

## Extracting optimal parameters and evaluating the performance of the self-control system using frequency and time domain analyses

Nahmat Khodaie<sup>1\*</sup>

1- Assistant Professor, Islamic Azad University, Khormuj Branch

### ABSTRACT

Structural systems with self-control capabilities, such as tall buildings with isolated suspended parts or controlled Mega-Sub systems, in which a part of the main structure acts as a vibration-absorbing substructure, have been proposed and noticed in recent years. In this research, the control performance of the self-control system was investigated by presenting a two-degree-of-freedom conceptual model with the primary damped mass under the white-noise random excitation and the vibrations of both masses are controlled. The optimal parameters and control performance of self-control system and TMD were compared using the frequency-domain analysis, and the vibration of the masses was also obtained with time-domain analysis. An example of a tall building under wind loads was presented and analyzed. The results showed that the efficiency of the self-control system increases with mass ratio. For example, in the conceptual model, for a mass ratio of 30%, the displacement was reduced by 70.7% compared to the uncontrolled state. The time-domain analysis showed that in the self-control system, the vibrations of the two masses are similar, but they have a phase difference, which provides the basis for controlling the vibrations by the damper. For the tall building, the self-control system played an effective role in controlling the structure's vibrations, especially the crosswind direction, which were more dominant than the along-wind vibrations. The optimal parameters of the along-wind response compared to the crosswind one were closer to the parameters of the conceptual model. For the tall building, providing a more accurate structural model and loading was associated with more favorable optimization results.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 27 July 2024

**Revise Date:** 02 December 2024

**Accept Date:** 31 December 2024

### Keywords:

Dynamic vibration absorber,  
Random vibration,  
Self-control ability,  
Passive control,  
Optimization

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.466461.3456](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.466461.3456)

\*Corresponding author: Nahmat Khodaie  
Email address: [Nahmat.khodaie@uma.ac.ir](mailto:Nahmat.khodaie@uma.ac.ir)

## استخراج پارامترهای بهینه و ارزیابی عملکرد سیستم دارای قابلیت خودکنترلی با تحلیل‌های حوزه فرکانس و زمان

نهمت خدایی<sup>\*۱</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خورموج، خورموج، ایران

### چکیده

سیستم‌های سازه‌ای با قابلیت خودکنترلی مثل سازه بلند با بخش‌های معلق جدا شده یا سیستم مگاساب کنترل شده که در آن‌ها بخشی از سازه اصلی به عنوان زیرسازه جاذب ارتعاش عمل می‌کند، در سال‌های اخیر پیشنهاد شده و مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، قابلیت کنترل سیستم خودکنترلی با ارائه مدل مفهومی دو درجه آزادی با سیستم اولیه میرا تحت تحریک تصادفی نوفه سفید مورد بررسی قرار گرفت. هدف کنترل به نحوی انتخاب شد که ارتعاشات هر دو جرم کنترل شود و پارامترهای بهینه و عملکردهای کنترلی سیستم خودکنترلی و TMD با استفاده از تحلیل حوزه فرکانس مقایسه شد. همچنین، ارتعاش جرم‌ها با تحلیل حوزه زمان نیز بررسی گردید. برای ارزیابی نقش روش خودکنترلی در کاهش ارتعاشات سازه‌ها و مقایسه عملکرد آن‌ها با مدل مفهومی، مثالی از ساختمان بلند در معرض باد ارائه و بررسی شد. نتایج نشان داد کارایی سیستم خودکنترلی با افزایش نسبت جرمی بیشتر می‌شود. به‌طور مثال، در مدل مفهومی، برای نسبت جرمی ۳۰ درصد، جایجایی نسبت به حالت کنترل نشده، ۷۰/۷ درصد کاهش داشت. تحلیل حوزه زمان نشان داد در سیستم خودکنترلی، ارتعاشات جرم‌های اولیه و ثانویه مشابه هستند ولی نسبت به هم اختلاف فاز دارند که زمینه را برای کاهش ارتعاشات توسط میراگر فراهم می‌کند. برای ساختمان بلند، سیستم خودکنترلی نقش موثری در کنترل ارتعاشات سازه به‌ویژه نوسانات عرضی که غالب‌تر از ارتعاشات طولی بود، داشت. پارامترهای بهینه پاسخ طولی ساختمان در مقایسه با پاسخ عرضی، به پارامترهای مدل مفهومی نزدیک‌تر بود. برای ساختمان بلند، ارائه مدل سازه‌ای و بارگذاری دقیق‌تر، با نتایج بهینه‌سازی مطلوب‌تری همراه بود.

