



ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین‌المللی آکوستیک و ارتعاشات
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



کنترل بهینه یک ساختمان ده طبقه با میراگر جرمی دوگانه به همراه اینترتر با استفاده از الگوریتم جستجوی پرنده گریزان

محسن شهروزی^{۱*}، مازیار فهیمی فرزاد^۲، جواد قلی‌زاده^۳

^۱ ایران، کرج، حصارک، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، کدپستی ۳۱۹۷۹۳۷۵۵۱، عضو هیات علمی (دانشیار)

^۲ ایران، مراغه، گلشهر، دانشگاه مراغه، دانشکده فنی و مهندسی، عضو هیات علمی (دانشیار)

^۳ ایران، کرج، حصارک، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shahruzi@khu.ac.ir

چکیده

کاربرد اینترتر در میراگر جرمی متوازن برای کاهش ارتعاشات سازه‌ها در مطالعات اخیر مطرح شده است. از دید نظری برای کارایی این سامانه می‌تواند به طبقات پایین سازه اصلی متصل گردد. لیکن در عمل این امر با مشکلات اجرایی معماری همراه می‌باشد. لذا در این مطالعه عملکرد سامانه جدید میراگر جرمی دوگانه با اینترتر متصل به هر دو جرم میراگر در طبقه بام، بررسی می‌شود. پارامترهای سامانه طی کمینه سازی نرُم بینهایت تابع تبدیل گریز طبقات برای کنترل مقاوم، بعنوان تابع هدف بهینه شده اند. با کاربرد الگوریتم جستجوی پرنده گریزان (بعنوان یک شیوه نوین فراابتکاری) برای حل این مساله بهینه یابی، برتری چشمگیر همگرایی آن در مقایسه با الگوریتم مشهور دسته ذرات بهینه یاب، آشکار می‌شود. سپس با ارزیابی عملکرد سامانه بهینه میراگر جرمی دوگانه با اینترتر در برابر میراگر جرمی متوازن و نیز میراگر جرمی دوگانه بدون اینترتر با نظر به شاخص گریز طبقات، ملاحظه می‌شود که سامانه پیشنهادی بهینه می‌تواند ضمن احتراز از محدودیت‌های معماری، پاسخ‌های سازه را در حد قابل قبولی کاهش دهد و موجب کنترل ارتعاش ساختمان در زلزله برای بهبود ایمنی ساکنین گردد.

کلمات کلیدی: کنترل غیرفعال؛ میراگر جرمی متوازن با اینترتر؛ بهینه یابی، الگوریتم جستجوی پرنده گریزان^۲.

