

بهینه‌سازی پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شده با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری—مطالعه موردی یک قاب برشی ۱۰ طبقه

سیدمهدی زهرائی*
استاد دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه تهران
mzahrai@ut.ac.ir

حبیباله احمدی
دانشجوی دکتری مهندسی سازه
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران
ahmadi.habibollah@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۴

چکیده

یکی از روش‌های مؤثر و پرکاربرد در کنترل غیرفعال^۱ سازه‌ها تحت اثر تحریکات ناشی از زلزله، استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شده^۲ (TMD) است. تعیین پارامترهای بهینه این میراگرها همواره به عنوان چالشی مهم در طراحی سازه‌ها مطرح بوده است. بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر یافتن مقادیر بهینه پارامترهای این نوع میراگرها، تحت تحریکات لرزه‌ای است. در این راستا، از چهار الگوریتم بهینه‌سازی با قابلیت‌های مختلف برای تعیین پارامترهای بهینه میراگر جرمی به منظور دستیابی به بیشینه کاهش پاسخ استفاده شده است. این الگوریتم‌ها شامل الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی^۳ (BBO)، الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی^۴ (ABC)، الگوریتم بهینه‌سازی فرهنگی^۵ (CA) و الگوریتم کرم شب‌تاب^۶ (FA) هستند. تابع هدف به کار رفته در این مطالعه، حداکثر تغییر مکان بام سازه حین ارتعاش در نظر گرفته شده است. برای یک مطالعه موردی مربوط به یک سازه ۱۰ طبقه مرجع، نتایج نشان می‌دهد با تعیین پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده به کمک الگوریتم‌های استفاده شده، مقدار میانگین کاهش جابجایی حدود ۳۸٪ و مقدار کاهش حداکثر جابجایی طبقه بام حدود ۳۶/۵٪ بدست آمده است که در مقایسه با مطالعات پیشین بهبود محسوسی را نشان می‌دهد. این نتیجه بیان‌گر قابلیت بالاتر الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی در جذب انرژی زلزله و کاهش جابجایی‌های طبقات است.

واژگان کلیدی: کنترل غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم‌شده، بهینه‌سازی، الگوریتم‌های فراابتکاری، کنترل ارتعاشات

۱. مقدمه

ارتعاشات ایجاد شده در سازه‌ها که در اثر زلزله یا باد ایجاد می‌شود را می‌توان به وسیله روش‌های مختلفی مانند اصلاح سختی، جرم، میرایی و اصلاح شکل یا به

یکی از چالش‌های همیشگی در مهندسی سازه، یافتن ابزاری جدید و تأثیرگذار برای حفاظت سازه‌ها و تجهیزات در برابر اثرات مخرب نیروهای طبیعی است.

وسیله فراهم کردن نیروهای مخالف فعال^۷ یا غیرفعال^۸، کنترل کرد.

سیستم‌های جذب انرژی غیرفعال سازه‌ها، در سال‌های اخیر به طور وسیعی در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به طور کلی، این سیستم‌ها شامل وسایل و مصالحی می‌شوند که میرایی، سختی و مقاومت سازه را افزایش داده و می‌توانند به منظور کاهش خطرات طبیعی محتمل و نیز مقاوم‌سازی سازه‌های جدید یا ساخته شده، به کار روند. به منظور کاهش و کنترل پاسخ دینامیکی سیستم‌های سازه‌ای و مکانیکی تحت ارتعاش، می‌توان از ابزارهای کنترل غیرفعال استفاده نمود. یکی از این ابزارها، میراگر جرمی تنظیم‌شده است که در ساده‌ترین حالت شامل یک جرم، یک فنر الاستیک (جزء سختی) و یک میراگر (جزء میراگر ویسکوز) است. با انتخاب صحیح این مشخصه‌ها، می‌توان پاسخ دینامیکی سازه اصلی را کاهش داد. میراگرهای جرمی تنظیم‌شده یا به اختصار TMD، به علت مقرون به صرفه بودن و در عین حال سادگی و کارآمدی نسبی، از پرکاربردترین روش‌های کنترل غیرفعال سازه‌های بلند به شمار می‌روند.

دلیل استفاده از TMD، قابل اعتماد بودن، هزینه کم و مؤثر بودن این سیستم است. سرآغاز طرح این میراگرها بر پایه مطالعاتی است که بر روی ضربه‌گیرهای ارتعاشات دینامیکی توسط فرام^۹ در سال ۱۹۹۰ انجام شد [۱].

به منظور گسترش تأثیر روش کنترل ارتعاشات، پیدا کردن پارامترهای مکانیکی بهینه بسیار حائز اهمیت است. یکی از مهم‌ترین مسائل طراحی میراگر جرمی، بهینه‌سازی پارامترهای میراگر است. پارامترهایی که به طور مستقیم بر پاسخ سازه اصلی اثرگذار هستند شامل

جرم، میرایی و سختی TMD است. چندین رابطه به منظور طراحی پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شده برای نوسان‌های مختلف پیشنهاد شده است. دن هارتوگ و پراگ نحوه تخمین پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شده را برای یک سازه بدون میرایی داخلی در معرض تحریکات خارجی هارمونیک شرح داده‌اند [۲].

سادک و همکاران روابطی را برای محاسبه پارامترهای بهینه TMD، برای دو مود ارتعاشی اول هر سیستم، ارائه کردند که مقدار فرکانس و میرایی را برای نسبت‌های جرم و میرایی مختلف بوسیله روش برازش منحنی به دست آورده‌اند. همچنین سیستم‌های چند درجه آزادی با سه مدل سازه‌ای مختلف را مورد بررسی و تحلیل قرار داده‌اند [۳]. لی و همکاران نیز موضوعات مربوط به تعیین بهینه پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شده را مورد بحث و بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها یک نظریه طراحی بهینه برای سازه‌های همراه با میراگرهای جرمی تنظیم‌شده ارائه کردند [۴].

در دهه اخیر نیز افراد متعددی به مطالعه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده و پارامترهای آن پرداخته‌اند. به عنوان نمونه پیزال در سال ۲۰۱۵، موضوع اثربخشی میراگرهای اصطکاکی جرمی تنظیم‌شده چندگانه غیرفعال را نسبت به یک میراگر اصطکاکی جرمی تنظیم‌شده مورد بحث و بررسی قرار داد [۵].

سالوی و ریزی در سال ۲۰۱۶ مطالعاتی به منظور استخراج روابط تنظیم بهینه مشخصات برای یک دستگاه میراگر جرمی تنظیم‌شده غیرفعال، انجام دادند و با استفاده از برازش منحنی‌ها، روابطی برای مشخصات بهینه‌ی میراگرهای جرمی ارائه کرده‌اند [۶]. سالوی و یارالیس عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم‌شده

همراه با اینترتر^{۱۰} که قابلیت اتلاف انرژی بالا دارند را تحت تحریک نویز سفید مورد ارزیابی و بررسی قرار داده‌اند [۷].

مانتیرو و همکاران موضوع بهینه‌سازی پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شده را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در قیاس با یکی از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری (الگوریتم بهینه‌سازی الهام گرفته از دایره^{۱۱} (CIOA)) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و در ادامه مقادیر بهینه تعیین شده و زمان تحلیل کمتر روش بهینه‌سازی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مورد تاکید قرار گرفته است [۸].

خزائی و همکاران نیز عملکرد میراگرهای جرمی تنظیم‌شده چندگانه را در ساختمان‌های بلند فولادی منظم و نامنظم L و U شکل دارای ۱۰ و ۲۰ طبقه، تحت رکوردهای زلزله نزدیک و دور بررسی کرده‌اند. در این پژوهش جانمایی بهینه میراگرها در پلان ساختمان نیز مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۹].

کاوه و همکاران نیز موضوع بهینه‌سازی پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم‌شده با استفاده از الگوریتم فراابتکاری جستجوی ذرات باردار^{۱۲} (CSS) را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۰]. کامگار و همکاران نیز همین موضوع را تحت تحریک بحرانی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۱]. باسیلی و همکاران نیز موضوع بهسازی تلفیقی لرزه‌ای و انرژی ساختمان‌های موجود بر اساس مفهوم میراگر جرمی تنظیم‌شده را مورد بررسی قرار داده‌اند؛ در این مقاله برای اولین بار پیاده‌سازی روش‌های نوین تلفیقی بهسازی لرزه‌ای و انرژی با بهره‌گیری از مفهوم میراگر جرمی تنظیم‌شده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است [۱۲].

