با دهانه‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. از موارد کاربرد این میراگرها می‌توان به برج ۵۳۵ متری سی اندر کانادا، ساختمان ۶۰ طبقه جان هانکوک در بوستون ایالت متحده، برج ۳۰۵ متری ستر پوینتدر سیدنی، برج ۵۰۴ متری تاییبی [۱]. از زمانی که دن هارتوگ [۲] اولین بار تئوری طراحی بهینه این میراگرها را در مورد سازه‌های یک درجه آزادی غیر میرا پیشنهاد نمود تا به امروز، روش‌های مختلفی جهت بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی پیشنهاد شده است. از آنجا که به جز در مورد سیستم‌های یک درجه آزادی بدون میرایی، شرایط طراحی بهینه میراگر جرمی یک مجموعه معادلات همزمان غیرخطی است، بدست آوردن حل دقیق این طراحی مستلزم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی در جهت کمینه ساختن پاسخ‌های مختلف سازه است [۳]. از این رو، هادی و آرفیادی با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای میراگر جرمی را در مورد ۳ نوع سازه چند درجه آزادی بهینه نمودند. نتایج حاصل از مقایسه این روش با روش‌های پیشنهادی مختلف که تا آن

زمان مطرح شده بودند نشان از برتری این روش نسبت به روش‌های قبلی داشت [۴]. وانگ و چی، قابلیت اتلاف و انتقال انرژی در سازه‌های کنترل شده با استفاده از میراگر جرمی را مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش نمودند که میراگرهای جرمی در کاهش حداکثر مقادیر انرژی‌های کرنشی و جنبشی سازه‌ها بسیار موثر بوده و مقدار انرژی که می‌بایست توسط سازه مرتعش میرا شود به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. ضمن اینکه میراگرهای جرمی در کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه‌هایی با دوره تناوب بالاتر، موثرتر می‌باشند [۵]. اسگوبا و مارانو از الگوریتم ژنتیک جهت طراحی میراگر جرمی در مورد سازه یک درجه آزادی غیرخطی که تحت ارتعاش تابع تصادفی وایت نویز قرار دارد استفاده نمودند. تغییر مکان ماکزیمم، میانگین انرژی اتلافی هیستریسیس و تابع خسارت که دو شاخص مذکور را در بر می‌گیرد، به عنوان توابع هدف در این مطالعه در نظر گرفته شده‌اند. نشان داده شده است که معیار انرژی، ضریب میرایی کوچکتر و نسبت فرکانسی، نسبت فرکانس میراگر به فرکانس سازه، بزرگتری را در مقایسه با معیار تغییر مکان ارائه می‌دهد [۶]. بانادیوادکار و جنگید طراحی بهینه میراگرهای جرمی چندگانه را در مورد سیستم‌های یک درجه آزادی میرا مورد مطالعه قرار دادند، آنها با مرتعش ساختن سازه توسط بارهای هارمونیک، پارامترهای این میراگر را در جهت کمینه ساختن حداکثر تغییر مکان حالت پایدار سازه طرح نمودند [۷]. زیلتی و همکاران جهت طراحی بهینه میراگر جرمی در مورد سازه مرتعش تحت نیروی تصادفی با چگالی طیف انرژی یکنواخت، از توابع هدف کمینه ساختن انرژی جنبشی در سازه اصلی و بیشینه ساختن قدرت اتلاف انرژی در میراگر استفاده نمودند [۸]. بهینه سازی میراگر جرمی در سیستم‌های یک درجه آزادی که تحت ارتعاش تابع تصادفی وایت نویز قرار دارند توسط تیگلی مورد مطالعه قرار گرفت. وی تغییر مکان، سرعت و شتاب سازه اصلی را به عنوان توابع هدف انتخاب نمود و نشان داد که همه پاسخ‌های در نظر گرفته جهت طراحی میراگر جرمی مطلوب بوده و معیار سرعت بهترین عملکرد با کمترین پیچیدگی در معادلات را دارد [۹].

در مطالعه حاضر، طراحی بهینه پارامترهای میراگر جرمی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی مورد بررسی قرار گرفته است. الگوریتم جستجوی هارمونی الگوریتمی تکاملی است که با الهام گیری از نحوه عملکرد یک گروه موسیقی به دنبال راه حل بهینه در مسائل مختلف است. در این تحقیق تابع هدف به صورت ترکیبی از مقادیر حداکثر توابع انتقال مربوط به تغییر مکان و شتاب طبقه فوقانی سازه در نظر گرفته شده است. همچنین تابع هدف متشکل از ماکزیمم مقدار تابع انتقال مربوط به شتاب طبقه اول و تغییر مکان طبقه اول تحت بار هارمونیک که توسط مرجع [۱۶] پیشنهاد شده است به منظور تصحیح اشتباهات صورت گرفته در مقاله اصلی نیز مورد توجه قرار گرفته است. از یک سازه ۱۰ طبقه برشی جهت ارزیابی طرح کنترل استفاده شده است و پاسخ‌های انرژی در زمین لرزه‌های مختلف به همراه توابع انتقال سازه در حالت‌های کنترل شده و کنترل نشده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در کلیه مراحل از روش فضای حالت، جهت تحلیل دینامیکی سازه استفاده شده است و روش تحلیل مودال، تنها در بخش اعتبار سنجی روش تحلیل مودال در سازه‌های کنترل شده با میراگر جرمی، مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲- معادلات انرژی و حل معادلات حاکم

تغییر مکان مطلق سازه مرتعش  $Y(t)$  که تحت تحریک پایه قرار دارد، به صورت مجموع تغییر مکان نسبیو تغییر مکان زمین تعریف می‌گردد. بنابراین خواهیم داشت [۵]:

$$\dot{Y}(t) = \dot{X}(t) + \dot{X}_g(t) \quad (1)$$

$$\ddot{Y}(t) = \ddot{X}(t) + \ddot{X}_g(t) \quad (2)$$

معادله حاکم بر حرکت سازه به صورت معادله **Error! Unknown switch argument.** است.

$$M\ddot{Y}(t) + C\dot{X}(t) + KX(t) = 0 \quad (3)$$

که در آن ماتریس‌های  $M$ ،  $K$  و  $C$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه می‌باشند. با انتگرال‌گیری از دو طرف معادله **Error! Unknown switch argument.** در بازه صفر تا  $t_k$  رابطه **Error! Unknown switch argument.** حاصل می‌گردد.

