



## مدل‌های ریاضی جدید مبتنی بر رویه تحلیل رگرسیون برای تنظیم بهینه‌ی پارامترهای TMD

بهروز کشته‌گر<sup>۱</sup> و صادق اعتدالی<sup>۲\*</sup><sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه زابل، زابل، ایران<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۶/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۹

## چکیده

میراگر جرمی تنظیم شده (TMD)، به عنوان یکی از استراتژی‌های کنترل ارتعاشات سیستم‌های مکانیکی و سازه‌ای به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. تنظیم پارامترهای TMD، نقش کلیدی در عملکرد آن دارد. در این مقاله، مدل‌های ریاضی جدیدی مبتنی بر رویه تحلیل رگرسیون برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD در یک سیستم اصلی میرا تحت تحریک شتاب پایه از نوع اغتشاش سفید ارائه شده‌اند. برای این منظور با بکارگیری الگوریتم جستجوی فاخته، یک پایگاه داده از مقادیر بهینه فرکانس و میرایی تنظیم TMD ایجاد و سپس مدل‌هایی مبتنی بر رویه تحلیل رگرسیون جهت تخمین پارامترهای بهینه TMD ارائه شده‌اند. کارایی مدل‌های ریاضی ارائه شده با چندین مدل صریح ارائه شده توسط مراجع، با استفاده از آماره ضریب اطمینان، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مدل‌های ارائه شده ضمن سادگی، به دلیل داشتن خطای کمتر و همبستگی بیشتر، از دقت بالاتری نسبت به دیگر مدل‌های ریاضی برخوردارند و در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جستجو کارایی و سادگی بالاتری داشته، لذا می‌توانند بدون نیاز به محاسبات وقت گیر، به سهولت در کاربردهای مهندسی استفاده شوند؛ همچنین نتایج حاصل برای سیستم اصلی در معرض تحریک اغتشاش سفید فیلتر شده، نشان می‌دهند که مقادیر پارامترهای بهینه TMD متأثر از فرکانس غالب تحریک نمی‌باشند. در انتها، کارایی مدل‌های ریاضی پیشنهاد شده برای یک سازه در معرض زلزله‌های مختلف نشان داده شده است.

**کلمات کلیدی:** میراگرهای جرمی تنظیم شده؛ تنظیم بهینه؛ جستجوی فاخته؛ رویه تحلیل رگرسیون؛ مدل‌های ریاضی.

## Novel Mathematical Models Based on Regression Analysis Scheme for Optimum Tuning of TMD Parameters

B. Keshtegar<sup>1</sup>, S. Etedali<sup>2,\*</sup><sup>1</sup> Assis. Prof., Civil Eng., University of Zabol, Zabol, Iran.<sup>2</sup> Assis. Prof., Civil Eng., Birjand University of Technology, Birjand, Iran.

## Abstract

Tuned mass damper (TMD) has been widely used as an adopted strategy for vibration control of mechanical and structural systems. Tuning of TMD parameters plays an important role in its performance. In this paper, novel mathematical models based on regression analysis scheme are presented for optimum tuning of TMD parameters in a damped main system subjected to white noise base acceleration. For this purpose, a database of optimum frequency and damping ratio of TMD is created and then models based on regression analysis scheme are proposed for optimum tuning of TMD parameters. Considering the confidence index as a statistical measurement, the efficiency of the proposed mathematical models is compared with other explicit models in the literature. The results show that the proposed models are simple and, due to having the lowest estimated errors and the best agreement with optimum tuning from database, they are able to provide more accuracy than other explicit mathematical models for optimum tuning of TMD parameters. Also, the proposed models are more efficient and simple than the search-based optimization algorithms. Therefore, they can readily be used for engineering applications without the need of time-consuming calculations. Furthermore, it is found that the optimum TMD parameters are not influenced by the predominant frequency of filtered white-noise excitation. At the end, the efficiency of the proposed mathematical models is shown for a structure subjected to different earthquakes.

**Keywords:** Tuned Mass Dampers; Optimum Tuning; Cuckoo Search; Regression Analysis Scheme; Mathematical Models.

## ۱- مقدمه

سیستم‌های کنترل غیرفعال، برای حفظ عملکرد سازه و امنیت آن در برابر حوادث طبیعی نظیر، باد و زلزله با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. میراگر جرمی تنظیم شده موسوم به TMD، یکی از سیستم‌های معمول کنترل غیرفعال است. این سیستم شامل، یک جرم، فنر و میراگر است و به طور معمول، در تراز فوقانی ساختمان‌ها نصب می‌شود تا با اثرگذاری روی مود اول سازه، سبب کاهش دامنه پاسخ‌های لرزهای شود. به طور معمول فرکانس TMD، متناسب با فرکانس مود غالب سازه تنظیم می‌شود؛ بنابراین، زمانی که سازه تحت این فرکانس تحریک می‌شود، حرکت TMD در فازی خلاف حرکت سازه تشدید می‌شود؛ لذا انرژی تحریک از طریق نیروی اینرسی که TMD به سازه وارد می‌کند، مستهلک می‌شود. TMDها، سیستم‌هایی ساده، ارزان و با قابلیت اعتماد بالا هستند [۱]. از آنجایی که کارایی سیستم‌های TMD به طور چشمگیری به تنظیم پارامترهای بهینه آن حساس است، لذا تنظیم بهینه پارامترهای TMD، بخش وسیعی از مطالعات محققان را به خود معطوف کرده است. مفهوم TMD اولین بار، در سال ۱۹۰۹ توسط Frahm برای کاهش حرکات قائم و نوسان بدنه کشتی‌ها مطرح شد. بعدها Ormondroyd و Den Hartog، بحث مفصلی در مورد تنظیم بهینه پارامترهای TMD ارائه دادند [۲]. Den Hartog [۳]، پارامترهای بهینه تنظیم فرکانس و میرایی سیستم TMD در سیستم‌های نامیرایی یک درجه آزادی تحت تحریکات خارجی هارمونیک را با روابط تحلیلی محاسبه کرد. بعد از آن محققان زیادی تلاش کردند تا به ازای مقدار ثابتی از نسبت جرمی TMD، روابط ریاضی را برای تخمین پارامترهای بهینه TMD ارائه دهند [۴-۷]. Warburton [۸ و ۹]، امکان و دقت بالای فرض به کارگیری یک سیستم یک درجه آزادی معادل به جای سیستم چند آزادی مجهز به TMD را تایید کردند. Bapat و Kumaraswamy [۱۰] و Thompson [۱۱]، راه‌حل‌های کلاسیک و گرافیکی را برای تنظیم پارامترهای بهینه TMD ارائه دادند. Sadek و همکاران [۱۲]، مدل‌های ریاضی را برای محاسبه بهینه پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده ارائه کردند. محققان زیادی سعی کردند، این تئوری را به سیستم‌های میرایی یک درجه آزادی بسط دهند. Warburton [۱۳]،

فرمول‌های ساده‌ای را برای تنظیم پارامترهای TMD در سیستم‌های یک درجه آزاد نامیرا و میرا تحت تحریک خارجی هارمونیک و اغتشاش سفید ارائه داد. بر خلاف مطالعات سایرین که عموماً برای یک نسبت ثابت TMD، راه‌حلی برای تنظیم بهینه سایر پارامترهای TMD ارائه دادند، Marano و همکاران [۱۴]، نسبت بهینه جرمی TMD را مورد مطالعه قرار دادند. Lin و Tsai [۱۵]، یک تکنیک جستجوی عددی را برای یافتن میرایی و فرکانس تنظیم بهینه TMD، با هدف کاهش پاسخ حالت پایا سیستم اصلی، گسترش دادند؛ همچنین آنها با استفاده از تکنیک‌های برازش منحنی، به فرمول‌های صریحی برای تخمین پارامترهای بهینه TMD در سیستم‌های میرا دست یافتند. Bakre و Jangid [۱۶] با بکارگیری روش‌ها و تکنیک‌های جستجوی عددی، روابط ریاضی صریحی را برای طراحی بهینه TMD ارائه دادند. Bandivadekar و Jangid [۱۷]، مدل‌های ریاضی برای تنظیم بهینه پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم شده منفرد و مضاعف در سیستم‌های نامیرا و میرا ارائه دادند. آنها با بهره‌گیری از تکنیک‌های برازش منحنی و بعد از سعی و خطاهای زیاد، فرمول‌های صریحی را برای تنظیم بهینه این سیستم‌ها ارائه دادند. Leung و Zhang [۱۸]، پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم شده را با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات تحت تحریکات مختلف بدست آوردند. آنها بر اساس پارامترهای بهینه حاصله، روابط ریاضی را برای تخمین بهینه این سیستم‌ها ارائه دادند. Salvi و Rizzi [۱۹] نیز با انجام مدل‌های برازشی مختلف، فرمول‌های صریح ساده‌ای را برای تخمین بهینه پارامترهای TMD بدست آوردند. استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت نظیر، الگوریتم ژنتیک [۲۰-۲۴]، الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات [۱۸ و ۲۵]، الگوریتم جستجوی هارمونی [۲۶]، الگوریتم کلونی مورچه‌ها [۲۷]، برای تخمین بهینه پارامترهای TMD نیز مورد توجه محققان قرار گرفته است.

اخیراً الگوریتم بهینه‌سازی فرااکتشافی موسوم به جستجوی فاخته مطرح شده است که در طیف گسترده‌ای از مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته، نتایج امیدوارکننده‌ای را دربرداشته است. الگوریتم جستجوی فاخته بر پایه استراتژی تولید مثل گونه خاصی از فاخته پایه‌ریزی شده است [۲۸]. رفتار این گونه از فاخته‌ها، با الگوی پرندگان

بهینه عددی وسیعی از پارامترهای TMD با بکارگیری الگوریتم جستجوی فاخته انجام شده است که در آن مقادیر بهینه فرکانس و میرایی تنظیم سیستم‌های TMD، برای یک سیستم در معرض اغتشاش سفید تعیین شده است. سپس بر مبنای پایگاه داده شکل گرفته، یک فرمولاسیون مبتنی بر رویه تحلیل رگرسیون جهت تخمین پارامترهای بهینه TMD ارائه گردیده است. فرمول جدید ارائه شده به صورت صریح و بدون صرف هزینه زمانی، قادر به تخمین پارامترهای بهینه TMD در سیستم‌های در معرض تحریک پایه‌ای از نوع اغتشاش سفید است.

ساختار بخش‌های بعدی مقاله حاضر به این شرح است: در بخش دوم، معادله حاکم بر رفتار دینامیکی یک سیستم مجهز به TMD، در معرض تحریک پایه اغتشاش سفید بیان می‌شود. بخش سوم، به تشریح الگوریتم جستجوی فاخته می‌پردازد. در بخش چهارم، یک تنظیم بهینه عددی وسیع از پارامترهای TMD برای سیستم اصلی در معرض تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید با بکارگیری الگوریتم جستجوی فاخته انجام شده است. در بخش پنجم، رویه تحلیل رگرسیون بر مبنای یک فرایند تکرار ریاضی ارائه شده که بر اساس آن مدل‌های غیرخطی جهت تخمین پارامترهای بهینه TMD ارائه گردیده است. در بخش ششم، ضمن بیان مدل‌های ریاضی ارائه شده در سایر مراجع برای تخمین پارامترهای بهینه TMD، یک سیستم تحت تحریک اغتشاش سفید، کارائی مدل‌های ریاضی ارائه شده جهت برآورد پارامترهای بهینه TMD، با مدل‌های ارائه شده در سایر مراجع مقایسه شده است. در بخش هفتم، تنظیم بهینه پارامترهای سیستم میراگر جرمی تنظیم شده برای سیستم اصلی، در معرض تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید فیلتر شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. کارائی مدل‌های ریاضی پیشنهاد شده برای یک سازه در معرض زلزله‌های مختلف در بخش هشتم ارزیابی می‌شود. بخش انتهایی، نتایج حاصل از این مطالعه را بیان می‌دارد.

