

طراحی بهینه‌ی چندهدفه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شده تحت تحریک بحرانی

رضا کامگار^{۱*}، محسن خطیبی‌نیا^۲

۱- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند

*Kamgar@eng.sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۶/۲/۳۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۵/۴/۲۱]

چکیده

بهینه‌سازی سازه‌ها تحت بار زلزله به‌گونه‌ای که ضمن حفظ امنیت جانی، صرفه‌ی اقتصادی نیز داشته باشد ضروری است. عدم تکرارپذیری زلزله‌ها با ویژگی‌های کاملاً مشابه، روند طراحی و بهینه‌سازی سازه‌ها تحت زلزله‌های رخ داده در گذشته را امری غلط جلوه می‌دهد و این امر سبب ظهور نوعی طراحی بر اساس زلزله‌ی بحرانی می‌شود. در این مقاله، روشی مؤثر برای تعیین پارامترهای بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه‌ی ازدحام ذرات تحت زلزله‌ی بحرانی پیشنهاد می‌شود. برای این منظور، ابتدا با توجه به اطلاعات زلزله‌های رخ داده در گذشته، زلزله‌های بحرانی برای قاب برشی ده طبقه با قید انرژی، بیشینه شتاب و طیف دامنه‌ی فوری‌ی حرکت زمین محاسبه می‌شوند به‌گونه‌ای که تابع هدف را بیشینه نمایند. سپس از بین زمین‌لرزه‌های تولیدشده، زمین‌لرزه‌ای که بیشینه مقدار را برای تابع هدف ایجاد می‌نماید به‌عنوان تحریک بحرانی در نظر گرفته می‌شود. در نهایت با استفاده از فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه، پارامترهای بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شده به‌گونه‌ای محاسبه می‌شوند، که بیشینه جابه‌جایی و بیشینه شتاب بام سازه کمینه شود. نتایج نمونه عددی ارائه‌شده حاکی از نیاز به جرم بیشتر میراگر جرمی تنظیم‌شده تحت تحریک بحرانی پالس گونه نسبت به تحریک بحرانی غیرپالس گونه است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه‌ی ازدحام ذرات توانایی محاسبه‌ی مقادیر بهینه برای پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شده برای دستیابی به کمینه‌نمودن بیشینه شتاب و بیشینه جابه‌جایی در بام سازه را دارا است.

واژگان کلیدی: تحریک بحرانی، میراگر جرمی تنظیم‌شده، بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

۱- مقدمه

مشکلاتی در طراحی سازه‌های مهم می‌شود [1-4]. تحریک بحرانی روشی مؤثر برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ذاتی در پیش‌بینی زلزله‌های رخ داده است [5]. انرژی ورودی به ازای واحد جرم در طول زلزله، به‌عنوان تابع هدف در مسئله‌ی تحریک بحرانی به وسیله وسترمو معرفی شد [6]. مصطفی نیز مسئله‌ی مدل نمودن زلزله به‌صورت زلزله‌ی طراحی برای سازه‌های غیرالاستیک با چند درجه آزادی را مطرح نمود

آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های طراحی معمولاً با در نظر گرفتن دانش کسب‌شده از مشاهده زلزله‌های رخ داده در گذشته با بینشی احتمالاتی ایجاد می‌شوند، زیرا که در نظر گرفتن خاصیت تصادفی بودن ویژگی‌های زمین‌لرزه در فرآیند آنالیز، طراحی و بهینه‌سازی سازه‌ها امری مهم و ضروری به شمار می‌آید. عدم قطعیت موجود در رخداد زلزله سبب ایجاد

از اجرای الگوریتم تنها یک پاسخ را می‌توانند بیابند، پس نمی‌توانند برای یافتن مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه مناسب باشند. امروزه الگوریتم‌های تکاملی به‌عنوان ابزار مناسبی برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه در نظر گرفته می‌شوند [19]. از این رو الگوریتم تکاملی بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه به عنوان یکی از بهترین روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه برای مسائل بهینه‌سازی پیوسته پیشنهاد شده است و برتری این الگوریتم در بسیاری از مسائل مهندسی به اثبات رسیده است [20-22].

در این مطالعه، روشی مؤثر برای تعیین پارامترهای بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم شده تحت زلزله‌ی بحرانی پیشنهاد می‌شود. در ابتدا تحریکات بحرانی تحت دو حالات قیدی متفاوت برای یک قاب برشی ده طبقه و با استفاده از اطلاعات محدودی که از زمین‌لرزه‌های رخ داده در گذشته موجود است، تعیین می‌شوند. زلزله‌های بحرانی به‌گونه‌ای تعیین می‌شوند که تحت قیود در نظر گرفته شده توابع هدف را بیشینه نمایند. سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه‌ی ازدحام ذرات، پارامترهای بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم شده‌ای که روی بام سازی مطالعه شده قرار می‌گیرد، تعیین می‌شوند. در فرآیند بهینه‌سازی، جرم، سختی و میرایی میراگر جرمی تنظیم شده به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند و کمینه نمودن بیشینه جابه‌جایی و شتاب بام به‌عنوان توابع هدف بهینه‌سازی است. نمونه عددی ارائه شده، توانمندی روش پیشنهادی در طرح بهینه‌ی چندهدفه‌ی میراگر جرمی تنظیم شده تحت تحریک بحرانی را نشان می‌دهد.

۲- معادله‌ی حرکت سیستم با میراگر جرمی تنظیم شده

معادله‌ی حرکت دینامیکی سیستم چند درجه آزادی خطی همراه با میراگر جرمی تنظیم شده مطابق شکل (۱) تحت تأثیر شتاب افقی زلزله‌ی بحرانی $\ddot{x}_g(t)$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = -[M] \{I\} \ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

[9-7]. مسئله‌ی طراحی لرزه‌ای و استفاده از تحریک بحرانی در کنترل فعال سازه‌های با اهمیت بالا در مراجع [10-11] بررسی شد.