$$\int_{t=0}^{t=t_k} \ddot{Y}^T M dX + \int_{t=0}^{t=t_k} \dot{X}^T C dX + \int_{t=0}^{t=t_k} X^T K dX = 0 \quad (4)$$

با جایگزینی معادله  $dX(t) = dY(t) - dX_g(t)$  بدست آمده از رابطه (۱) در عبارت اول معادله **Error! Unknown switch argument.** خواهیم داشت:

$$\int_{t=0}^{t=t_k} \ddot{Y}^T M dY + \int_{t=0}^{t=t_k} \dot{X}^T C dX + \int_{t=0}^{t=t_k} X^T K dX = \int_{t=0}^{t=t_k} \ddot{Y}^T M dX_g \quad (5)$$

سه عبارت موجود در سمت چپ معادله (۵) به ترتیب نماینده انرژی جنبشی (KE)، انرژی میرایی (DE)، انرژی پتانسیل (SE) و عبارت سمت راست نماینده انرژی ورودی به سازه (IE) می‌باشند. از آنجا که در زمان صفر می‌باشند، لذا شکل‌های مختلف انرژی به صورت معادلات (۹)–(۶) قابل بیان هستند [۵].

$$KE = \int_{t=0}^{t=t_k} \dot{Y}^T M dY = \frac{1}{2} \dot{Y}^T(t_k) M \dot{Y}(t_k) \quad (6)$$

$$DE = \int_{t=0}^{t=t_k} \dot{X}^T C dX = \int_{t=0}^{t=t_k} \dot{X}^T C \dot{X} dt \quad (7)$$

$$SE = \int_{t=0}^{t=t_k} X^T K dX = \frac{1}{2} X^T(t_k) K X(t_k) \quad (8)$$

$$IE = \int_{t=0}^{t=t_k} \ddot{Y}^T M dX_g = \int_{t=0}^{t=t_k} \ddot{Y}^T M \dot{X}_g dt \quad (9)$$

در این تحقیق به منظور حل معادله **Error! Unknown switch argument.** از روش فضای حالت و روش تحلیل مودال بر اساس انتگرال‌گیری از تابع تحریک استفاده شد.

### ۳- تحلیل مودال بر اساس انتگرال‌گیری از تابع تحریک

معادله حاکم بر حرکت سازه، رابطه (۳)، را می‌توان در مختصات مودال به صورت  $N$  معادله (۱۰) باز نویسی نمود.

$$M_n \ddot{q}_n + \sum_{r=1}^n C_{nr} \dot{q}_r + K_n q_n = P_n(t) \quad n=1,2,3,\dots,N \quad (10)$$

که  $N$  تعداد درجات آزادی سازه و ضریب مودی مربوط به مود  $n$  ام سازه بوده و مقادیر جرم تعمیم یافته، ضریب میرایی، سختی تعمیم یافته نیروی مودی تعمیم یافته می‌باشند که به صورت روابط (۱۱) تعریف می‌گردند.

$$M_n = \varphi_n^T M \varphi_n, \quad C_{nr} = \varphi_n^T C \varphi_r, \quad K_n = \varphi_n^T K \varphi_n, \quad P_n(t) = -\varphi_n^T M \{1\} \ddot{X}_g \quad (11)$$

شکل مودی  $n$  ام سازه است. در صورتی که سازه دارای میرایی کلاسیک باشد به ازای مقادیر  $C_{nr} = 0, n \neq r$  معادلات مودال به  $n$  معادله مجزا<sup>۱</sup> مطابق معادله (۱۲) تبدیل خواهند شد.

$$M_n \ddot{q}_n + C_n \dot{q}_n + K_n q_n = P_n(t) \quad (12)$$

با حل معادله (۱۲) و محاسبه مقادیر، مقادیر جابجایی و سرعت طبقات را می‌توان با استفاده از روابط (۱۳) محاسبه نمود.

$$X(t) = \sum_{n=1}^N \varphi_n q_n(t), \quad \dot{X}(t) = \sum_{n=1}^N \varphi_n \dot{q}_n(t) \quad (13)$$

حل معادله (۱۲) زمانی که تابع تحریک نسبت به زمان به صورت دلخواه تغییر نماید معمولاً امکان پذیر نیست. چنین مسائلی را می توان با استفاده از روش های عددی و انتگرال گیری از معادله دیفرانسیلی در هر گام زمانی حل نمود. در این تحقیق از روش عددی درون یابی تابع تحریک مطابق رابطه (۱۴) استفاده شد.

$$P(\tau) = P_j + \frac{\Delta P_j}{\Delta t_j} \tau \quad (14)$$

که نمو زمان در گام  $\Delta t$  و  $\tau$  متغیر زمانی در فاصله زمانی  $[t_j, t_{j+1}]$  می باشند. بنابراین مقادیر را می توان با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه نمود.

$$q_{j+1} = Aq_j + B\dot{q}_j + Cp_j + Dp_{j+1} \quad (15)$$

$$\dot{q}_{j+1} = A'q_j + B'\dot{q}_j + C'p_j + D'p_{j+1} \quad (16)$$

پارامترهای  $A, B, C, D, A', B', C', D'$  تابعی از سختی، فرکانس، نسبت میرایی سازه و نمو های زمانی تابع تحریک می باشند.

#### ۴- الگوریتم جستجوی هارمونی اصلاح شده

در سال ۲۰۰۱ الگوریتم جستجوی هارمونی توسط گیم و همکاران ارائه شد [۱۲] و تاکنون از این روش در حل بسیاری از مسائل پیچیده مهندسی استفاده شده است. از مهمترین مزایای الگوریتم جستجوی هارمونی نسبت به الگوریتم های بهینه سازی متداول می توان به (۱) هزینه محاسباتی کمتر جهت دستیابی به نتیجه، (۲) عدم نیاز به اطلاعات مربوط به مشتق توابع به دلیل استفاده از تکنیک جستجوی تصادفی و (۳) ترکیب همه بردارهای موجود در حافظه هارمونی جهت تولید بردار جدید، در حالیکه الگوریتم ژنتیک تنها از دو بردار والدین استفاده می کند، اشاره نمود. به طور کلی الگوریتم هارمونی شامل ۵ مرحله به شرح زیر است [۱۳]:

گام ۱- تعیین مقادیر اولیه برای پارامترهای مسئله و الگوریتم: در گام اول، شکل کلی مسئله بهینه سازی به صورت زیر بیان می گردد:

$$\text{Minimize } f(x) \text{ Subject to } x(j) \in [LB(j), UB(j)], \quad (17)$$

$f(x)$  تابع هدف و  $x(j)$  حل کاندید شامل  $n$  متغیر تصمیم می باشند. همچنین در این مرحله می بایست پارامترهای الگوریتم جستجوی هارمونی نیز تعیین شوند. این پارامترها شامل اندازه حافظه هارمونی HMS یا تعداد بردارهای کاندید، نرخ انتخاب حافظه هارمونی HMCR، نرخ تنظیم نت PAR، نرخ تنظیم گام bw و تعداد تکرار الگوریتم NI به عنوان معیار توقف هستند [۱۳].