## ۲- معادله حاکم بر رفتار دینامیکی یک سیستم

### مجهز به TMD

شکل ۱ به صورت شماتیک، یک سیستم اصلی مجهز به یک میراگر جرمی تنظیم شده به جرم  $m_T$ ، میرایی  $C_T$  و سختی

هنگام پرواز، موسوم به الگوریتم پرواز Lévy ترکیب شده، آن را به یکی از الگوریتم‌های موفق در بهینه سازی تبدیل کرده است [۲۹]. مطالعات اخیر نشان داده است که الگوریتم جستجوی فاخته می‌تواند، کارا تر از الگوریتم‌های ازدحام ذرات و تفاضلات تکاملی عمل نماید [۳۰]. فرآیندهای برون‌یابی و درون‌یابی در این الگوریتم، با بهره بردن از الگوریتم پرواز لوی (Lévy)، فضای جستجو را مورد پایش قرار می‌دهند. از نقطه نظر آماری، پرواز لوی میانگین و واریانس بی‌نهایت دارد؛ بنابراین در مقایسه با روش‌های گرادیان می‌تواند فضای جستجو را به شکل بهتری مورد کاوش قرار دهد [۳۱].

علیرغم عملکرد بهتر این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌های فرااکتشافی برای حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی، تاکنون مطالعه‌ای بر بکارگیری این الگوریتم برای تنظیم بهینه پارامترهای TMD گزارش نشده است. سادگی محاسبه و دقت تخمین، می‌تواند دو عامل اصلی در انتخاب یک روش جهت تخمین بهینه پارامترهای بهینه TMD باشند. بهره‌گیری از الگوریتم‌های فرااکتشافی به علت جستجوی پارامترهای بهینه در فضای ممکنه و تحلیل عددی معادله حرکت، بسیار وقت‌گیر بوده، لذا نسبت به مدل‌های ریاضی از عمومیت، کارایی و سادگی کمتری برخوردارند. از طرفی، دقت برازش مدل‌های ریاضی، نقش مهمی را در تنظیم بهینه پارامترهای TMD ایفا می‌نماید. از اینرو مدلی ارجح‌تر است که ضمن سادگی، تطبیق مناسبی نیز ارائه دهد. در مقاله حاضر، مدل‌های ریاضی غیرخطی جهت تنظیم پارامترهای بهینه TMD ارائه گردیده است. ضرایب مدل‌های ریاضی پیشنهاد شده که مبتنی بر برآوردگر حداقل مربعات می‌باشند، با هدف کمینه‌کردن مربع خطا در یک سیستم میرا مجهز به TMD تحت تحریک اغتشاش سفید، تعیین می‌شوند. کارایی مدل‌های ریاضی ارائه شده با مدل‌های موجود در مراجع [۱۶-۱۹] مقایسه شده است. مدل‌های ریاضی پیشنهاد شده در مقایسه با مدل‌های موجود از سادگی، دقت و کارایی بالاتری برخوردار بوده، قادرند با محاسبات کم و دقت بالا، یک تخمین مناسب از پارامترهای بهینه TMD را فراهم نمایند. عملکرد مدل‌های پیشنهادی، بستگی زیادی به مقدار و صحت پایگاه داده‌های مورد استفاده برای ساخت مدل‌ها دارد. بر این اساس در مقاله حاضر، ابتدا یک تنظیم

$$H_{xs}(\omega) = \frac{1}{\Gamma} [\omega_T (1 + \mu) - \omega^2 + 2i \omega_T \xi_T \omega (1 + \mu)] \quad (۳)$$

$$\Gamma = \omega^4 - 2i [\omega_s \xi_s + \omega_T \xi_T (1 + \mu)] \omega^3 - [\omega_s^2 + (1 + \mu) \omega_T^2 + 4\omega_T \omega_s \xi_T \xi_s] \omega^2 + 2i \omega_T \omega_s [\omega_s \xi_T + \omega_T \xi_s] \omega + \omega_T^2 \omega_s^2 \quad (۴)$$

که در آن فرکانس طبیعی و میرایی ویسکوز سیستم اصلی به ترتیب برابر،  $\omega_s = (k_s / m_s)^{0.5}$  و  $\xi_s = c_s / (2m_s \omega_s)$  هستند. مشابه با سیستم اصلی،  $\omega_T = (k_T / m_T)^{0.5}$  فرکانس طبیعی و  $\xi_T = c_T / (2m_T \omega_T)$  نسبت میرایی ویسکوز سیستم TMD تعریف می‌شوند. از طرف دیگر، نسبت جرمی و فرکانس تنظیم به صورت  $f = \omega_T / \omega_s$  و  $\mu = m_T / m_s$  تعریف می‌شوند. در این صورت، مقدار میانگین مربعات جابجایی سیستم اصلی به صورت رابطه (۵) حاصل می‌شود [۱۶]:

$$\sigma_{xs}^2 = \left( \frac{2\pi S_0}{\omega_s^3} \right) \frac{A}{4B} \quad (۵)$$

که در آن مقادیر  $A$  و  $B$  از طریق معادلات (۶) و (۷) حاصل می‌شوند.

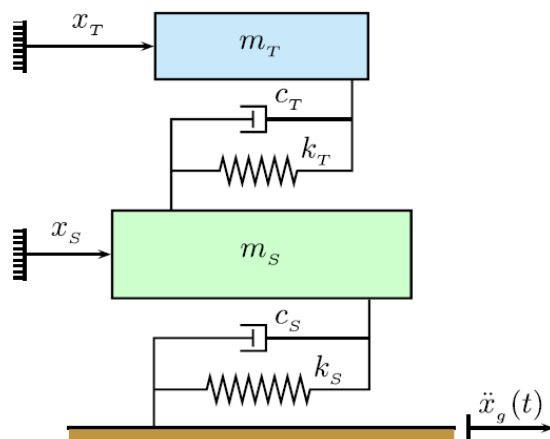
$$A = f^4 [\xi_T^2 (1 + \mu)^4] + f^3 [\xi_s \mu (1 + \mu)^2 + 4\xi_s \xi_T^2 (1 + \mu)^3] + f^2 [-\xi_T (2 - \mu)(1 + \mu)^2 + 4\xi_s^2 \xi_T (1 + \mu)^2 + 4\xi_T^3 (1 + \mu)^3] + f [\xi_s \mu^2 + 4\xi_s \xi_T^2 (1 + \mu)^2 + \xi_T^2] \quad (۶)$$

$$B = f^4 [\xi_s \xi_T (1 + \mu)^2] + f^3 [\xi_s^2 \mu + 4\xi_s^2 \xi_T^2 (1 + \mu)] + f^2 [-2\xi_T \xi_s + 4\xi_s^3 \xi_T + 4\xi_s \xi_T^3 (1 + \mu)] + f (\mu \xi_T^2 + 4\xi_T^2 \xi_s^2) + \xi_T \xi_s \quad (۷)$$

### ۳- الگوریتم جستجوی فاخته

Yang و Deb الگوریتم جستجوی فاخته را با الهام گرفتن از رفتار گونه‌ی خاصی از فاخته در تولید مثل مطرح کردند [۲۸]. این روش نیز به مانند بسیاری از الگوریتم‌های جستجو، مفاهیم بهینه سازی را از طریق نمادهای الهام گرفته از طبیعت بیان می‌کند. در این الگوریتم، فاخته نماد و مسئول انجام جستجوی محلی است؛ همچنین هر تخم فاخته، نمایش دهنده یک راه حل است که درون لانه پرنده‌گان میزبان قرار می‌گیرد. اگر پرنده میزبان از وجود این تخم‌های ناشناس آگاه شود، لانه را ترک کرده یا تخم موردنظر را کنار می‌گذارد [۳۱]. این رفتار نمادی از جستجوی سراسری در الگوریتم جستجوی فاخته است که در آن جواب‌های نه چندان خوب کنار گذاشته می‌شوند. همچنین نخبه‌گرایی، از طریق انتقال تخم‌هایی با کیفیت بالا به نسل‌های بعد صورت می‌گیرد [۳۱]. این الگوریتم به صورت موفقیت‌آمیزی روی

$k_T$  را نشان می‌دهد. پارامترهای دینامیکی سیستم اصلی شامل، جرم سازه  $m_s$ ، میرایی سازه  $c_s$  و سختی سازه  $k_s$  است. در این شکل، سیستم اصلی به صورت یک سیستم یک درجه آزادی مدل شده است که با اضافه کردن یک TMD به آن، تبدیل به یک سیستم دو درجه آزادی می‌شود.



شکل ۱- سیستم اصلی یک درجه آزادی مجهز به میراگر جرمی تنظیم شده تحت تحریک پایه

هنگامی که سیستم در معرض شتاب پایه  $\ddot{x}_g(t)$  قرار می‌گیرد، معادله دینامیکی حرکت را می‌توان به صورت رابطه (۱) بیان کرد:

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s(t) \\ \ddot{x}_T(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s + c_T & -c_T \\ -c_T & c_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s(t) \\ \dot{x}_T(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_T & -k_T \\ -k_T & k_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s(t) \\ x_T(t) \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_s \\ m_T \end{Bmatrix} \ddot{x}_g(t) \quad (۱)$$

در صورتی که پارامترهای TMD برای یک زلزله خاص تنظیم شوند، ممکن است که سیستم TMD در مقابل زلزله‌های دیگر موثر واقع نشود. برای رفع نسبی این ایراد، معمولاً از تحریک پایه‌ای از نوع اغتشاش سفید بهره می‌گیرند [۲۴] که یک فرآیند تصادفی با چگالی توان طیفی یکنواخت به شدت  $S_0$  است. در حالتی که سیستم اصلی در معرض چنین تحریکی قرار گیرد، میانگین مربعات جابجایی سیستم اصلی  $\sigma_{xs}^2$  از معادلات (۲-۴) حاصل می‌شود [۱۶].

$$\sigma_{xs}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_0 |H_{xs}(\omega)|^2 d\omega \quad (۲)$$

۳. یک عضو  $x_i$  از جمعیت را به صورت تصادفی انتخاب کن.
۴. بردار جدید  $x^{t+1}$  را بر طبق معادله (۸) از توزیع لوی ایجاد کن.
۵. برای  $x^{t+1}$  تابع برازش را محاسبه کن.
۶. اگر  $x^{t+1}$  پاسخ بهتری نسبت به  $x$  می باشد آن را جایگزین  $x$  کن.
۷. بخشی از بدترین پاسخ‌ها را با احتمال  $p_a$  انتخاب کن.
۸. هر پاسخ انتخاب شده در گام  $\gamma$  را بر اساس معادله (۹) بروز کن.
۹. برای هر پاسخ ایجاد شده در گام ۸، تابع برازش را محاسبه کن.
۱۰. اگر شرط پایان صادق نمی‌باشد به گام ۳ برو.
۱۱. جواب‌ها را رتبه بندی و بهترین پاسخ را انتخاب کن.
۱۲. پایان