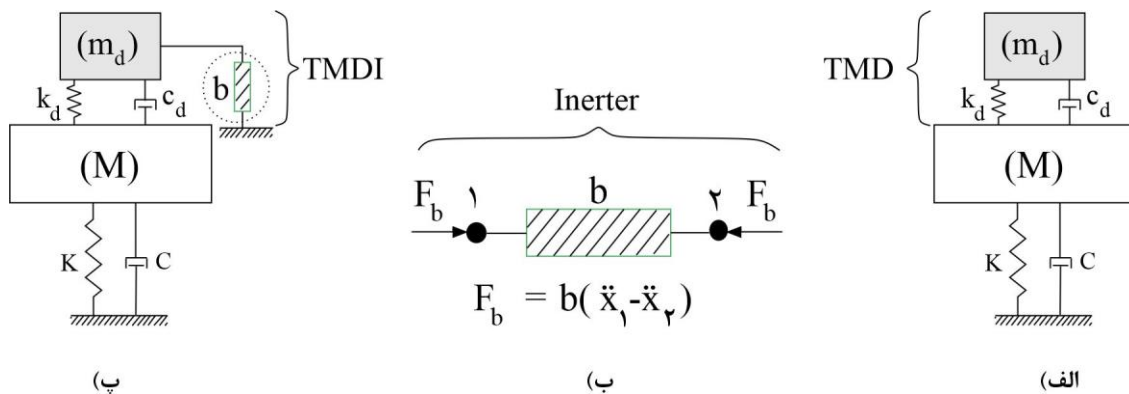
¹ Tuned Mass Damper with Inerter

² Escaping Bird Search

۱- مقدمه

در نیم قرن اخیر میراگر جرمی متوازن به عنوان یک دستگاه کارآمد و قابل اعتماد در کنترل ارتعاش ساختمان‌های بلند در برابر باد معرفی و به صورت عملی در بسیاری از ساختمان‌ها در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، کاربرد آن برای کنترل ارتعاش سازه تحت تحریک زلزله هنوز یک موضوع بحث برانگیز می باشد زیرا ممکن است ارتعاش سازه اصلی را در حضور محتوای فرکانسی زلزله تشدید کند. بنابراین بهبود عملکرد و کارایی لرزه‌ای میراگرهای جرمی متوازن تبدیل به یک موضوع تحقیقاتی فعال در جامعه کنترل سازه شده است [۱]. به منظور بهره‌مندی کامل از قابلیت میراگر جرمی متوازن، نسبت‌های فرکانس، میرایی و جرم این میراگر با استفاده از روش‌های بهینه‌یابی بدست می‌آیند [۲].

بر اساس برخی مطالعات قبلی افزایش یکنواخت نسبت جرم می‌تواند باعث بهبود عملکرد TMD گردد [۳] اما تامین این جرم عظیم برای سازه‌ها با چالش‌های عملی رو به رو است. متعاقباً در سال ۲۰۰۲م. اسمیت یک دستگاه مکانیکی دو ترمینالی به نام اینترت معرفی کرد که می‌تواند جرم ظاهری (مجازی) ایجاد نماید [۴]. در دهه اخیر ماریان و جیارالیس به منظور بهبود کارایی میراگر تنظیم شونده، دستگاه مکانیکی اینترت را به میراگر جرمی متوازن اضافه کرده اند تا با افزایش جرم باعث بهبود عملکرد میراگر شود [۵]. شکل (۱) شمای میراگر جرمی متوازن، دستگاه مکانیکی اینترت و میراگر جرمی متوازن با اینترت را نمایش می دهد.



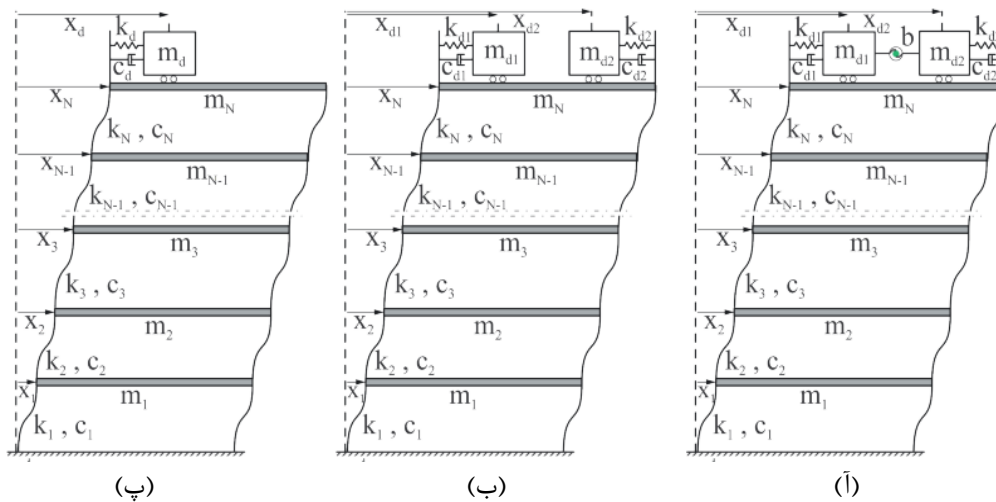
شکل ۱. نمای شماتیک مدل (الف) سامانه مجهز به TMD (ب) اینترت و (پ) سامانه مجهز به TMDI.