گام ۲- تعیین مقادیر اولیه برای حافظه هارمونی: در این گام ماتریس حافظه هارمونی، نشان داده شده در معادله **Error! Unknown**

**switch argument**، با استفاده از مقادیر تصادفی با توزیع یکنواخت ما بین حد بالا و پائین هر متغیر تصمیم تشکیل می شود [۱۳].

$$HM = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{HMS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & x_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{HMS}(1) & x_{HMS}(2) & \dots & x_{HMS}(n) \end{bmatrix} \quad (18)$$

گام ۳- ایجاد یک هارمونی جدید: هارمونی جدید بر مبنای سه قاعده انتخاب حافظه هارمونی، انتخاب تصادفی و تنظیم گام ایجاد می شود. در قانون انتخاب حافظه هارمونی، هر متغیر تصمیم به صورت تصادفی از بردارهای موجود در حافظه هارمونی با احتمال HMCR انتخاب

می شود. مطابق قانون انتخاب تصادفی، متغیرهای تصمیم با احتمال  $(1 - HMCR)$  در بازه تعریف شده مطابق رابطه **Error!**

**Unknown switch argument** به صورت تصادفی انتخاب می شوند.

$$x_{new}(j) = LB_j + \text{rand}() \times (UB_j - LB_j) \quad (19)$$

که در آن  $rand()$  یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه  $[0, 1]$  است. در قانون تنظیم گام، هر متغیر تصمیم تولید شده با استفاده از قانون انتخاب حافظه هارمونی، با احتمال PAR مطابق رابطه **Error! Unknown switch argument.** اصلاح می گردد [۱۳].

$$x_{new}(j) = x_{new}(j) + bw \times u(-1, 1) \quad (20)$$

گام  $bw$  دلخواه برای متغیرهای پیوسته و  $u(-1, 1)$  یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در فاصله  $[-1, 1]$  می باشند.

به منظور افزایش کارایی و همگرایی الگوریتم هارمونی، مهدوی و همکاران [۱۴] یک نسخه اصلاح شده این الگوریتم را تحت عنوان IHS پیشنهاد نمودند. در این روش، تنها پارامترهای PAR و  $bw$  با افزایش تعداد تکرار الگوریتم مطابق روابط **Error! Unknown switch argument.** و **Error! Unknown switch argument.** متغیر می باشند.

$$PAR(t) = PAR_{min} + (PAR_{max} - PAR_{min}) \times t/NI \quad (21)$$

$$bw(t) = bw_{max} \left[ \exp(\ln(bw_{min}/bw_{max}) \times t/NI) \right] \quad (22)$$

که  $PAR(t)$  نرخ تنظیم نت در تکرار  $t$ ،  $PAR_{max}$  و  $PAR_{min}$  حد بالا و پائین نرخ تنظیم نت،  $bw(t)$  اندازه گام در تکرار  $t$  و  $bw_{max}$  و  $bw_{min}$  حد بالا و پائین اندازه گام می باشند [۱۴].

گام ۴- به هنگام سازی حافظه هارمونی: اگر هارمونی جدید تولید شده بهتر از بدترین هارمونی موجود در حافظه هارمونی از نظر مقدار تابع هدف باشد، جایگزین آن در حافظه شده و هارمونی بدتر از حافظه خارج می شود. در این مرحله مجدداً حافظه هارمونی بر اساس مقادیر تابع هدف هر یک از هارمونی ها، مرتب می شود [۱۳].

گام ۵- بررسی معیار توقف الگوریتم: زمانی که شرط توقف الگوریتم برآورده شود، الگوریتم جستجوی هارمونی متوقف می شود. در غیر این صورت گام های ۳ و ۴ تا برآورده شدن معیار توقف تکرار می شوند [۱۳].

اولین تابع هدف در نظر گرفته شده در این مقاله مطابق رابطه (۲۳) بوده که توسط آقای بکداس و نیگدلی [۱۶] پیشنهاد شده است.

$$f_{obj.1} = \frac{\max |x_{First} \text{ with TMD}|}{\max |x_{First} \text{ without TMD}|} + \frac{\max |TF_{Acc.First} \text{ with TMD}|}{\max |TF_{Acc.First} \text{ without TMD}|} \quad (23)$$

$x_{First}$  جابجایی طبقه اول سازه تحریک شده توسط شتاب پایه بار سینوسی با فرکانسی برابر با فرکانس بحرانی سازه است که زمان آن ۵ برابر زمان تناوب بحرانی سازه در نظر گرفته شده است. همچنین  $TF_{Acc.First}$  تابع انتقال مربوط به شتاب طبقه اول سازه، که به صورت نسبت لاپلاس شتاب طبقه اول به شتاب زمین بر حسب دسیبل قابل تعریف است. تابع هدف معرفی شده در این مقاله مطابق رابطه (۲۴) است.