#### ۴- پارامترهای بهینه TMD برای سیستم اصلی در

##### معرض تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید

در یک سیستم اصلی نامیرا مجهز به TMD و برای یک نسبت جرمی مشخص، با استفاده از روش‌های تحلیلی، به راحتی می‌توان یک رابطه ریاضی صریح و دقیق را برای تنظیم بهینه پارامترهای بهینه TMD بدست آورد [۱۸]؛ این درحالی است که در سیستم‌های میرا، این امکان وجود نخواهد داشت. در این حالت، می‌توان از تکنیک‌های جستجوی بهینه، با هدف حداقل سازی مربع میانگین پاسخ سیستم اصلی جهت برآورد بهینه پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شده استفاده کرد. در مطالعات پیشین، مراجع از روش‌های بهینه‌سازی سنتی مبتنی بر تکرار نسبت به برآورد پارامترهای بهینه TMD اقدام نموده‌اند و سپس با بهره‌گیری از روش‌های برازش منحنی، یک فرمول صریح را برای تنظیم پارامترهای بهینه TMD ارائه داده‌اند. در روش‌های بهینه‌سازی به کار رفته در این مطالعات، مقادیر بهینه پارامترها در یک فضای گسسته جستجو می‌شوند. در این مطالعه، به منظور امکان جستجوی متغیرهای بهینه سیستم TMD در فضای پیوسته، از الگوریتم جستجوی فاخته

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی اعمال شده است. طراحی بهینه فنر استاندارد و تیر جوش داده شده در مرجع [۳۱] با این الگوریتم انجام شده است. گندمی و همکاران [۳۲]، الگوریتم جستجوی فاخته را برای حل مسائل مختلفی از بهینه‌سازی سازه‌ای نظیر، قاب صفحه‌ای مفصلی، کمینه کردن خیز قائم تیر I شکل، مسئله تیر طره و طراحی تیر بتن مسلح به کار بردند و عملکرد الگوریتم جستجوی فاخته را در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها نظیر، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات ارزیابی کردند. طراحی بهینه سازه‌های خریابی [۳۳] و قاب‌های فولادی [۳۴] و تنظیم بهینه کنترل لرزه‌ای سازه‌های جدا شده هوشمند مجهز به میراگرهای اصطکاکی نیمه‌فعال [۳۵ و ۳۶]، نمونه‌ای دیگر از کاربردهای اخیر الگوریتم جستجوی فاخته در حوزه مهندسی سازه است. الگوریتم جستجوی فاخته، حرکت در فضای حالت را با استفاده از الگوریتم پرواز لوی انجام می‌دهد و سبب می‌گردد تا گام‌های ما در فضای جستجو دنباله‌ای تصادفی داشته باشد و تنوع بیشتری در جواب‌ها حاصل شود. فرمول (۸)، جستجوی محلی را برای  $x_i^{t+1}$  امین تخم فاخته با استفاده از پرواز لوی ایجاد می‌کند [۲۹]:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \oplus \text{Lévy}(\beta) \quad (8)$$

در آن  $\beta$  ضریب پرواز لوی،  $\alpha$ ، اندازه گام‌ها در فضای جستجو و  $\oplus$ ، ضرب داخلی است. جستجوی سراسری در الگوریتم جستجوی فاخته با استفاده از الگوریتم راه رفتن تصادفی (random walk) محلی صورت می‌گیرد. اکتشاف جواب‌های موجود توسط الگوریتم جستجوی سراسری، توسط فرمول (۹) صورت می‌گیرد [۲۸]:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \otimes H(p_a - \varepsilon) \otimes (x_j^t - x_k^t) \quad (9)$$

که در آن  $H(\cdot)$  تابع هویساید (Heaviside)،  $\varepsilon$  عددی تصادفی با توزیع یکنواخت و  $p_a$  متغیر احتمالاتی است.  $p_a$  مسئول ایجاد توازن بین جستجوی محلی و سراسری است. با افزایش  $p_a$ ، احتمال جستجوی محلی افزایش می‌یابد و بالعکس. الگوریتم استاندارد جستجوی فاخته به صورت گام‌های زیر خلاصه می‌شود:

۱. یک جمعیت  $n$  تایی از فاخته‌ها (بردارهای جواب) را به صورت تصادفی ایجاد کن.
۲. برای هر عضو از جمعیت، تابع برازش را محاسبه کن.

حاصل شد. با توجه به اینکه تنظیم بهینه فرکانس سیستم TMD، معمولاً در نزدیکی فرکانس سیستم اصلی حاصل می‌شود، لذا محدوده جستجوی نسبت فرکانس به صورت  $0.5 \leq f \leq 1.5$  در نظر گرفته شده است. از طرفی، عملکرد بهینه سیستم TMD را بایستی در محدوده نسبت میرایی  $0 < \xi_T < 1$  جستجو کرد [۳]؛ لذا محدوده مذکور به عنوان محدوده جستجوی نسبت میرایی بهینه سیستم TMD اتخاذ شده است. مقادیر بهینه نسبت فرکانسی ( $f^{opt}$ ) و نسبت میرایی ( $\xi_T^{opt}$ )، برای سیستم اصلی نامیرا و میرا با نسبت میرایی  $0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1$  و در محدوده نسبت وزنی  $0.02 \leq \mu \leq 0.1$ ، با بهره‌گیری از الگوریتم جستجوی فاخته تعیین و نتایج حاصل در جدول ۱ درج شده‌اند؛ همچنین خواص آماری پارامترهای TMD و نیز ضریب حداقل پاسخ تحت تحریک اغتشاش سفید در جدول ۱ درج گردیده است. مشخص است که دامنه حداقل و حداکثر  $f^{opt}$ ، کمتر از دامنه تغییرات پارامتر  $\xi_T^{opt}$  است و نیز کمترین ضریب تغییرات (CoV) نیز، با توجه به پارامتر  $f^{opt}$  نتیجه شده است؛ لذا، می‌توان نتیجه گرفت که نسبت فرکانسی بهینه، تغییر چندانی نسبت به تغییرات نسبت جرمی و نسبت میرایی سیستم اصلی نداشته، در محدوده  $0.8$  تا  $1$  متغیر است، اما نسبت میرایی بهینه میراگر جرمی تنظیم شده، تغییرات چشمگیری برحسب مقادیر مختلف نسبت میرایی سیستم و نسبت جرمی نشان داده است.

## ۵- مدل‌سازی ریاضی جهت تخمین پارامترهای

### بهینه TMD

در این بخش، یک فرمولاسیون جدید مبتنی بر رویه تحلیل رگرسیون، جهت تخمین پارامترهای بهینه TMD بسط داده شده است. این رویه رگرسیون بر مبنای برآوردگر حداقل مربعات و با استفاده از جستجوی ضرایب توابع ریاضی غیرخطی با هدف حداقل‌سازی مربع خطا برای یک سیستم میرا با TMD بنا نهاده شده است. مدل‌های ارائه شده برای تخمین بهینه پارامترهای سیستم TMD در یک سیستم اصلی میرا استفاده شده، در انتها توابع برازش غیرخطی ارائه گردیده است.

استفاده شده است. برای این منظور، می‌توان با توجه به معادله (۵)، یک مسئله بهینه‌سازی را با در نظر گرفتن مقدار میانگین پاسخ سیستم اصلی  $N = \sigma_{ys}^2 \omega_s^3 / 2\pi S_0$  تعریف کرد. در این صورت فرآیند بهینه‌سازی برای تعیین پارامترهای بهینه سیستم TMD، با هدف کمینه کردن این مقدار و به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود [۱۹]:

$$N^{opt} = \min N(\mu, \xi_T, f) = \min_{\mu, \xi_T, f} \left( \frac{A}{4B} \right) \quad (10)$$

رابطه (۱۰)، تابع هدف مسئله بهینه‌سازی برای تعیین پارامترهای بهینه سیستم TMD است که وابسته به نسبت جرمی، نسبت فرکانس تنظیم، میرایی سیستم اصلی و سیستم TMD است. برای یک نسبت مشخص از نسبت جرمی ( $\mu$ ) و نسبت میرایی سیستم اصلی ( $\xi_s$ )، رابطه فوق وابسته به دو متغیر طراحی شامل نسبت فرکانسی ( $f^{opt}$ ) و نسبت میرایی ( $\xi_T^{opt}$ ) است که در مراجع مختلف جهت طراحی سیستم TMD در نظر گرفته شده‌اند [۱۶-۱۹]. از آنجایی که در کاربردهای عملی معمولاً مقدار نسبت جرمی ( $\mu$ ) به یک دهم جرم سیستم اصلی محدود می‌شود، این مسئله نیز در طراحی بهینه پارامترهای TMD در نظر گرفته شده است. اندازه جمعیت  $n$ ، متغیر احتمالاتی  $p_a$ ، اندازه گام‌ها در فضای جستجو  $\alpha$  و ضریب پرواز لوی یعنی  $\beta$ ، پارامترهای قابل تنظیم در الگوریتم جستجوی فاخته هستند. در مقایسه با سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، پارامترهای مهم قابل تنظیم این الگوریتم کمتر می‌باشند. اندازه جمعیت که در همه الگوریتم‌های بهینه‌سازی وجود دارد و متغیر احتمالاتی  $p_a$ ، دو پارامتر مهم قابل تنظیم الگوریتم جستجوی فاخته هستند و دو پارامتر دیگر یعنی، اندازه گام‌ها در فضای جستجو و ضریب پرواز لوی می‌توانند، بدون تاثیر قابل محسوسی بر عملکرد الگوریتم، ثابت فرض شوند، به طوریکه در اغلب مسائل مهندسی  $\alpha=0.01$  و  $\beta=1.5$ ، مقادیر مناسبی می‌باشند. دو پارامتر دیگر یعنی، اندازه جمعیت و متغیر احتمالاتی تاثیر زیادی بر عملکرد الگوریتم دارند. احتمالاتی  $p_a$ ، مسئول ایجاد توازن میان جستجوی محلی و سراسری است [۳۷ و ۳۸]. مقادیر مختلفی از این دو پارامتر، برای حصول بهترین تنظیم در مسئله بهینه‌سازی تعریف شده آزمایش و بهترین تنظیم برای حالت  $n=15$  و  $p_a=0.25$

جدول ۱- مقادیر بهینه نسبت فرکانسی ( $f^{opt}$ ) و نسبت میرایی ( $\xi_T^{opt}$ )