اخلاق پسند و زهرائی، مقایسه میراگر جرمی تنظیم‌شده منفرد با توزیع‌شده عمودی بر اساس تحلیل مودال را در یک ساختمان ۲۰ طبقه، مورد تحلیل و بررسی قرار داده‌اند، در این مقاله علاوه بر استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^{۱۳} (PSO)، بیش از یک مود ارتعاشی برای تنظیم میراگرهای جرمی تنظیم شده، استفاده شده است [۱۳]. همچنین حاتمی و همکاران نیز موضوع تعیین بهینه پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شده با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی بهبودیافته را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۶].

ژرونی و همکاران، مفهوم میراگرهای جرمی تنظیم‌شده چندگانه همراه با اینترتر را معرفی کرده و عملکرد آن در کنترل ارتعاشات را در مقایسه با میراگر جرمی همراه با اینترتر تک را مورد بررسی قرار داده‌اند. در مقاله مذکور از الگوریتم بهینه‌سازی PSO برای تعیین مشخصات استفاده شده است [۱۴].

تعیین پارامترهای بهینه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده، همواره به عنوان چالشی مهم در طراحی سازه‌ها مطرح بوده است. در این پژوهش، هدف اصلی، بهینه‌یابی پارامترهای این نوع میراگرها به منظور کنترل مؤثرتر سازه، تحت تحریکات لرزه‌ای است. بدین منظور برای اولین بار چهار الگوریتم فراابتکاری با قابلیت‌های متفاوت به‌کار گرفته شده‌اند، تا پارامترهای بهینه TMD با هدف کاهش بیشینه پاسخ تعیین شوند. در این راستا، از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO)، الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب (FA)، الگوریتم بهینه‌سازی فرهنگی (CA) و الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC) استفاده شده است. همچنین تابع هدف در این مساله حداقل کردن حداکثر جابجایی طبقه بام تعریف شده است.

شاخص عملکردی و غیره تعریف کرد. از طرفی متغیرهای تصمیم‌گیری در این پژوهش به صورت زیر تعریف شده است:

$$\text{Decision Variables} \begin{cases} m_d \rightarrow \text{mass of damper} \\ k_d \rightarrow \text{stiffness of damper} \\ c_d \rightarrow \text{damping of damper} \end{cases} \quad (۳)$$

در نهایت در صورتی که تابع هدف برابر حداکثر تغییرمکان بام سازه در نظر گرفته شود، مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Find } x = [m_d, k_d, c_d] \quad (۴)$$

$$(m_d)_{\min} < m_d < (m_d)_{\max} \quad (۵)$$

$$(k_d)_{\min} < k_d < (k_d)_{\max} \quad (۶)$$

$$(c_d)_{\min} < c_d < (c_d)_{\max} \quad (۷)$$

$$\text{Minimize (Maximum Displacement of } n - \text{th Storey)} \quad (۸)$$

۳. الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری

در مسائل پیچیده مهندسی، اغلب دامنه تابع ناپیوسته بوده و به دلیل تعداد بالای متغیرها امکان استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر مشتق وجود ندارد و یا بسیار دشوار است. از این رو پژوهشگران همواره به دنبال روش‌هایی ابتکاری^{۱۸} و خلاقانه بوده‌اند تا بتوانند بدون محاسبه مشتق توابع، جواب‌های قابل قبولی را در نزدیکی مقادیر بیشینه و یا کمینه تابع بیابند. این روش‌ها اغلب با روش سعی و خطا؛ مجموعه‌ای از جواب‌ها را تولید کرده و با هدف یافتن کمترین یا بیشترین مقدار تابع مورد نظر، به جستجوی دامنه تابع می‌پردازند.

به دلیل ماهیت ابتکاری این روش‌ها آن‌ها را الگوریتم‌های ابتکاری می‌نامند. الگوریتم‌های ابتکاری به صورت چرخه‌ای یا تکراری عمل می‌کنند. به این صورت که در هر چرخه یا تکرار، مجموعه‌ای از جواب‌ها را به صورت تصادفی ایجاد کرده و مقدار تابع مورد نظر را برای هر جواب بدست می‌آورد. در تکرارهای بعدی

در ادامه با استفاده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، سیستم اصلی بدون کنترل و دارای میراگر جرمی طراحی شده به روش‌های مختلف، میزان کاهش پاسخ‌های دینامیکی ارزیابی شده است تا در نهایت، پارامترهای مناسب برای طراحی میراگرهای جرمی پیشنهاد شود.

در این مطالعه از روش تحلیل فضای حالت^{۱۴} برای تحلیل سازه و برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب^{۱۵} بهره گرفته شده است.

در این پژوهش علاوه بر دستیابی به پاسخی بهینه‌تر و کارا تر نسبت به سایر پژوهش‌ها که مبین قدرت روش‌های پیشنهادی است، مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری، با مبانی و قابلیت‌های گوناگون، روش‌های حل مختلف و نحوه دستیابی به پاسخ مناسب در هر یک از آن‌ها نیز مدنظر قرار گرفته است.

۲. بهینه‌سازی سازه‌ها

به‌طور کلی یک مسئله استاندارد بهینه‌سازی سازه‌ها به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\text{Minimize } f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad (۱)$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} g_j(x_i) \leq 0, & j = 1, 2, \dots, m \\ h_k(x_i) = 0, & k = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن، $f(x)$ تابع هدف، n تعداد متغیرهای تصمیم^{۱۶} و بیان‌گر ابعاد فضای جستجو^{۱۷}، $g(x)$ توابع قیود نامساوی، $h(x)$ توابع قیود مساوی، m تعداد قیود نامساوی و l تعداد قیود مساوی است. از آنجایی که هدف پژوهش حاضر کنترل بهینه و مؤثرتر سازه در برابر تحریکات لرزه‌ای است؛ تابع هدف را می‌توان برابر تغییرمکان حداکثر بام، جذر مجموع مربعات تغییرمکان‌های همه طبقات، شتاب هر یک از طبقات،

سعی می‌شود با ایجاد یک تغییر کوچک و تصادفی در مجموعه جواب‌های تکرار قبلی به جستجوی کمترین مقدار یا بیشترین مقدار تابع بپردازد.

حافظه‌ی طبیعت کوله‌باری وسیع و بی‌همتا از تجربه‌ها است. انسان خردمند به عنوان جزئی از این طبیعت تنها ۴۰۰ هزار سال است که حرکت خود به سوی کمال را آغاز نموده است. از این رو همواره سعی کرده تا از حافظه‌ی عظیم طبیعت استفاده کند و آن را به عنوان منبعی ناب که در طول میلیون‌ها سال پالایش شده، منبع الهام خود قرار دهد. نسل بعدی الگوریتم‌های ابتکاری با الهام از طبیعت سعی کردند تا جستجوی دامنه تابع به صورتی جهت‌دار و هوشمند انجام گیرد. به دلیل ماهیت هوشمند این روش‌ها آن‌ها را الگوریتم‌های فراابتکاری^{۱۹} یا هوشمند می‌نامند. از جمله این الگوریتم‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی، الگوریتم مبتنی بر جغرافیای زیستی، الگوریتم کرم شب‌تاب و غیره اشاره کرد. امروزه صدها الگوریتم فراابتکاری در مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد و سرعت و کیفیت پاسخ‌ها روز به روز افزایش می‌یابد.

