



# ISAV2024

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



## بررسی پارامترهای طراحی سامانه میراگر جرمی با اینترتر متصل به طبقات مختلف مدل ساختمان برشی

مازیار فهیمی فرزاد<sup>۱</sup>، محسن شهروزی<sup>۲</sup> \*، جواد قلی زاده<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> ایران، مراغه، گلشهر، دانشگاه مراغه، دانشکده فنی و مهندسی، عضو هیات علمی (دانشیار)

<sup>۲</sup> ایران، کرج، حصارک، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، عضو هیات علمی (دانشیار)

<sup>۳</sup> ایران، کرج، حصارک، دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [shahruzi@khu.ac.ir](mailto:shahruzi@khu.ac.ir)

### چکیده

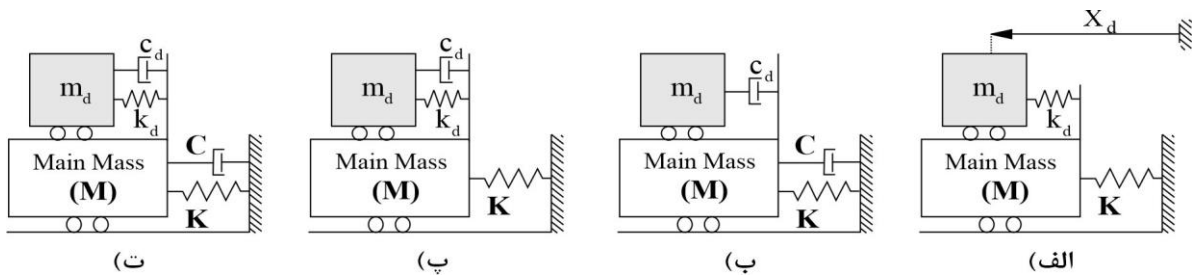
در این پژوهش عوامل موثر بر طراحی و عملکرد میراگر جرمی با اینترتر، جهت کنترل مقاوم لرزه ای یک ساختمان برشی معیار بررسی می شوند. بدین منظور از تحلیلهای تاریخچه زمانی تحت دو زلزله حوزه نزدیک و دو زلزله حوزه دور استفاده می گردد. در مثال ساختمان ۱۰ طبقه با ۲ درصد میرایی رایلی به ازای مقدار ثابت برای نسبت های جرم و اینرسی میراگر جرمی با اینترتر، نسبت های بهینه فرکانس و میرایی آن با اتصال پایانه دوم اینترتر به طبقات ۸ تا ۱۰ جستجو می شوند. به حداقل رساندن نرم بی نهایت تابع تبدیل جابجایی بام به عنوان تابع هدف بهینه یابی فرمولبندی گردیده و سپس مساله با روش دسته ذرات بهینه یاب حل شده است. طی طراحی های بهینه پژوهش حاضر با افزایش نسبت اینرسی میراگر، نسبت های فرکانس و میرایی بهینه افزایش یافته اند. همچنین مشاهده می شود با اتصال پایانه دوم دستگاه مکانیکی اینترتر به طبقات پایین تر این سازه عملکرد میراگر جرمی بهینه دارای اینترتر تحت زلزله های مذکور بهبود می یابد.

**کلمات کلیدی:** کنترل لرزه ای؛ ساختمان برشی؛ میراگر جرمی با اینترتر؛ طراحی بهینه.

### ۱- مقدمه

جامعه مهندسی سازه همواره علاقه مند به کاهش ارتعاشات سازه ها تحت اثر بارهای دینامیکی جانبی (زلزله، باد، موج و...) می باشد تا سازه ها عملکرد ایمن و بدون وقفه داشته باشند. بنابراین محققان به دنبال راهی برای رفع این چالش بودند که در این میان کنترل سازه یکی از محبوب ترین و شناخته شده ترین رویکردها است [۱]. روش های کنترل سازه به چهار گروه کنترل غیرفعال، فعال، نیمه فعال و ترکیبی تقسیم می شود که سیستم های کنترل غیرفعال به دلیل سادگی و مقرون به صرفه بودن بسیار مورد توجه هستند.