کلمات کلیدی: جاذب ارتعاش دینامیکی، ارتعاشات تصادفی، قابلیت خودکنترلی، کنترل غیرفعال، بهینه‌سازی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.466461.3456">10.22065/jsce.2024.466461.3456</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.466461.3456">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.466461.3456</a>	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	۱۴۰۳/۱۰/۱۱	۱۴۰۳/۱۰/۱۱	۱۴۰۳/۰۹/۱۲	۱۴۰۳/۰۵/۰۶
نهمت خدایی					*نویسنده مسئول:	
Nahmat.khodaie@iau.ac.ir					پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

سیستم جاذب ارتعاش دینامیکی، وسیله کنترل غیرفعال است که به جرم اولیه تک درجه آزادی متصل می‌شود تا ارتعاشات آن را کاهش دهد. این سیستم در مهندسی عمران، تحت عنوان میراگر جرمی تنظیم شونده یا TMD شناخته می‌شود که در آن، جرم ثانویه با مجموعه موازی فنر و میراگر به جرم اصلی متصل می‌شود. در طراحی TMD، هدف از بهینه‌سازی، کنترل ارتعاشات جرم اصلی است [۱]. با توجه به اهمیت و کاربرد گسترده سیستم جاذب ارتعاش در صنایع، بهینه‌سازی آن در تحقیقات متعدد و به اشکال مختلف مورد توجه قرار گرفته است. اورموندرویود و دن هارتوگ<sup>۱</sup> مدل استاندارد سیستم جاذب ارتعاش را ارائه کردند که در آن، جرم اولیه نامیرا توسط سیستم موازی سختی و میرایی به جرم ثانویه متصل است [۲]. آن‌ها معیار بهینه سازی  $H_{\infty}$  را معرفی نمودند که هدف آن به حداقل رساندن مقدار دامنه تشدید جرم اولیه در معرض تحریک هارمونیک بود. هانکام شرایط تنظیم بهینه  $H_{\infty}$  را با استفاده از نظریه نقاط ثابت مطالعه کرد [۳]. براک<sup>۲</sup> راه حلی تحلیلی برای نسبت میرایی بهینه سیستم جاذب ارتعاش به دست آورد [۴]. کراندال و مارک<sup>۳</sup> معیار بهینه سازی  $H_2$  را پیشنهاد کردند که واریانس جابجایی جرم اولیه را در حالتی که تحت ارتعاش تصادفی نوفه سفید قرار دارد به حداقل می‌رساند [۵]. واربرتون<sup>۴</sup> پارامترهای بهینه سیستم جاذب ارتعاش را برای انواع مختلف نیروهای تحریک استخراج کرد [۶ و ۷]. نیشهارا و آسامی<sup>۵</sup> راه‌حلی را برای بهینه‌سازی دقیق سیستم جاذب ارتعاش ارائه کردند و نتایج به دست آمده را با نتایج حاصل از تئوری نقاط ثابت مقایسه نمودند [۸]. ویانا و همکاران از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها برای رسیدن به پارامترهای بهینه جاذب ارتعاش دینامیکی استفاده کردند [۹]. براون و سینگ<sup>۶</sup> از روش بهینه‌سازی مینی‌ماکس<sup>۷</sup> استفاده کردند که حداکثر پاسخ جرم اولیه را در طیف وسیعی از فرکانس‌های تحریک شده کمینه می‌کند [۱۰]. تیگلی<sup>۸</sup> پارامترهای طراحی بهینه دقیق جاذب ارتعاش را برای معیار  $H_2$  سرعت و راه‌حلی تقریبی برای پاسخ‌های جابجایی و شتاب پیشنهاد کرد [۱۱]. هدف اصلی در مطالعات پیشین، کنترل و کمینه نمودن ارتعاشات جرم اصلی بوده است.