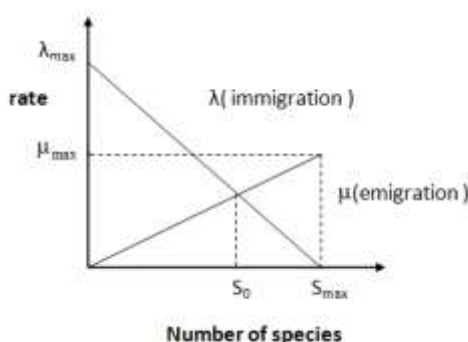
۳-۱. الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO)

مفهوم الگوریتم BBO از طبیعت و بر مبنای چگونگی مهاجرت جانوران از جزیره یا منطقه‌ای با شمار زیاد رقبا به منطقه‌ای خلوت‌تر و با رقبای کمتر است. بر مبنای این الگوریتم، هر چه تعداد ساکنان منطقه بیشتر باشد، آن منطقه از دید زیستی مکان بهتری برای زندگی بوده و در نتیجه دارای برازندگی^{۲۰} بهتر و بیشتری است. در این حالت است که ارگانیسم‌ها در هر

مرحله، از جزایر با برازندگی بیشتر به جزایر با برازندگی کمتر مهاجرت کرده و مبتنی بر این مفهوم، فرآیند بهینه‌سازی انجام می‌پذیرد. جزایر یا محل‌های سکونت که دارای ویژگی‌های مناسب برای سکونت جانوران زیستی هستند، دارای شاخص شایستگی محل سکونت بالاتری نسبت به سایر محل‌های سکونت هستند. شاخص شایستگی محل سکونت که به اختصار HSI، نامیده می‌شود همان تابع برازندگی یا هدف در سایر الگوریتم‌ها است.

متغیرهایی که قابلیت سکونت در یک منطقه را تعریف می‌کنند، متغیرهای شاخص برازندگی هستند که به اختصار SIV نامیده می‌شود.

در شکل ۱ دو مفهوم "مهاجرت به^{۲۱}" و "مهاجرت از^{۲۲}" بدین گونه توصیف می‌شوند که اگر در منطقه‌ای بیشینه جمعیت وجود داشته باشد (به عبارتی بالاترین میزان تابع هدف یا برازندگی را داشته باشد)، در نتیجه مهاجرت به آن صفر و مهاجرت از آن دارای بالاترین نرخ ممکن است و بالعکس (به عبارتی سایر پاسخ‌ها به سمت آن حرکت می‌کنند). در شکل ۱، λ نشان دهنده "نرخ مهاجرت به" و μ نشان دهنده "نرخ مهاجرت از" است.



شکل ۱. نرخ‌های مهاجرت براساس تعداد گونه‌ها در یک محل

سکونت با استفاده از الگوریتم BBO [۱۷]

روش انجام الگوریتم بهینه‌یابی مبتنی بر جغرافیای زیستی عبارت است از:

۱. مجموعه‌ای از پاسخ‌های اولیه مسئله را به صورت تصادفی مقاردهی کنید.
۲. میزان برازندگی (HSI) هر پاسخ را محاسبه نمایید.
۳. مقادیر S ، λ و μ را برای هر راه‌حل تعیین کنید.
۴. عملیات مهاجردهی و مهاجرپذیری زیستگاه‌ها (جزایر) را بر پایه λ و μ انجام دهید.
۵. عملیات جهش را اعمال کنید.
۶. تا حد امکان از نخبه‌گرایی بهره‌گیری کنید.
۷. در صورت لزوم (تا حصول شرط پایان)، به مرحله ۲ برای تکرار بعدی بازگردید.

۲-۳. الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب (FA)

الگوریتم کرم شب‌تاب یک الگوریتم فراابتکاری الهام‌گرفته از رفتار اجتماعی و خاصیت نورافشانی کرم‌های شب‌تاب است. این الگوریتم در سال ۲۰۰۸ توسط یانگ توسعه داده شد [۱۸].

الگوریتم FA از رفتار نورافشانی و جذب اجتماعی کرم‌های شب‌تاب در طبیعت الهام گرفته شده است. این الگوریتم بر سه قاعده ساده و ایده‌آل شده به شرح زیر استوار است.

الف) همه کرم‌های شب‌تاب یک‌جنس هستند و کرم‌های با نور کمتر به سمت کرم‌های با نور بیشتر جذب می‌شوند.

ب) میزان جذابیت (γ) بین دو کرم شب‌تاب با شدت نور (I) آن‌ها (که معادل مقدار تابع هدف است) رابطه مستقیم و با افزایش فاصله (r) بین آن‌ها رابطه عکس دارد.

ج) روشنایی یک کرم شب‌تاب متناسب با مقدار تابع هدف تعیین می‌شود. (مثلاً برای مسائل بیشینه‌سازی، روشنایی با مقدار برازندگی یا همان مقدار تابع هدف رابطه مستقیم دارد).

شبه‌کد الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب به صورت زیر خلاصه شده است:

** تابع هدف: $f(x)$; $x = (x_1, \dots, x_d)^T$.

** جمعیت اولیه کرم‌های شب‌تاب x_i را تولید کنید ($i = 1, 2, \dots, n$).

** شدت نور I_i در x_i بر اساس $f(x_i)$ تعیین می‌شود.

** ضریب جذب نور γ را تعریف کنید.

حلقه *while* (تا حصول شرط پایان)

حلقه *for* ($i = 1$ تا n تمام کرم شب‌تاب)

حلقه *for* ($j = 1$ تا n تمام کرم شب‌تاب)

(دستور شرطی) اگر $(I_j > I_i)$ باشد، کرم شب‌تاب i

را در بعد d به سمت j حرکت دهید؛

پایان دستور شرطی

جاذبه با فاصله r از طریق $\exp[-\gamma r]$ تغییر

می‌کند

راه‌حل‌های جدید را ارزیابی کرده و شدت نور را

به‌روزرسانی کنید.

پایان حلقه j

پایان حلقه i

کرم‌های شب‌تاب را رتبه‌بندی کنید و بهترین پاسخ را

بیابید

پایان حلقه *while*

۳-۳. الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبور عسل

مصنوعی (ABC)

الگوریتم ABC یک الگوریتم فراابتکاری است که در سال

۲۰۰۵ برای حل مسائل بهینه‌سازی عددی ارائه شد [۱۹].

این الگوریتم رفتار هوشمندانه و الهام‌بخش زنبورهای عسل

در یافتن منابع غذایی (شهد) را مدل‌سازی می‌کند.

$x_{ij}, i = 1, \dots, SN; j = 1, \dots, D$

۲: جمعیت را ارزیابی کنید

۳: شماره تکرار = ۱

۴: عملیات‌های زیر را تکرار کنید.

۵: راه‌حل‌های جدید v_{ij} را برای زنبورهای کارگر تولید کرده

و آن‌ها را ارزیابی نمایید

۶: فرآیند انتخاب حریصانه را اعمال کنید.

۷: مقادیر احتمال P_{ij} را برای راه‌حل‌های x_{ij} محاسبه کنید.

۸: راه‌حل‌های جدید v_{ij} را برای ناظران از راه‌حل‌های x_{ij}

(انتخاب‌شده بر اساس P_{ij}) تولید کرده و ارزیابی نمایید.

۹: فرآیند انتخاب حریصانه را اعمال کنید.

۱۰: راه‌حل ره‌اشده را برای زنبور کاوشگر (در صورت وجود)

تعیین کرده و آن را با راه‌حل جدیدی به‌صورت تصادفی

جایگزین کنید x_{ij}

۱۱: بهترین راه‌حل به‌دست‌آمده تاکنون را به ثبت کنید.

۱۲: شماره تکرار = شماره تکرار + ۱

۱۳: تا زمانی که شماره تکرار = MCN چرخه را ادامه دهید.

۳-۴. الگوریتم بهینه‌سازی فرهنگی (CA)

الگوریتم فرهنگی، یک الگوریتم فراابتکاری، مبتنی بر

جمعیت است که توسط رینولدز در سال ۱۹۹۴ معرفی شد

[۲۰]. این الگوریتم از مدل تکامل فرهنگی در جامعه انسانی

الهام گرفته شده است که در آن افراد یک جامعه (جمعیت)

تحت تأثیر باورها، سنت‌ها و دانش کلی جامعه (فرهنگ)

قرار می‌گیرند و این فرهنگ نیز در طول زمان توسط

تجربیات افراد به‌روز می‌شود. ایده اصلی و معماری دو

سطحی^{۲۷} الگوریتم فرهنگی به صورت زیر تشریح داده

می‌شود:

الف) سطح جمعیت

در الگوریتم ABC، هر منبع غذایی نشان‌دهنده

یک راه‌حل کاندید برای مسئله بهینه‌سازی است و میزان

شهد آن معادل کیفیت آن راه‌حل (مقدار تابع هدف یا

برازندگی) است. جمعیت زنبورها به سه گروه تقسیم

می‌شوند.

الف) زنبورهای کارگر^{۲۳}

هرکدام به یک منبع غذایی خاص تعلق دارند و اطلاعات

درباره آن منبع (راه‌حل) را در حافظه دارند. آن‌ها به اطراف

منبع خود پرواز کرده و یک منبع غذایی جدید در

همسایگی آن جستجو می‌کنند.