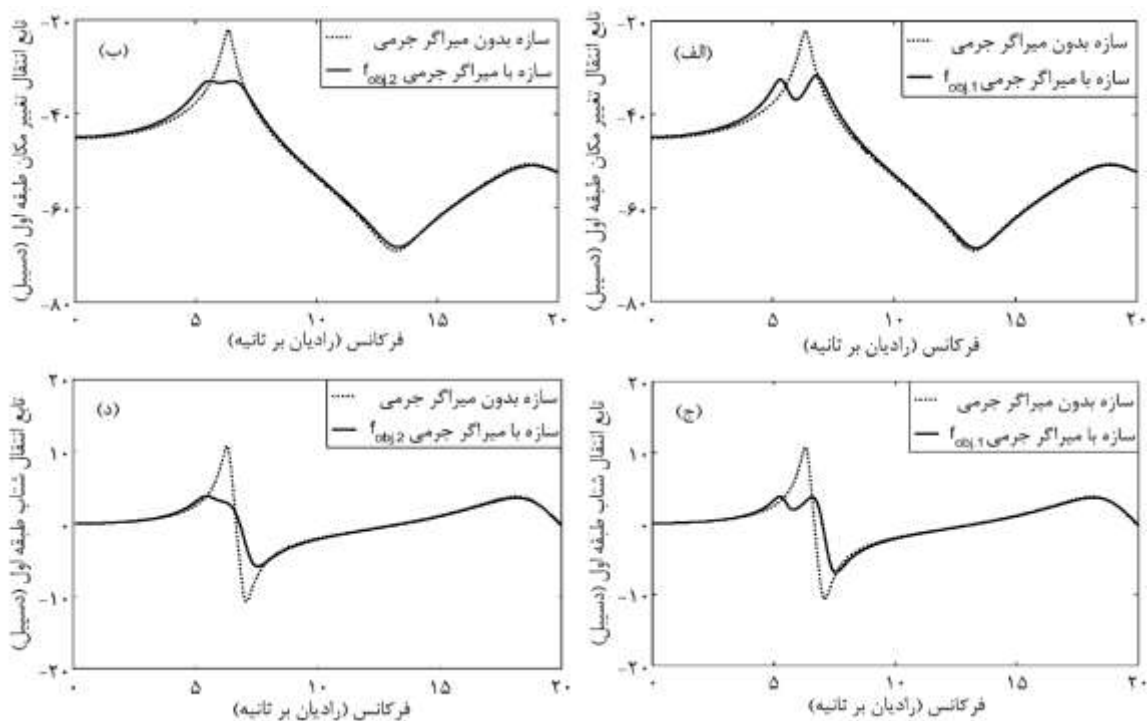
$$f_{obj.2} = \frac{\max |TF_{Dis.Top} \text{ with TMD}|}{\max |TF_{Dis.Top} \text{ without TMD}|} + \frac{\max |TF_{Acc.Top} \text{ with TMD}|}{\max |TF_{Acc.Top} \text{ without TMD}|} \quad (24)$$

که در آن توابع انتقال مربوط به تغییر مکان و شتاب طبقه فوقانی سازه است.

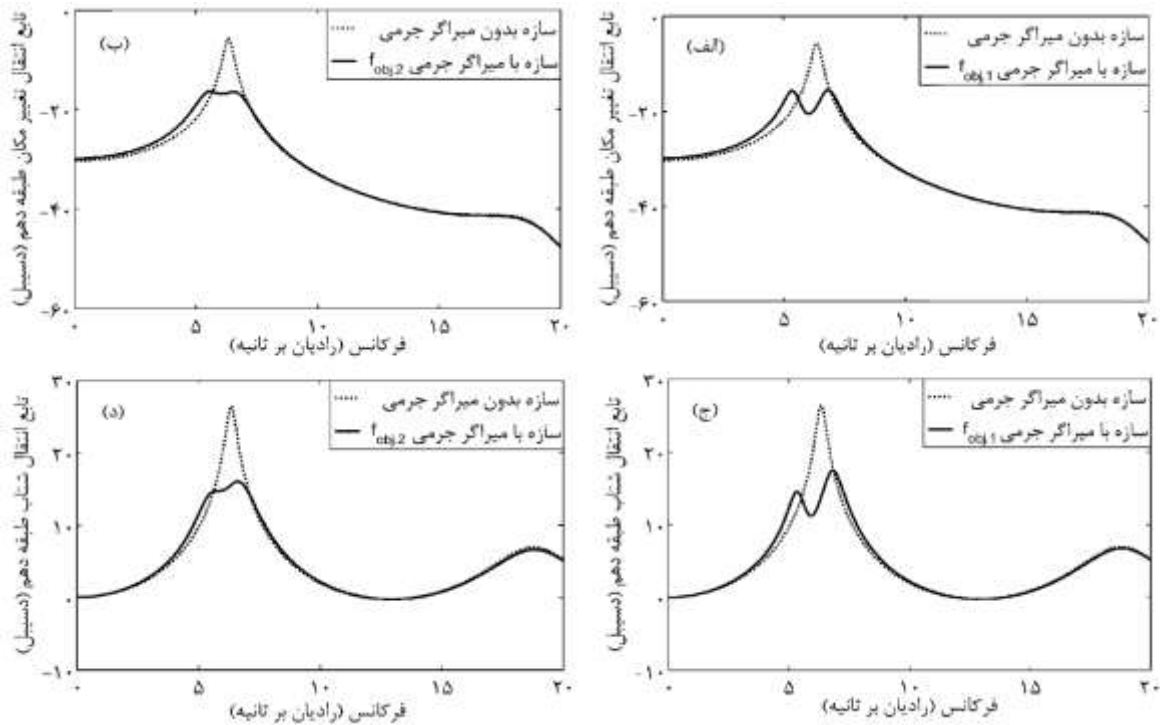
## ۵- شبیه سازی عددی

یک سازه ۱۰ طبقه برشی از مرجع [۴] انتخاب می گردد. تمام طبقات دارای جرم مشابه ۳۶۰ ton، ضریب میرایی مشابه  $6/2 \text{ MNs/m}$  و سختی مشابه  $650 \text{ MN/m}$  می باشند. به دلیل امکان اعتبارسنجی نتایج با سایر مراجع، حداکثر مقدار مجاز جرم میراگر به  $108 \text{ ton}$  محدود شده است. طرح بهینه میراگر شامل پارامترهای جرم، سختی و میرایی در مورد تابع هدف به ترتیب  $108 \text{ ton}$ ،  $3653/94 \text{ KN/m}$ ،  $3653/94 \text{ KNs/m}$  و در مورد تابع هدف به ترتیب  $108 \text{ ton}$ ،  $3727/88 \text{ KN/m}$ ،  $210/90 \text{ KNs/m}$  بدست آمد. همچنین موقعیت بهینه میراگر در مورد هر دو تابع هدف طبقه فوقانی سازه تعیین گردید.