سیستم میراگر جرمی تنظیم شده با بهره‌گیری از الگوریتم جستجوی فاخته

$\mu$	$\xi_s = 0$		$\xi_s = 0.01$		$\xi_s = 0.02$		$\xi_s = 0.03$		$\xi_s = 0.05$		$\xi_s = 0.075$		$\xi_s = 0.1$	
	$f^{opt}$	$\xi_T^{opt}$	$f^{opt}$	$\xi_T^{opt}$	$f^{opt}$	$\xi_T^{opt}$	$f^{opt}$	$\xi_T^{opt}$	$f^{opt}$	$\xi_T^{opt}$	$f^{opt}$	$\xi_T^{opt}$	$f^{opt}$	$\xi_T^{opt}$
0.002	0.99750	0.02234	0.99619	0.02230	0.99450	0.02231	0.99240	0.02230	0.98700	0.02220	0.97829	0.02220	0.96745	0.02209
0.004	0.99502	0.03158	0.99321	0.03160	0.99109	0.03150	0.98860	0.03150	0.98230	0.03140	0.97249	0.03123	0.96064	0.03105
0.006	0.99254	0.03864	0.99039	0.03860	0.98790	0.03860	0.98500	0.03850	0.97809	0.03845	0.96748	0.03830	0.95492	0.03805
0.008	0.99008	0.04459	0.98771	0.04460	0.98488	0.04451	0.98170	0.04440	0.97418	0.04440	0.96297	0.04415	0.94967	0.04380
0.010	0.98762	0.04981	0.98498	0.04980	0.98190	0.04975	0.97848	0.04970	0.97056	0.04955	0.95866	0.04930	0.94480	0.04900
0.015	0.98152	0.06090	0.97831	0.06090	0.97477	0.06085	0.97078	0.06080	0.96182	0.06060	0.94868	0.06030	0.93368	0.07019
0.020	0.97548	0.07030	0.97182	0.07020	0.96780	0.07015	0.96346	0.07010	0.95363	0.06990	0.93950	0.06950	0.92349	0.07833
0.025	0.96949	0.07805	0.96549	0.07830	0.96109	0.07825	0.95634	0.07820	0.94580	0.07795	0.93076	0.07760	0.91391	0.08566
0.030	0.96356	0.08571	0.95920	0.08565	0.95447	0.08560	0.94942	0.08555	0.93821	0.08530	0.92243	0.08485	0.90483	0.09235
0.035	0.95769	0.09235	0.95302	0.09235	0.94799	0.09230	0.94263	0.09225	0.93086	0.09200	0.91438	0.09150	0.89614	0.09856
0.040	0.95187	0.09895	0.94692	0.09855	0.94165	0.09850	0.93597	0.09840	0.92367	0.09815	0.90656	0.09765	0.88775	0.10435
0.045	0.94611	0.10471	0.94090	0.10435	0.93537	0.10430	0.92946	0.10420	0.91668	0.10395	0.89902	0.10981	0.87960	0.10345
0.050	0.94040	0.10880	0.93497	0.10980	0.92917	0.10975	0.92303	0.10965	0.90984	0.10935	0.89159	0.10885	0.87166	0.11497
0.055	0.93474	0.11482	0.92910	0.11495	0.92308	0.11490	0.91673	0.11480	0.90312	0.11450	0.88436	0.11395	0.86400	0.11987
0.060	0.92914	0.11835	0.92329	0.11985	0.91707	0.11980	0.91052	0.11970	0.89649	0.11940	0.87731	0.11890	0.85646	0.11820
0.065	0.92358	0.12456	0.91751	0.12455	0.91115	0.12450	0.90441	0.12440	0.89001	0.12410	0.87034	0.12355	0.84910	0.12285
0.070	0.91808	0.12904	0.91181	0.12905	0.90526	0.12900	0.89832	0.12890	0.88360	0.12855	0.86358	0.12805	0.84193	0.12730
0.075	0.91262	0.13335	0.90620	0.13335	0.89946	0.13330	0.89239	0.13320	0.87730	0.13285	0.85687	0.13230	0.83484	0.13160
0.080	0.90722	0.13749	0.90062	0.13750	0.89375	0.13740	0.88650	0.13730	0.87107	0.13705	0.85025	0.13645	0.82792	0.13570
0.085	0.90186	0.14149	0.89510	0.14150	0.88806	0.14140	0.88067	0.14135	0.86498	0.14100	0.84382	0.14045	0.82114	0.13970
0.090	0.89655	0.14536	0.88967	0.14535	0.88245	0.14530	0.87490	0.14520	0.85895	0.14490	0.83748	0.14430	0.81443	0.14360
0.095	0.89129	0.14910	0.88428	0.14910	0.87688	0.14900	0.86921	0.14895	0.85297	0.14860	0.83119	0.14805	0.80789	0.14725
0.100	0.88607	0.15273	0.87889	0.15275	0.87138	0.15270	0.86361	0.15260	0.84712	0.15230	0.82498	0.15170	0.80143	0.15090

جدول ۲- مقایسه خواص آماری متغیرهای بهینه TMD تحت

تحریک اغتشاش سفید

پارامتر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	بیشینه	کمینه
$\xi_T^{opt}$	۰/۰۹۷۲	۰/۰۳۹۷	۰/۴۰۸۴	۰/۱۵۲۷	۰/۰۲۲۱
$f^{opt}$	۰/۹۹۲۱	۰/۰۴۷۹	۰/۰۵۱۹	۰/۹۹۷۵	۰/۸۰۱۴
$N^{opt}$	۳/۹۱۳۴	۲/۳۰۰۹	۰/۵۲۱۲	۱۲/۸۷۹۷	۱/۶۹۸۷

غیرخطی مورد استفاده قرارگیرد [۱۹]. هدف از تحلیل رگرسیون بر مبنای برآوردگر حداقل مربعات، برازش یک تابع غیرخطی  $g(\mu, \xi_s)$  با ضرایب ناشناخته برای تخمین پارامترهای بهینه سیستم TMD ( $f^{opt}$  و  $\xi_T^{opt}$ ) است؛ بنابراین، خطای هر داده تحلیلی از پارامترهای بهینه سیستم TMD با توجه به مدل پیش بینی غیرخطی، به صورت رابطه (۱۱) می‌تواند بیان شود:

$$e_i = P_i - g(\mu_i, \xi_{si}) \quad (11)$$

در آن،  $P_i$  مقدار بهینه پارامترهای سیستم TMD حاصل از الگوریتم جستجوی فاخته و  $g(\mu_i, \xi_{si})$  مقدار تابع برازش شده غیرخطی با توجه به متغیرهای ورودی  $\mu$  و  $\xi_s$  برای  $i$ -امین

۵-۱- رویه تحلیل رگرسیون

تخمین گر حداقل مربعات با هدف جستجوی ضرایب مدل و با حداقل سازی مربع خطای مشاهدات و پیش بینی، می‌تواند به نحو مناسب و کارایی جهت تخمین ضرایب یک مدل

که در آن  $\lambda$ ، یک ضریب تعدیل است که همگرایی الگوریتم تکرار را برای توابع بسیار غیرخطی کنترل می‌کند که به صورت  $0 < \lambda < 1$  است. جهت دستیابی به نتایج پایدار بهتر است که مقدار ضریب  $\lambda$  عدد کوچکی در نظر گرفته شود. در این تحقیق، مقدار  $\lambda$  برابر با  $0.2$  لحاظ شده است.

**گام چهارم:** ارزیابی همگرایی الگوریتم تکرار به صورت  $\|a_{k+1} - a_k\| < \varepsilon$  که در صورت برقراری آن توقف رویه تکرار و در غیر اینصورت  $k=k+1$  و بازگشت به گام دوم

### ۵-۲- مدل‌های ریاضی غیرخطی ارائه شده جهت تخمین بهینه پارامترهای TMD

جهت برازش تابع غیرخطی، الگوریتم تشریح شده در بخش قبل در نرم افزار MATLAB کدنویسی شده است. این الگوریتم می‌تواند به نحو مناسب پارامترهای یک مدل غیرخطی را برآورد کند. در این مقاله، یک فرم ریاضی غیرخطی جهت تخمین پارامترهای سیستم میرا مجهز به TMD تحت تحریک پایه اغتشاش سفید با رابطه (۱۶-۱۷) پیشنهاد شده است.

$$f^{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} \times (1-1.5\xi_s^2)^{1.2075} \times [\exp(-2.5732\sqrt{\mu\xi_s}) + 0.2174\sqrt{\mu\xi_s^{1.5}}] \quad (16)$$

$$\xi_s^{opt} = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} \times \exp(-0.0616\xi_s) - 0.1130(1+20\mu)\xi_s^2 \quad (17)$$

که در آن  $\xi_s$ ، نسبت میرایی سیستم اصلی و  $\mu$ ، نسبت جرمی می‌باشند. شکل‌های ۲ و ۳ رویه‌های حاصل از مدل‌های ارائه شده جهت تخمین پارامترهای بهینه TMD را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، نتایج حاصل از تنظیم بهینه پارامترهای TMD با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته و به ازای مقادیر مختلفی از نسبت جرمی و میرایی سیستم اصلی با علامت ستاره درج شده‌اند. تطبیق مناسبی از نتایج حاصل از تخمین بهینه پارامترهای TMD به کمک مدل‌های ریاضی پیشنهاد شده، نتایج حاصل از الگوریتم جستجوی فاخته در این شکل‌ها مشاهده می‌شود؛ بنابراین مدل‌های ریاضی ارائه شده با دقت مناسبی قادر به تخمین پارامترهای بهینه TMD هستند و طراح را از محاسبات وقت‌گیر و پیچیده بهینه‌یابی برای جستجوی پارامترهای TMD بی‌نیاز می‌کنند.

داده است. یک تابع خطا برای تمامی داده‌ها و بر اساس مجموع توان دوم خطای تعریف شده در رابطه (۱۱) را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$f(a) = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n [P_i - g(\mu_i, \zeta_{si})]^2 \quad (12)$$

که در آن  $n$  تعداد داده‌های مشاهده شده از طریق بهینه سازی مبتنی بر جستجوی فاخته است. به منظور دستیابی به بهترین برازش، تابع خطای فوق می‌بایستی نسبت به ضرایب ناشناخته رابطه ریاضی برای پارامترهای بهینه TMD حداقل شود. از اینرو مطابق با رابطه (۱۳) برای هر ضریب ناشناخته، می‌توان یک معادله نوشت که این معادله بر اساس شکل تابع غیرخطی و داده‌های مورد بررسی، قابل محاسبه است. حل همزمان دستگاه معادلات فوق، منجر به تخمین ضرایب ناشناخته مدل گردیده که مطابق با آن تابع خطای (۱۲) حداقل شده است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(a)}{\partial a_1} &= 0 \\ \frac{\partial f(a)}{\partial a_2} &= 0 \\ &\dots \\ \frac{\partial f(a)}{\partial a_p} &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن،  $a_1, a_2, \dots, a_p$  شامل،  $p$  ضریب ناشناخته مدل غیرخطی می‌باشند. برای دستیابی به مقدار حداقل خطای رابطه (۱۲)، در این مقاله یک فرایند تکرار ریاضی توسعه داده شده است که قادر به تخمین پارامترهای ناشناخته مدل بوده، و می‌تواند در هر نرم افزار عددی مورد استفاده قرار گیرد. گام‌های این فرایند تکرار به شرح ذیل است.

**گام اول:** در نظر گرفتن ضرایب اولیه فرایند رگرسیون شامل، شماره تکرار الگوریتم برازش به صورت  $k=0$ ، مقادیر اولیه ضرایب ناشناخته مدل  $a_0$  و معیار توقف الگوریتم  $\varepsilon=10^{-4}$ .