ب) زنبورهای ناظر^{۲۴}

این زنبورها در کندو منتظر می‌مانند و بر اساس اطلاعاتی

که زنبورهای کارگر از طریق رقص خود ارائه می‌دهند، یک

منبع غذایی را با احتمال انتخاب می‌کنند و سپس به اطراف

آن منبع برای جستجوی یک منبع جدید پرواز می‌کنند

(مکانیزم انتخاب بر اساس کیفیت).

ج) زنبورهای جستجوگر^{۲۵}

اگر یک منبع غذایی پس از تعداد معینی تلاش^{۲۶} بهبود

نیابد، توسط زنبور کارگر رها می‌شود. سپس آن زنبور کارگر

به یک زنبور جستجوگر تبدیل می‌شود و به

صورت تصادفی یک منبع غذایی جدید در فضای جستجو

کشف می‌کند (مکانیزم خروج از بهینه‌های محلی).

شبه‌کد الگوریتم بهینه‌سازی کلونی زنبورعسل مصنوعی

صورت زیر خلاصه شده است:

** تعداد منابع غذایی که برابر با تعداد زنبورهای کارگر یا

ناظر است (SN).

** حداکثر تعداد چرخه‌ها (تکرارها) (MCN).

** D تعداد پارامترهای بهینه‌سازی است.

۱: جمعیت پاسخ‌ها را مقداردهی اولیه کنید،

این سطح شامل مجموعه‌ای از افراد (راه‌حل‌های کانید) است که توسط یک الگوریتم تکاملی اولیه (مانند الگوریتم ژنتیک، برنامه‌ریزی تکاملی و غیره) اداره می‌شود. افراد در این سطح با استفاده از عملگرهای متداول (مانند انتخاب، تولیدمثل و جهش) تکامل می‌یابند.

(ب) سطح باور

این سطح نماینده فرهنگ یا دانش استخراج‌شده از کل جامعه در طول زمان است. این دانش به صورت یک سری قواعد، الگوها یا محدودیت‌ها خلاصه‌سازی می‌شود. بین این دو سطح یک ارتباط دوسره به صورت زیر برقرار است.

۱. تأثیرگذاری: باورها بر تکامل افراد در سطح جمعیت تأثیر می‌گذارند (مثلاً جهت جهش یا تولیدمثل را هدایت می‌کنند).

۲. به‌روزرسانی: تجربیات و دانش افراد برجسته (دارای بیشترین برازندگی) در هر نسل، برای به‌روزرسانی باورها در سطح فرهنگ استفاده می‌شود.

شبهه‌کد الگوریتم بهینه‌سازی فرهنگی به صورت زیر خلاصه شده است:

* شروع

* تکرار ← ۰

- جمعیت اولیه ← تولید جمعیت تصادفی $POP(0)$

- فضای باور ← مقداردهی اولیه $BLF(0)$

- کانال ارتباطی ← مقداردهی اولیه $CHL(0)$

- ارزیابی برازندگی $POP(0)$ ← محاسبه بر اساس تابع هدف

* تکرار ← ۱

- مراحل زیر تا برقراری شرط توقف تکرار گردد.

- تبادل یا انتقال دانش ← بین جمعیت $POP(0)$ و

فضای باور $BLF(t)$

- تنظیم باورها ← به‌روزرسانی $BLF(t)$ بر اساس دانش دریافتی

- هدایت جمعیت ← انتقال باورهای $BLF(t)$ به جمعیت جدید $POP(t)$

- تعدیل تناسب یا برازندگی ← تنظیم تابع هدف یا

برازندگی با باورهای $BLF(t)$ برای $POP(t)$

* تکرار ← تکرار + ۱

- انتخاب ← $POP(t)$ را از $POP(t-1)$ بر اساس تناسب انتخاب کن

- تکامل ← $POP(t)$ را با عملگرهای ژنتیکی تکامل دهید.

- ارزیابی ← میزان برازندگی $POP(t)$ را بر اساس تابع هدف محاسبه کن.

* پایان

۴. معادلات حرکت

سازه ساختمانی، به عنوان قاب برشی الاستیک خطی با فرض تمرکز جرم‌ها در طبقات فرض شده است. ارتعاشات زلزله با فرض ایجاد در فونداسیون به عنوان تحریک سازه‌ای در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن جابجایی افقی طبقات به عنوان درجات آزادی دینامیکی سازه، معادله حرکت سازه مدنظر تحت ارتعاش زلزله به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (9)$$

که در آن $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سازه است. $\{u\}$ بردار تغییر مکان ساختمان و $\{r\}$ برداری با ابعاد $(n \times 1)$ که درایه‌های نظیر درجات آزادی در راستای شتاب زلزله برابر یک و در دیگر درایه‌ها مقدار صفر را دارند. و در نهایت \ddot{u}_g ، شتاب زلزله در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد.

Γ نیز ماتریس ورودی گسسته بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\Gamma = \int_0^{\Delta t} e^{A\tau} B d\tau \quad (21)$$

اگر ماتریس $[A]$ معکوس پذیر باشد (که معمولاً در سازه‌ها اینگونه است)؛ خواهیم داشت:

$$\Gamma = A^{-1}(\phi - I)B \quad (22)$$

در روابط بالا k شماره‌ی گام زمانی و $\dot{u}_{g,k}$ نیز برابر شتاب زمین در لحظه‌ی k ام گام زمانی است.

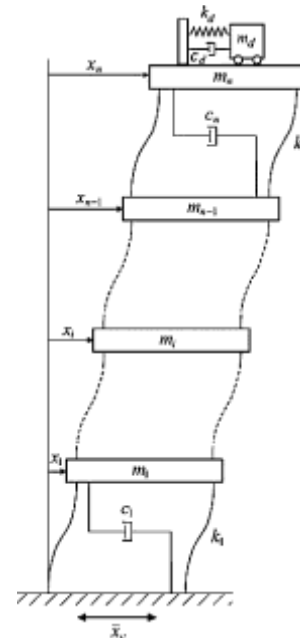
۵. صحت‌سنجی مدل ساخته شده

به منظور اطمینان از نتایج و پاسخ‌های بدست آمده و همچنین روند بهینه‌سازی، لازم است تا دقت پاسخ‌های بدست آمده مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین روش مدل‌سازی و روش تحلیل لرزه‌ای و مکانیزم سیستم کنترل غیرفعال با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شده، نتایج و پاسخ‌های بدست آمده از تحلیل یک مدل سازه‌ای مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده با روش دینامیکی تاریخچه زمانی، با پاسخ‌های مطالعات پیشین مقایسه می‌شود.

به عنوان مدل سازه‌ای مرجع، از یک مدل سازه‌ای ۱۰ طبقه تحت شتاب نگاشت ناشی از زلزله ال‌سنترو^۳ استفاده می‌شود [۱۰]. مشخصات دینامیکی این مدل سازه‌ای، مطابق مرجع [۱۰]، جرم هر طبقه ۳۶۰ تن، سختی الاستیک هر طبقه $۱۰^۵ * ۶/۵$ کیلونیوتن بر متر و میرایی هر طبقه نیز $۱۰^۳ * ۶/۲$ کیلونیوتن. ثانیه بر متر می‌باشد؛ مقادیر برای همه طبقات یکسان در نظر گرفته شده است. سازه مورد مطالعه یک قاب برشی متقارن، با رفتار خطی الاستیک و فرض تمرکز جرم در تراز طبقات در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است با توجه به تمرکز پژوهش بر بررسی عملکرد TMD در کنترل پاسخ جانبی و متقارن بودن پلان فرضی سازه، از یک مدل دوبعدی قاب برشی

$$[C]_T = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & & & \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & & & 0 \\ 0 & -c_3 & \ddots & & & \\ & 0 & & c_n + c_d & -c_d & \\ & & & -c_d & c_d & \end{bmatrix} \quad (17)$$

میرایی سازه همراه با میراگر جرمی هستند. در شکل ۲ قاب مجهز به یک میراگر جرمی در بام نشان داده شده است.