میراگر جرمی تنظیم شده^۱ برای اولین بار به وسیله فراهام برای کاهش حرکات سالن کشتی استفاده شد [12]. لی و همکاران یک الگوریتم بهینه‌سازی عددی را برای ساختمان‌های با میراگر جرمی تنظیم شده برای کاهش مقدار شاخص عملکردی توسعه دادند [13]. به وسیله‌ی روش جستجوی عددی، بکره و جنگید روش صریح ریاضی برای طرح بهینه‌ی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده را ارائه نمودند [14]. مقایسه و بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک براساس دو نوع معیار مختلف شتاب و تغییر مکان به‌عنوان توابع هدف برای یک سیستم یک درجه آزادی تحت اغتشاش سفید به وسیله مارانو و همکاران بررسی شد [15]. همچنین در مراجع [16-17] مسئله‌ی بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده تحت قیود و حالات مختلف بررسی شده است. از آخرین پژوهش‌ها در زمینه‌ی بهینه‌سازی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده می‌توان به مطالعه‌ی انجام شده به وسیله کاوه و همکاران با استفاده از الگوریتم جستجوی شارژ تحت زلزله‌ی الستر و اشاره نمود [18]. در تمامی مطالعات گذشته، تنها دو پارامتر بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم شده (میرایی و سختی) تحت زلزله‌ای خاص که در گذشته اتفاق افتاده تعیین شده است که با تغییر زلزله‌ی طراحی و در نظر گرفتن ماهیت تصادفی زلزله نمی‌توان انتظار داشت که مقادیر به دست آمده از سطح قابلیت اطمینان بالایی برخوردار باشد.

بیشتر مسائل بهینه‌سازی که بشر در دنیای واقعی با آنها سروکار دارد، بیش از یک هدف را در برمی‌گیرند (بهینه‌سازی چند هدفه)؛ به‌گونه‌ای که پاسخ بهینه‌ی مسئله هنگامی حاصل می‌شود که کلیه‌ی اهداف به مرز خاصی از بهینگی رسیده باشند. اهداف مطرح در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ممکن است باهم در تضاد باشند، از این رو، با مجموعه‌ای از پاسخ‌های بهینه مواجه خواهیم بود. از آنجا که روش‌های کلاسیک در هر مرحله

¹Tuned mass damper

پیوسته‌ی $h(t)$ کاملاً تعریف شده و هدف یافتن مجهولات A_i و θ_i است به گونه‌ای که بیشینه مقدار برای توابع هدف تحت قیود موردنظر حاصل شود. با در نظر گرفتن تعدادی زلزله منطبق با شرایط ساختگاه و محاسبه‌ی مقادیر انرژی (E)، بیشینه شتاب حرکت زمین M_1 و طیف دامنه‌ی فوریه‌ی فوقانی M_2 زمین‌لرزه‌های انتخابی، قیود موردنظر محاسبه و در ساخت زلزله‌ی بحرانی استفاده می‌شوند. برای تعریف قید مربوط به محتوای فرکانسی، طیف دامنه‌ی فوریه‌ی فوقانی زمین‌لرزه‌های انتخابی به گونه‌ای که شدت آریاس برابر با واحد را داشته باشند تعیین می‌شوند [9-11].

حال با در نظر گرفتن توابع هدف و با استفاده از روش تحلیل تاریخچه زمانی و اعمال قیود در نظر گرفته شده، زلزله‌های بحرانی که مقدار توابع هدف را بیشینه می‌نمایند، محاسبه می‌شوند. این قیود توسط مصطفی و منوهار به صورت زیر معرفی شده‌اند [23].

$$\sqrt{\int_0^T \dot{x}_g^2(t) dt} \leq E, \quad 0 \leq t \leq T \quad (3)$$

$$\max |\dot{x}_g(t)| \leq M_1,$$

$$|\dot{X}_g(\omega)| \leq M_2(\omega)$$

به گونه‌ای که T مدت زمان زلزله و $\dot{x}_g(t)$ انتقال فوریه-

ی زمین‌لرزه‌ی بحرانی $\dot{x}_g(t)$ را نشان می‌دهد. در پایان نیز از میان زمین‌لرزه‌های محاسبه شده، زمین‌لرزه‌ای که بیشینه مقدار را برای توابع هدف ایجاد نموده است، تحت عنوان تحریک بحرانی معرفی می‌شود. مسئله‌ی موردبررسی، مسئله‌ی بهینه‌سازی تحت قیود غیرخطی است که با استفاده از روش برنامه‌نویسی مرتبه‌ی دوم متعاقبی^۱ و الگوریتم بهینه‌سازی مرتبه‌ی دوم در برنامه‌ی Matlab [24] کد نویسی می‌شود. لازم به ذکر است که در هر گام زمانی، برای بررسی همگرایی روابط (۴) کنترل می‌شوند:

$$|OF_j - OF_{j-1}| \leq \varepsilon_1 \quad (4)$$

$$|\{A_{i,j} - \theta_{i,j-1}\}^T| \leq \varepsilon_2$$

به گونه‌ای که OF_j مقدار توابع هدف در j امین تکرار و $\{A_{i,j} - \theta_{i,j-1}\}^T$ امین مقدار بهینه برای ضرایب مجهول A_i و

در رابطه‌ی (۱)، $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه به همراه میراگر جرمی تنظیم شده و بردارهای $\{x\}$ ، $\{\dot{x}\}$ ، $\{\ddot{x}\}$ نیز به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابه‌جایی سیستم چند درجه آزادی را نشان می‌دهند. بردار $\{l\}$ نیز برداری ستونی و واحد و هم‌مرتبه با تعداد درجات آزادی سیستم است.