سیستم TMD نمونه‌ی کاربردی از جاذب ارتعاش است که برای کنترل ارتعاشات ناشی از باد و زلزله در انواع سازه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. اعتدالی و همکاران عملکرد کنترل لرزه‌ای میراگرهای جرمی تنظیم شونده معمولی و اصطکاکی را برای کاهش ارتعاشات ساختمان‌های بلند تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل با استفاده از الگوریتم چندهدفه جستجوی فاخته مورد مطالعه قرار دادند [۱۲]. حسینایی و همکاران از الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر آموزش و یادگیری برای طراحی بهینه سیستم‌های کنترل فعال و غیرفعال در سازه‌های تحت تحریک زلزله استفاده نمودند [۱۳]. مطالعات مشابه دیگری تاثیر میراگرهای جرمی منفرد و چندگانه را در حالات غیرفعال و فعال برای کنترل ارتعاشات سازه‌های انعطاف‌پذیر مطالعه نموده‌اند [۱۹-۱۴].

در سال‌های اخیر، سیستم‌های سازه‌ای جدیدی پیشنهاد شده‌اند که در آن‌ها، از بخش یا بخش‌هایی از سازه اصلی به عنوان زیرسازه جاذب ارتعاش دینامیکی استفاده می‌شود. در این سازه‌ها که دارای قابلیت خودکنترلی هستند، نیازی به جرم اضافی برای کاهش ارتعاشات نیست و بخشی از سازه اصلی به عنوان کنترل کننده عمل می‌نماید؛ لذا، نسبت جرمی جاذب ارتعاش افزایش می‌یابد و ظرفیت کنترل