سامانه جدید TMDI توانایی هموار کردن راه برای میراگرهای متوازن عظیم، بدون افزایش جرم واقعی را دارد. نحوه‌ی اتصال پایانه‌های دستگاه مکانیکی اینترت نقش موثری در عملکرد این سیستم‌ها دارد. کاوه و همکاران نشان دادند اتصال پایانه دوم اینترت به طبقات پایین‌تر ساختمان می‌تواند به نتایج بهتری منتهی شود. لیکن در عمل اتصال اینترت به طبقات پایین‌تر با یک سری چالش‌های اجرایی رو به رو است. از طرفی جرم طبقه هدف نیز به واسطه این اتصال افزایش می‌یابد. این امر اثرات نامطلوبی در پاسخ‌های لرزه‌ای سامانه کنترل شده به همراه خواهد داشت [۶]. جلالی و فرزام در سال ۲۰۲۲م. دستگاه مکانیکی اینترت را به میراگر جرمی دوگانه اضافه نمودند و سامانه جدید میراگر جرمی دوگانه با اینترت^۳ را معرفی کردند [۷]. در این سامانه، پایانه‌های دستگاه مکانیکی اینترت به دو جرم میراگر متصل شده است که فقط باعث افزایش جرم میراگر می‌شود و اثرات افزایش جرم ناشی از اتصال اینترت به طبقات سازه منتقل نمی‌گردد. متعاقباً با افزایش پارامترهای طراحی میراگر به دو برابر TMD معمولی، مسئله بهینه‌یابی دشوارتر می‌شود [۷]. این امر ضرورت کاربرد الگوریتم‌های مناسب را که می‌توانند از میان شیوه‌های فراابتکاری اخیر [۱۲]–[۸] انتخاب شوند خاطر نشان می‌سازد. در مقاله حاضر عملکرد میراگر جرمی دوگانه با اینترت در یک ساختمان برشی محک ۱۰ طبقه با رفتار خطی تحت رکوردهای حوره دور و نزدیک بررسی می‌شود. پارامترهای طراحی بهینه میراگر جرمی دوگانه با اینترت برای نسبت جرم ۱ درصد و نسبت‌های اینرسی ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۱ با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری PSO و EBS بدست می‌آیند. تابع هدف مسئله کمینه‌سازی، H_{∞} تابع تبدیل گریز طبقات انتخاب شده است.

³ Inerter-Connected Double Tuned Mass Damper

۲- تعریف مسئله و مدل‌سازی ریاضی

به منظور ارزیابی عملکرد سامانه میراگر جرمی دوگانه با اینترتر واقع در طبقه بام، سه مدل مختلف از ساختمان برشی بررسی می‌شوند. مدل اول شامل یک جرم اضافی در طبقه بام است و مدل دوم شامل دو جرم اضافی در طبقه بام می‌باشد که به ترتیب TMD و DTMD نام دارند. به عنوان مدل سوم، دو جرم اضافی فرض شده که این جرم‌ها با استفاده از دستگاه مکانیکی اینترتر به یکدیگر متصل گردیده‌اند. سامانه جدید در این مطالعه DTMDI نامگذاری شده است. شمای این سیستم‌ها در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲. نمای شماتیک ساختمان برشی N طبقه مجهز به: (آ) DTMDI (ب) DTMD و (پ) TMD [۷].

یک ساختمان برشی ۱۰ طبقه خطی معیار با میرایی ۲ درصد در این مطالعه مدنظر بوده است. مشخصات این مدل در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱. مشخصات مدل برشی ۱۰ طبقه معیار [۱۳].

طبقه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
جرم ($10^3 kg$)	۱۷۹	۱۷۰	۱۶۱	۱۵۲	۱۴۳	۱۳۴	۱۲۵	۱۱۶	۱۰۷	۹۸
سختی ($10^6 N/m$)	۶۲/۴۷	۵۲/۲۶	۵۶/۱۴	۵۳/۰۲	۴۹/۹۱	۴۶/۷۹	۴۳/۶۷	۴۰/۵۵	۳۷/۴۳	۳۴/۳۱

نسبت جرم و نسبت اینرسی برای سیستم‌های TMD، DTMD و DTMDI مقدار ثابتی انتخاب شده درحالی‌که نسبت‌های فرکانس و میرایی سیستم‌های کنترل به عنوان متغیرهای طراحی مسئله می‌باشند. مقدار ثابت برای نسبت جرم و نسبت اینرسی با توجه به محدودیت‌های اجرایی انتخاب شده و برای سادگی مسئله، جرم در سیستم‌های DTMD و DTMDI بطور مساوی تقسیم شده است. تحلیل سیستم‌ها در فضای حالت انجام شده است. معادلات فضای حالت برای یک سامانه N درجه آزادی بصورت زیر نوشته می‌شود.