شکل ۱. مدل ساختمان برشی چندطبقه همراه با میراگر جرمی تنظیم شده

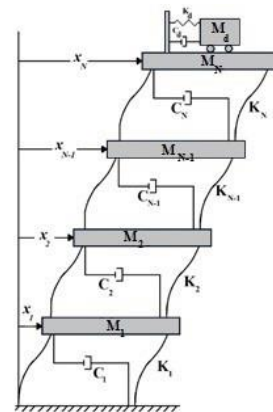


Fig. 1. Multi-story shear building model with a tuned mass damper

۳- محاسبه‌ی زلزله‌ی بحرانی برای سیستم چند درجه آزادی

در تعیین زلزله‌ی بحرانی، شتاب حرکت زمین به صورت حاصل ضرب سری فوریه و یک تابع پوش ($h(t)$) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$h(t) = B_0(e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t}), \beta_2 > \beta_1 \quad (2)$$

$$\dot{x}_g(t) = \sum_{i=1}^{N_f} h(t) A_i \cos(\omega_i t - \theta_i)$$

در رابطه‌ی (۲)، ضرایب مجهول A_i و θ_i به ترتیب مقادیر دامنه و زاویه‌ی فاز زلزله‌ی بحرانی را نشان می‌دهند. ω_i ها نیز فرکانس‌هایی هستند که محتوای فرکانسی حرکت زمین را نمایش می‌دهند و مقادیری مابین ۰/۱ تا ۲۵ هرتز را دارا هستند. پارامترهای β_1 و β_2 نیز تمایل نامانایی مشاهده شده در رکورد زلزله را ایجاد نموده و ضریب B_0 نیز ثابت مقیاس‌سازی نامیده می‌شود [9-11].

در ساخت زلزله‌ی بحرانی، فرض می‌شود که تابع

استفاده می‌شود [26]:

$$W_{k+1} = W_{\max} - \frac{W_{\max} - W_{\min}}{k_{\max}} k \quad (7)$$

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه^۱ به وسیله کوئلو در سال ۲۰۰۴ معرفی شد [27]. این الگوریتم در واقع تعمیمی است از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات که برای حل مسائل چندهدفه به کار می‌رود. توضیحات جامع‌تر را می‌توان در مرجع [27] یافت.

۵- نمونه عددی

در این مقاله، قاب برشی ده طبقه‌ای که توسط پژوهشگرانی از قبیل سادک و همکاران [28] و دن هارتوگ [12] مورد توجه قرار گرفته است، به عنوان نمونه عددی انتخاب می‌شود. مشخصات سازه‌ی مطالعه شده در جدول (۱) نشان داده شده است. برای محاسبه‌ی تحریک بحرانی، تعدادی زلزله مطابق جدول (۲) بر مبنای فاصله و جنس خاک ساختگاه در نظر گرفته می‌شود. ویژگی‌های مربوط به انرژی و بیشینه شتاب زلزله‌های انتخابی که از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی [29] دریافت شده‌اند، در جدول (۲) آورده شده‌اند. با توجه به جدول (۲)، مقادیر قیود انرژی و بیشینه شتاب به ترتیب برابر با $(m/s^{1.5})$ و $7/50$ و $10/06(m/s^2)$ است.

جدول ۱. مشخصات سازه‌ی مورد مطالعه [28]

Storey number	Stiffness $(N/m) \times 10^7$	Damping $(N.sec/m) \times 10^3$	Mass $(N.sec^2/m)$
1	6.247	805.863	179000
2	5.226	674.154	170000
3	5.614	724.206	161000
4	5.302	683.958	152000
5	4.991	643.839	143000
6	4.679	603.591	134000
7	4.367	563.343	125000
8	4.055	523.095	116000
9	3.743	482.847	107000
10	3.431	442.592	98000

Table 1. The properties of studied building [28]

در θ_i زمان تکرار است. مقادیر $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ نیز مقادیر کوچکی است (مثلاً 10^{-2}) که از پیش به عنوان معیار همگرایی در نظر گرفته می‌شوند.

۴- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یا الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع پرندگان اولین بار به وسیله کندی و ابرهات برای بهینه‌سازی توابع غیرخطی پیوسته ارائه شد. در این الگوریتم، هر پرنده یک جواب ممکن در فضای جستجوی مسئله است که آن را ذره می‌نامند. در ابتدا، این الگوریتم به وسیله‌ی گروهی از پرندگان که به طور تصادفی در فضای مسئله تولید شده‌اند، مقداردهی می‌شود و سپس جست‌وجو برای رسیدن به بهترین جواب آغاز می‌شود [25]. در این الگوریتم، موقعیت و سرعت هر پرنده در گام بعدی از روابط (۵ و ۶) تعیین می‌شوند:

$$v_{i,j}(t+1) = w v(t) + c_1 r_1(t) (pbest_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) + c_2 r_2(t) (gbest_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)) \quad (5)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \quad (6)$$

ثابت‌های c_1 و c_2 در رابطه‌ی (۵) پارامترهای یادگیری (میزان تأثیر) را برای $gbest$ و $pbest$ تعیین می‌کنند و معمولاً برابر با ۲ انتخاب می‌شوند. $pbest$ نیز بهترین موقعیتی است که آن ذره تاکنون داشته است و $gbest$ نیز بهترین موقعیتی است که تا به حال توسط کل ذره‌های اجتماع به دست آمده است. r_1 و r_2 نیز اعدادی تصادفی است در محدوده‌ی [۰،۱] است. $v_{i,j}$ و $x_{i,j}$ نیز به ترتیب موقعیت و سرعت حرکت ذره‌ها را نشان می‌دهند. همچنین w پارامتری است که لختی حرکت ذرات را کنترل نموده و در واقع این پارامتر نقش مهمی را در رفتار همگرایی الگوریتم جامعه پرندگان بر عهده دارد به گونه‌ای که مقادیرهای زیاد w باعث افزایش مقدار بردار سرعت و بالطبع گام‌های بزرگ‌تر در هر تکرار شده و بالعکس. در این مقاله برای محاسبه‌ی این پارامتر از رابطه‌ی (۷) که توسط شی و ابرهات ارائه شده است،

بعد از تشکیل ماتریس سختی، میرایی و جرم سازه، جهت تحلیل تاریخیچه زمانی از روش نیومارک-بتا (روش شتاب خطی) با مقدار Δt برابر با 0.01 ثانیه که دقت و پایداری حل را تضمین می‌نماید، استفاده می‌شود. همچنین ضرایب β_1 ، β_2 ، B_0 و N_f به ترتیب برابر با 0.05 ، 0.13 ، 0.5 ، $2/17$ و 30 در نظر گرفته می‌شوند. مدت زمان زلزله‌های بحرانی نیز برابر با 30 ثانیه فرض می‌شود. برای حالات مختلف قیدی مطابق جدول (۳)، تحریکات بحرانی محاسبه شده و در جدول (۴) ویژگی‌های آن‌ها ارائه می‌شود. نمودارهای تاریخیچه زمانی شتاب دو زلزله‌ی بحرانی محاسبه شده نیز در شکل (۲) نشان داده می‌شوند.