یکی از رایج‌ترین سیستم‌های کنترل غیرفعال، میراگر جرمی تنظیم‌شونده<sup>۱</sup> (TMD) می‌باشد. میراگر جرمی تنظیم‌شونده برای اولین بار در سال ۱۹۰۹ توسط فرام<sup>۲</sup> جهت کاهش حرکات سالن کشتی‌ها معرفی شد [۲]. این میراگر ابزاری است که به سازه اصلی متصل می‌شود و تحت اثر حرکات جانبی سازه، شروع به ارتعاش می‌کند و با جذب بخش از انرژی ورودی به سازه از آن محافظت می‌کند [۳]. سه موضوع اصلی کارایی، استحکام و سادگی ساخت در توسعه میراگر جرمی تنظیم‌شونده همواره مورد توجه محققان بوده است. معمولاً بهبود هر سه ویژگی بصورت همزمان امکان‌پذیر نمی‌باشد با این حال به نظر می‌رسد ایجاد تعادل بین آنها بهترین طراحی ممکن باشد [۴]. برای این منظور ۵ سال پس از ایده جرم اضافی فرام، لانچستر<sup>۳</sup> بطور قابل توجهی استحکام TMD را با جایگزینی میراگر به جای فنر بهبود بخشید [۵]. سپس دن هارتوگ<sup>۴</sup> این دو ایده را برای بهبود همزمان کارایی و استحکام با هم ترکیب نمود [۶]. دن هارتوگ همچنین چهارچوبی برای تنظیم بهینه پارامترهای این میراگر تعیین نمود. در این چهارچوب سه پارامتر نسبت جرم، نسبت میرایی و نسبت فرکانس به عنوان پارامترهای طراحی میراگر جرمی تنظیم‌شونده بهینه انتخاب می‌شوند. نسبت جرم معمولاً بدلیل محدودیت‌های ساخت، عددی کمتر از ۵ درصد جرم سازه فرض می‌شود. ابتدا بدلیل عدم توسعه ابزارهای محاسباتی، سیستم‌های مورد مطالعه به سازه‌های نامیرا محدود شده بودند ولی همزمان با ظهور الگوریتم‌های فراابتکاری این محدودیت نیز برطرف شد. تکامل میراگر جرمی تنظیم‌شونده در شکل (۱) نشان داده شده است که در آن  $M$ ،  $C$  و  $K$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه و  $m_d$ ،  $c_d$  و  $k_d$  به ترتیب جرم، میرایی و سختی میراگر می‌باشد.  $X_d$  بردارد جابجایی جرم اضافه شده می‌باشد.



شکل ۱. تکامل میراگر جرمی تنظیم‌شونده (الف) ایده فرام [۲]، (ب) ایده لانچستر [۵]، (پ) ایده دن هارتوگ [۶]، (ت) شکل نهایی TMD

میراگر جرمی تنظیم‌شونده در برابر بار باد عملکرد مناسبی دارد اما رفتار این میراگر در برابر بارهای لرزه‌ای هنوز تحت بررسی است [۷]. از سوی دیگر مشاهده شده هر چقدر جرم این میراگر متوازن افزایش یابد، میراگر عملکرد بهتری در برابر بارهای لرزه‌ای خواهد داشت [۸]. در سال ۲۰۰۲ یک دستگاه مکانیکی دو ترمینالی به نام اینترتر توسط اسمیت<sup>۵</sup> معرفی شده است که می‌تواند نیرویی متناسب با اختلاف شتاب بین دو پایانه ایجاد نماید [۹]. این دستگاه با جرم ناچیز باعث افزایش اینرسی جرم متصل به سازه می‌شود. در سال ۲۰۱۴ دستگاه مکانیکی اینترتر به میراگر جرمی تنظیم‌شونده اضافه گردیده و میراگر جرمی با اینترتر<sup>۶</sup> (TMDI) را پدید آورد [۱۰]. یکی از پایانه‌های دستگاه مکانیکی اینترتر به میراگر جرمی و پایانه دوم به زمین، طبقات سازه و یا سازه مجاور می‌تواند متصل شود. محل اتصال پایانه دوم دستگاه در عملکرد این سیستم موثر می‌باشد. از طرفی نصب پایانه دوم به طبقات پایین‌تر با یک سری محدودیت‌هایی روبه‌رو است. نسبت جرم، نسبت فرکانس، نسبت میرایی و نسبت اینرسی دستگاه از دیگر پارامترهای موثر در طراحی میراگرهای جرمی با اینترتر هستند. در این مطالعه به منظور بررسی اثر نسبت‌های اینرسی مختلف و محل اتصال پایانه دوم اینترتر، یک ساختمان برشی ۱۰ طبقه معیار با میرایی ۲ درصد برای ارزیابی نتایج در نظر گرفته شده است. نسبت‌های اینرسی ۰/۵ و

<sup>1</sup> Tuned Mass Damper

<sup>2</sup> Frahm

<sup>3</sup> Lanchester

<sup>4</sup> Den Hartog

<sup>5</sup> Smith

<sup>6</sup> Tuned Mass Damper with Inerter

۱، به ترتیب معرف حالت بدون اینترتر (TMD)، اینترتر با اینرسی متوسط و بالا، فرض شده اند. پایانه دوم اینترتر یک بار به طبقه دهم، بار دیگر به طبقه نهم و سپس به طبقه هشتم متصل شده و این سیستم‌ها به ترتیب TMDI-10، TMDI-9 و TMDI-8 نام‌گذاری شده اند. هدف مسئله‌ی بهینه‌یابی در این مطالعه، به حداقل رساندن نرُم  $H_\infty$  تابع تبدیل جابجایی بام با استفاده از الگوریتم متداول دسته ذرات بهینه‌یاب<sup>۷</sup> می‌باشد.