<sup>1</sup> Ormondroyd and Den Hartog

<sup>2</sup> Brock

<sup>3</sup> Crandall and Mark

<sup>4</sup> Warburton

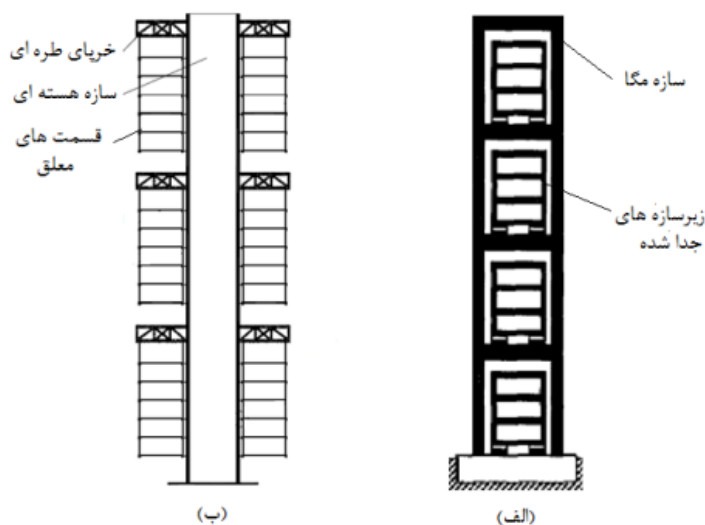
<sup>5</sup> Nishihara and Asami

<sup>6</sup> Minimax

<sup>7</sup> Minimax

<sup>8</sup> Tigli

ارتعاش بالاتری نسبت به سیستم‌های قبلی مثل TMD قابل تامین است. در این سازه‌ها، هدف کنترل دوگانه است، به این معنی که ارتعاشات هر دو بخش سازه اصلی و زیرسازه باید کنترل شود. سازه مگاساب کنترل شده<sup>۹</sup> (شکل ۱-الف)، یکی از سیستم‌های کنترلی مذکور است. در این سیستم، سازه مگا یا اصلی، شامل زیرسازه‌های جدا شده است که هر کدام از چندین طبقه تشکیل شده‌اند و نقش جاذب ارتعاش دارند [۲۳-۲۰]. ساختمان‌های بلند با بخش‌های طره‌ای آویزان نیز در برخی مطالعات برای ایده فوق مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند (شکل ۱-ب) [۲۴ و ۲۵]. استفاده از پوسته بیرونی نمای ساختمان [۲۶] یا طبقه بالای جدا شده از یک ساختمان بتن‌آرمه مرتفع [۲۷] نمونه‌های دیگری از سیستم‌های مطالعه شده با قابلیت خودکنترلی بوده‌اند. ایمانی و خدایی عملکرد سیستم سازه‌ای خودکنترلی را با مدل ساده شده دو درجه آزادی بررسی نمودند. در مطالعه مذکور، سازه اصلی به صورت نامیرا در نظر گرفته شد و پاسخ سیستم در حالی که جرم اصلی تحت ارتعاش هارمونیک قرار دارد با استفاده از تئوری نقطه ثابت بهینه گردید [۲۸].



شکل ۱- نمونه‌هایی از سازه‌های با قابلیت خودکنترلی: الف) سیستم مگاساب کنترل شده [۲۰] ب) سازه هسته‌ای با قسمت‌های معلق [۲۴]

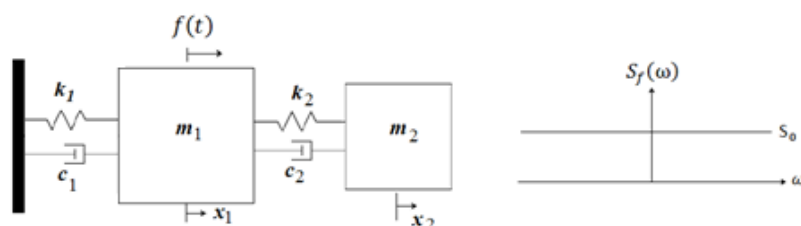
با وجود انجام تحقیقات پیشین در زمینه سیستم‌های سازه‌ای با قابلیت خودکنترلی، مطالعات پایه‌ای و مفهومی در زمینه عملکرد سیستم مذکور و مقایسه آن با سیستم TMD خیلی محدود است. با توجه به هدف دوگانه کنترل در سیستم مورد مطالعه، بهینه‌سازی آن از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اینکه بارهای باد و زلزله ماهیت تصادفی دارند، بهینه‌سازی‌های مبتنی بر بارگذاری تصادفی نوفه سفید<sup>۱۰</sup>، نتایج واقع‌بینانه‌تری را در مقایسه با بار هارمونیک ارائه می‌دهند. در این مطالعه، عملکرد سیستم خودکنترلی با مدل دو درجه آزادی که در آن سیستم اصلی به صورت میرا فرض شده و تحت بارگذاری نوفه سفید قرار دارد، شبیه‌سازی شد. پاسخ سیستم با فرض عملکرد خودکنترلی بهینه شد و نتایج آن با پاسخ سازه کنترل نشده و کنترل شده با TMD مقایسه گردید. همچنین، برای بررسی تاثیر روش خودکنترلی در کاهش ارتعاشات سازه‌ها و مقایسه عملکرد سیستم و پارامترهای بهینه‌سازی آن با مدل مفهومی دو درجه آزادی، مثالی از ساختمان بلند در معرض ارتعاشات ناشی از باد ارائه و بررسی شد. ساختمان بلند به صورت تیر طره‌ای قائم چند درجه آزادی با جرم‌های متمرکز در گره‌ها مدل شد و پاسخ سازه در دو امتداد عرضی و طولی با استفاده از تحلیل حوزه فرکانس برای سه حالت کنترل نشده، کنترل شده با TMD و کنترل شده با روش خودکنترلی تعیین گردید و مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