جدول ۴. اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های بحرانی برای حالات متفاوت قیدی

Constraint scenario	Arias Intensity [31] ($m/sec^{1.5}$)	PGA (m/sec^2)
First	7.49	10.06
Second	4.84	4.59

Table 4. Critical earthquakes data for different considered constraints scenarios

شکل ۲. زلزله‌های بحرانی محاسبه شده در حالات قیدی در نظر گرفته شده

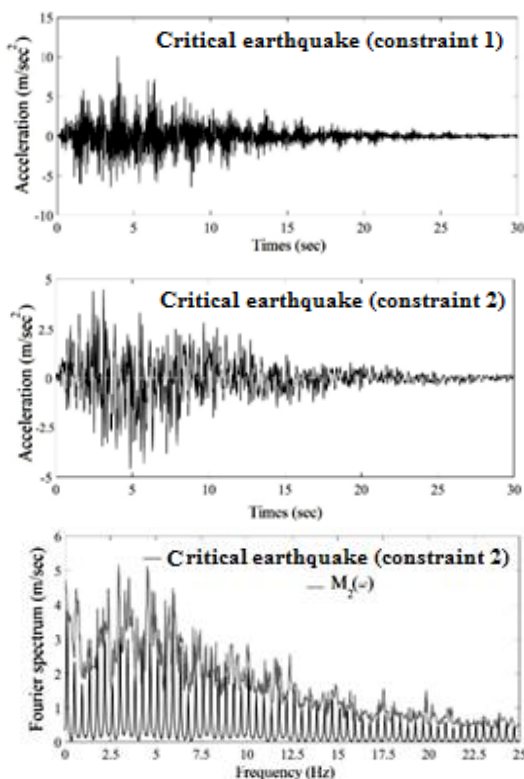


Fig. 2. The computed critical earthquakes based on considered constraint scenarios

جدول ۲. اطلاعات زلزله‌های انتخابی ثبت شده بر روی خاک نوع II مطابق

با استاندارد ۲۸۰۰ ایران [30]

Earthquake	Shear wave velocity (m/sec)	Comp.	PGA (m/sec^2)	Energy ($m/sec^{1.5}$)
Ahar-Varzaghan	475	L	5.32	3.34
		T	5.30	3.57
Bam	499	L	7.99	7.22
		T	6.36	5.65
Manjil - Rudbar	660	L	6.35	5.35
		T	5.46	7.50
Zanjiran	680	L	10.06	6.43
		T	10.00	7.28
Naghan	700	L	8.72	4.51
		T	5.65	3.34
Van Dyke	658	L	5.13	1.295
		T	3.74	0.9984

Table 2. The information of selected recorded earthquake on type II soil based on 2800 Iranian code [30]

۱-۵- تولید زلزله‌ی بحرانی

برای محاسبه‌ی زلزله‌های بحرانی دو حالت قیدی مطابق جدول (۳) در نظر گرفته می‌شود و برای هر حالت قیدی تحریک بحرانی محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که حالات قیدی به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که زلزله‌های بحرانی محاسبه شده دارای ویژگی‌های مهندسی مطابق با زلزله‌های رخ داده در گذشته باشند. از طرفی پارامترهایی مانند انرژی، بیشینه شتاب و محتوای فرکانسی چون از نقطه نظر مهندسی برای ارزیابی رکوردهای زلزله مهم است، انتخاب شده‌اند. در حقیقت توسط دو قید بیشینه شتاب و انرژی زلزله، مدیریت ایجاد زلزله‌ی بحرانی در حوزه‌ی زمان و توسط قید طیف دامنه‌ی فوریه، این مدیریت در حوزه‌ی فرکانس برای ایجاد زلزله‌ای مطابق با زلزله‌های رخ داده در گذشته اعمال می‌شود.

جدول ۳. حالات قیدی در نظر گرفته شده

Constraint scenario	Considered constraints
First	Energy + PGA
Second	UBFAS ¹ + PGA + Energy

Table 3. Considered constraint scenarios

1 Upper Bound Fourier Amplitude Spectrum

جدول (۵) نیز اطلاعات مربوط به بیشینه جابه‌جایی و شتاب بام سازه‌ی تحت دو زلزله‌ی بحرانی فوق را نشان می‌دهد.

جدول ۵. اطلاعات بیشینه جابه‌جایی و شتاب بام سازه‌ی کنترل نشده تحت زلزله‌های بحرانی محاسبه‌شده برای حالات قیدی

Critical Earthquake	Maximum roof displacement (m)	Maximum roof acceleration (m/sec^2)
First constraint scenario	0.72	14.17
Second constraint scenario	0.50	7.66

Table 5. The maximum values of displacement and acceleration for uncontrolled building subjected to computed critical earthquakes based on different constraint scenarios

تکاملی چندهدفه‌ی ازدحام ذرات تحت تحریکات بحرانی محاسبه‌شده است به گونه‌ای که بیشینه جابه‌جایی و شتاب بام را کمینه نمایند. مقادیر کران بالا و پایین پارامترهای میرایی، جرم و سختی میراگر جرمی تنظیم‌شده در فرآیند بهینه‌سازی مطابق با جداول (۶ و ۷) است. همچنین، مقادیر بهینه‌ی محاسبه‌شده برای میراگر جرمی تنظیم‌شده تحت تحریکات بحرانی حاصل از دو حالت قیدی بر مبنای کمینه جابه‌جایی یا کمینه شتاب بام در جدول (۸) نشان داده شده‌اند. لازم به ذکر است، مطابق جداول (۶ و ۷)، برای زلزله‌ی بحرانی ناشی از اعمال قیود حالت اول که منجر به ایجاد زلزله‌ای پالس گونه شد، مقادیر کران بالای بیشتری برای پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شده در نظر گرفته می‌شود. علت این امر را می‌توان در نیاز بیشتر سازه‌ی تحت تحریک بحرانی‌تر به جرم و سختی بیشتر برای میراگر جرمی تنظیم‌شده برای کنترل سازه دانست. در حقیقت همان‌گونه که در جدول (۸)، نشان داده شده است، تحت زلزله‌ی بحرانی‌تر (زلزله‌ی ناشی از اعمال قیود حالت اول)، نیاز به جرم و سختی بیشتر برای میراگر جرمی تنظیم‌شده وجود دارد.