## ۲- مدل‌سازی ریاضی

به منظور ارزیابی عملکرد میراگر جرمی با اینترتر، یک ساختمان برشی ۱۰ طبقه طبق ادبیات فنی بررسی می‌شود [۱۱]. جرم و سختی طبقات در جدول (۱) گزارش شده و میرایی طبقات نیز با فرض نسبت میرایی ۲ درصد با استفاده از میرایی رایلی بدست آمده اند. معادله‌ی حرکت یک مدل برشی N درجه آزادی بصورت رابطه ۱ تعریف می‌شود.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{X}(t) = \mathbf{U}(t) \quad (1)$$

که در آن  $\mathbf{M}$ ،  $\mathbf{C}$  و  $\mathbf{K}$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی و  $\ddot{\mathbf{X}}(t)$ ،  $\dot{\mathbf{X}}(t)$  و  $\mathbf{X}(t)$  نیز به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابجایی می‌باشند.

جدول ۱. مشخصات مدل برشی ۱۰ طبقه معیار [۱۱]

طبقه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
جرم ( $10^2 kg$ )	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

یک مدل برشی N درجه آزادی مجهز به میراگر جرمی با اینترتر در شکل (۲) آمده است. یک جرم اضافی به طبقه N وصل شده است و نیز یک اینترتر جرم اضافی را به طبقه iام متصل می‌کند. بنابراین یک درجه آزادی به سیستم اضافه شده است و ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی و همچنین بردار  $\mathbf{X}(t)$  برای N+1 درجه آزادی تعریف می‌شوند. با توجه به سادگی مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی سیستم در فضای حالت، معادلات حاکم بر حرکت این مسائل در فضای حالت تعریف مطابق با رابطه ۲ تعریف می‌شوند:

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (2)$$

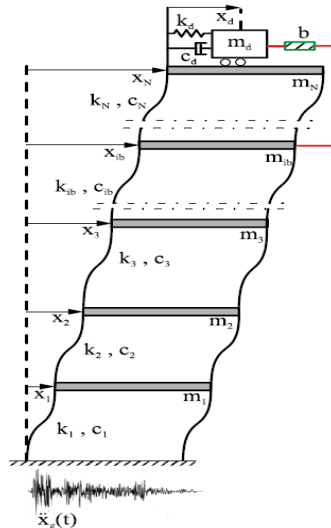
در اینجا  $\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$  شتاب زلزله وارد بر تکیه‌گاه سازه،  $\mathbf{Z}(t)$  بردار حالت،  $\mathbf{A}$  و  $\mathbf{B}$  نیز به ترتیب ماتریس‌های سیستم و موقعیت می‌باشند:

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\mathbf{x}(t)$  بردار جابجایی،  $\dot{\mathbf{x}}(t)$  بردار سرعت،  $\mathbf{M}$ ،  $\mathbf{C}$  و  $\mathbf{K}$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه،  $\mathbf{0}$  ماتریس صفر و  $\mathbf{I}$  ماتریس همانی با ابعاد مناسب می‌باشند.

<sup>7</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)



شکل ۲. یک مدل برشی N درجه آزادی مجهز به میراگر جرمی با اینتر [۱۲]

### ۳- پارامترهای طراحی TMDI

نسبت جرم، نسبت میرایی، نسبت فرکانس، نسبت اینرسی و نحوه‌ی اتصال پایانه‌های اینترتر از عوامل موثر در طراحی TMDI می‌باشند. نسبت جرم به عنوان ضریب جرم میراگر به جرم کل سازه بصورت رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$\mu = \frac{m_d}{M_T} \quad (5)$$

در اینجا به ترتیب جرم میراگر و جرم کل سازه می‌باشد. نسبت اینرسی از نظر ریاضی بصورت رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$\beta = \frac{b}{M_T} \quad (6)$$

در این رابطه پارامتر  $b$  اینرسی است که می‌توان آن را جرم ظاهری نامید. مقایسه رابطه (۵) و (۶) نشان می‌دهد  $\beta$  برای جرم ظاهری اضافه شده مشابه  $\mu$  سیستم می‌باشد.