در شکل (۲) توابع انتقال مربوط به شتاب و تغییر مکان طبقه اول و در شکل (۳) توابع انتقال مربوط به شتاب و تغییر مکان طبقه دهم در حالت‌های کنترل نشده و کنترل شده با توابع هدف و ارائه شده است. در شکل (۲) حداکثر مقادیر توابع انتقال تغییر مکان و شتاب مربوط به طبقه دهم بر حسب دسیبل در حالت کنترل نشده به ترتیب از  $-22/2$  و  $10/67$  به  $-31/76$  و  $3/79$  در حالت کنترل شده طرح تابع هدف به  $32/92$  و  $3/78$  در حالت کنترل شده طرح تابع هدف کاهش یافته است. همچنین در شکل (۳) حداکثر مقادیر توابع انتقال تغییر مکان و شتاب مربوط به طبقه دهم سازه در حالت کنترل نشده به ترتیب از  $-5/7$  و  $26/42$  به  $15/7$  و  $17/45$  در حالت کنترل شده تابع هدف به  $16/37$  و  $15/98$  در حالت کنترل شده تابع هدف کاهش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود علاوه بر اینکه تابع هدف نسبت به تابع هدفدر کاهشمقادیر ماکزیمم توابع انتقال عملکرد موثرتری داشته است با توزیع یکنواخت تر توابع انتقال از قابلیت اعتماد بالاتری برخوردار است.



شکل ۲. توابع انتقال تغییر مکان و شتاب طبقه اول سازه در حالت کنترل شده و حالت کنترل نشده.



شکل ۳. توابع انتقال تغییر مکان و شتاب طبقه دهم سازه در حالت کنترل شده و حالت کنترل نشده.

جدول ۱. حداکثر مقادیر پاسخ‌های سازه تحت زلزه‌های مختلف.

$F_T$ (kN)	$Dis_T$ (m)	$DE_S$ (KJ)	$IE$ (KJ)	$SE$ (KJ)	$KE$ (KJ)	$Acc_S$ (m/s <sup>2</sup> )	$Dis_S$ (m)	زمین لرزه
-	-	۴۶۲۴۲/۶۳	۴۶۶۵۰/۴۸	۱۶۸۷۸/۴۲	۱۶۶۲۱/۴۵	۲۷/۱۱	۰/۶۶۴	سازه بدون میراگر جرمی
۷۷۴۸/۰۹	۱/۹۴۷	۱۷۹۳۸/۳۸	۴۸۵۸۴/۴۴	۱۵۸۵۵/۰۳	۱۵۴۷۶/۲۰	۲۶/۶۹	۰/۶۳۹	Obj.1 سازه با میراگر جرمی
۶۰۲۹/۱۰	۱/۴۹۸	۱۷۱۷۱/۵۰	۴۸۲۲۴/۹۳	۱۴۸۷۱/۴۳	۱۴۱۱۲/۰۲	۲۵/۰۶	۰/۶۲۳	Obj.2 سازه با میراگر جرمی
-	-	۷۸۵۱/۵۱	۸۷۵۳/۰۸	۶۲۶۸/۸۱	۶۳۲۰/۵۵	۱۹/۲۸	۰/۴۱۰	سازه بدون میراگر جرمی
۳۵۷۴/۸۰	۰/۹۶۶	۲۵۷۱/۱۳	۷۹۰۴/۶۵	۴۱۳۹/۴۱	۴۶۴۵/۵۱	۱۶/۳۹	۰/۳۲۵	Obj.1 سازه با میراگر جرمی
۲۹۲۱/۱۷	۰/۷۸۴	۲۷۶۱/۰۵	۸۰۷۱/۲۰	۴۲۵۵/۹۰	۴۷۹۲/۰۳	۱۶/۳۶	۰/۳۳۶	Obj.2 سازه با میراگر جرمی
-	-	۲۵۲۴/۴۹	۶۶۲۶/۷۲	۳۱۲۷/۴۵	۶۲۰۲/۵۰	۱۱/۷۵	۰/۲۸۴	سازه بدون میراگر جرمی
۲۵۳۹/۵۵	۰/۷۷۴	۱۰۸۰/۲۱	۶۳۷۴/۳۷	۲۴۰۶/۷۲	۵۵۷۵/۴۸	۹/۹۳	۰/۲۴۷	Obj.1 سازه با میراگر جرمی
۲۱۸۶/۵۸	۰/۶۶۹	۱۰۳۰/۵۵	۶۴۴۵/۶۵	۲۵۴۲/۸۵	۵۶۸۵/۴۸	۱۰/۰۵	۰/۲۵۵	Obj.2 سازه با میراگر جرمی
-	-	۲۷۶۷/۳۹	۳۱۶۲/۰۸	۱۱۸۰/۸۷	۱۵۵۴/۶۲	۸/۷۲	۰/۱۷۶	سازه بدون میراگر جرمی
۱۱۸۵/۲۵	۰/۲۹۶	۹۶۳/۳۲	۱۹۶۵/۶۷	۵۹۰/۸۲	۸۷۴/۸۰	۶/۳۳	۰/۱۲۷	Obj.1 سازه با میراگر جرمی
۹۶۶/۵۱	۰/۲۶۲	۱۰۱۹/۰۸	۲۱۹۳/۶۶	۶۰۸/۱۲	۸۲۸/۶۰	۶/۲۶	۰/۱۲۹	Obj.2 سازه با میراگر جرمی
-	-	۱۷۳۶۹/۳۰	۱۸۱۷۴/۰۲	۱۰۰۲۵/۳۸	۱۱۶۰۸/۶۱	۲۳/۶۰	۰/۵۱۹	سازه بدون میراگر جرمی
۴۴۸۹/۶۶	۱/۲۰۹	۶۴۴۸/۷۵	۱۴۶۴۶/۵۱	۷۸۲۱/۵۱	۸۲۳۰/۹۰	۲۰/۹۵	۰/۴۵۵	Obj.1 سازه با میراگر جرمی
۳۶۸۲/۱۳	۰/۹۸۱	۶۲۸۴/۱۴	۱۴۸۴۵/۲۸	۷۹۰۲/۰۱	۸۲۲۶/۶۹	۲۰/۸۸	۰/۴۶۱	Obj.2 سازه با میراگر جرمی
-	-	۶۵۰۸/۲۶	۷۰۳۹/۸۱	۲۳۲۹/۳۳	۴۶۵۶/۲۱	۱۰/۵۱	۰/۲۴۸	سازه بدون میراگر جرمی
۲۱۵۰/۵۳	۰/۵۷۴	۳۸۱۷/۴۴	۸۴۲۷/۷۲	۱۶۹۴/۸۳	۴۹۵۵/۲۰	۸/۹۷	۰/۲۰۵	Obj.1 سازه با میراگر جرمی
۱۷۰۶/۵۰	۰/۴۵۹	۳۷۲۷/۹۴	۸۳۹۹/۷۴	۱۵۴۳/۷۰	۴۷۷۶/۷۰	۸/۵۳	۰/۱۹۷	Obj.2 سازه با میراگر جرمی
-	-	۲۴۱۱/۹۹	۶۳۱۷/۰۳	۳۲۵۳/۸۳	۵۷۷۶/۹۱	۱۴/۶۸	۰/۲۷۱	سازه بدون میراگر جرمی
۲۸۴۵/۵۳	۰/۸۳۳	۱۹۶۷/۶۸	۶۶۷۵/۶۸	۳۰۱۱/۳۳	۵۶۶۹/۹۸	۱۴/۰۰	۰/۲۶۸	Obj.1 سازه با میراگر جرمی
۲۳۵۰/۳۶	۰/۶۹۹	۲۰۴۰/۴۰	۶۷۳۵/۴۴	۳۰۵۲/۴۸	۵۶۴۵/۴۷	۱۴/۰۷	۰/۲۷۳	Obj.2 سازه با میراگر جرمی
-	-	۲۳۵۹۲/۷۵	۲۹۰۹۶/۳۶	۱۵۸۶۸/۶۸	۱۷۵۲۵/۵۲	۲۷/۷۳	۰/۶۴۵	سازه بدون میراگر جرمی
۶۵۰۱/۹۵	۱/۷۷۳	۷۹۷۴/۲۳	۲۲۵۴۵/۷۱	۱۱۱۱۸/۴۹	۱۲۶۷۱/۹۷	۲۰/۳۴	۰/۵۳۵	Obj.1 سازه با میراگر جرمی