لازم به ذکر است که در الگوریتم جامعه پرندگان، تعداد ذرات جمعیت و بیشینه تعداد تکرار الگوریتم به ترتیب برابر ۳۰ و ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. این مقادیر بر اساس چندین مرتبه اجرای برنامه‌ی بهینه‌سازی، تغییر دادن مقادیر فوق و انجام آنالیز حساسیت به دست آمده است. همچنین با توجه به مرجع [32]، مقادیر w_{min} و w_{max} به ترتیب برابر با ۰/۹ و ۰/۴ انتخاب می‌شوند. به منظور در نظر گرفتن ماهیت تصادفی الگوریتم جامعه پرندگان چندهدفه، ۱۰ اجرای مستقل انجام می‌شود و در نتیجه بهترین جواب الگوریتم انتخاب می‌شود. مقادیر بهینه‌ی محاسبه‌شده برای میراگر جرمی تنظیم‌شده تحت تحریکات بحرانی حاصل از دو حالت قیدی بر مبنای کمینه جابه‌جایی یا کمینه شتاب بام در جدول (۸) نشان داده شده‌اند. شکل‌های (۳ و ۴) نیز نمودار پارتو مربوط به بهینه‌سازی چندهدفه‌ی تحت دو حالت تحریک بحرانی را نشان می‌دهند.

با توجه به جدول (۵)، مقادیر بیشینه جابه‌جایی برای زلزله‌ی بحرانی حالت اول بیشتر از حالت دوم است. این امر به علت عدم وجود قید برای محدوده‌ی طیف دامنه‌ی فوریه-ی فوقانی در حالت اول قیدی است درحالی‌که به ازای حالت قیدی دوم به دلیل وجود داشتن قید برای طیف دامنه-ی فوریه امکان تمرکز محتوای فرکانسی در یک فرکانس خاص وجود ندارد [9-11]. در هر صورت هر دو زلزله‌های ناشی از اعمال حالات قیدی اول و دوم بحرانی است. نظر به این‌که بیشینه جابه‌جایی و شتاب بام ایجادشده در هر دو زلزله‌ی محاسبه‌شده چندین برابر بیشینه جابه‌جایی‌ها و شتاب‌های بام ایجادشده ناشی از زلزله‌های انتخابی در ساخت زلزله‌ی بحرانی است. به عنوان نمونه، بیشینه جابه‌جایی بام ایجادشده ناشی از زلزله‌ی بحرانی حالت اول، ۳/۲ برابر مقدار ایجادشده توسط مؤلفه‌ی L در زلزله‌ی اهر-ورزقان، ۱/۷۲ برابر مقدار ایجادشده توسط مؤلفه‌ی L در زلزله‌ی رودبار-منجیل و ۱۱/۱۷ برابر مقدار ایجادشده توسط مؤلفه‌ی L در زلزله‌ی زنجیران است.

۲-۵ نتایج طرح بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شده

در این قسمت، هدف محاسبه‌ی مقادیر بهینه‌ی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شده (جرم، میرایی و سختی) برای سازه‌ی مورد مطالعه به کمک الگوریتم بهینه‌سازی

شکل ۴. جبهه‌ی پارتو زلزله‌ی بحرانی ایجادشده ناشی از قید حالت

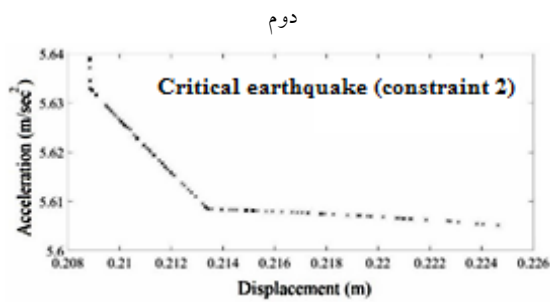


Fig. 4. The Pareto front for critical earthquake induced by constraint type 2

همان‌گونه که در شکل‌های (۳ و ۴) و جدول (۸) نشان داده شده است، به ازای یک مقدار معینی جرم، میرایی و سختی میراگر جرمی تنظیم‌شده و تحت زلزله‌ی بحرانی مشخص، کمترین جابه‌جایی و کمترین شتاب در بام سازه رخ می‌دهد.

نمودارهای تاریخچه زمانی جابه‌جایی و شتاب بام مربوط به سازه‌ی کنترل‌شده توسط میراگر جرمی تنظیم‌شده-ی بهینه و سازه‌ی کنترل نشده تحت تحریکات بحرانی با فرض کمینه جابه‌جایی بام و یا کمینه شتاب بام در شکل‌های (۵ تا ۸) نشان داده شده است.