نسبت فرکانس TMDI به صورت نسبت فرکانس طبیعی میراگر به فرکانس طبیعی سازه تعریف شود. بیان ریاضی نسبت فرکانس TMDI بصورت رابطه (۷) می‌باشد.

$$v_{TMDI} = \frac{\omega_d}{\omega_s} = \frac{\sqrt{\frac{k_d}{m_d + b}}}{\omega_s} \quad (7)$$

$\omega_d$  و  $\omega_s$  به ترتیب فرکانس طبیعی سازه و فرکانس طبیعی TMDI را نشان می‌دهند. نسبت میرایی TMDI نیز با رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$\zeta_{TMDI} = \frac{c_d}{2(m_d + b)\omega_d} \quad (8)$$

علاوه بر این پارامترها، نحوه‌ی اتصال پایانه‌های اینترتر نیز نقش مهمی در تعیین اثر بخشی سیستم میراگر دارد. در این مطالعه پایانه اول اینترتر به میراگر جرمی متصل است و پایانه دوم به طبقات ۱۰، ۹ و ۸ متصل می‌شود تا اثرات آن بررسی شود. به دلیل محدودیت‌های معماری از اتصال پایانه دوم به زمین و طبقات پایین‌تر صرف نظر شده است. تا کنون هیچ روش پذیرفته شده‌ای برای نام گذاری اتصال پایانه‌ها وجود ندارد. در این مطالعه شماره‌ی طبقه‌ای که پایانه دوم به آن متصل است در نام گذاری سیستم‌ها وارد شده است.

#### ۴- مساله بهینه‌یابی

هدف بهینه‌سازی در این مقاله، به حداقل رساندن نُرم  $H_\infty$  تابع تبدیل جابجایی طبقه بام می‌باشد. پارامترهای بهینه سیستم‌ها، مستقل از محتوای فرکانسی تحریک خارجی هستند بنابراین روش کنترل، مقاوم می‌باشد. پس از تعریف نُرم سیستم‌ها از الگوریتم فراابتکاری PSO به منظور بهینه‌یابی استفاده می‌گردد. مقادیر بهینه سیستم‌های کنترل برای ساختمان برشی معیار با میرایی ۲ درصد با فرض نسبت جرم میراگر به سازه برابر با ۱ درصد به ازای نسبت‌های اینرسی ۰، ۰/۵ و ۱ جستجو شده که به ترتیب نشان دهنده حالت بدون اینترتر، اینترتر با اینرسی متوسط و با اینرسی بالا می‌باشند. نُرم  $H_\infty$  مورد استفاده در این مطالعه بصورت رابطه (۹) تعریف می‌شود:

$$\|H\|_\infty = \sup_\omega \bar{\sigma}(H) \quad (9)$$

در این رابطه  $\bar{\sigma}$  بزرگترین مقدار تکین تابع تبدیل می‌باشد. امروزه الگوریتم‌های فراابتکاری متعددی برای حل مسائل مهندسی گسترش یافته اند [۱۶]-[۱۳]. در این پژوهش الگوریتم مشهور دسته ذرات بهینه‌یاب که در سال ۱۹۹۵ معرفی شده [۱۷] با عنایت به رواج بسیار زیاد، بکار می‌رود.

مراحل محاسبه‌ی پارامترهای بهینه سیستم‌های TMDI بصورت زیر است:

- (۱) فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مودی برای سازه کنترل نشده محاسبه می‌شود.
  - (۲) ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی برای هر مدل تشکیل شده و سیستم‌ها مدل‌سازی می‌شوند.
  - (۳) برنامه نویسی نُرم  $H_\infty$  و الگوریتم انجام می‌شود.
  - (۴) مقادیر بهینه با استفاده از الگوریتم PSO برای سیستم‌های TMDI-8، TMDI-9 و TMDI-10 به ازای نسبت‌های اینرسی ۰، ۰/۵ و ۱ جستجو می‌شود. پارامترهای کنترلی الگوریتم PSO در این مطالعه ۱، ۰/۱ و ۱ فرض شده است. مقدار حداقل متغیرهای طرح (نسبت فرکانس و نسبت میرایی) برابر ۰/۰۵ و مقدار حداکثر آن ۲/۵ لحاظ گردیده است.
- پارامترهای بهینه هر سیستم در جدول (۲) گزارش شده اند. فرض اینرسی برابر با ۰ در سیستم‌های کنترلی مختلف به یک پاسخ بهینه منتهی شده است. بنابراین در جدول نتایج، مقدار آن یک بار آمده است.