<sup>9</sup> Controlled mega-sub system

<sup>10</sup> White-noise excitation

## ۲- مدل تحلیلی و معادله ارتعاش

سیستم دو درجه آزادی مشتمل بر جرم اولیه به عنوان نماینده سازه اصلی و جرم ثانویه به عنوان جاذب ارتعاش دینامیکی در شکل (۲) نشان داده شده است. در مدل کلاسیک جاذب ارتعاش دینامیکی و روابط بهینه ارائه شده برای آن، فرض بر این است که جرم اصلی فاقد اتصال میرایی یا به عبارت دیگر نامیرا است. با توجه به اینکه در عمل سازه‌ها دارای میرایی (هر چند کم) هستند، در این تحقیق، جرم اصلی با اتصال میرایی فرض می‌شود و مقادیر بهینه سیستم برای نسبت‌های میرایی ۱ و ۲ درصد تعیین می‌شود.



شکل ۲- مدل جاذب ارتعاش دینامیکی برای سیستم اصلی میرا تحت ارتعاش نوفه سفید

برای سیستم دو درجه آزادی نشان داده شده، معادله ارتعاش به صورت زیر است:

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

که در آن  $\mathbf{X}$  بردار جابجایی‌ها و  $\mathbf{F}$  بردار نیروهای خارجی است؛  $\mathbf{M}$ ،  $\mathbf{C}$  و  $\mathbf{K}$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی هستند که برای سیستم مورد نظر، از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

برای استخراج پارامترهای بهینه در حالات مورد نظر، پارامترهای زیر تعریف می‌شوند:

مجدور فرکانس طبیعی جرم اولیه	$\omega_1^2 = k_1 / m_1$
مجدور فرکانس طبیعی جرم ثانویه	$\omega_2^2 = k_2 / m_2$
نسبت جرمی میراگر	$\mu = m_2 / m_1$
نسبت فرکانسی	$f = \omega_2 / \omega_1$
میرایی جرم اولیه	$c_1 = 2\zeta_1 m_2 \omega_1$
میرایی جرم ثانویه	$c_2 = 2\zeta_2 m_2 \omega_2$

## ۳- ماتریس توابع پاسخ فرکانسی و جابجایی سیستم

با توجه به معادله (۱)، ماتریس توابع پاسخ فرکانسی بین جابجایی‌های سازه و نیروهای خارجی از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$H(\omega) = (-\omega^2 M + i\omega C + K)^{-1} \quad (3)$$

که در آن،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای و  $i$  واحد موهومی است. بر اساس تئوری ارتعاشات تصادفی، واریانس جابجایی جرم‌های اصلی و ثانویه در حالی که  $S_f(\omega)$  تابع تراکم نیروی وارده بر جرم اول باشد از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$E[x_1^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_f(\omega) |H_{11}(\omega)|^2 d\omega, \quad E[x_2^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_f(\omega) |H_{12}(\omega)|^2 d\omega \quad (4)$$

روابط فوق مربوط به تحلیل حوزه فرکانس است. پارامترهای حاصل در عین مفید بودن، وضعیت لحظه‌ای ارتعاشات جرم‌ها نسبت به همدیگر را نشان نمی‌دهد. لذا در این تحقیق، علاوه بر تحلیل حوزه فرکانس، برای مقایسه پاسخ‌های دو جرم نسبت به همدیگر در لحظات مختلف، از تحلیل حوزه زمان نیز استفاده شد. برای این منظور، تاریخچه زمانی نیروی خارجی، با داشتن تابع طیف تراکم، با استفاده از رابطه زیر شبیه‌سازی شد [۲۹]:

$$f(t) = 2\sqrt{\Delta\omega} \sum_{j=1}^n \sqrt{S_f(\omega_j)} \cos(\omega_j t + \phi_j) \quad (5)$$