۵۲۷۴/۷۷	۱/۴۲۶	۸۱۱۷/۰۶	۲۲۸۸۴/۹۰	۱۱۵۶۱/۱۹	۱۲۸۲۷/۰۹	۲۰/۳۷	۰/۵۴۶	Obj.2	سازه با میراگر،	
-	-	۱۱۳۲۲/۷۴	۱۳۸۰۳/۳۷	۶۵۶۴/۷۴	۷۸۰۲/۶۶	۱۷/۲۷	۰/۴۱۳		سازه بدون میراگر	
۴۳۷۴/۴۳	۱/۲۲۲	۴۱۱۵/۳۱	۱۰۸۶۸/۰۳	۴۹۷۲/۶۰	۵۸۵۳/۵۶	۱۳/۸۳	۰/۳۵۸	Obj.1	سازه با میراگر،	San Fernando, 1971 (Pacoima Dam 164)
۳۴۸۳/۷۹	۰/۹۹۹	۴۲۶۰/۲۳	۱۱۳۳۷/۷۸	۵۱۰۰/۶۰	۵۸۹۷/۲۱	۱۴/۳۹	۰/۳۶۴	Obj.2	سازه با میراگر،	
-	-	۹۲۳/۲۶	۱۰۱۰/۱۶	۴۲۱/۹۱	۵۸۲/۰۸	۵/۲۶	۰/۱۰۶		سازه بدون میراگر	
۹۹۰/۶۷	۰/۲۸۶	۴۳۴/۶۸	۹۲۴/۶۳	۲۳۱/۹۳	۳۹۸/۷۲	۴/۲۹	۰/۰۷۸	Obj.1	سازه با میراگر،	Landers, 1992 (Lucerne 000)
۸۰۸/۶۳	۰/۲۳۰	۴۸۷/۶۲	۱۰۱۹/۷۵	۲۴۹/۴۶	۴۳۰/۰۵	۴/۳۷	۰/۰۸۱	Obj.2	سازه با میراگر،	
-	-	۲۰۳۶/۶۸	۳۰۲۸/۶۴	۱۴۰۳/۳۷	۲۰۶۷/۶۰	۸/۳۲	۰/۱۸۸		سازه بدون میراگر	
۱۵۸۸/۵۷	۰/۳۷۶	۱۱۲۴/۲۷	۲۶۴۶/۱۸	۵۵۲/۳۷	۸۵۷/۴۹	۵/۵۲	۰/۱۲۱	Obj.1	سازه با میراگر،	Imperial Valley, 1940 (El Centeo NS)
۱۲۹۲/۷۷	۰/۳۱۰	۱۰۳۲/۹۵	۲۵۰۲/۲۶	۵۶۸/۰۰	۸۶۳/۹۷	۵/۸۰	۰/۱۲۳	Obj.2	سازه با میراگر،	

جدول (۱) حداکثر مقادیر مربوط به تغییر مکان؛  $Dis_S$  و شتاب سازه؛  $Acc_S$ ، انرژی جنبشی؛  $KE$ ، انرژی کرنشی؛  $SE$ ، انرژی ورودی؛  $IE$  و انرژی میرا شده توسط سازه؛  $DE_S$ ، تغییر مکان؛  $Dis_T$  و نیروی تولید شده توسط میراگر جرمی؛  $F_T$ ، در زمین لرزه‌های مختلف ثبت شده ارائه شده است. مشاهده می‌شود که پاسخ‌های سازه کنترل شده توسط هر دو طرح میراگر جرمی به نحو موثری در تمام زمین‌لرزه‌ها کاهش یافته است لیکن در تمام زمین‌لرزه‌ها، جابجایی و حداکثر نیروی تولید شده توسط میراگر جرمی در طرح مربوط به تابع هدف به گونه موثرتری تنزل یافته است.

حداکثر مقادیر تغییر مکان و شتاب طبقات سازه مرتعش تحت زمین لرزه السنترو در جدول (۲) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در تمام روش‌ها پاسخ‌های سازه به نحو مطلوبی کاهش یافته است. بعلاوه تغییر مکان و شتاب طبقات سازه کنترل شده در هر دو طرح مربوط به توابع هدف تقریباً مشابه بوده با این تفاوت که تغییر مکان و شتاب مربوط به میراگر جرمی در طرح مربوط به تابع هدف به نحو قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. با مقایسه نتایج بدست آمده با سایر مراجع مشاهده می‌شود که تغییر مکان‌های طبقات سازه در مقایسه با مرجع [۱۷] بهبود یافته و مشابه مرجع [۴] است ضمن اینکه تغییر مکان و شتاب مربوط به میراگر در طرح مربوط به تابع هدف در مقایسه با مرجع [۴] به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.

جدول ۲. تغییر مکان و شتاب طبقات سازه مثال ۱ تحت زمین لرزه السنترو ۱۹۴۰.