شکل ۵. تاریخچه زمانی جابه‌جایی و شتاب بام در سازه‌ی کنترل‌شده و کنترل نشده تحت زلزله‌ی بحرانی حاصل از قید حالت اول (کمینه جابه‌جایی)

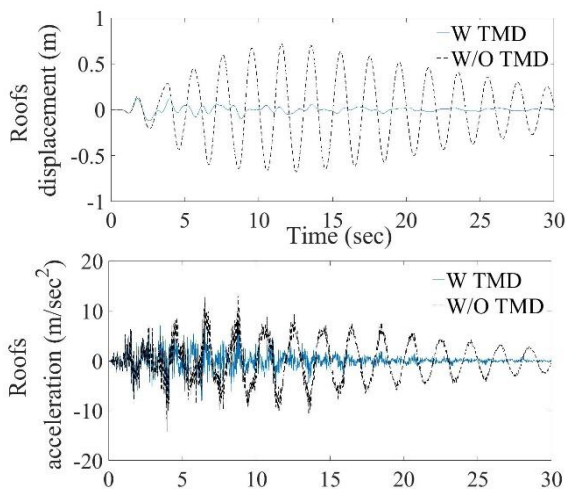


Fig. 5. Roof displacement and acceleration time histories for controlled and uncontrolled buildings subjected to critical earthquake induced by constraint type 1 (minimum displacement)

جدول ۶. مقادیر کران بالا و پایین برای پارامترهای میراگر جرمی در

سازه‌ی تحریک شده توسط زلزله‌ی بحرانی اول

Lower bound	Upper bound	Parameter
1×10^5	5×10^5	$c_d (N.sec/m)$
2×10^6	6.2×10^6	$k_d (N/m)$
5×10^4	3.5×10^5	$m_d (N.sec^2/m)$

Table 6. The upper and lower bounds for the parameters of tuned mass damper in the structure subjected to induced critical earthquake for constraint type 1

جدول ۷. مقادیر کران بالا و پایین برای پارامترهای میراگر جرمی در

سازه‌ی تحریک شده توسط زلزله‌ی بحرانی دوم

Lower bound	Upper bound	Parameter
1×10^5	3×10^5	$c_d (N.sec/m)$
2×10^6	4.2×10^6	$k_d (N/m)$
5×10^4	1.5×10^5	$m_d (N.sec^2/m)$

Table 7. The upper and lower bounds for the parameters of tuned mass damper in the structure subjected to induced critical earthquake for constraint type 2

جدول ۸. مقادیر بهینه‌ی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شده

Critical earthquake	$k_d (N/m)$	$c_d (N.sec/m)$	$m_d (N.sec^2/m)$
First scenario (minimum roof displacement)	2.77×10^6	1×10^5	3.5×10^5
First scenario (minimum roof acceleration)	2.38×10^6	1×10^5	3.5×10^5
Second scenario (minimum roof displacement)	2×10^6	1.8114×10^5	1.5×10^5
Second scenario (minimum roof acceleration)	2×10^6	3×10^5	1.5×10^5

Table 8. The optimum values for parameters of tuned mass dampers

شکل ۳. جبهه‌ی پارتو زلزله‌ی بحرانی ایجادشده ناشی از قید حالت

اول

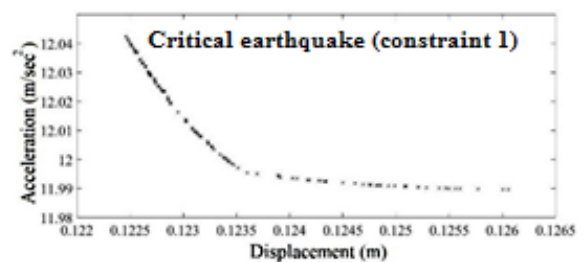


Fig. 3. The Pareto front for critical earthquake induced by constraint type 1

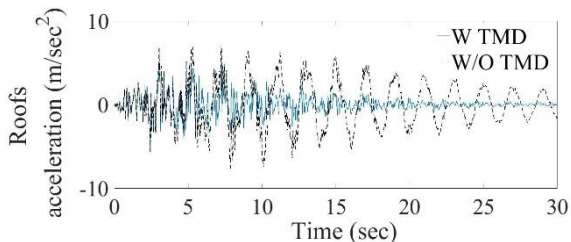


Fig. 8. Roof displacement and acceleration time histories for controlled and uncontrolled buildings subjected to critical earthquake induced by constraint type 2 (minimum acceleration)

با توجه به نتایج جدول (۸)، برای تحریک بحرانی ناشی از قید حالت اول نسبت جرم میراگر جرمی تنظیم شده به جرم کل سازه برابر با $25/27\%$ است که این نسبت بسیار بیشتر از همین مقدار برای تحریک بحرانی ناشی از قید حالت دوم $10/83\%$ است. در حقیقت با شدت یافتن تحریک بحرانی برای کنترل سازه، جرم و سختی میراگر جرمی تنظیم شده افزایش می‌یابند. در جدول (۹)، مقادیر بیشینه شتاب و جابه‌جایی بام سازه‌ی کنترل شده تحت زلزله‌های بحرانی نشان داده شده است. همان‌گونه که از نتایج جدول (۹) و شکل‌های (۵ تا ۸) قابل برداشت است، در حالتی که سازه‌ی کنترل شده تحت زلزله‌ی بحرانی حالت اول قرار گیرد، اگر معیار را کاهش بیشتر در جابه‌جایی بام قرار دهیم (کمینه جابه‌جایی) میزان بیشینه جابه‌جایی بام $83/33\%$ و میزان بیشینه شتاب بام $15/03\%$ نسبت به سازه‌ی کنترل نشده کاهش می‌یابد.

جدول ۹. بیشینه شتاب و جابه‌جایی در بام سازه‌ی کنترل شده تحت

Earthquake	زلزله بحرانی	
	Maximum roof acceleration (m/sec^2)	Maximum roof displacement (m)
First scenario (minimum roof displacement)	12.04	0.12
First scenario (minimum roof acceleration)	11.99	0.13
Second scenario (minimum roof displacement)	5.63	0.21
Second scenario (minimum roof acceleration)	5.61	0.22

Table 9. Maximum acceleration and displacement at the roof of controlled building subjected to critical earthquake

شکل ۶. تاریخچه زمانی جابه‌جایی و شتاب بام در سازه‌ی کنترل شده و کنترل نشده تحت زلزله‌ی بحرانی حاصل از قید حالت اول (کمینه شتاب)