جدول ۲. پارامترهای بهینه بدست آمده برای مدل‌ها

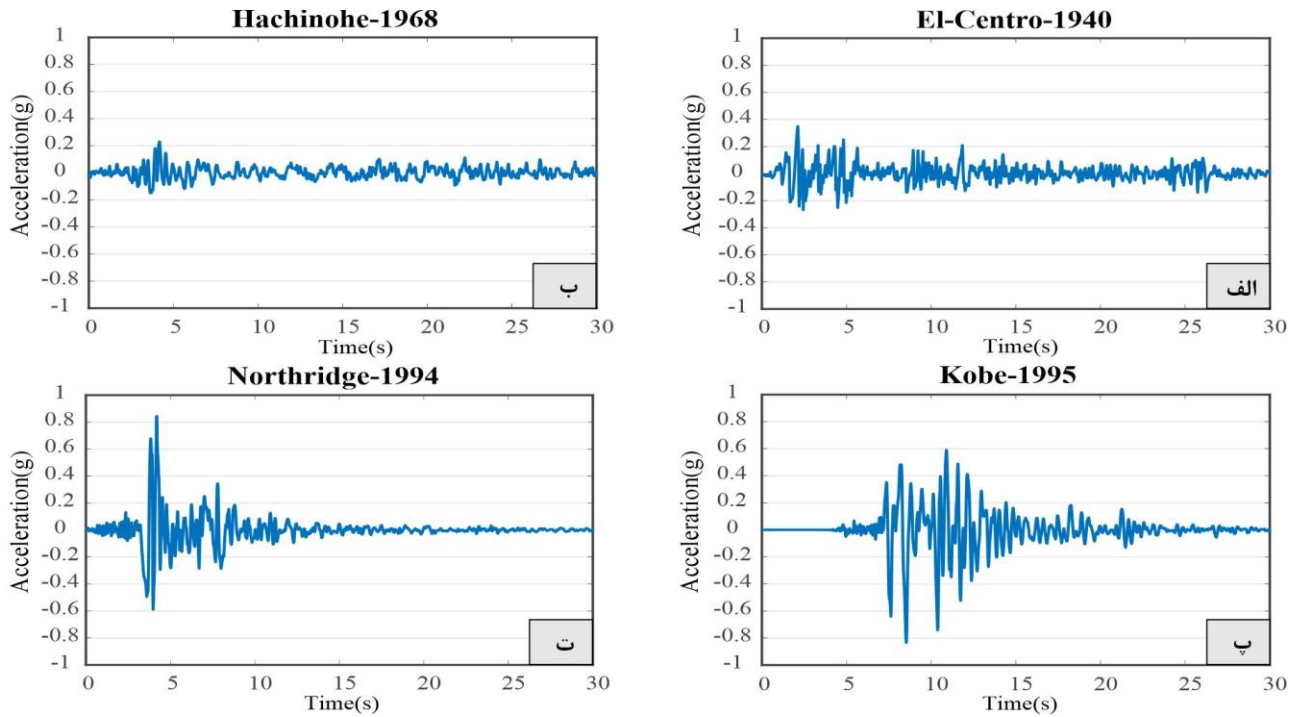
مدل‌ها	$\mu$	$\beta$	$\nu_d$	$\zeta_d$
TMD		۰	۰,۹۶۸	۰,۰۹۷
TMDI-8		۰/۵	۱/۲۰۲	۰/۱۲۹
TMDI-9	۰/۰۱	۱	۱/۵۸۹	۰/۴۷۳
TMDI-9		۰/۵	۱/۰۹۲	۰/۰۵۰
TMDI-10		۱	۱/۲۴۲	۰/۰۷۵
TMDI-10		۰/۵	۰/۹۸۴	۰/۰۵۰
TMDI-10		۱	۰/۹۸۵	۰/۰۵۰

نتایج بهینه‌یابی به ازای نسبت جرم مفروض نشان می‌دهد در مدل‌های TMDI-8 و TMDI-9، با افزایش نسبت اینرسی، نسبت‌های بهینه فرکانس و میرایی سیستم‌های کنترلی افزایش یافته است.