**گام دوم:** با استفاده از رابطه (۱۴)، محاسبه بردار گرادیان تابع حداقل خطا در نقطه  $a_k$

$$\nabla f(a_k) = \left[ \frac{\partial f(a)}{\partial a_1}, \frac{\partial f(a)}{\partial a_2}, \dots, \frac{\partial f(a)}{\partial a_p} \right]^T \Big|_{a=a_k} \quad (14)$$

**گام سوم:** محاسبه مقدار جدید پارامترهای ناشناخته از طریق رابطه (۱۵) است

$$a_{k+1} = a_k - \lambda \nabla f(a_k) \quad (15)$$



$$f^{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} + (-3.79441 + 9.87259\sqrt{\mu} - 15.2978\mu)\sqrt{\mu\xi_s} + (-13.6731 + 19.1282\sqrt{\mu} + 21.7049\mu)\sqrt{\mu\xi_s^2} \quad (18)$$

$$\xi_T^{opt} = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} \quad (19)$$

Zhang و Leung [۱۸] در سال ۲۰۰۹، روابط ریاضی (۲۰-۲۱) را جهت تخمین پارامترهای بهینه میراگر جرمی تنظیم شده در یک سیستم میرا ارائه کردند:

$$f^{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} + (-4.9453 + 20.2319\sqrt{\mu} - 37.9419\mu)\sqrt{\mu\xi_s} + (-4.8287 + 25\sqrt{\mu})\sqrt{\mu\xi_s^2} \quad (20)$$

$$\xi_T^{opt} = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} - 5.3024\mu\xi_s^2 \quad (21)$$

همچنین Rizzi و Salvi [۱۹] در سال ۲۰۱۲، دو فرم ریاضی جهت تخمین پارامترهای بهینه سیستم TMD در یک سیستم اصلی میرای تحت تحریک اغتشاش سفید پیشنهاد کردند. فرم ریاضی I، مطابق با معادلات (۲۲) و (۲۳) پیشنهاد شده است.

$$f^{opt} = 1.004 - 0.9219\mu^{0.8948} - 1.787\mu^{0.4307}\xi_s^{0.9872} - 1.659\xi_s^{1.926} \quad (22)$$

$$\xi_T^{opt} = -0.005614 + 0.4548\mu^{0.4579} + 0.1584\mu^{1.245}\xi_s^{1.485} + 0.001293\xi_s^{9.587} \quad (23)$$

همچنین فرم ریاضی II آن‌ها به صورت رابطه (۲۴-۲۵) پیشنهاد شده است.

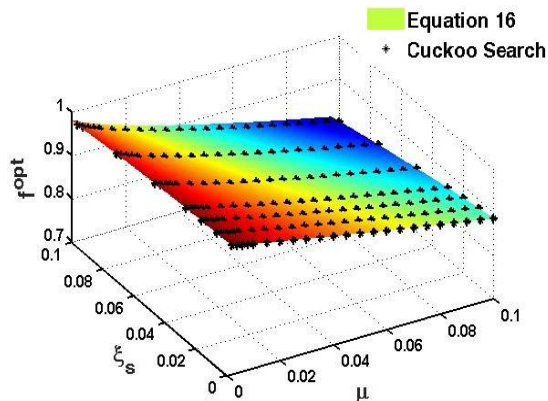
$$f^{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} \times (1 - 10\mu^{5.678} - 2.456\mu^{0.5041}\xi_s^{0.9943} - 1.78\xi_s^{1.947}) \quad (24)$$

$$\xi_T^{opt} = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} \times (1 + 0.001\mu^{1.757} + 1.14\mu^{1.457}\xi_s^{1.238} + 1.339\xi_s^{4.56}) \quad (25)$$

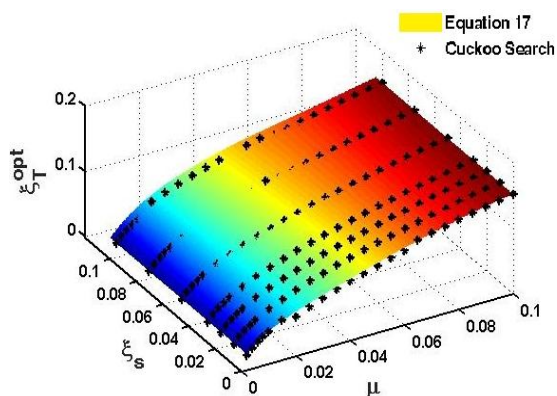
جهت مقایسه کارایی مدل‌های ریاضی ارائه شده در این مقاله و مدل‌های ریاضی ارائه شده توسط مراجع [۱۶ و ۱۸] در تخمین پارامترهای بهینه TMD، از آماره مقایسه ضریب اطمینان استفاده است. آماره ضریب اطمینان، براساس حاصلضرب دو معیار ضریب تطبیق و ضریب کارایی به صورت رابطه (۲۶) قابل محاسبه است [۳۹]:

$$CI = D \times EF \quad (26)$$

در آن D ضریب تطبیق و EF ضریب کارایی بوده، به صورت رابطه (۲۷-۲۸) تعریف می‌شوند:



شکل ۲- مقایسه تخمین بهینه فرکانس تنظیم سیستم TMD با استفاده از مدل ریاضی پیشنهادی و بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم جستجوی فاخته



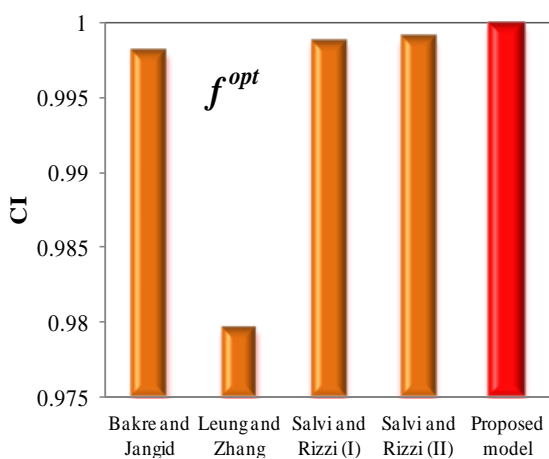
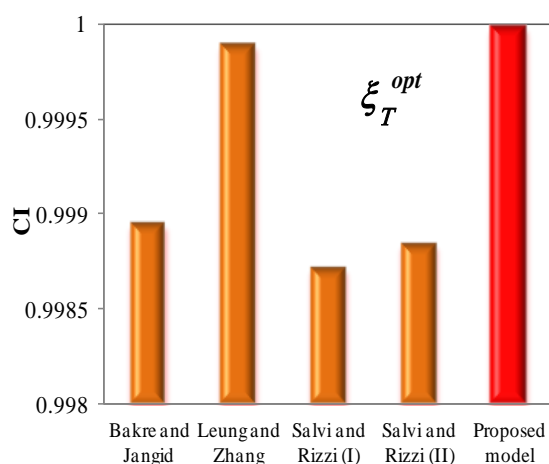
شکل ۳- مقایسه تخمین بهینه نسبت میرایی سیستم TMD با استفاده از مدل ریاضی پیشنهادی و بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم جستجوی فاخته

## ۶- ارزیابی مدل‌های ریاضی ارائه شده در مقایسه

### با سایر مدل‌های ریاضی ارائه شده در مراجع

مدل‌های ریاضی جهت تخمین پارامترهای بهینه TMD بر اساس نسبت جرمی و نسبت میرایی سیستم اصلی توسط مراجع [۱۶ و ۱۸ و ۱۹] ارائه شده است که علاوه بر سادگی، تخمین سریع پارامترهای TMD را در مسائل کاربردی مهندسی فراهم می‌آورند. Jangid و Bakre در سال ۲۰۰۷ [۱۶]، رابطه ریاضی صریحی را جهت تخمین پارامترهای TMD، بر اساس برآزش داده‌های حاصل از بهینه‌یابی ضریب میانگین پاسخ اغتشاش سفید با رابطه (۱۸-۱۹) ارائه کردند:

مختلفی از نسبت جرمی و میرایی سیستم دارای پراکندگی بیشتری است، کارایی مناسبی را از خود نشان نمی‌دهند. ضریب کارایی روابط ارائه شده جهت تخمین پارامترهای بهینه TMD، توسط مراجع [۱۶] و [۱۹] تقریباً مشابه است و می‌توان نتیجه گرفت، نتایجی مشابه از پاسخ سیستم به ازای روابط مورد استفاده از این مراجع حاصل می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل‌های ریاضی ارائه شده در این مقاله، در مقایسه با سایر مدل‌های ریاضی پیشنهادی در مراجع، کارایی مطلوبتری را در تخمین بهینه هر دو پارامتر طراحی سیستم‌های TMD، یعنی نسبت فرکانس تنظیم و نسبت میرایی TMD فراهم نموده‌اند.



شکل ۴- مقایسه ضریب کارایی مدل‌های ارائه شده با مدل‌های ریاضی پیشنهادی در سایر مراجع

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i - \bar{Y}| + |y_i - \bar{Y}|)^2} \quad (27)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{Y} - y_i)^2} \quad 0 \leq EF \leq 1 \quad (28)$$

که در آن  $\bar{Y}$  و  $\bar{y}$  به ترتیب، متوسط پارامترهای بهینه سیستم TMD حاصل از الگوریتم جستجوی بهینه‌یابی و متوسط پارامترهای پیش‌بینی شده آن، توسط مدل ریاضی است.  $y_i$  و  $\bar{y}_i$  به ترتیب، مقدار برآورد حاصل از تخمین تابع ریاضی و مقدار بهینه برآورد شده از الگوریتم بهینه‌یابی برای  $i$ -امین داده است. اگر مقدار  $CI=0$  شود، بین داده‌های پیش‌بینی و مشاهده هیچ وابستگی وجود ندارد و برآورد نادرست است؛ در صورتی که  $CI=1$  دلالت به تطبیق کامل مدل ریاضی ارائه شده با داده‌های پیش‌بینی دارد؛ همچنین ضریب کارایی، میزان انطباق مدل‌سازی بر داده‌ها را نشان می‌دهد، بطوریکه اگر برابر با یک شود، نشان دهنده کارایی بالای مدل‌سازی بوده، برآورد حاصله با واقعیت مطابقت دارد که در این آماره نیز لحاظ شده است. بر اساس روابط ارائه شده برای آماره ضریب اطمینان، روابط ریاضی ارائه شده برای تخمین پارامتر بهینه نسبت فرکانسی TMD (رابطه ۱۶) و نسبت میرایی (رابطه ۱۷) با روابط ارائه شده مرجع [۱۶] (روابط ۱۸ و ۱۹)، مرجع [۱۸] (روابط ۲۰ و ۲۱) و مرجع [۱۹] (روابط I و ۲۲) و [۲۳] و II (۲۴ و ۲۵)، تحت تحریک اغتشاش سفید در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مدل‌های ریاضی ارائه شده به کمک توابع غیرخطی توانی و نمایی، توانمندی و کارایی بالایی نسبت به مدل‌های ریاضی ارائه شده توسط مراجع دیگر دارد.