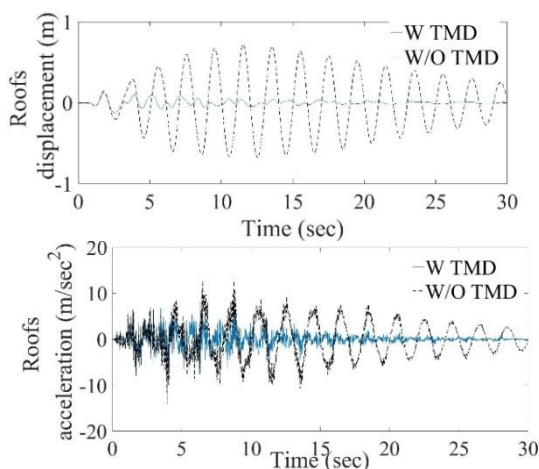


Fig. 6. Roof displacement and acceleration time histories for controlled and uncontrolled buildings subjected to critical earthquake induced by constraint type 1 (minimum acceleration)

شکل ۷. تاریخچه زمانی جابه‌جایی و شتاب بام در سازه‌ی کنترل شده و کنترل نشده تحت زلزله‌ی بحرانی حاصل از قید حالت دوم (کمینه جابه‌جایی)

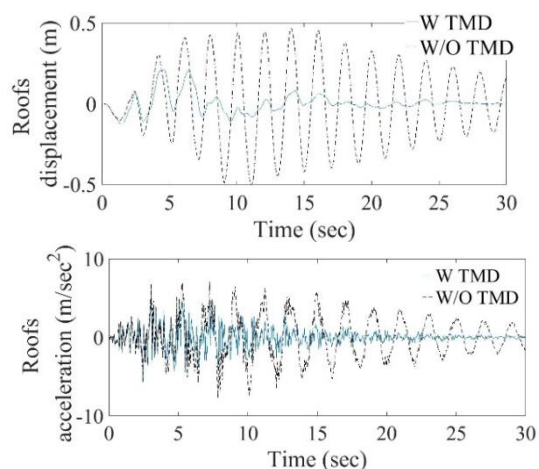
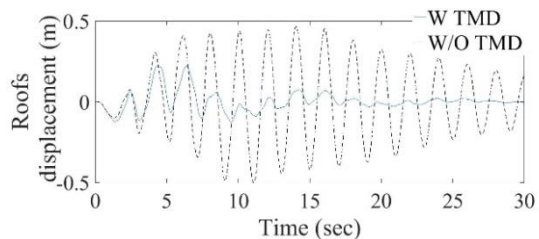


Fig. 7. Roof displacement and acceleration time histories for controlled and uncontrolled buildings subjected to critical earthquake induced by constraint type 2 (minimum displacement)

شکل ۸. تاریخچه زمانی جابه‌جایی و شتاب بام در سازه‌ی کنترل شده و کنترل نشده تحت زلزله‌ی بحرانی حاصل از قید حالت دوم (کمینه شتاب)



- Engineering and Structural Dynamics*, 30(4), 519-535.
- [5] Takewaki I. 2001b Nonstationary random critical excitation for acceleration response. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(6), 544-556.
- [6] Westermo B. D. 1985 The critical excitation and response of simple dynamic systems. *Journal of Sound and Vibration*, 100(2), 233-242.
- [7] Moustafa A. 2009 Critical earthquake load inputs for multi-degree-of-freedom inelastic structures. *Journal of Sound and Vibration*, 325(3), 532-544
- [8] Moustafa A. 2006 Critical seismic load inputs for simple inelastic structures. *Journal of Sound and Vibration*, 296(4), 949-967.
- [9] Moustafa A. 2011 Damage-Based Design Earthquake Loads for Single-Degree-Of-Freedom Inelastic Structures. *Journal of Structural Engineering*, 137(3), 456-467.
- [10] Kamgar R. & Rahgozar R. 2015 Determination of critical excitation in seismic analysis of structures. *International Journal of Earthquakes & Structures*, 9(4), 875-891.
- [11] Kamgar R., Shojaee S. & Rahgozar R. 2015 Rehabilitation of tall buildings by active control system subjected to critical seismic excitation. *Asian Journal of Civil Engineering*, 16(6), 819-833.
- [12] Den Hartog J. P. 1956 *Mechanical vibrations*. McGraw-Hill.
- [13] Lee C. L., Chen Y. T., Chung L. L. & Wang W. P. 2006 Optimal design theories and applications of tuned mass dampers. *Engineering structures*, 28(1), 43-53.
- [14] Bakre S. V. & Jangid R. S. 2007 Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system. *Structural Control and Health Monitoring*, 14(3), 448-470.
- [15] Marano G. C., Greco R. & Chiaia B. 2010 A comparison between different optimization criteria for tuned mass dampers design. *Journal of Sound and Vibration*, 329(23), 4880-4890.
- [16] Zilletti M., Elliott S. J. & Rustighi E. 2012 Optimisation of dynamic vibration absorbers to minimise kinetic energy and maximize internal power dissipation. *Journal of sound and Vibration*, 331(18), 4093-4100.
- [17] Tigli O. F. 2012 Optimum vibration absorber (tuned mass damper) design for linear damped systems subjected to random loads. *Journal of Sound and Vibration*, 331(13), 3035-3049.
- [18] Kaveh A., Mohammadi S., Hosseini O. K., Keyhani A. & Kalatjari V. 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(C1), 21-40.
- [19] Deb K. 2001 *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, United Kingdom.
- [20] Salajegheh E., Gholizadeh S. & Khatibinia M. 2008 Optimal design of structures for earthquake loads by a hybrid RBF-BPSO method. *Journal of Earthquake*

این مقادیر برای حالتی که سازه‌ی کنترل شده تحت زلزله‌ی بحرانی حالت اول قرار گیرد و این بار معیار را کاهش بیشتر در شتاب بام قرار دهیم (کمینه شتاب) به ترتیب برابر با ۸۱/۹۴٪ و ۱۵/۳۸٪ می‌باشند. این مقادیر برای سازه‌ی کنترل شده تحت زلزله‌ی بحرانی حالت دوم و با معیار کمینه جابه‌جایی برابر ۵۸٪ و ۲۶/۵٪ و براساس معیار کمینه شتاب ۵۶٪ و ۲۶/۷۶٪ است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روشی مؤثر برای تعیین پارامترهای بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم شده تحت زلزله‌های بحرانی پیشنهاد شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که اعمال قیود مربوط به حدود فوقانی طیف دامنه‌ی فوریه باعث کاهش جابه‌جایی بیشتری در بام سازه شده و سبب ایجاد زمین‌لرزه‌های پالس گونه شده است. همچنین براساس روش ارائه شده در این مقاله، می‌توان زلزله‌ی بحرانی را تعیین نمود و سپس بر اساس آن مقادیر بهینه‌ی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده را به گونه‌ای که سازه تحت زلزله‌های شدید کنترل شود، محاسبه نمود. نتایج نشان می‌دهد که برای کنترل زلزله‌های شدیدتر نیاز به استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شده با جرم و سختی بیشتری است.