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{AZ}(t) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (1)$$

در این معادله $\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$ شتاب زلزله وارد بر تکیه‌گاه سازه، $\mathbf{Z}(t)$ بردار حالت، \mathbf{A} و \mathbf{B} نیز به ترتیب ماتریس‌های سامانه و موقعیت می‌باشند. بردار حالت و ماتریس‌های \mathbf{A} و \mathbf{B} بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

می‌باشد. پارامترهای بهینه سیستم‌ها، مستقل از محتوای فرکانسی تحریک خارجی هستند بنابراین روش کنترل، مقاوم می‌باشد. نرم H_∞ مد نظر این مطالعه مطابق با رابطه ۷ تعریف می‌شود.

$$\|H\|_\infty = \sup_\omega \bar{\sigma}(H) \quad (7)$$

در این رابطه $\bar{\sigma}$ بزرگترین مقدار تکین تابع تبدیل می‌باشد. نسبت‌های فرکانس و میرایی بهینه سیستم‌های کنترل به ازای نسبت جرم ۱ درصد و نسب‌های اینرسی ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۱ با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری PSO و EBS بدست آمده است. پارامترهای قابل تنظیم و بازه متغیرهای طراحی در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲. پارامترهای مسئله بهینه‌یابی و محدوده آنها

DTMDI			DTMD		TMD	
$\mu_\tau = \frac{m_{d\tau}}{M}$	$\mu_1 = \frac{m_{d1}}{M}$	$\beta = \frac{b}{M}$	$\mu_\tau = \frac{m_{d\tau}}{M}$	$\mu_1 = \frac{m_{d1}}{M}$	$\mu = \frac{m_d}{M}$	متغیرهای انتخاب شده
$\beta = [0.1, 0.3, 0.5, 1]$			$\beta = [0]$		$\mu = [1]$	محدوده
$\mu_1 = \mu_\tau = [1]$			$\mu_1 = \mu_\tau = [1]$			متغیرهای انتخاب شده
$f_{d\tau} = \frac{\omega_{d\tau}}{\omega_{1s}} = \frac{\sqrt{\frac{k_{d\tau}}{m_{d\tau} + b}}}{\omega_{1s}}$			$f_{d1} = \frac{\omega_{d1}}{\omega_{1s}} = \frac{\sqrt{\frac{k_{d1}}{m_{d1} + b}}}{\omega_{1s}}$		$f_d = \frac{\omega_d}{\omega_{1s}} = \frac{\sqrt{\frac{k_d}{m_d}}}{\omega_{1s}}$	متغیرهای طراحی
$\zeta_{d\tau} = \frac{c_{d\tau}}{2(m_{d\tau} + b)\omega_{d\tau}}$			$\zeta_{d1} = \frac{c_{d1}}{2(m_{d1} + b)\omega_{d1}}$		$\zeta_d = \frac{c_d}{2m_d\omega_d}$	محدوده
$\zeta_{d1} = \zeta_{d\tau} = [0:2]$			$f_{d1} = f_{d\tau} = [0.0001:2]$		$f_d = [0.0001:2]$ $\zeta_d = [0:2]$	متغیرهای طراحی

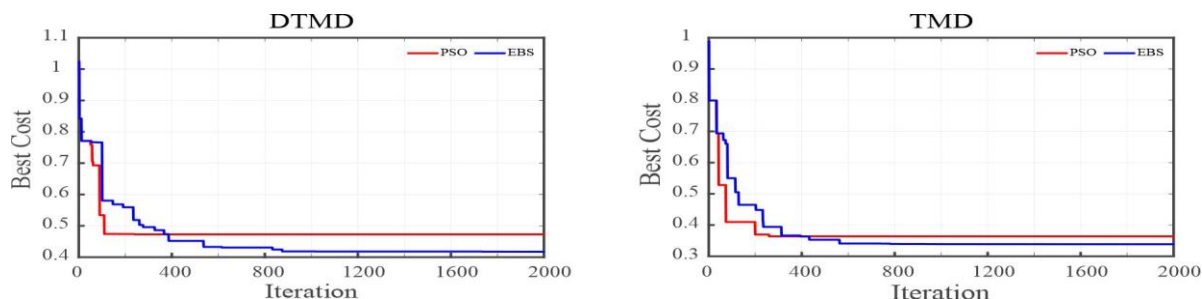
جدول ۳. پارامترهای بهینه سیستم‌های مختلف با هدف به حداقل رساندن نرم H_∞ تابع تبدیل گریز طبقات