رابطه ارائه شده توسط Leung و Zhang، کارایی بهتری نسبت به روابط ارائه شده سایر مراجع برای تخمین نسبت میرایی TMD دارد، اما رابطه آنها جهت تخمین نسبت فرکانسی سیستم TMD مناسب نمی‌باشد. از طرفی رابطه ارائه شده Bakre و Jangid و همچنین دو رابطه ریاضی پیشنهادی Salvi و Rizzi، جهت تخمین نسبت فرکانس تنظیم سیستم TMD کارایی مناسبی را نشان می‌دهند، اما در تخمین مقدار بهینه نسبت میرایی سیستم TMD که محدوده طراحی بهینه آن مطابق با جدول ۲ برای حالت‌های

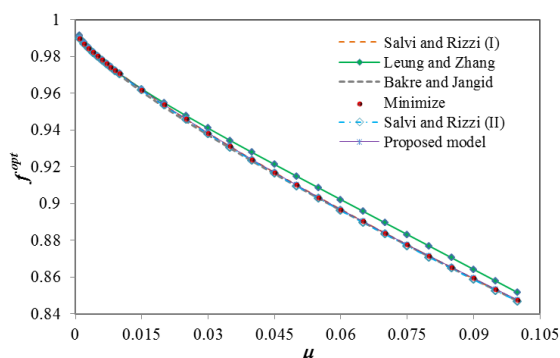
**۷- تنظیم بهینه پارامترهای TMD برای سیستم اصلی در معرض تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید فیلتر شده**

در آنالیزهای تصادفی، استفاده از تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید، به جای مجموعه‌ای از تاریخچه‌های زمانی ثبت شده زلزله‌ها معمول است. از آنجایی که اغتشاش سفید به عنوان یک فرآیند تصادفی با چگالی طیفی یکنواخت به شدت  $S_0$  روی دامنه همه فرکانس‌ها است، لذا برای بکارگیری آن به عنوان تحریک پایه سازه، استفاده از فیلتری ضروری است که بتواند خاصیت عبور امواج از خاک را روی آن مدل‌سازی نماید. یکی از معروفترین فیلترهای مورد استفاده برای این منظور، فیلتر کانای-تاجیمی [۴۰ و ۴۱] است که با تابع چگالی طیفی مندرج در معادله (۲۹) تعریف می‌شود:

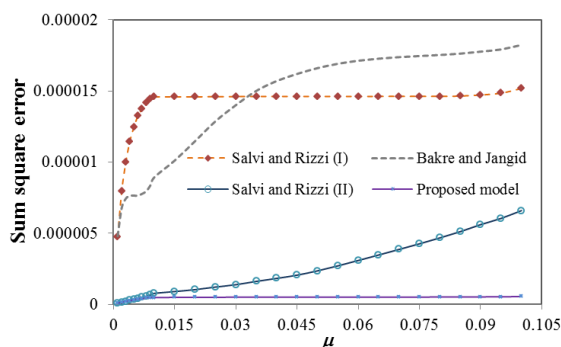
$$S_{\ddot{x}_g}(\omega) = S_0 \left( \frac{1 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4\xi_g^2(\omega/\omega_g)^2} \right) \quad (29)$$

که در آن  $\xi_g$  و  $\omega_g$  به ترتیب، معرف میرایی و فرکانس زمین است که برای خاک‌های متفاوت، دارای مقادیر متفاوتی است. در مطالعه حاضر  $\xi_g=0.6$ ، مربوط به خاک‌های معمولی، در نظر گرفته شده است [۴۲]. به منظور بررسی اثر فرکانس زمین بر تنظیم بهینه پارامترهای TMD،  $\omega_g$  به صورت متغیر و به صورت نسبتی از فرکانس سازه  $(\omega_s)$  در نظر گرفته شده است. مطابق با آنچه در بخش ۲ مقاله تشریح شد، مقادیر بهینه پارامترهای TMD برای سیستم اصلی تحت تحریک اغتشاش سفید فیلتر شده به کمک الگوریتم جستجوی فاخته تعیین شده‌اند.

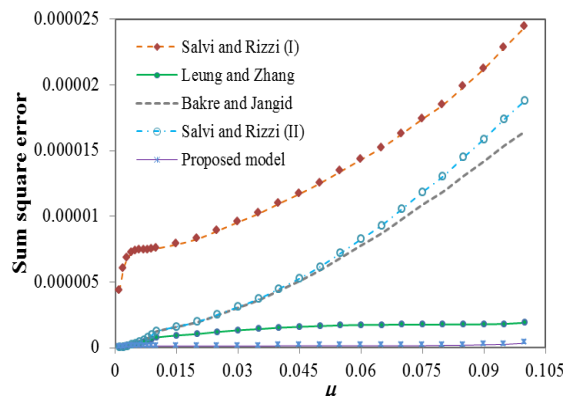
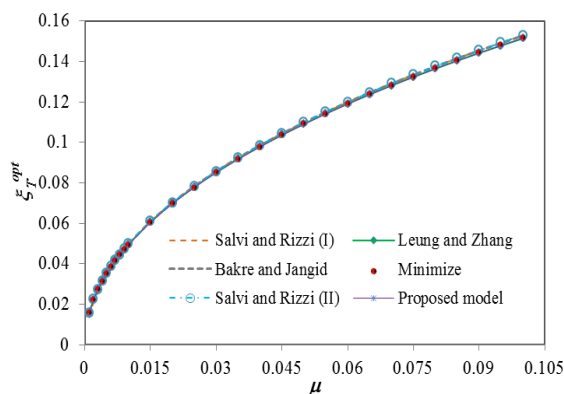
در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب، نسبت فرکانس تنظیم بهینه و نسبت میرایی بهینه TMD حاصل از روابط ریاضی موجود، پیشنهاد شده و فرآیند بهینه‌سازی برای یک سیستم اصلی با نسبت میرایی ۵ درصد (این مقدار میرایی در سازه‌ها عمومیت دارد.) و در معرض اغتشاش سفید در پایه برای مقادیر مختلفی از نسبت جرمی نشان داده شده است. در این شکل‌ها همچنین منحنی مجموع توان دوم خطا (Sum Square Error) یا به اختصار SSE نیز، برای هر رابطه ریاضی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مدل ریاضی ارائه شده برای تخمین پارامترهای بهینه، در حالت  $\xi_g=0.05$ ، نتایجی مشابه با روابط ریاضی ارائه شده توسط مراجع دیگر فراهم می‌آورد. با مقایسه توان دوم خطا برای پارامترهای بهینه سیستم TMD، بیشترین خطا برای نسبت فرکانسی و میرایی بهینه به ترتیب بر اساس رابطه ارائه شده توسط Salvi-Rizzi و Bakre-Jangid حاصل شده است. با افزایش نسبت جرمی، توان دوم خطا در این مدل‌ها افزایش می‌یابد. کمترین خطا بر اساس مدل‌های ریاضی ارائه شده حاصل شده است به نحوی که میزان خطا برای نسبت میرایی ۵ درصد، بسیار ناچیز و از خطای ناشی از بکارگیری روابط ارائه شده توسط مراجع بسیار کمتر است. همچنین برخلاف سایر مدل‌ها با افزایش نسبت جرمی، میزان خطاها افزایش نیافته است؛ لذا مدل‌های ریاضی ارائه شده، بدون نیاز به یک الگوریتم تکرار بهینه سازی وقت گیر، قادر است برآورد مناسب و بهینه‌ای از پارامترهای سیستم TMD فراهم نموده، به سهولت در کاربردهای مهندسی استفاده شود.



شکل ۴- مقایسه نسبت فرکانس تنظیم TMD و مجموع توان دوم خطای مدل‌های ریاضی در حالت  $\xi_g=0.05$



شکل ۵- مقایسه نسبت فرکانس تنظیم TMD و مجموع توان دوم خطای مدل‌های ریاضی در حالت  $\xi_g=0.05$



شکل ۶- مقایسه نسبت میرایی TMD و مجموع توان دوم خطای مدل‌های ریاضی در حالت  $\xi_g=0.05$

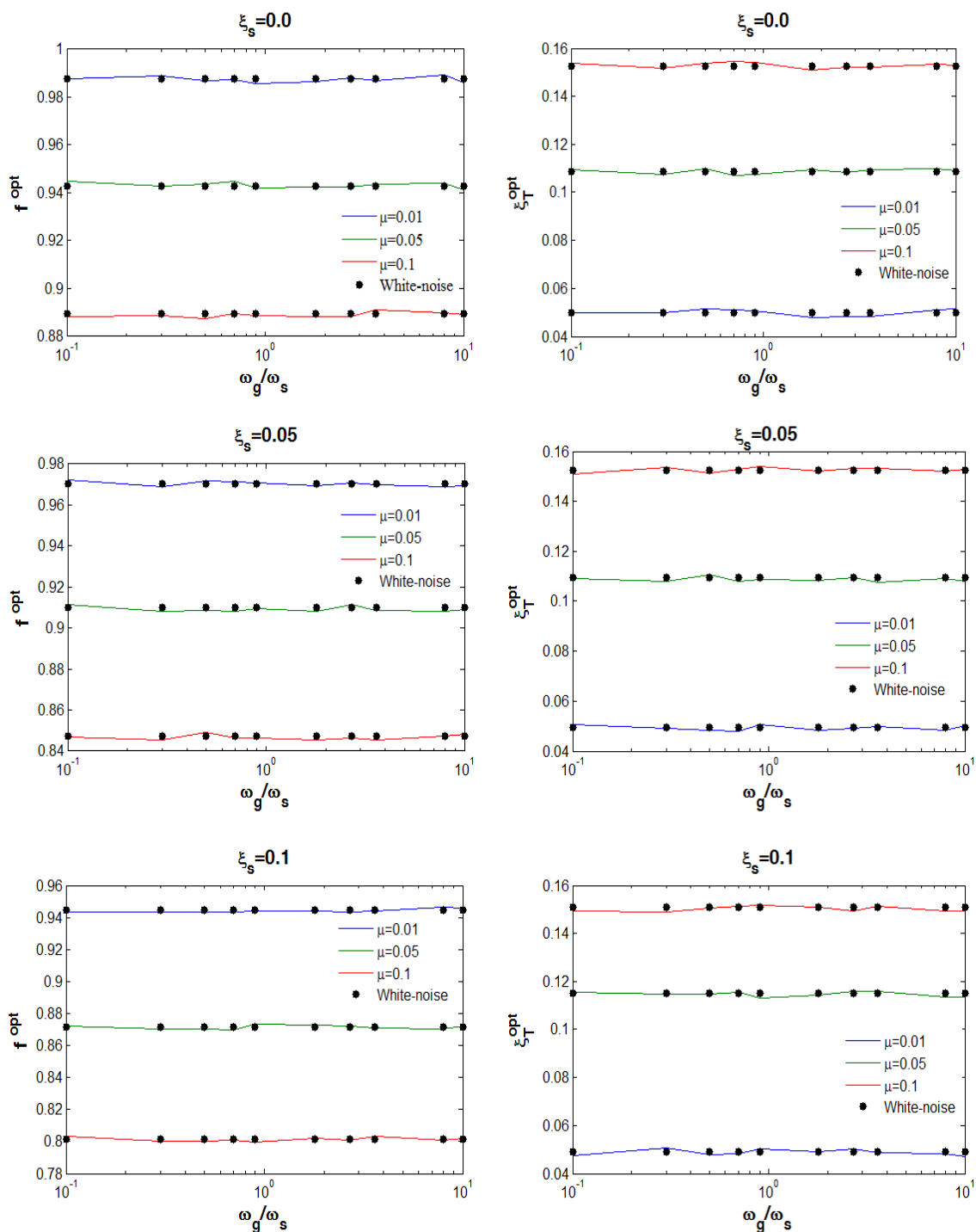
## ۸- ارزیابی کارایی مدل‌های ریاضی پیشنهاد شده

### برای سازه‌های در معرض زلزله

به منظور بررسی کارایی مدل‌های ریاضی پیشنهادی در طراحی بهینه سیستم TMD برای سازه‌های ساختمانی در معرض زلزله، یک ساختمان ۱۰ طبقه در نظر گرفته شده است. جرم طبقات سازه مذکور به ترتیب برابر، ۱۷۹، ۱۷۰، ۱۶۱، ۱۵۲، ۱۴۳، ۱۳۴، ۱۲۵، ۱۱۶، ۱۰۷ و ۹۸ تن و سختی طبقات مذکور به ترتیب برابر، ۶۲/۴۷، ۵۲/۲۶، ۵۶/۱۴، ۳۴/۳۱ و ۳۷/۴۳، ۴۰/۵۵، ۴۳/۶۷، ۴۶/۷۹، ۴۹/۹۱، ۵۳/۰۲ مگانیوتن بر متر است همچنین مطابق با مرجع [۱۲]، ماتریس میرایی سیستم سازه به صورت  $\mathbf{C}=0.0129\mathbf{K}$  یعنی، متناسب با ماتریس سختی سازه در نظر گرفته شده است. یک TMD با جرم معادل ۵۵/۴۵ تن روی طبقه فوقانی سازه مستقر شده است. با تعیین جرم مدی و نسبت میرایی سازه مذکور در مد اول سازه و بهره‌گیری از فرمول‌های پیشنهادی، پارامترهای بهینه سیستم TMD برای سازه مورد مطالعه برای  $c_T=49.76 \text{ kN.s/m}$  و  $k_T=407 \text{ kN/m}$  تعیین می‌گردند. برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه مذکور، تحلیل تاریخچه زمانی سازه در معرض دو زلزله دور از گسل ال‌سنترو (۱۹۴۰) و هاچینو (۱۹۶۸) و همچنین دو زلزله نزدیک‌گسل، نورتریدج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) انجام شده است. تمامی زلزله‌های یاد شده به مقدار حداکثر  $0.3g$  مقیاس شده‌اند که  $g$ ، شتاب گرانشی زمین است. شکل ۸، تاریخچه زمانی جابجایی و شتاب مطلق بام در زلزله ال‌سنترو و برای دو حالت با و بدون TMD را نشان می‌دهد.