مطالعه حاضر		تابع هدف fobj.1		لی و همکاران [۱۷]		هادی و آریادی [۴]		سازه کنترل نشده		طبقه
تابع هدف fobj.2		Dis <sub>s</sub> (m)	Acc <sub>s</sub> (m/s <sup>2</sup> )	Dis <sub>s</sub> (m)	Acc <sub>s</sub> (m/s <sup>2</sup> )	Dis <sub>s</sub> (m)	Acc <sub>s</sub> (m/s <sup>2</sup> )	Dis <sub>s</sub> (m)	Acc <sub>s</sub> (m/s <sup>2</sup> )	
۰/۰۱۹	۲/۶۵۷	۰/۰۱۹	۲/۶۵۱	۰/۰۲۰	۲/۶۷۲	۰/۰۱۹	۲/۶۹۸	۰/۰۳۱	۲/۸۹۳	۱
۰/۰۳۸	۳/۱۱۱	۰/۰۳۷	۳/۰۳۸	۰/۰۳۹	۳/۰۹۷	۰/۰۳۷	۳/۰۲۵	۰/۰۶۰	۳/۹۷۲	۲
۰/۰۵۵	۳/۶۲۰	۰/۰۵۳	۳/۵۰۴	۰/۰۵۷	۳/۶۳۸	۰/۰۵۸	۳/۵۲۸	۰/۰۸۷	۴/۹۳۴	۳
۰/۰۷۰	۳/۹۷۱	۰/۰۶۸	۳/۹۱۴	۰/۰۷۳	۳/۹۸۹	۰/۰۶۸	۳/۹۴۴	۰/۱۱۱	۵/۶۷۷	۴
۰/۰۸۳	۴/۰۸۱	۰/۰۸۱	۴/۰۵۵	۰/۰۸۷	۴/۱۲۲	۰/۰۸۲	۴/۰۷۹	۰/۱۳۳	۶/۱۴۰	۵
۰/۰۹۵	۴/۰۳۷	۰/۰۹۳	۴/۱۱۳	۰/۰۹۹	۴/۱۳۹	۰/۰۹۴	۳/۸۲۶	۰/۱۵۱	۶/۵۵۸	۶
۰/۱۰۵	۴/۳۴۲	۰/۱۰۳	۴/۳۹۳	۰/۱۰۸	۴/۲۶۲	۰/۱۰۴	۴/۳۹۰	۰/۱۶۶	۶/۷۱۴	۷
۰/۱۱۴	۵/۰۳۹	۰/۱۱۲	۵/۰۹۳	۰/۱۱۷	۴/۹۵۱	۰/۱۱۳	۵/۰۵۱	۰/۱۷۷	۷/۰۰۷	۸
۰/۱۲۰	۵/۵۱۸	۰/۱۱۸	۵/۵۵۳	۰/۱۲۳	۵/۴۳۸	۰/۱۱۹	۵/۵۳۴	۰/۱۸۴	۷/۸۴۳	۹
۰/۱۲۳	۵/۷۹۸	۰/۱۲۱	۵/۸۲۴	۰/۱۲۶	۵/۷۲۰	۰/۱۲۲	۵/۸۱۲	۰/۱۸۸	۸/۳۱۹	۱۰
۰/۳۱۰	۱۱/۹۷۰	۰/۳۷۶	۱۴/۷۰۹	۰/۲۸۲	۱۱/۶۵۹	۰/۳۵۸	۱۳/۹۴۲	-	-	TMD

در جدول (۳) مقادیر ماکزیمم تغییر مکان و شتاب طبقات در حالت‌های کنترل شده و کنترل نشده به همراه نتایج سایر مراجع تحت زمین لرزه السنترو ارائه شده است. لازم به ذکر است که در حالت کنترل شده از پارامترهای طرح میراگر جرمی ارائه شده توسط مرجع [۱۶]



استفاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در حالت کنترل نشده به دلیل برآورده شدن شرط میرایی کلاسیک در روش مودال، نتایج هر دو روش یکسان بوده ولی در حالت کنترل شده به دلیل برآورده نشدن این شرط نتایج کاملاً متفاوت بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که نتایج سازه کنترل شده در روش تحلیل مودال مشابه نتایج مرجع [۱۶] بوده و نادرست است.

جدول ۳. پاسخ‌های سازه تحت زمین لرزه السسترو با استفاده از روش فضای حالت و روش تحلیل مودال.

طبقه	هادی و آرپایدی [۴]	سازه کنترل نشده				سازه کنترل شده					
		مطالعه حاضر		بکداس و نیگدلی [۱۶]	مطالعه حاضر		بکداس و نیگدلی [۱۶]	مطالعه حاضر			
		روش فضای حالت			روش تحلیل مودال			روش فضای حالت		روش تحلیل مودال	
		Dis (m)	Acc (m/s <sup>2</sup> )		Dis (m)	Acc (m/s <sup>2</sup> )		Dis (m)	Acc (m/s <sup>2</sup> )	Dis (m)	Acc (m/s <sup>2</sup> )
۱	۰/۰۳۱	۳/۶۸۴	۰/۰۳۱	۳/۶۸۴	۰/۰۳۱	۳/۶۸۴	۰/۰۳۱	۳/۶۸۴	۰/۰۳۱	۳/۶۸۴	
۲	۰/۰۶۰	۵/۳۷۰	۰/۰۶۰	۵/۳۷۰	۰/۰۶۰	۵/۳۷۰	۰/۰۶۰	۵/۳۷۰	۰/۰۶۰	۵/۳۷۰	
۳	۰/۰۸۷	۶/۱۴۰	۰/۰۸۷	۶/۱۴۰	۰/۰۸۷	۶/۱۴۰	۰/۰۸۷	۶/۱۴۰	۰/۰۸۷	۶/۱۴۰	
۴	۰/۱۱۲	۷/۳۰۴	۰/۱۱۱	۷/۳۰۴	۰/۱۱۱	۷/۳۰۴	۰/۱۱۱	۷/۳۰۴	۰/۱۱۲	۷/۳۰۴	
۵	۰/۱۳۳	۸/۲۲۱	۰/۱۳۳	۸/۲۲۱	۰/۱۳۳	۸/۲۲۱	۰/۱۳۳	۸/۲۲۱	۰/۱۳۳	۸/۲۲۱	
۶	۰/۱۵۱	۸/۷۲۲	۰/۱۵۱	۸/۷۲۲	۰/۱۵۱	۸/۷۲۲	۰/۱۵۱	۸/۷۲۲	۰/۱۵۱	۸/۷۲۲	
۷	۰/۱۶۶	۹/۰۲۲	۰/۱۶۶	۹/۰۲۲	۰/۱۶۶	۹/۰۲۲	۰/۱۶۶	۹/۰۲۲	۰/۱۶۶	۹/۰۲۲	
۸	۰/۱۷۷	۹/۲۷۰	۰/۱۷۷	۹/۲۷۰	۰/۱۷۷	۹/۲۷۰	۰/۱۷۷	۹/۲۷۰	۰/۱۷۷	۹/۲۷۰	
۹	۰/۱۸۴	۹/۴۸۱	۰/۱۸۴	۹/۴۸۱	۰/۱۸۴	۹/۴۸۱	۰/۱۸۴	۹/۴۸۱	۰/۱۸۴	۹/۴۸۱	
۱۰	۰/۱۸۸	۹/۶۰۶	۰/۱۸۸	۹/۶۰۶	۰/۱۸۸	۹/۶۰۶	۰/۱۸۸	۹/۶۰۶	۰/۱۸۸	۹/۶۰۶	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	TMD	