$\zeta_{d\tau}$	ζ_{d1}	fd_τ	fd_1	μ_τ	μ_1	β	
-	۰/۰۹۷۸۹	-	۰/۹۶۹۸۸	-	۰/۰۱	-	TMD
۰/۰۷۹۰۲۰	۰/۱۲۳۲۵۱	۰/۹۸۲۷۴۹	۰/۹۴۴۵۱۷			-	DTMD
۰/۰۰۰۳	۰/۱۴۳۹	۰/۲۸۹۰۲	۰/۰۶۶۹۹۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۰/۱	DTMDI-۰/۱
۰/۰۰۵۹۹۸	۰/۰۱۶۲۴۲	۰/۰۶۶۵۸۵	۰/۱۶۲۱۰۳			۰/۳	DTMDI-۰/۳
۱/۶۴۰۷	۰/۰۱۰۱۹۴	۰/۰۰۰۲۷	۰/۱۳۶۱۳			۰/۵	DTMDI-۰/۵
۰/۰۰۹۴۷۴	۱/۷۰۷۸	۰/۰۹۶۶۳۲	.			۱	DTMDI-۱

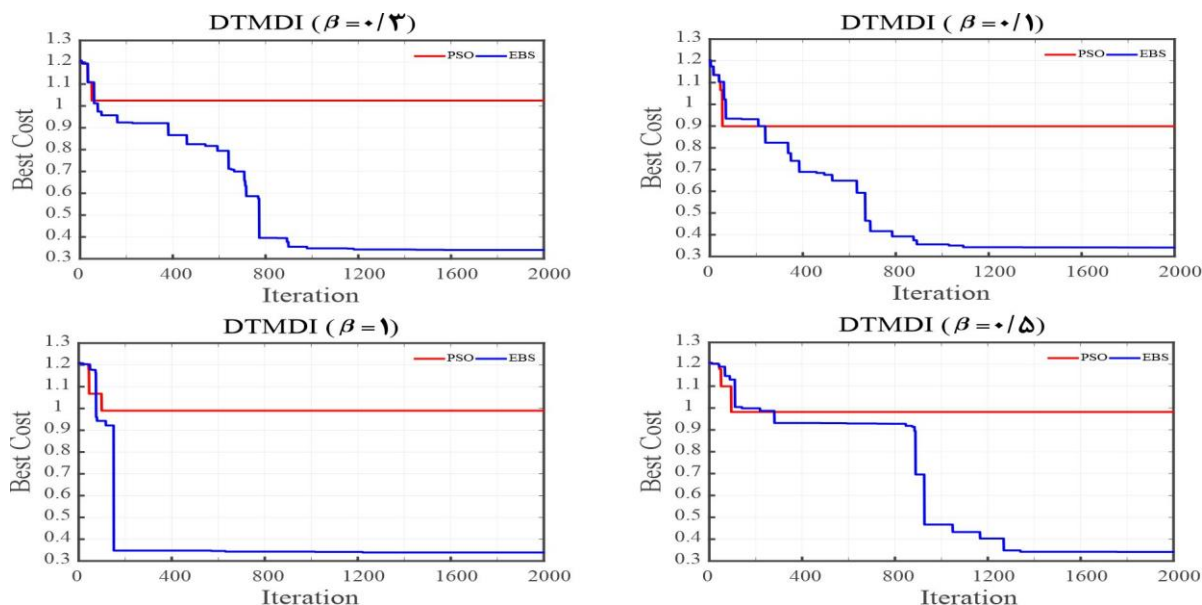
الگوریتم‌های فراابتکاری PSO و EBS هر کدام ده مرتبه اجرا شده است. پاسخ‌های نهایی هر الگوریتم با هم مقایسه شده و در نهایت بهترین آنها در جدول (۳) گزارش گردیده است. نمودار همگرایی الگوریتم‌های فراابتکاری در شکل‌های (۳) و (۴) برای سیستم‌های TMD، DTMD و DTMDI با نسب‌های اینرسی مختلف نشان داده شده است. مشاهده می‌شود الگوریتم EBS با روند همگرایی بهتری از PSO با موفقیت از نقاط بهینه موضعی به سوی مقادیر بهینه سراسری عبور کرده است. در مقابل همگرایی الگوریتم PSO در سطح بالاتری از تابع هزینه متوقف شده که نشان می‌دهد در بهینه‌های موضعی به دام افتاده است. همچنین بهبود کارایی الگوریتم جستجوی پرندگان نسبت به روش شناخته شده دسته ذرات بهینه‌یاب، بویژه در سیستم‌های کنترلی دارای اینتر بیشتر نمایان شده که برتری کارایی آن را در این مساله نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقایسه مقادیر تابع هدف حاصل از روشهای فراابتکاری برای طرح بهینه مدلهای مختلف کنترلی

الگوریتم بهینه یابی	TMD	DTMD	DTMDI- $\beta=0/1$	DTMDI- $\beta=0/3$	DTMDI- $\beta=0/5$	DTMDI-1
PSO	۰/۳۴۹	۰/۴۳۰	۰/۵۵۹	۰/۵۹۳	۰/۷۶۰	۰/۷۶۰
EBS	۰/۳۳۸	۰/۳۴۲	۰/۳۴۱	۰/۳۳۹	۰/۳۳۹	۰/۳۳۹



شکل ۳. نمودار همگرایی الگوریتم‌های EBS و PSO برای سیستم‌های TMD و DTMD.