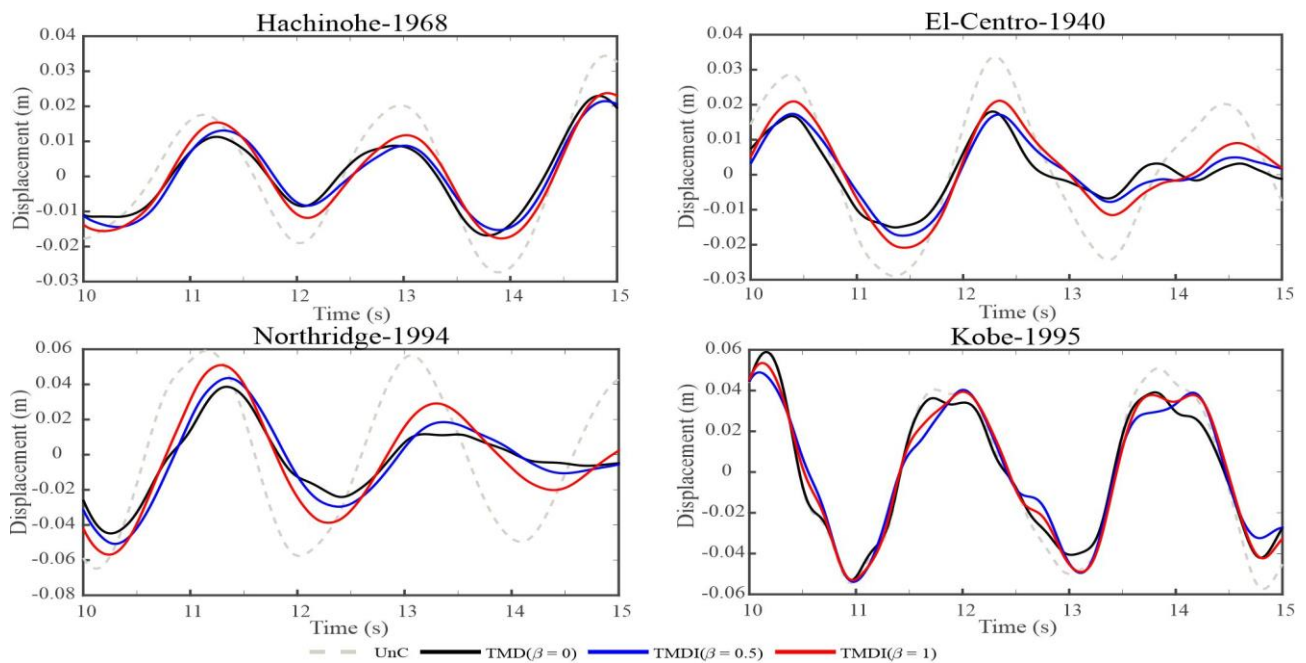
#### ۵- ارزیابی عملکرد میراگر جرمی با اینترتر

در این بخش عملکرد ساختار کنترل شده با TMDI با پارامترهای بدست آمده از بخش قبل در حوزه‌ی زمان ارزیابی می‌شود. برای این منظور جابجایی طبقه بام برای سیستم‌های کنترل نشده و کنترل شده تحت تاریخچه زمانی‌های شتاب السنترو ۱۹۴۰،

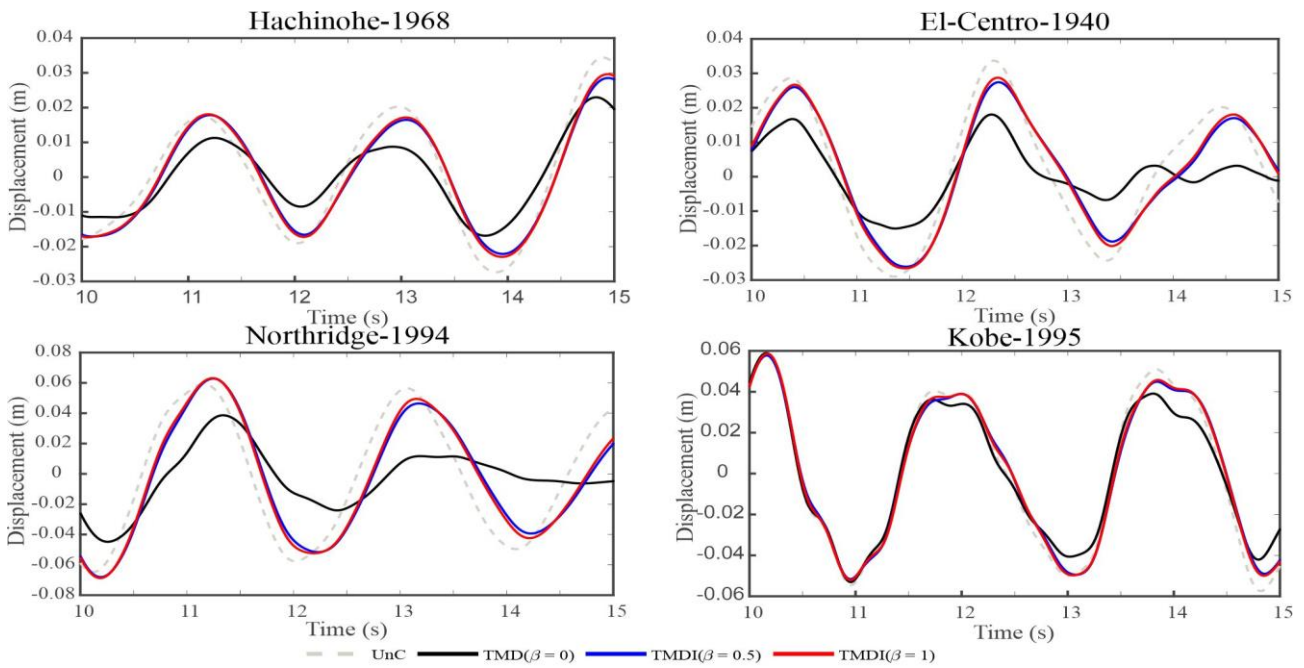
هاچینوئه ۱۹۶۸ (دو رکورد حوزه دور)، کوبه ۱۹۹۵ و نورثریج ۱۹۹۴ (دو رکورد حوزه نزدیک) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تاریخچه زمانی شتابنگاشتها در شکل (۳) نشان داده شده اند.