شکل ۲. مدل سازه همراه با میراگر جرمی تنظیم شده

برای حل دستگاه معادلات فضای حالت از روش‌های متعددی استفاده می‌شود. یکی از روش‌های مورد استفاده که در این پژوهش نیز از آن استفاده شده است، گسسته‌سازی معادلات حاکم بر حرکت است؛ این روش با گسسته‌سازی زمان به صورت زیر آغاز می‌شود.

$$t_k = k\Delta t \quad (18)$$

بر این اساس متغیرهای حالت به صورت زیر بدست می‌آید.

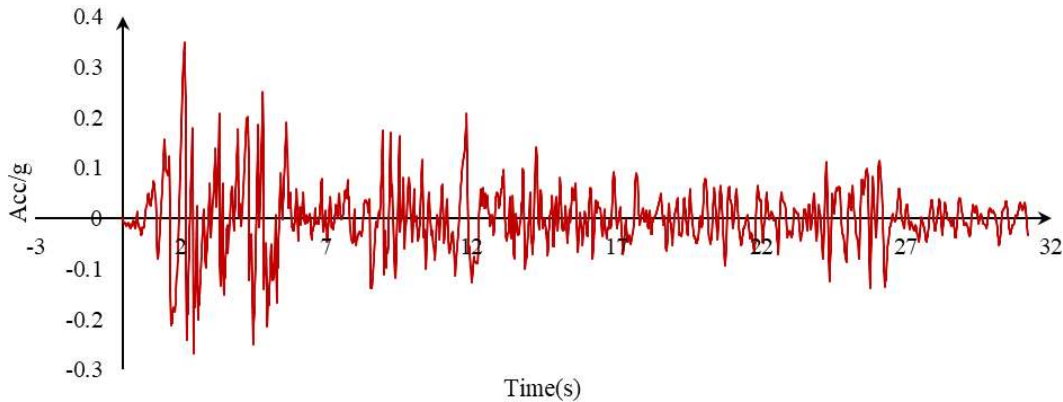
$$z_{k+1} = \phi z_k + \Gamma \dot{u}_{g,k} \quad (19)$$

در معادله بالا ϕ ماتریس انتقال حالت گسسته بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود.

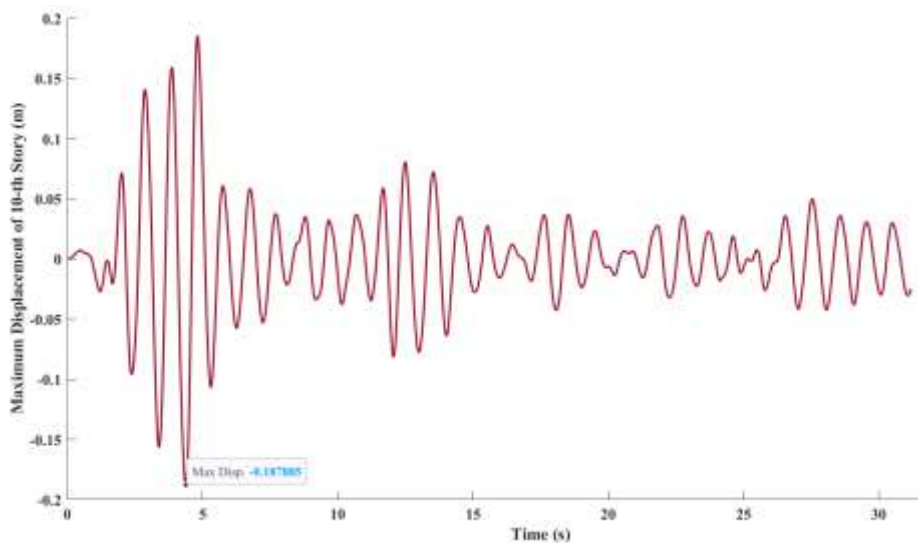
$$\phi = e^{A\Delta t} \quad (20)$$

بر ماهیت مسئله بهینه‌سازی به صورت گسترده استفاده شده است.

معادل که پاسخ اصلی سازه در یک راستا را مدل می‌کند، استفاده شده است. این رویکرد در بسیاری از مطالعات مشابه (مانند [۳]، [۱۰]، [۱۵]) برای ساده‌سازی و تمرکز



شکل ۳. تاریخچه تحریک افقی زلزله السنترو (۱۹۴۰)



شکل ۴. تاریخچه ارتعاش بام سازه مرجع ۱۰ طبقه تحت تحریک زلزله السنترو

در شکل ۵ نیز پاسخ پروفیل حداکثر تغییرمکان مطلق طبقات در زلزله به همراه نتایج ارائه شده در مرجع [۱۰] و انطباق آن‌ها نشان داده شده است.

۶. مسئله حل شده

در این بخش تلاش می‌شود، حداکثر جابجایی بام سازه ۱۰ طبقه مورد بحث در بخش قبل، با استفاده از یک میراگر

در شکل ۴ پاسخ تاریخچه جابجایی بام سازه مرجع کنترل نشده، تحت تحریک زلزله ال سنترو مطابق شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ قابل رویت است، حداکثر جابجایی بام سازه مرجع تحت تحریک زلزله السنترو حدود ۱۸/۷۹ سانتی‌متر بدست آمده است؛ قابل ذکر است مقدار حداکثر جابجایی بام، ارائه شده در مرجع [۱۰] برابر ۱۸/۸ سانتی‌متر اعلام شده است. که این موضوع بیانگر صحت و دقت مدل ارائه شده در این مقاله می‌باشد.

$$\text{Find } x = [k_t, c_t] \quad (23)$$

$$m_t = 108 \text{ ton}$$

$$0 \leq k_t \leq 5000 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (24)$$

$$0 \leq c_t \leq 1000 \text{ kN.s/m} \quad (25)$$

$$\text{Minimize } \left(\begin{array}{l} \text{Maximum Displacement} \\ \text{of 10 - th floor(roof)} \end{array} \right) \quad (26)$$

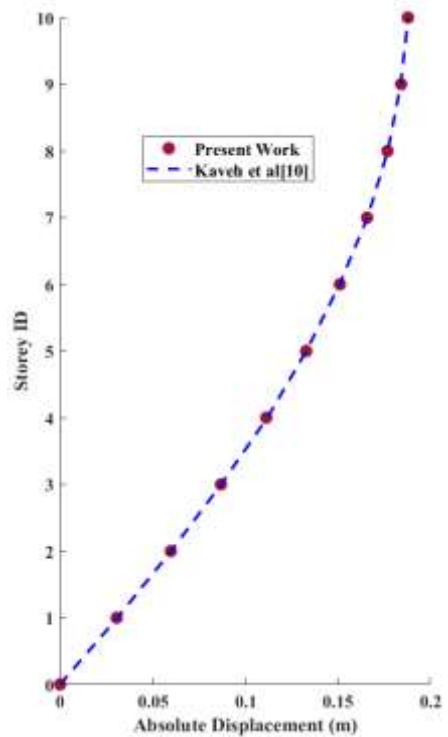
مقادیر بهینه سختی و میرایی برای سازه با مشخصات فوق با استفاده از الگوریتم‌های عنوان شده، با فرض جابجایی مطلق حداکثر بام به عنوان تابع هدف، تعیین شده است؛ مقادیر بهینه پارامترهای تخمینی در این مقاله با مقادیر سایر پژوهش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

در شکل ۶ نیز نمودار همگرایی ۱۰۰ تکرار اول الگوریتم‌های بهینه‌سازی نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است، الگوریتم‌ها پس از مراحل اکتشاف پاسخ‌ها و توسعه و بهبود آن‌ها به پاسخ بهینه‌ای با مشخصات بهینه ذکر شده در فوق همگرا شده است. دستیابی به پاسخی قابل قبول، آن هم در کمتر از ۵۰ تکرار از قدرت الگوریتم‌های مورد استفاده در این مقاله حکایت دارد.

مقادیر پارامترهای بهینه میراگر جرمی و قیاس آن با سایر مقالات در جدول زیر نشان داده شده است. شایان ذکر است در مرجع شماره [۱۶] از دو تابع هدف نسبی برای تعیین مقادیر پارامترها استفاده شده است، که مقادیر خروجی بهینه‌سازی هر دو تابع هدف در جدول ۱ ارائه شده است.