شکل ۷ نشان می‌دهد که پارامترهای بهینه سیستم TMD، به ازای مقادیر ثابتی از نسبت جرمی ( $\mu$ ) و نسبت میرایی سیستم اصلی ( $\xi_s$ )، مستقل از کمیت بدون بعد  $\omega_s/\omega_g$  (نسبت فرکانس زمین به فرکانس سازه) است. به بیان دیگر، مقایسه مقادیر بهینه نسبت فرکانس تنظیم و میرایی ( $f_T^{opt}$  و  $\xi_T^{opt}$ ) سیستم میراگر جرمی در دو حالت تحت تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید و اغتشاش سفید فیلتر شده با فیلتر کانای-تاجیمی در شکل ۷ نشان می‌دهد که اختلاف محسوسی میان نسبت فرکانس تنظیم و میرایی بهینه در دو حالت مذکور وجود ندارد. اساساً نتیجه مذکور به این دلیل حاصل شده است که اغتشاش سفید فیلتر شده، در واقع فرآیند تصادفی پهن باندهای است که در مجاورت فرکانس طبیعی سیستم اصلی به آرامی تغییر می‌کند.

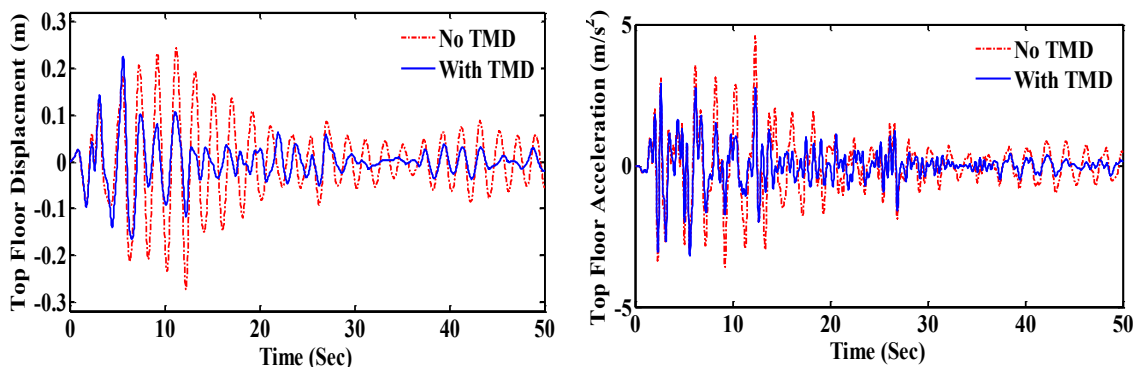
پاسخ بهینه سیستم اصلی ( $N^{opt}$ )، متأثر از فرکانس غالب اغتشاش سفید فیلتر شده است و با نزدیک شدن نسبت  $\omega_s/\omega_g$  به یک، بیشینه مقدار آن حاصل می‌شود؛ بنابراین مقادیر بهینه نسبت فرکانس تنظیم و میرایی سیستم TMD، متأثر از فرکانس غالب اغتشاش سفید فیلتر شده نمی‌باشد و این یک نتیجه کاربردی در حوزه مهندسی سازه و طراحی لرزه‌ای سازه‌های مجهز به TMD است. به بیان دیگر، از فرمول‌های ریاضی ارائه شده می‌توان به طور مستقیم برای طراحی بهینه میراگرهای جرمی تنظیم‌شده در سازه‌های در معرض زلزله استفاده کرد.



شکل ۷- مقایسه مقادیر بهینه سیستم TMD در دو حالت تحت تحریک پایه از نوع اغتشاش سفید و اغتشاش سفید فیلتر شده با فیلتر کانای- تاجیمی در سه حالت  $\zeta_s=0$ ،  $\zeta_s=0.05$  و  $\zeta_s=0.1$  با نسبت جرمی های مختلف

همانطور که مشاهده می‌شود، میراگرهای جرمی تنظیم شده با مدل‌های پیشنهادی به نحو مطلوبی بیشینه پاسخ‌های لرزه‌ای سازه را کاهش داده‌اند. برای دستیابی به یک نتیجه کلی، متوسط درصد کاهش پاسخ‌های بیشینه همه طبقات سازه در زلزله‌های مختلف، در جدول ۴ درج شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای در زلزله هاچینو حاصل شده است. به طور متوسط برای همه زلزله‌ها، میراگر جرمی تنظیم شده کاهش حدود ۲۵ و ۱۴ درصد را به ترتیب در بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات فراهم نموده است.

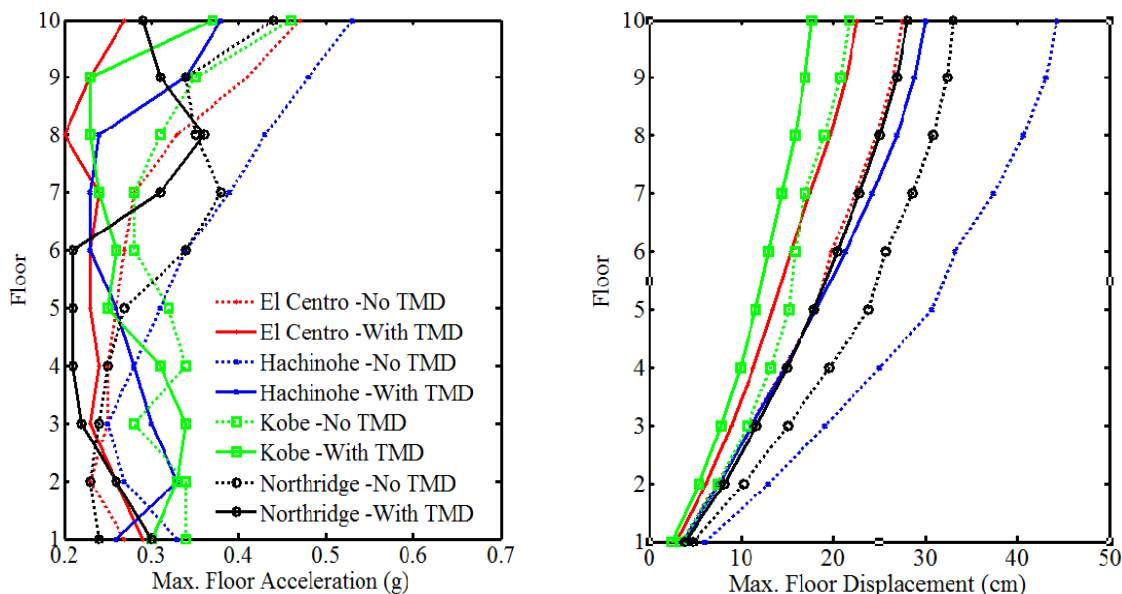
همانطور که مشاهده می‌شود، بیشینه جابجایی و شتاب مطلق بام برای حالت بدون TMD به ترتیب برابر،  $27/36 \text{ cm}$  و  $4/59 \text{ m/s}^2$  است که با بکارگیری TMD، به مقادیر  $22/62 \text{ cm}$  و  $2/69 \text{ m/s}^2$  تقلیل پیدا کرده‌اند که به ترتیب کاهشی حدود ۱۷ و ۴۱ درصد را نشان می‌دهند. جدول ۳، بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه را برای چهار زلزله مورد مطالعه و در دو حالت با و بدون TMD نشان می‌دهد. همچنین به منظور نشان دادن پراکندگی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه مذکور در زلزله‌های مختلف، بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه در شکل ۹ ترسیم شده است.



شکل ۸ - تاریخچه زمانی جابجایی و شتاب مطلق بام در زلزله ال سنتر و برای دو حالت با و بدون TMD

جدول ۳- بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه

طبقه	ال سنتر و		هاچینو		کوبه		نورتریج									
	بدون TMD		با TMD		بدون TMD		با TMD									
	جابجایی (سانتی‌متر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتی‌متر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتی‌متر)	شتاب (g)	جابجایی (سانتی‌متر)	شتاب (g)								
۱	۲/۴۲	-۰/۲۷	۲/۸۸	-۰/۲۹	۶/۰۵	-۰/۳۳	۳/۵۷	-۰/۲۶	۳/۵۰	-۰/۳۴	۲/۴۸	-۰/۳۰	۴/۷۶	-۰/۲۴	۳/۸۷	-۰/۳۰
۲	۷/۳۶	-۰/۲۳	۶/۱۶	-۰/۲۶	۱۳/۰۰	-۰/۲۷	۷/۶۰	-۰/۳۳	۷/۴۸	-۰/۳۴	۵/۴۶	-۰/۳۳	۱۰/۲۴	-۰/۲۳	۸/۱۰	-۰/۲۶
۳	۱۰/۹۵	-۰/۲۵	۸/۸۷	-۰/۲۳	۱۹/۰۹	-۰/۲۵	۱۱/۱۴	-۰/۳۰	۱۰/۶۲	-۰/۲۸	۷/۸۷	-۰/۳۴	۱۵/۰۱	-۰/۲۴	۱۱/۶۶	-۰/۲۲
۴	۱۴/۵۷	-۰/۲۵	۱۱/۳۲	-۰/۲۴	۲۴/۹۹	-۰/۲۸	۱۴/۶۷	-۰/۲۸	۱۳/۲۱	-۰/۳۴	۹/۸۷	-۰/۳۱	۱۹/۵۵	-۰/۲۵	۱۴/۹۶	-۰/۲۱
۵	۱۸/۰۷	-۰/۲۶	۱۳/۴۵	-۰/۲۳	۳۰/۶۶	-۰/۳۱	۱۸/۱۰	-۰/۲۶	۱۵/۱۷	-۰/۳۲	۱۱/۵۲	-۰/۲۵	۲۳/۸۰	-۰/۲۷	۱۷/۸۴	-۰/۲۱
۶	۱۹/۷۰	-۰/۲۷	۱۵/۳۸	-۰/۲۳	۳۳/۲۴	-۰/۳۴	۲۱/۳۱	-۰/۲۳	۱۵/۸۱	-۰/۲۸	۱۲/۹۸	-۰/۲۶	۲۵/۷۰	-۰/۲۴	۲۰/۴۰	-۰/۲۱
۷	۲۲/۳۳	-۰/۲۸	۱۷/۵۰	-۰/۲۴	۳۷/۳۴	-۰/۳۹	۲۴/۲۸	-۰/۲۳	۱۶/۹۲	-۰/۲۸	۱۴/۳۹	-۰/۲۴	۲۸/۶۰	-۰/۲۸	۲۲/۸۲	-۰/۳۱
۸	۲۴/۶۲	-۰/۳۳	۱۹/۶۴	-۰/۳۰	۴۰/۶۵	-۰/۴۳	۲۶/۸۴	-۰/۲۴	۱۸/۹۵	-۰/۳۱	۱۵/۷۸	-۰/۲۳	۳۰/۸۳	-۰/۲۵	۲۴/۹۸	-۰/۳۶
۹	۲۶/۳۸	-۰/۴۱	۲۱/۴۴	-۰/۲۳	۴۳/۰۱	-۰/۴۸	۲۸/۸۱	-۰/۳۴	۲۰/۷۱	-۰/۳۵	۱۶/۹۵	-۰/۲۳	۳۲/۲۹	-۰/۳۴	۲۶/۸۸	-۰/۳۱
۱۰	۲۷/۳۶	-۰/۴۷	۲۲/۶۲	-۰/۲۷	۴۴/۳۸	-۰/۵۳	۳۰/۰۲	-۰/۳۸	۲۱/۷۵	-۰/۴۶	۱۷/۶۳	-۰/۳۷	۳۳/۰۰	-۰/۴۴	۲۸/۰۷	-۰/۲۹