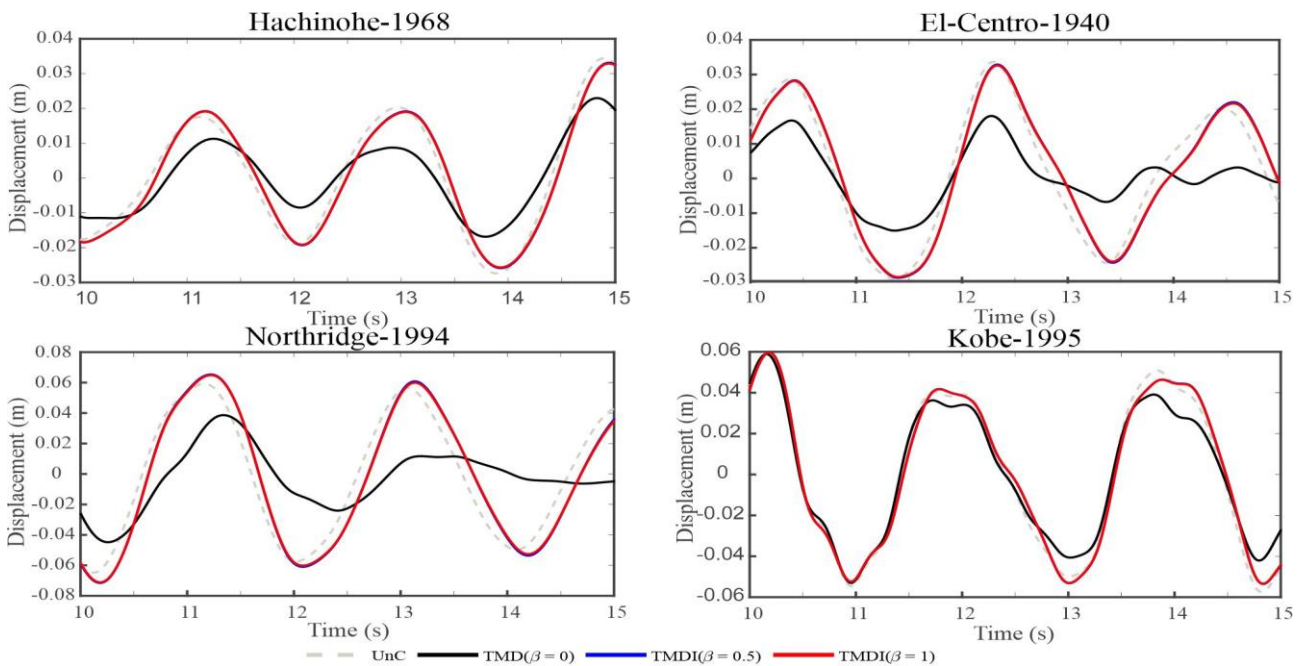
شکل ۳. رکوردهای اعمال شده الف و ب: حوزه دور - پ و ت: حوزه نزدیک



شکل ۴. تاریخچه زمانی جابجایی بام با اتصال پایانه دوم اینترتر به طبقه ۸ تحت اثر رکوردهای حوزه دور و نزدیک



شکل ۵. تاریخچه زمانی جابجایی بام با اتصال پایانه دوم اینترتر به طبقه ۹ تحت اثر رکوردهای حوزه دور و نزدیک



شکل ۶. تاریخچه زمانی جابجایی بام با اتصال پایانه دوم اینترتر به طبقه ۱۰ تحت اثر رکوردهای حوزه دور و نزدیک

تاریخچه زمانی جابجایی طبقه بام برای حالت اتصال پایانه دوم دستگاه اینترتر به طبقه هشتم در شکل (۴)، اتصال به طبقه نهم در شکل (۵) و اتصال به طبقه دهم در شکل (۶) تحت هر رکورد زلزله نشان داده شده است. ضمن تغییر محتوای بسامدی نگاشته‌ها، حالت‌هایی مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت اینرسی عملکرد سیستم TMDI ضعیف‌تر و به ازای حالت بدون اینرسی نتایج بهتری حاصل شده است. به ازای اتصال پایانه دوم اینترتر به طبقات پایین‌تر، باز هم نتایج بهتر شده‌اند. بهترین نتیجه برای حالتی بوده که پایانه دوم به طبقه هشتم سازه (بین طبقات ۸ تا ۱۰) متصل شود. بدترین نتیجه نیز برای حالتی بوده که پایانه دوم به طبقه دهم متصل شده و پاسخ‌هایی نزدیک به حالت کنترل نشده بدست آمده‌اند.