که در آن:

$$\omega_j = (j-1)\Delta\omega + \frac{1}{2}\Delta\omega; \quad j=1,2,\dots,n; \quad \Delta\omega = \frac{\omega_u}{n}$$

$n$  تعداد المان‌های  $\Delta\omega$ ،  $\omega_u$  حد بالای فرکانس شبیه‌سازی،  $\phi_j$  زوایای فاز تصادفی که به‌طور یکنواخت بین صفر تا  $2\pi$  توزیع شده است و  $S_f(\omega)$  ماتریس تابع طیف تراکم نیرو را نشان می‌دهند.

برای سیستم جاذب ارتعاش دینامیکی کلاسیک با سیستم اولیه نامیرا، مقادیر بهینه نسبت‌های فرکانسی و میرایی، با فرض اینکه جرم اصلی تحت ارتعاشات تصادفی با تابع تراکم نوفه سفید قرار داشته و هدف بهینه‌سازی، کنترل جابجایی جرم اصلی باشد از رابطه زیر تعیین می‌شود [۶ و ۷]:

$$f_{opt} = \frac{(1+\mu/2)^{1/2}}{1+\mu}, \quad \zeta_{2opt} = \sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{4(1+\mu)(1+\mu/2)}} \quad (6)$$

همان‌طور که در بخش‌های قبلی تشریح شد، پارامترهای فوق با هدف کنترل جابجایی جرم اصلی به دست آمده‌اند و کنترل دامنه جابجایی جرم ثانویه مد نظر نبوده است، در حالی که در سیستم‌های با قابلیت خودکنترلی، جرم ثانویه یا جاذب ارتعاش نیز بخشی از سازه اصلی است و در نتیجه دامنه جابجایی هر دو جرم باید محدود شود که در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

#### ۴- مراحل انجام تحقیق برای تعیین پارامترهای بهینه سیستم‌ها

برای استخراج پارامترهای بهینه سیستم‌های مورد مطالعه در حالات مختلف، مدل مفهومی دو درجه آزادی نشان داده شده در شکل (۲) در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد و اهداف کنترلی برای حالات مختلف تعیین گردید. سپس، با استفاده از تابع کمینه‌یاب متلب، مقادیر بهینه نسبت‌های فرکانسی و میرایی تعیین شدند. گام‌های اصلی برنامه تهیه شده و قابلیت‌های کلیدی نرم‌افزار برای تحلیل حوزه فرکانس

به شرح ذیل بود:

- ۱- تعریف پارامتر نسبت جرمی به عنوان متغیر اصلی ورودی برنامه
- ۲- تعریف مقادیر اولیه برای نسبت‌های میرایی و فرکانسی (این مقادیر در حین استفاده از تابع کمینه یاب متلب به برنامه معرفی می شود که در ادامه جزئیات آن تشریح خواهد شد).
- ۳- محاسبه ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی طبق رابطه (۲)
- ۴- تعیین ماتریس انتقال سیستم؛ ماتریس انتقال در برنامه متلب در محیط لاپلاس انجام می‌پذیرد که طبق رابطه (۳) به صورت زیر تعریف شد:

$$H(s) = (Ms^2 + Cs + K)^{-1} \quad (7)$$

که در آن،  $M$ ،  $C$  و  $K$  به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی و  $s$  متغیر لاپلاس است.