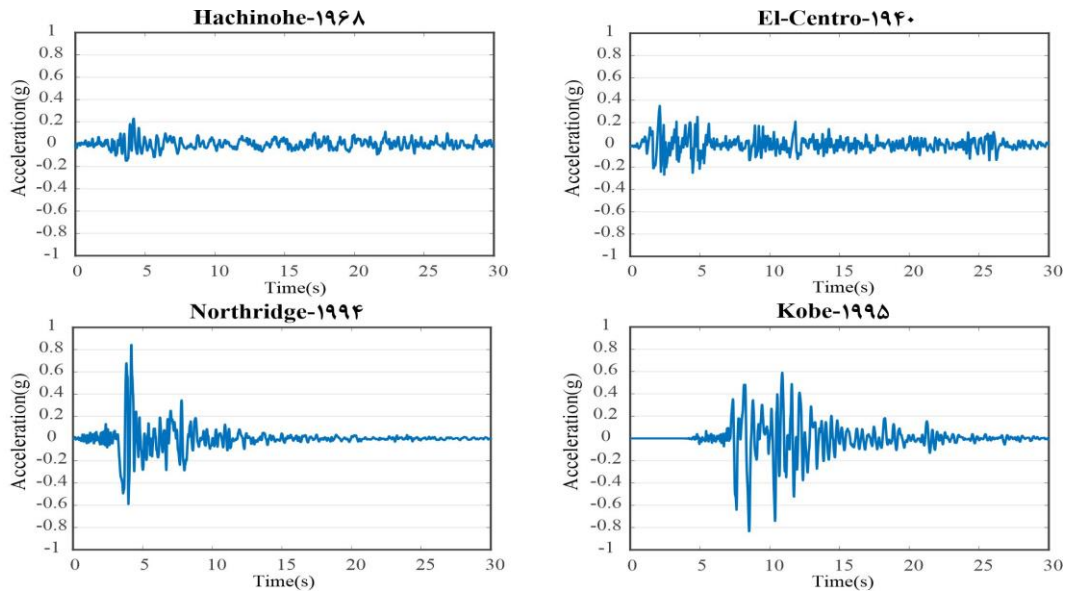


شکل ۴. نمودار همگرایی الگوریتم‌های EBS و PSO برای سامانه DTMDI با نسبت‌های اینرسی مختلف.

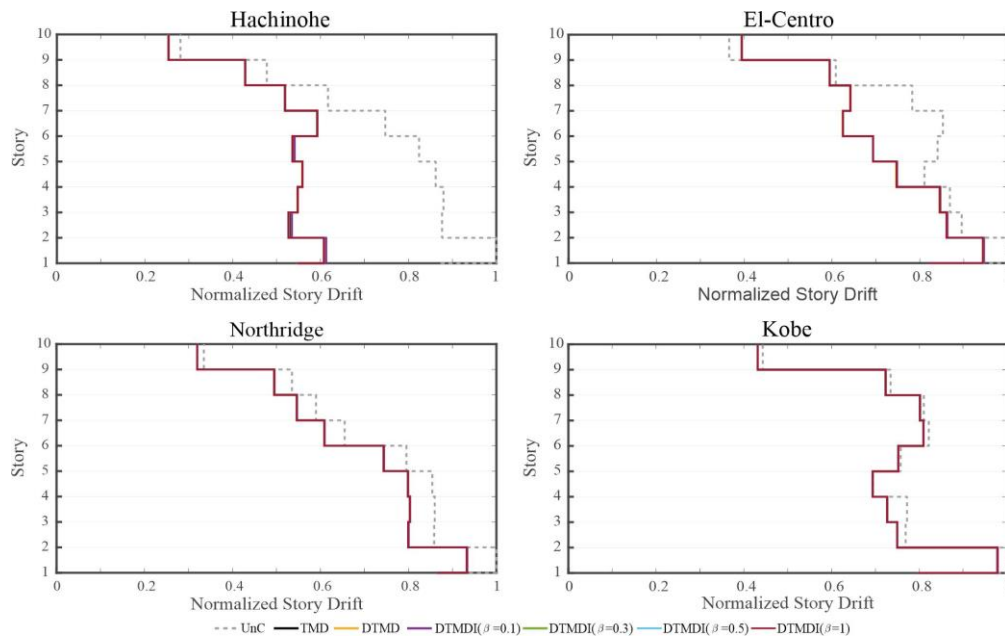
مقدار نهایی تابع هدف برای سیستم‌های مختلف در جدول (۴) برای هر الگوریتم گزارش شده است. این نتایج نیز حاکی از برتری الگوریتم EBS و اختلاف بیشتر مقادیر تابع هدف بین این دو الگوریتم در سیستم‌های مجهز به دستگاه اینرتر می باشد.