## ۶- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر با بکاگیری الگوریتم جستجوی هارمونی پارامترهای میراگر جرمی در جهت حداقل کردن ترکیبی از تابع انتقال مربوط به شتاب طبقه اول و تغییر مکان طبقه اول تحت بار هارمونیک و نیز توابع انتقال مربوط به تغییر مکان و شتاب طبقه فوقانی سازه بهینه گشتند. نتایج حاصل از شبیه سازی‌های انجام گرفته بر روی یک سازه ۱۰ طبقه نشان داد که میراگرهای جرمی در هر دو تابع هدف در نظر گرفته شده، توانایی بالایی در کاهش حداکثر مقدار توابع انتقال تغییر مکان و شتاب طبقات سازه در محدوده فرکانسی نزدیک به فرکانس بحرانی سازه دارند، اگرچه طرح مربوط به تابع هدف که در این مقاله معرفی شد، با توزیع یکنواخت‌تر توابع انتقال در این محدوده، از قابلیت اعتماد بالاتری نسبت به طرح مربوط به تابع هدف معرفی شده توسط بکداس و نیگدلی، برخوردار است. همچنین با بررسی پاسخ‌های دینامیکی میراگر جرمی و سازه مرتعش تحت زمین لرزه‌های مختلف نشان داده شد که میراگرهای جرمی علاوه بر کاهش قابل توجه حداکثر مقادیر انرژی‌های جنبشی و کرنشی سازه، سهم انرژی میرا شده در سازه را به نحو بسیار موثری کاهش داده‌اند این در حالیست که تغییر مکان و مقدار نیروی اعمال شده توسط میراگر جرمی به سازه در طرح مربوط به تابع هدف نسبت به طرح مربوط به تابع هدف مقادیر بسیار کمتری را دارا بوده است. بعلاوه، در بخش ارزیابی روش تحلیل مودال نشان داده شد که سازه‌های کنترل شده با میراگرهای جرمی با وجود میرایی کلاسیک در سازه کنترل نشده، لزوماً دارای میرایی کلاسیک نبوده و استفاده از روش تحلیل مودال منجر به نتایج نادرست خواهد شد.

- [1] Frahm, H. “*Device for damping vibration of bodies*”, U.S.Patent No.989-958; (1911).
- [2] Den Hartog, J.P. “*Mechanical vibrations*”, 4th Edn., NY: McGraw Hill, (1956).
- [3] Leung, A.Y.T. and Zhang, H. “*Particle swarm optimization of tuned mass dampers*”, *Engineering Structures*, 31(3), (2009) 715–728.
- [4] Hadi, M.N.S. and Arfiadi Y. “*Optimal design of absorber for MDOF structures*”, *Structural Engineering*, 124(11), (1998) 1272–80.
- [5] Wong, K.K.F. and Chee, Y.L. “*Energy dissipation of tuned mass dampers during earthquake excitations*”, *The structural design of tall and special building*, 13(2), (2004) 105–121.
- [6] Sgobba, S. and Marano, G.C. “*Optimum design of linear tuned mass dampers for structures with nonlinear behavior*”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(6), (2010) 1739–1755.
- [7] Bandivadekar, T.P. and Jangid, R.S. “*Optimization of multiple tuned mass dampers for vibration control of system under external excitation*”, *Vibration and Control*, 19(12), (2013) 1854–1871.
- [8] Zilletti, M.; Elliott, S.J.; Rustighi, E. “*Optimisation of dynamic vibration absorbers to minimise kinetic energy and maximise internal power dissipation*”, *Sound and Vibration*, 331(18), (2012) 4093–4100.
- [9] Tigli, O.F. “*Optimum vibration absorber (tuned mass damper) design for linear damped systems subjected to random loads*”, *Journal of Sound and Vibration*, 331(13), (2012) 3035–3049.
- [10] Mokhtari, M. and Marie, M. “*Engineering Applications of MATLAB and SIMULINK*”, 1st Edt., Springer, (2000).
- [11] Chopra, A.K. “*Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*”, 3rd Edt., New Jersey: Prentice Hall, (2006).
- [12] Geem, Z.W. and Kim, J.H. Loganathan G.V. “*A new heuristic optimization algorithm: Harmony search*”, *Simulation*, 76(2), (2001) 60–68.
- [13] Lee, K.S. and Geem, Z.W. “*A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: Harmony search theory and practice*”, *Comput Methods Appl MechEng*, 194,(2005) 3902–33.
- [14] Mahdavi, M.; Fesanghary, M.; Damangir, E. “*An improved harmony search algorithm for solving optimization problems*”, *Appl Math Comput*, 188(2), (2007) 1567–79.
- [15] Aghaie, M.; Nazari, T.; Zolfaghari, A.; Minuchehr, A. and Shirani, A. “*Investigation of PWR core optimization using harmony search Algorithms*”, *Annals of Nuclear Energy*, 57, (2013) 1–15.
- [16] Bekdaş, G. and Nigdeli, S.M. “*Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search*”, *Engineering Structures*, 33(9), (2011)2716–2723.
- [17] Lee, C.L.; Chen, Y.T.; Chung, L.L. and Wang, Y.P. “*Optimal design theories and applications of tuned mass dampers*”, *Engineering Structures*, 28(1), (2006) 43–53.
- [18] Sadek, F.; Mohraz, B.; Taylor, A.W. and Chung, R.M. “*A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications*”, *Earthq Eng Struct Dyn*, 26(6), (1997)617–35.