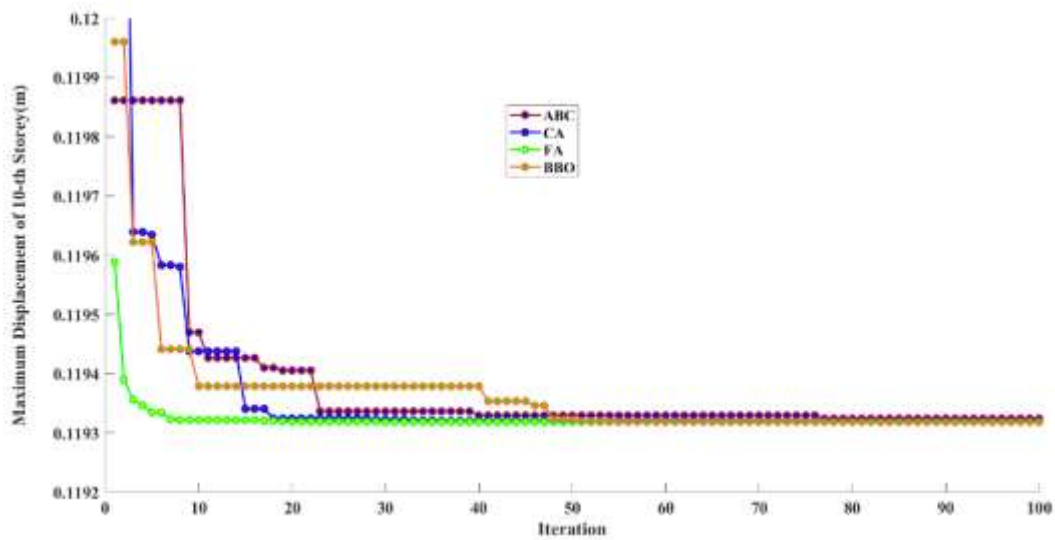
جدول ۱. مقادیر پارامترهای میراگر جرمی تنظیم‌شده

TMD Parameter	Optimum Values								
	Hadi et al. [15]	Lee et al. [3]	Kaveh et al. [10]	Hatami et al. [16]		Present Work			
				obj.1	obj.2	BBO	FA	ABC	CA
C_t (kN.s/m)	۱۵۱/۵	۲۷۱/۷۹	۸۸/۶۹۷	۱۲۱/۵۱	۲۱۰/۹	۵۷/۷۴۶۷	۷۷/۲۱۴۵	۵۸/۷۲۲۲	۵۸/۱۰۳۸
K_t (kN/m)	۳۷۵۰	۴۱۲۶/۹۳	۴۲۰۷/۷۳۵	۳۶۵۳/۹۴	۳۷۲۷/۸۸	۳۲۴۳/۴۷۴۵	۳۵۷۹/۶۳۷۹	۳۲۵۴/۹۶۵۸	۳۲۴۳/۴۷۴۵



شکل ۵. پروفیل جابجایی مطلق حداکثر طبقات تحت زلزله ال‌سترو

نصب شده در بام، کاهش داده شود. این مثال به عنوان مسئله معیار^{۳۱} در برخی مراجع از جمله مراجع [۳]، [۱۰] و [۱۵] مورد تحلیل و بهینه‌سازی قرار گرفته است. مطابق مشخصات مسئله، فرض بر ثابت بودن مقدار جرم میراگر بوده (برابر ۱۰۸ تن) و دو متغیر سختی و میرایی به عنوان متغیرهای تصمیم و حداکثر جابجایی بام سازه به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. مسئله استاندارد بهینه‌سازی سازه مرجع به همراه میراگر جرمی تک به صورت زیر است.

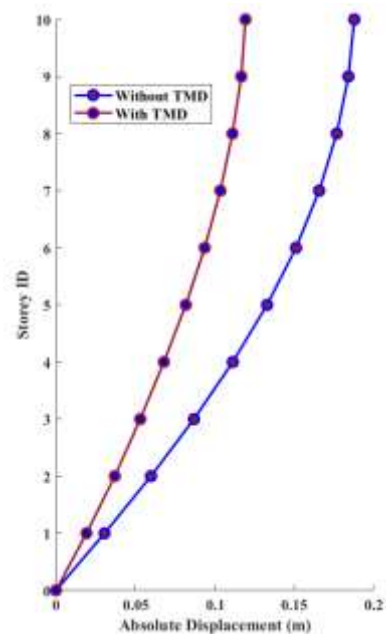


شکل ۶. روند همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی در تکرارهای مختلف

در جدول ۲، مقادیر جابجایی حداکثر طبقات، به همراه مقادیر ارائه شده در سایر مراجع، به منظور مقایسه روش‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج این پژوهش نسبت به سایر مقالات کمتر بوده که نشان از کارآمدی الگوریتم‌های استفاده شده است. جابجایی بام در حالت کنترل نشده برابر ۱۸/۷۹ سانتی‌متر بوده که با نصب میراگر با این مشخصات به حدود ۱۱/۹۳ سانتی‌متر کاهش داشته است. این مقدار بیان‌گر ۳۶/۵ درصد کاهش در جابجایی بام بوده است؛ این در حالی است که درصد کاهش جابجایی بام در مقاله هادی و همکاران [۱۵]، لی و همکاران [۳]، کاوه و همکاران [۱۰] و حاتمی و همکاران [۱۶] به ترتیب برابر ۳۵/۱۱ درصد، ۳۲/۹۸ درصد، ۳۴/۸۴ درصد و ۳۵/۶ درصد (به ازای تابع هدف اول) بوده است. همان‌طور که مشخص است کاهش جابجایی بام در این پژوهش نسبت به سایر مراجع برتری دارد.

قابل ذکر است میزان میانگین کاهش حداکثر جابجایی

در شکل ۷ نیز مقادیر حداکثر جابجایی طبقات در حالت کنترل شده و کنترل نشده تحت تحریک زلزله ال‌سنترو، با پارامترهای تعیین شده در این پژوهش (با الگوریتم BBO، که بهترین خروجی را داشته است)، نشان داده شده است.



شکل ۷. حداکثر جابجایی طبقات در حالت کنترل شده و کنترل نشده تحت تحریک زلزله ال‌سنترو

$$\omega_d = \frac{\omega}{1 + \mu} \cong 6.165 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (30)$$

در رابطه ۳۰، ω_d فرکانس زاویه‌ای میراگر و ω فرکانس زاویه‌ای سازه است. با مقادیر فوق، سختی و میرایی به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$k_d = m_d \omega_d^2 \cong 4104 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (31)$$

$$c_d = 2\zeta m_d \omega_d = 133.2 \frac{\text{kN.s}}{\text{m}} \quad (32)$$

مقادیر بدست آمده با روابط فوق با روش ارائه شده در مقاله حاضر قابل مقایسه است.

مقادیر حداکثر جابجایی طبقات، در صورت استفاده از میراگر با این مشخصات، در شکل‌های ۸ و ۹، نشان داده شده و با مقادیر جابجایی میراگر با پارامترهای تعیین شده در این پژوهش مقایسه شده است.

جزئیات بیشتر از رفتار سازه از پاسخ تاریخیچه جابجایی طبقات قابل برداشت است؛ در شکل‌های ۸ و ۹،

همه طبقات در این روش ۳۸ درصد بدست آمده که این مقدار نیز در قیاس با میانگین کاهش حداکثر جابجایی طبقات در مرجع [۱۵]، ۳۶/۹۷ درصد، مرجع [۳]، ۳۴/۳۸ درصد و مرجع [۱۰]، ۳۷/۵۷ درصد، دارای برتری محسوس است. این موضوع مبین این است که روش حاضر نسبت به سایر مراجع قابلیت بالاتر در جذب انرژی زلزله و کاهش جابجایی‌های طبقات دارد. خالی از لطف نیست اگر مقادیر پارامترهای بهینه ارائه شده توسط هارتوگ نیز، با مقادیر بدست آمده در این مقاله مقایسه شود. با فرض استفاده از این روش برای تعیین مقادیر پارامترهای میراگر جرمی، مقادیر زیر برای میراگر این ساختمان بدست می‌آید.