۴- ارزیابی عملکرد سامانه میراگر جرمی دوگانه با اینرتر

در این مرحله عملکرد سیستم‌های TMD، DTMD و DTMDI با نسبت‌های اینرسی مختلف با استفاده از مقادیر بهینه بدست آمده در بخش قبل، تحت چهار رکورد حوزه دور و نزدیک در حوزه زمان مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور ساختمان ۱۰ طبقه معیار با میرایی ۲ درصد بررسی شده است. گریز هر طبقه به صورت جابجایی نسبی بین آن طبقه و طبقه زیرین تعریف و با تقسیم بر ارتفاع طبقه نرمال می شود. بیشینه این پارامتر در هر مدل به عنوان شاخص عملکرد در حوزه زمان انتخاب شده است. از شتابنگاشت های زلزله در حوزه دور (EL-Centro 1940، Hachinohe 1968) و همچنین شتابنگاشت‌های حوزه نزدیک (Kobe 1995 و Northridge 1994) مطابق شکل (۵)، بعنوان تحریک لرزه ای استفاده شده اند.



شکل ۵. تاریخچه‌زمانی شتاب زلزله‌های حوزه دور و نزدیک.



شکل ۶. حداکثر گریز نرمال طبقات برای سیستم‌های مختلف تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک.

در شکل (۶) تغییرات گریز نرمال طبقات برای سیستم‌های کنترل شده با TMD، DTMD و DTMDI با نسبت‌های اینرسی مختلف و سامانه کنترل نشده تحت هر زلزله در مساله کمینه سازی نرْم H_{∞} تابع تبدیل گریز طبقات نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود سیستم‌های کنترل مذکور عموماً این شاخص عملکرد را در هر دو حوزه دور و نزدیک نسبت به حالت کنترل نشده کاهش داده‌اند. البته میزان این کاهش با تغییر نداشت تحریک و در طبقات مختلف تغییر میکند. برای زلزله السنترو در طبقه دهم پاسخ‌های حالت کنترل نشده استثنائاً کمی بهتر بوده که نشانگر تاثیر محتوای فرکانسی رکورد خاص بر مدل‌های طراحی شده می‌باشد. در این مطالعه DTMD تحت نداشت‌های حوزه دور عملکرد بهتری داشته است. با وجود توانایی عمومی سیستم‌های کنترل مذکور در کاهش گریز طبقات، عملکرد میراگر جرمی دوگانه با اینرسی ۰/۱ بهتر از سایر نسبت‌های اینرسی بوده است. ضمن این که سامانه DTMDI واقع در طبقه بام، دارای مزیت اجرایی در عدم اتصال اینترتر به طبقات پایینتر سازه نیز می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه عملکرد میراگر جرمی متوازن با اینرتر برای کنترل یک ساختمان برشی میان مرتبه تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک مورد بررسی قرار گرفت. برای احتراز از محدودیت‌های معماری میراگر دوگانه با اینرتر و ایجاد جرم مجازی در طبقه بام اعمال شد. سپس پارامترهای سیستم‌های کنترلی با استفاده از الگوریتم‌های PSO و EBS با هدف به حداقل رساندن نرَم بی‌نهایت تابع گریز طبقات تنظیم و بهینه شدند. الگوریتم EBS توانست برخلاف PSO از نقاط بهینه موضعی عبور کرده و تابع هدف را نسبت به رقیب خود بیشتر کاهش دهد که این برتری کارایی در مدل‌های کنترلی دارای اینرتر خیلی بیشتر مشاهده شد. در ادامه، طرح‌های بهینه حاصل با تحلیلهای تاریخچه زمانی در برابر نگاشتهای دو زلزله حوزه نزدیک و دو زلزله حوزه دور بررسی شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که سیستم پیشنهادی یعنی کاربرد میراگر جرمی بهینه دوگانه با اینرتر، بدون نیاز به اتصال به طبقات سازه با موفقیت توانسته برای نسبت‌های اینرسی مختلف، گریز طبقات را مشابه با سایر سیستم‌ها کنترلی تحت تمام شتابنگاشتهای انتخابی کاهش دهد البته میزان کاهش به زلزله ورودی نیز وابسته است. نهایتاً هدف راهبردی پژوهش در تامین کارایی سامانه کنترلی DTMDI بدون ایجاد محدودیتهای معماری، محقق گردید. همچنین برتری چشمگیر الگوریتم جستجوی پرنده گریزان در سرعت و کیفیت همگرایی نسبت به روش متداول دسته ذرات بهینه یاب برای طراحی بهینه این سامانه آشکار شد.