شکل ۹- بیشینه جابجایی و شتاب مطلق طبقات سازه مورد مطالعه در زلزله‌های مختلف برای دو حالت با و بدون TMD

استفاده از مدل‌های ارائه شده، بدون نیاز به محاسبات وقت‌گیر موردنیاز در رویه‌های بهینه‌یابی مبتنی بر جستجو، پارامترهای بهینه TMD را می‌توان برای یک سیستم اصلی میرا در معرض اغتشاش سفید با دقت بالایی برآورد کرد. همچنین نشان داده شد که فرمول‌های صریح ریاضی که برای سیستم اصلی در معرض تحریک پایه اغتشاش سفید ارائه شده‌اند، برای سیستم‌های در معرض تحریک پایه اغتشاش سفید فیلتر شده نیز قابل استفاده می‌باشند. به بیان دیگر، اختلاف محسوسی میان نسبت فرکانس تنظیم و میرایی بهینه حاصل از فرمول‌های ارائه شده در دو حالت مذکور وجود ندارد. این نتیجه می‌تواند برای کاربردهای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها به کمک TMDها مورد توجه مهندسين زلزله قرارگیرد. در انتها، کارائی مدل‌های ریاضی پیشنهاد شده برای یک سازه در معرض زلزله‌های مختلف ارزیابی گردید. نتایج حاصل، توانمندی مدل‌های ریاضی پیشنهاد شده را در تخمین بهینه سیستم TMD برای سازه‌های در معرض زلزله تایید می‌کند.

#### ۱۰- مراجع

- [1] Datta TK (1996) Control of dynamic response of structures. In: Indo-US symposium on emerging trends in vibration and noise engineering 1: 18-20.

جدول ۴- متوسط درصد کاهش پاسخ‌های بیشینه در

زلزله	زلزله‌های مختلف	
	درصد کاهش شتاب مطلق (%)	درصد کاهش جابجایی (%)
ال سنترو	۱۵/۴۶	۱۹/۸۸
هاچینو	۱۶/۵۷	۳۷/۶۴
کوبه	۱۲/۹۶	۲۱/۸۲
نورتریج	۹/۷۳	۲۰/۱۹
میانگین همه زلزله‌ها	۱۳/۶۸	۲۴/۸۸

#### ۹- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از جستجوی بهینه پارامترهای سیستم TMD با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته برای یک سیستم اصلی تحت تحریک اغتشاش سفید، مدل‌های ریاضی جدیدی، مبتنی بر رویه تحلیل رگرسیون، برای تخمین بهینه پارامترهای TMD ارائه شدند. مدل‌های پیشنهادی، از توانمندی بالایی جهت تخمین مقادیر بهینه پارامترهای TMD برخوردار بوده، می‌توان به‌سهولت از آن‌ها در کاربردهای مهندسی بهره برد. ارزیابی کارایی مدل‌های پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های پیشنهاد شده در مراجع نشان داد که مدل‌های ریاضی ارائه شده خطای کمتر و همبستگی بیشتری را با داده‌های بهینه حاصل از بکارگیری الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی فاخته فراهم می‌آورند. لذا با

- [18] Leung AYT, Zhang H (2009) Particle swarm optimization of tuned mass dampers. *Eng Struct* 31(3): 715-28.
- [19] Salvi J, Rizzi E (2012) A numerical approach towards best tuning of tuned mass dampers In: *Proc 25th Inter Conf noise Vib Eng (ISMA)* 17: 2419-2434.
- [20] Hadi MN., Arfiadi Y (1998) Optimum design of absorber for MDOF structures. *J Struct Eng (ASCE)* 124(11): 1272-80.
- [21] Singh MP, Singh S, Moreschi LM (2002) Tuned mass dampers for response control of torsional buildings. *Earthq Eng Struc Dyn* 31(4): 749-69.
- [22] Desu NB, Deb SK, Dutta A (2006) Coupled tuned mass dampers for control of coupled vibrations in asymmetric buildings. *Structu Control Hlth* 13(5): 897-916.
- [23] Etedali S, Sohrabi MR, Tavakoli S (2013). An independent robust modal PID control approach for seismic control of buildings. *J Civil Eng Urban* 3(5): 279-291.
- [24] Mohebbi M, Shakeli K, Ghanbarpour Y, Majzoub H (2013) Designing optimal multiple tuned mass dampers using genetic algorithms (GAs) for mitigating the seismic response of structures. *J Vib Control* 19(4): 605-25.
- [25] Leung AYT, Zhang H, Cheng CC, Lee LL (2008) Particle swarm optimization of TMD by non-stationary base excitation during earthquake. *Earthq Eng Struc Dyn* 37(9): 1223-46.
- [26] Bekdaş G, Nigdeli SM (2011) Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search optimization of Tuned Mass Damper Parameters. *Eng Struct* 33(9): 2716-23.
- [27] Farshidianfar A, Soheili S (2013) Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil-structure interaction. *Soil Dyn Earthq Eng* 51: 14-22.
- [28] Yang XS, Deb S (2009) Cuckoo search via Lévy flights. *The world cong on nature and biologically inspired computing (NaBIC)-IEEE* pp. 210-214.
- [29] Yang XS, Deb S (2013) Cuckoo search: recent advances and applications. *Neural Comput Appl* 24(1): 169-74.
- [30] Civicioglu P, Besdok EA (2013) A conceptual comparison of the Cuckoo-search, particle swarm optimization, differential evolution and artificial bee colony algorithms. *Artif Intell Rev* 39(4): 315-346.
- [31] Yang XS, Deb S (2013) Multi objective cuckoo search for design optimization. *Comput Oper Res* 40(6): 1616-24.
- [2] Ormondroyd J, Den Hartog J (1928) The theory of the dynamic vibration absorber. *J Appl Mech-T ASME* 50(7): 11-22.
- [3] Den Hartog JP (1947) *Mechanical vibrations*. 3rd edn. McGraw-Hill, New York.
- [4] Bishop RED, Welbourn DB (1952) The problem of the dynamic vibration absorber. *Engineering*, London.
- [5] Snowdon JC (1959) Steady-state behavior of the dynamic absorber. *J Acoust Soc Am* 31(8): 1096-103
- [6] Falcon KC, Stone BJ, Simcock WD, Andrew C (1967) Optimization of vibration absorbers: A graphical method for use on idealized systems with restricted damping. *J Mech Eng Sci* 9(5): 374-81.
- [7] Ioi T, Ikeda K (1978) On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system. *B JSME* 21(151): 64-71.
- [8] Warburton GB, Ayorinde EO (1980) Optimum absorber parameters for simple systems. *Earthq Eng Struc Dyn* 8(3): 197-217
- [9] Ayorinde EO, Warburton GB (1980) Minimizing structural vibrations with absorbers. *Earthq Eng Struc Dyn* 8(3): 219-36
- [10] Bapat VA, Kumaraswamy HV (1979) Effect of primary system damping on the optimum design of an untuned viscous dynamic vibration absorber. *J Sound Vib* 63(4): 469-74.
- [11] Thompson AG (1980) Optimizing the un-tuned viscous dynamic vibration absorber with primary system damping: A frequency locus method. *J Sound Vib* 73(3): 469-72.
- [12] Sadek F, Mohraz B, Taylor AW, Chung RM (1997). A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Earthq Eng Struc Dyn* 26(6): 617-36.
- [13] Warburton GB (1982) Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthq Eng Struc Dyn* 10(3): 381-401.
- [14] Marano GC, Greco R, Chiaia B (2010) A comparison between different optimization criteria for tuned mass dampers design. *J Sound Vib* 329(23): 4880-90.
- [15] Tsai HC, Lin GC (1993) Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady state response of support-excited and damped systems. *Earthq Eng Struc Dyn* 22(11): 957-73.
- [16] Bakre SV, Jangid RS (2007) Optimal parameters of tuned mass damper for damped main system. *Structu Control Hlth* 14(3): 448-70.
- [17] Bandivadekar TP, Jangid RS (2013) Optimization of multiple tuned mass dampers for vibration control of system under external excitation. *J Vib Control* 19(12): 1854-71.



- [37] Rajabioun R (2011) Cuckoo Optimization Algorithm. *Appl Soft Comput* 11(8): 5508-18
- [38] Valian E, Tavakoli S, Mohanna S, Haghi A (2013) Improved cuckoo search for reliability optimization problems. *Comput Ind Eng* 64(1): 459-68.
- [39] Keshtegar B, Miri M (2014) Reliability analysis of corroded pipes using conjugate HL–RF algorithm based on average shear stress yield criterion. *Eng Fail Anal* 46:104-17.
- [40] Kanai K (1957) Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground. *Bull Earthq Res Ins (BERI)* 35: 309-325.
- [41] Tajimi H (1960) A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake. *Proc 2nd World Conf Earthq Eng (2WCEE)* 11: 781-798.
- [۴۲] محبی م، شاکری ک، مجذوب ح (۱۳۹۱) روشی بر پایه استفاده از الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شده‌ی چندگانه تحت ارتعاش زلزله. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی عمران مدرس ۱۳۸-۷۱ (۱): ۱۲.
- [31] Yang XS, Deb S (2010) Engineering optimization by cuckoo search. *Int J Math Model Numer Optim*, 1(4): 330-343.
- [32] Gandomi AH, Yang XS, Alavi AH (2013) Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems. *Eng Comput* 29(1): 17-35.
- [33] Gandomi AH, Talatahari S, Yang XS, Deb S (2013) Design optimization of truss structures using cuckoo search algorithm. *Struct Des Tall Spec* 22(17): 1330-49.
- [34] Kaveh A, Bakhshpoori T (2013) Optimum design of steel frames using cuckoo search algorithm with Lévy flights. *Struct Des Tall Spec* 54(3): 185-8.
- [35] Etedali S, Tavakoli S, Sohrabi MR (2016) Design of a decoupled PID controller via MOCS for seismic control of smart structures. *Earthq Struct* 10(5): 1067-87.
- [36] Zamani AA, Tavakoli S, Etedali S (2016) Control of piezoelectric friction dampers in smart base-isolated structures using self-tuning and adaptive fuzzy proportional–derivative controllers. *J Intell Mater Syst Struct*.