$$\mu = \frac{m_t}{M_{\text{str}}}, \text{ Mass Ratio} \quad (27)$$

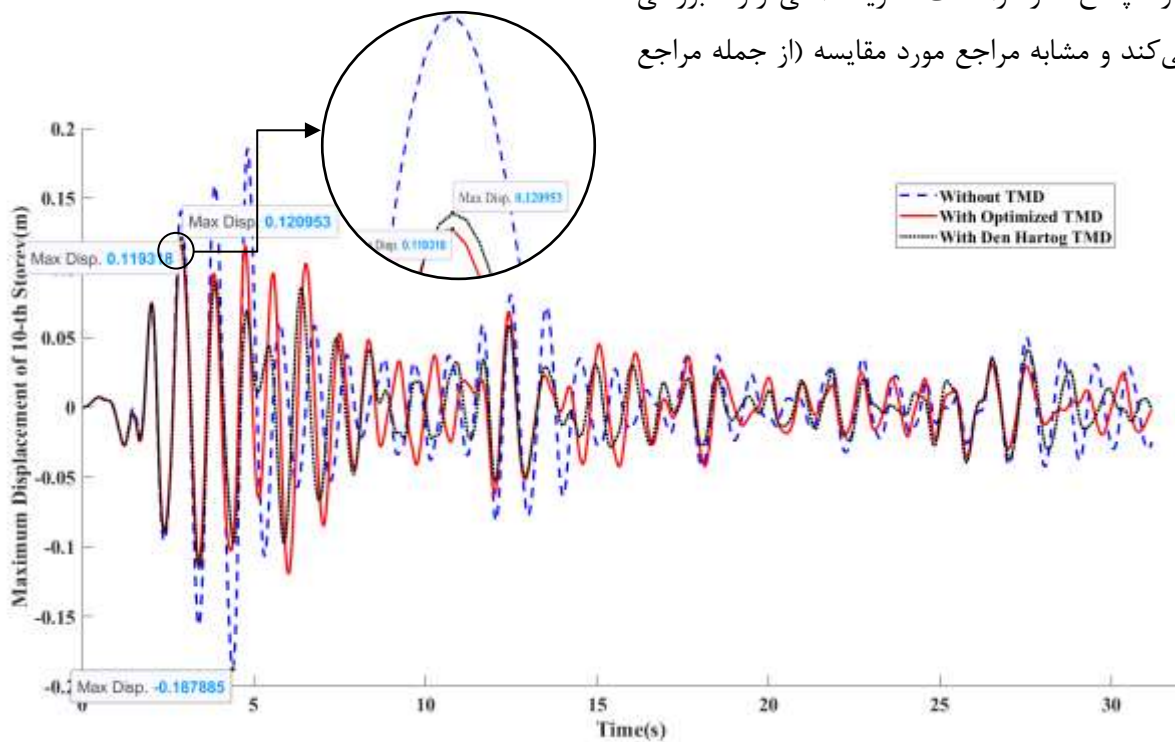
$$\beta = \frac{1}{1 + \mu} \cong 0.97, \text{ Frequency Ratio} \quad (28)$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \approx 0.10, \text{ Damping Ratio} \quad (29)$$

جدول ۲. مقادیر حداکثر جابجایی مطلق طبقات نسبت به زمین

Story	Maximum absolute displacement with respect to the ground (m)								
	Hadi et al. [15]	Lee et al. [3]	Kaveh et al. [10]	Hatami et al. [16]		Present Work			
				obj.1	obj.2	BBO	FA	ABC	CA
1	۰/۰۱۹	۰/۰۲	۰/۰۱۸۵	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹۲	۰/۰۱۸۵	۰/۰۱۹۱	۰/۰۱۹۱۹
2	۰/۰۳۷	۰/۰۳۹	۰/۰۳۶۲	۰/۰۳۷	۰/۰۳۸	۰/۰۳۷۱	۰/۰۳۶۲	۰/۰۳۶۹	۰/۰۳۷
3	۰/۰۵۸	۰/۰۵۷	۰/۰۵۲۵	۰/۰۵۳	۰/۰۵۵	۰/۰۵۳۱	۰/۰۵۲۵	۰/۰۵۲۹	۰/۰۵۳
4	۰/۰۶۸	۰/۰۷۳	۰/۰۶۸۲	۰/۰۶۸	۰/۰۷	۰/۰۶۸	۰/۰۶۷۲	۰/۰۶۷۹	۰/۰۶۸
5	۰/۰۸۲	۰/۰۸۷	۰/۰۸۲۵	۰/۰۸۱	۰/۰۸۳	۰/۰۸۱۸	۰/۰۸۰۵	۰/۰۸۱۷	۰/۰۸۱۷
6	۰/۰۹۴	۰/۰۹۹	۰/۰۹۵	۰/۰۹۳	۰/۰۹۵	۰/۰۹۳۸	۰/۰۹۲۹	۰/۰۹۳۶	۰/۰۹۳۷
7	۰/۱۰۴	۰/۱۰۸	۰/۱۰۵۶	۰/۱۰۳	۰/۱۰۵	۰/۱۰۳۶	۰/۱۰۳۲	۰/۱۰۳۵	۰/۱۰۳۶
8	۰/۱۱۳	۰/۱۱۷	۰/۱۱۳۹	۰/۱۱۲	۰/۱۱۴	۰/۱۱۱۲۶	۰/۱۱۱۱۶	۰/۱۱۱۱	۰/۱۱۱۲
9	۰/۱۱۹	۰/۱۲۳	۰/۱۱۹۶	۰/۱۱۸	۰/۱۲	۰/۱۱۶۷	۰/۱۱۶۶	۰/۱۱۶۷	۰/۱۱۶۷
10	۰/۱۲۲	۰/۱۲۶	۰/۱۲۲۵	۰/۱۲۱	۰/۱۲۳	۰/۱۱۹۳۱۸	۰/۱۱۹۴۲۸	۰/۱۱۹۳۲۴	۰/۱۱۹۳۲
TMD	۰/۳۵۸	۰/۲۸۲	۰/۴۹۳۳	۰/۳۷۶	۰/۳۱	۰/۴۱۰۶	۰/۴۲۴۶	۰/۴۱۰۶	۰/۴۱۰۶

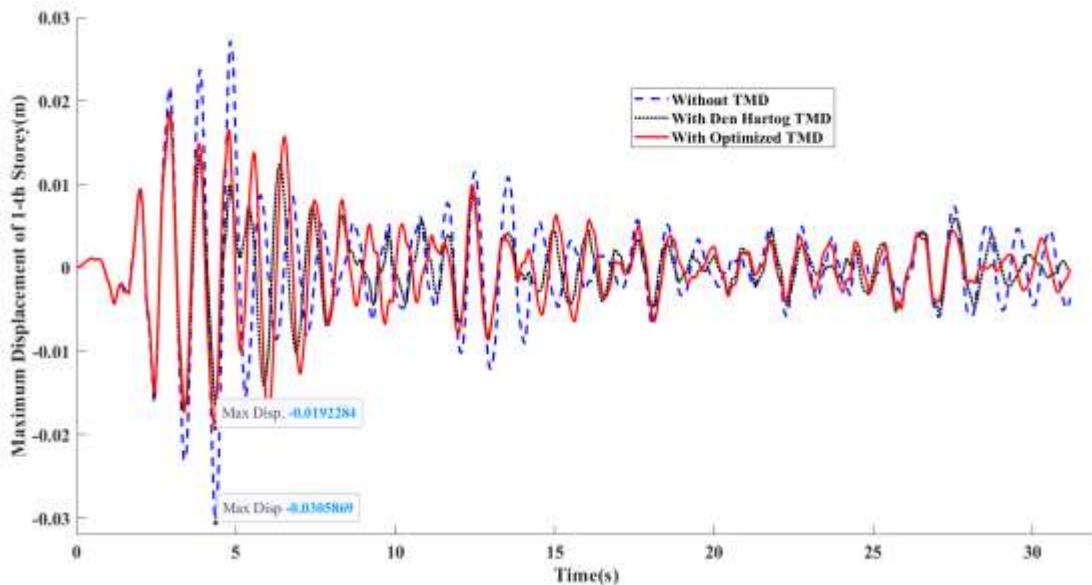
[۳]، [۱۰]، [۱۵]) اثرات سایر بارها (گرانش، باد)، تأثیر مشخصات ژئوتکنیکی خاک سایت در انتخاب رکورد یا اندرکنش خاک-سازه در نظر گرفته نشده است. این موارد می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی باشد. لازم به ذکر است برای حفظ یکنواختی شرایط مقایسه با مراجع پیشین (مراجع فوق‌الذکر) که از رکورد مقیاس‌نشده ال‌سنترو استفاده کرده‌اند، در این مرحله از مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت نیز صرف‌نظر شده است.