مراجع

1. M. Fahimi Farzam and H. Hojat Jalali, "Tandem tuned mass damper inerter for passive control of buildings under seismic loads," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 29, no. 9, Sep. 2022, doi: 10.1002/stc.2987.
2. B. Shen *et al.*, "Experimental Research on Damping Effect of Double-Layer Tuned Mass Damper for High-Rise Structure," *Shock and Vibration*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/7523127.
3. L. Marian and A. Giaralis, "The tuned mass-damper-inerter for harmonic vibrations suppression, attached mass reduction, and energy harvesting," *Smart Structures and Systems*, vol. 19, no. 6. pp. 665–678, 2017. doi: 10.12989/sss.2017.19.6.665.
4. M. C. Smith, "Synthesis of mechanical networks: The inerter," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 10. pp. 1648–1662, 2002. doi: 10.1109/TAC.2002.803532.
5. L. Marian and A. Giaralis, "Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 38. pp. 156–164, 2014. doi: 10.1016/j.probingmech.2014.03.007.
6. A. Kaveh, M. Fahimi Farzam, H. Hojat Jalali, and R. Maroofiazar, "Robust optimum design of a tuned mass damper inerter," *Acta Mechanica*, vol. 231, no. 9, pp. 3871–3896, Sep. 2020, doi: 10.1007/s00707-020-02720-9.
7. H. H. Jalali and M. F. Farzam, "Inerter-Connected Double Tuned Mass Damper for Passive Control of Buildings under Seismic Excitation," *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 66, no. 2. pp. 421–432, 2022. doi: 10.3311/PPci.19638.
8. M. Shahrouzi and A. H. Sabzi, "Damage detection of truss structures by hybrid immune system and teaching-learning-based optimization," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 19, no. 7, pp. 811–825, 2018, doi: 10.1007/s42107-018-0065-9.
9. M. Shahrouzi, "Optimal Spectral Matching of Strong Ground Motion by Opposition-Switching Search," in *EngOpt 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization*, Lisbon, Portugal: Springer International Publishing, 2018, pp. 713–724. doi: 10.1007/978-3-319-97773-7.
10. M. Shahrouzi and A. Kaveh, "An efficient derivative-free optimization algorithm inspired by avian life-saving manoeuvres," *Journal of Computational Science*, vol. 57, no. May 2021, p. 101483, 2022, doi: 10.1016/j.jocs.2021.101483.
11. M. Shahrouzi and M. Ebadijalal, "A deductive design method to simplify ASCE 41-17 nonlinear static procedure preserving the adjusted collapse margin ratio of steel moment frames," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 24, no. 3, pp. 657–671, 2023, doi: 10.1007/s42107-022-00522-z.
12. A. M. Taghavi and M. Shahrouzi, "Optimal design of spatial structures by a novel meta-heuristic algorithm: Sound energy optimizer," *Structures*, vol. 70, no. June, p. 107570, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.istruc.2024.107570.
13. M. N. S. Hadi and Y. Arfiadi, "Optimum Design of Absorber for MDOF Structures," *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, no. 11, pp. 1272–1280, 1998, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1998)124:11(1272).
14. R. Eberhart and J. Kennedy, "New optimizer using particle swarm theory," *Proceedings of the International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 39–43, 1995.