۷- سپاسگزاری

مؤلفین از زحماتی که مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی در رابطه با تهیه و در اختیار قرار دادن زلزله‌های استفاده شده در این مقاله کشیدند، نهایت تشکر و قدردانی را دارند.

References

۸- مراجع

- [1] Takewaki I. 2002 Critical excitation method for robust design: A review. *Journal of Structural Engineering*, 128(5), 665-672.
- [2] Stein R. S. 2003 Earthquake conversations. *Journal of Scientific American*, 288(1), 72-79.
- [3] Takewaki I. 2013 *Critical excitation methods in earthquake engineering*. Elsevier, Netherlands.
- [4] Takewaki I. 2001a A new method for non-stationary random critical excitation. *Journal of Earthquake*

- [26] Shi Y. & Eberhart R. 1998 A modified particle swarm optimizer. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, IEEE Press, Piscataway, NJ, 69–73.
- [27] Durillo J., Garca J., Nebro A., Coello C., Luna F. & Alba E. 2009 Multi-objective particle swarm optimizers: An experimental comparison. 5th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Springer Berlin Heidelberg.
- [28] Sadek F., Mohraz B., Taylor A. W. & Chung R. M. 1997 A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(6), 617-636.
- [29] <http://smd.bhrc.ac.ir/Portal/>.
- [30] BHRC. 2014 Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. Standard No. 2800, 4rd edn. BHRC, Tehran, Iran (In Persian).
- [31] Arias A. 1970 *A measure of earthquake intensity: seismic design for nuclear power plants*. MIT Press, Cambridge, MA, pp 438-468.
- [32] Li L. J., Huang Z. B., Liu F. & Wu Q. H. 2007 A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures. *Journal of Computers and Structures*, 85(7), 340–349.
- Engineering and Engineering Vibration*, 7(1), 14-24.
- [21] Salajegheh E., Salajegheh J., Seyedpoor S. M. & Khatibinia M. 2009 Optimal design of geometrically nonlinear space trusses using adaptive neuro-fuzzy inference system. *Scientia Iranica*, 16(5), 403-414.
- [22] Gharehbaghi S. & Khatibinia M. 2015 Optimal seismic design of reinforced concrete structures under time history earthquake loads using an intelligent hybrid algorithm. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 14(1), 97-109.
- [23] Moustafa A. & Manohar C. S. 2002 Critical spatially-varying earthquake load models for extended structures. *Journal of Structural Engineering*, 29(1), 39-52.
- [24] Arora J. S. 2012 *Introduction to optimum design*. Elsevier, Academic Press, USA.
- [25] Kennedy J. & Eberhart R. C. 1995 Particle swarm optimization. *In Proceedings of IEEE international conference on neural networks*, New Jersey, IEEE Press.

Multi-objective Optimization Design of Tuned Mass Damper System Subjected to Critical Excitation

R. Kamgar^{*1}, M. Khatibinia²

1- Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Shahrekord University. (Corresponding Author)

2- Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Birjand.

*Kamgar@eng.sku.ac.ir

Abstract:

Controlling the maximum acceleration and displacement of the roof within the acceptable range is important and essential. In order to control structures, a number of control systems have been introduced that are categorized into four system including active, passive, semi active and hybrid system. One of the most used passive systems is the tuned mass damper system which is placed on the roof of structure for controlling the behavior of building. In addition, the optimization of structures subjected to the earthquake load is an essential task for the safe and economic design of structures. It must be noted that earthquakes are random phenomena and the precise prediction of forthcoming events is a hard task. However, in seismic design codes, the static and modal seismic methods for the seismic design of structures are adopted by the design spectrum produced based on previous earthquakes. Hence, in order to overcome this problem, the concept of critical excitation as a robust method has been presented and developed to generate worst-case critical excitations. The critical excitation method have been presented in the framework of an optimization problem to maximize the structural responses subjected to some constraints. In this paper, an effective method is presented to determine the optimum values for the parameters of the tuned mass damper system subjected to critical earthquakes. The critical earthquakes are unique and are computed based on the dynamical properties of the structure. For this purpose, based on the obtained information from the past occurred earthquakes the critical earthquakes of a ten story shear building are established subjected to the constraints. The constraint scenarios include some computable properties of the ground motion such as energy, peak ground acceleration an upper bound Fourier amplitude spectrum. In fact, in this stage, to compute the critical earthquakes an inverse nonlinear constraint optimization problem must be solved for each time step. Then, the building equipped by a tuned mass damper system at roof of the structure (controlled building) is considered and the optimal design of tuned mass damper subjected to critical earthquakes are implemented. The maximum absolute displacement and acceleration of the roof are considered as the objective functions. Finally, among the computed earthquakes, one of them which produces the maximum objective functions is selected as the critical earthquake. In the optimization procedure, the mass, damping and stiffness of the tuned mass damper (TMD) system are adopted as the design variables. Multi-objective particle swarm optimization method is used to optimize the parameters of the tuned mass damper system. Since, the optimal design of the tuned mass damper system is presented as a multi-objective optimization problem, a set of optimal solutions are obtained. Numerical examples demonstrate the ability and efficiency of the proposed method in the optimal design of the tuned mass damper system subjected to the critical earthquakes. In addition, the numerical results show that the maximum absolute values of the displacement and acceleration of the roof efficiently decreases when the building is controlled by the optimum tuned mass damper system. Also, the results show that the severe earthquake needs a bigger mass for tuned mass damper in order to control the displacement and acceleration of the roof.

Keywords: Critical excitation, Tuned mass damper, Multi-optimization, Particle swarm optimization method.