شکل ۸. حداکثر جابجایی طبقه بام در حالت کنترل شده و کنترل نشده تحت تحریک زلزله ال‌سنترو

تاریخچه جابجایی حداکثر جابجایی طبقه آخر و اول در دو حالت کنترل شده (با مشخصات تعیین شده به کمک الگوریتم BBO) و کنترل نشده نشان داده شده است؛ بهبود پاسخ با کمک میراگر جرمی تنظیم‌شده مشهود است. شایان ذکر است به نوعی با فعال شدن میراگر جرمی، اختلاف فاز حرکتی آن با ارتعاش طبقات قابل رویت است.

ذکر این نکته نیز خالی از لطف نیست که این مطالعه صرفاً پاسخ سازه را تحت تحریک افقی زلزله بررسی می‌کند و مشابه مراجع مورد مقایسه (از جمله مراجع



شکل ۹. حداکثر جابجایی طبقه اول در حالت کنترل شده و کنترل نشده تحت تحریک زلزله ال سنترو

۷. نتیجه گیری

یکی از شیوه‌های کارآمد در کنترل غیرفعال سازه‌ها تحت اثر زمین‌لرزه‌ها، بهره‌گیری از سیستم میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD) است. هدف کلی این پژوهش، تعیین پارامترهای بهینه میراگرهای جرمی، برای دستیابی به بیشینه کاهش پاسخ سازه (جابجایی) تحت بارگذاری ناشی از زلزله است. در این مقاله از چهار الگوریتم متفاوت، با قابلیت‌های مختلف، برای تعیین پارامترهای بهینه TMD به منظور دستیابی به بیشینه کاهش پاسخ استفاده شد. این الگوریتم‌ها الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO)، الگوریتم کلونی زنبور عسل مصنوعی (ABC)، الگوریتم بهینه‌ساز فرهنگی (CA) و الگوریتم کرم شب‌تاب (FA) بودند.

تابع هدف به کار رفته در این مطالعه، بر اساس تابع هدف مراجع ذکر شده، یعنی حداکثر تغییر مکان بام سازه حین ارتعاش تعریف شده است. همانگونه که بیان شد، الگوریتم‌های فراابتکاری یکی از روش‌های قدرتمند در بهینه‌یابی میراگرهای جرمی تنظیم‌شده هستند.

پاسخ خروجی الگوریتم‌های مورد استفاده در این مقاله، همگی قابل قبول و در قیاس با نتایج سایر مراجع، بهبود محسوسی نشان داده‌اند. از روش‌های ارائه‌شده در این پژوهش می‌توان، برای یافتن پاسخ تمام سیستم‌های سازه‌ای و مکانیکی تحت هرگونه تحریک خارجی بهره برد. با این حال، به منظور قابلیت مقایسه نتایج با مقالات پیشین، روش مونتاز ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه، تنها برای قاب‌های برشی با یک درجه آزادی انتقالی در هر طبقه تعریف شده است.

در مثال حل شده، یک ساختمان برشی ۱۰ طبقه در نظر گرفته شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که با جرم میراگر یکسان، مقدار میانگین کاهش جابجایی حدود ۳۸٪ و مقدار کاهش حداکثر جابجایی طبقه بام حدود ۳۶/۵٪ است، که در مقایسه با مطالعات پیشین بهبود محسوسی را نشان می‌دهد. این نتیجه بیان‌گر قابلیت بالاتر الگوریتم‌های فراابتکاری پیشنهادی در جذب انرژی زلزله و کاهش جابجایی‌های طبقات است.

- [1] Frahm, Hermann. "Device for damping vibrations of bodies." U.S. Patent 989,958, issued April 18, 1911.
- [2] Den Hartog, Jacob Pieter. *Mechanical vibrations*. Courier Corporation, 1985.
- [3] Sadek, Fahim, Bijan Mohraz, Andrew W. Taylor, and Riley M. Chung. "A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 26, no. 6 (1997): 617-635.
- [4] Lee, Chien-Liang, Yung-Tsang Chen, Lap-Loi Chung, and Yen-Po Wang. "Optimal design theories and applications of tuned mass dampers." *Engineering structures* 28, no. 1 (2006): 43-53.
- [5] Pisal, Alka Y., and R. S. Jangid. "Seismic response of multi-story structure with multiple tuned mass friction dampers." *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)* 6, no. 1 (2014): 46.
- [6] Salvi, Jonathan, and Egidio Rizzi. "Closed-form optimum tuning formulas for passive tuned mass dampers under benchmark excitations." *Smart Structures and Systems* 17, no. 2 (2016): 231-256.
- [7] Salvi, J., and A. Giaralis. "Performance assessment of a novel energy harvesting-enabled tuned mass-damper-inerter (eh-tmdi) for white noise-excited structures."
- [8] Monteiro, Daniele Kautz, Leticia Fleck Fadel Miguel, Patrick de Oliveira Batista da Costa, and Daniel Barbosa Mapurunga Matos. "Optimization of tuned mass dampers parameters using Artificial Neural Networks." In *Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (45.: 2024.: Maceió)*. Belo Horizonte: ABMEC, 2024. 2024.
- [9] Khazaei, Mohsen, Reza Vahdani, and Ali Kheyroddin. "Optimal location of multiple tuned mass dampers in regular and irregular tall steel buildings plan." *Shock and Vibration* 2020, no. 1 (2020): 9072637.
- [10] Kaveh, A., S. Mohammadi, O. Khadem Hosseini, A. Keyhani, and V. R. Kalatjari. "Optimum parameters of tuned mass dampers for seismic applications using charged system search." *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Civil Engineering* 39, no. C1 (2015): 21.
- [11] Kamgar, Reza, Parham Samea, and Mohsen Khatibinia. "Optimizing parameters of tuned mass damper subjected to critical earthquake." *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 27, no. 7 (2018): e1460.
- [12] Basili, Michela, Filippo Busato, and Maurizio De Angelis. "Integrated seismic and energetic rehabilitation of existing buildings based on the tuned mass damper concept." *Results in Engineering* 24 (2024): 103552.
- [13] Akhlagh Pasand, Ali, and Seyed Mehdi Zahrai. "Seismic control of tall buildings using vertically distributed multiple tuned mass dampers." *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 33, no. 14 (2024): e2123.
- [14] Djerouni, Salah, Said Elias, Mahdi Abdeddaim, and Rajesh Rupakhety. "Multi-tuned mass damper inerter (MTMDI) system for earthquake-induced vibration control of buildings." *Engineering Structures* 322 (2025): 119139.

- [15] Hadi, Muhammad NS, and Yoyong Arfiadi. "Optimum design of absorber for MDOF structures." *Journal of Structural Engineering* 124, no. 11 (1998): 1272-1280.
- [16] Hatami, F., H. Saberi Hoseinabad, and A. Rahai. "Using improved harmony search algorithm (IHAS) for optimal designing of tuned mass dampers (TMD)."
- [17] Simon, Dan. "Biogeography-based optimization." *IEEE transactions on evolutionary computation* 12, no. 6 (2008): 702-713.
- [18] Yang, Xin-She. *Nature-inspired metaheuristic algorithms*. Luniver press, 2010.
- [19] Karaboga, Dervis. "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization." (2005): 1-10.
- [20] Reynolds, Robert G. "An introduction to cultural algorithms." In *Proceedings of the third annual conference on evolutionary programming*, vol. 24, no. 26, pp. 131-139. 1994.

پی نوشت

-
- ¹ Passive Control
² Tuned Mass Damper (TMD)
³ Bio-geography Based Optimization(BBO)
⁴ Artificial Bee Colony Algorithm(ABC)
⁵ Cultural Algorithm(CA)
⁶ Firefly Algorithm(FA)
⁷ Active
⁸ Passive
⁹ Frahm
¹⁰ Inerter
¹¹ Circle-Inspired Optimization Algorithm(CIOA)
¹² Charged System Search(CSS)
¹³ Particle Swarm Optimization(PSO)
¹⁴ State Space
¹⁵ MATLAB
¹⁶ Decision Variables
¹⁷ Search Space
¹⁸ Heuristic
¹⁹ Metaheuristic
²⁰ Fitness
²¹ Immigration
²² Emigration
²³ Employed Bees
²⁴ Onlooker Bees
²⁵ Scout Bees
²⁶ Limit
²⁷ Dual-Inheritance
²⁸ State Marix
²⁹ Input Matrix
³⁰ Elcentro
³¹ Benchmark