در جدول (۳) حداکثر جابجایی نرمال شده طبقه بام (نسبت پاسخ کنترل شده به کنترل نشده) تحت کل تاریخچه زمانی‌های شتاب زلزله‌های حوزه دور و نزدیک معیار گزارش شده‌اند. در این جدول رکوردهای حوزه دور السنتر و هاچینوئه به ترتیب با E و H

و رکوردهای حوزه نزدیک کوبه و نورتریج با K و N نشان داده شده است. پاسخ‌های کنترل شده در همه سیستم‌ها کمتر از حالت کنترل نشده می‌باشد، به استثنای سیستم TMDI-10 که پاسخ حالت کنترل شده اندکی (کمتر از ۵ درصد) بیشتر از حالت کنترل نشده بدست آمده است.

جدول ۳. حداکثر جابجایی نرمال شده طبقه بام ساختمان معیار مجهز به سیستم‌های کنترلی تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک

TMDI-10				TMDI-9				TMDI-8				مدل‌ها
N	K	H	E	N	K	H	E	N	K	H	E	نگاشتها
۰/۹۲۷	۰/۹۹۳	۰/۶۸۲	۰/۷۶۸	۰/۹۲۷	۰/۹۹۳	۰/۶۸۲	۰/۷۶۹	۰/۹۲۷	۰/۹۹۳	۰/۶۸۲	۰/۷۶۸	$\beta = 0.0$
۱/۰۰۸	۱/۰۰۶	۱/۰۳۹	۰/۹۶۸	۰/۹۶۵	۰/۹۸۸	۰/۹۳۱	۰/۸۵۳	۰/۹۱۰	۰/۹۰۲	۰/۷۰۵	۰/۸۰۹	$\beta = 0.5$
۱/۰۱۰	۱/۰۰۶	۱/۰۴۹	۰/۹۷۶	۰/۹۷۴	۰/۹۷۴	۰/۹۰۲	۰/۸۲۰	۰/۸۸۶	۰/۸۲۵	۰/۶۵۴	۰/۷۹۴	$\beta = 1.0$

## ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، نحوه‌ی اتصال پایانه‌ها دستگاه مکانیکی اینترت با نسبت‌های اینرسی مختلف در یک ساختمان برشی ۱۰ طبقه معیار تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت کنترل مقاوم TMDI با استفاده از الگوریتم دسته ذرات بهینه یاب، نُرم بی‌نهایت تابع تبدیل جابجایی بام به عنوان تابع هدف مسئله کمینه شده است. نتایج نشان می‌دهد در ساختمان ۱۰ طبقه معیار این مطالعه با میرایی ۲٪، با افزایش نسبت اینرسی میراگر، نسبت‌های بهینه فرکانس و میرایی سیستم‌های کنترلی عموماً افزایش می‌یابد. همچنین روش مورد استفاده برای بهینه‌یابی سیستم‌های کنترلی نشان داده که تحت رکوردهای حوزه دور و نزدیک مقاوم بوده و پاسخ‌های سازه از حالت کنترل نشده فراتر نرفته اند. بهترین عملکرد سیستم‌ها برای حالتی بوده که پایانه دوم اینترت به طبقه هشتم متصل شود. همچنین در پژوهش فعلی، عملکرد TMDI تحت رکوردهای حوزه دور بهتر از رکوردهای حوزه نزدیک می‌باشد.

## مراجع

1. M. F. Farzam, H. H. Jalali, S. A. Mousavi-Gavgani, A. E. Kayabekir, and G. Bekdaş, "Current Trends in the Optimization Approaches for Optimal Structural Control," in *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 326, 2021, pp. 133–179. doi: 10.1007/978-3-030-61848-3\_5.
2. H. Frahm, "Device for damping vibration of bodies", Inventor. US Patent, 989958. 1909."
3. F. Casciati and C. Van Der Eijk, "Variability in mechanical properties and microstructure characterization of CuAlBe shape memory alloys for vibration mitigation," in *Smart Structures and Systems*, Mar. 2008, pp. 103–121. doi: 10.12989/sss.2008.4.2.103.
4. 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.
5. F.W. Lanchester. "Damping torsional vibrations in crank shafts", Inventor. US Patent, 1085443. 1914."
6. J. P. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1956.
7. A. Pandit, R. Ghiasi, and A. Malekjafarian, "On the optimization of Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) systems for buildings subjected to real ground motions using slime mould algorithm." 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108557>.
8. 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.
9. 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.
10. 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.probengmech.2014.03.007.
11. 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).
12. 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.
13. A. Kaveh and M. Shahrouzi, "Optimal structural design family by genetic search and ant colony approach," *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, vol. 25, no. 3, pp. 268–288, 2008, doi: 10.1108/02644400810857092.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, IEEE, pp. 1942–1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.