- ۵- محاسبه واریانس جابجایی جرم‌های اولیه و ثانویه؛ برای محاسبه کمیت‌های مذکور از معیار  $H_2$  که از توابع موجود در نرم افزار متلب است استفاده شد:

$$\|H\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |H(\omega)|^2 d\omega} \quad (8)$$

- با توجه به رابطه فوق و با فرض اینکه عامل تحریک از نوع نوبه سفید با شدت یک یعنی  $S_f = 1$  است، مقادیر واریانس پاسخ جرم‌ها طبق رابطه (۴) به صورت زیر قابل تعیین است:

$$E[x_1^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} |H_{11}(\omega)|^2 d\omega = 2\pi (\|H_{11}\|_2)^2 \quad (9-الف)$$

$$E[x_2^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} |H_{12}(\omega)|^2 d\omega = 2\pi (\|H_{12}\|_2)^2 \quad (9-ب)$$

- ۶- تعیین تابع هدف برای بهینه‌سازی؛ تابع هدف برای سیستم TMD، انحراف معیار پاسخ جرم اصلی و برای سیستم خودکنترلی پاسخ هر دو جرم است. تابع هدف برای هر کدام از حالات مذکور، در بخش ۵ ارائه شده است.

- ۷- تبدیل برنامه تهیه شده به تابع و تعیین نسبت‌های میرایی و فرکانسی بهینه با استفاده از ابزار کمینه‌یاب متلب که در ادامه همین بخش معرفی خواهد شد.

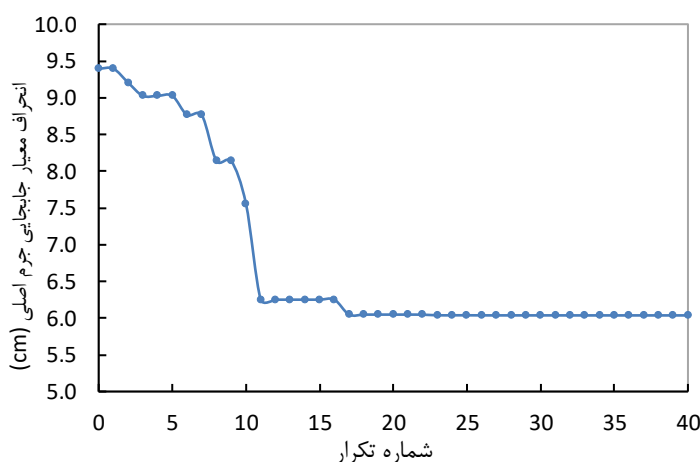
- ۸- تعیین پاسخ سیستم بر مبنای پارامترهای بهینه از رابطه (۹)

- ۹- تکرار مراحل فوق برای مقادیر مختلف نسبت جرمی

برای انجام تحلیل حوزه زمان، نخست عامل تحریک با استفاده از رابطه (۵) به صورت تابع زمانی تولید شد و به جرم اولیه اعمال گردید. سپس، تحلیل حوزه زمان در نرم افزار متلب با استفاده از ابزار Lsim انجام پذیرفت. عملکرد ابزار فوق به این صورت است که تابع انتقال سیستم و عامل تحریک در حوزه زمان را به عنوان ورودی گرفته و پاسخ درجات آزادی سیستم را در حوزه زمان به عنوان خروجی ارائه می‌دهد.

ابزار کمینه‌یاب استفاده شده در نرم‌افزار متلب، fminsearch است که مقدار حداقل تابع هدف را با استفاده از فرآیند جستجوی

تکراری می‌یابد. برای استفاده از آن، تابع هدف به همراه مقادیر اولیه حدسی از پارامترهای بهینه معرفی می‌شود و جستجوی مقادیر بهینه تا یافتن پارامترهای بهینه با میزان خطای تعریف شده، ادامه می‌یابد. ابزار مذکور از دقت و سرعت مطلوبی برخوردار است که در بخش ۵-۱، صحت آن از طریق مقایسه با روابط تئوری موجود اثبات می‌شود. هر چه مقادیر اولیه به مقادیر بهینه نزدیک‌تر باشد، سرعت و همگرایی محاسبات بهبود می‌یابد. شکل (۳) نتیجه به‌کارگیری تابع کمینه‌یاب متلب را برای سیستم TMD به‌ازای نسبت جرمی ۲ درصد، برای جرم اصلی با میرایی یک درصد نشان می‌دهد. مقادیر اولیه نسبت‌های فرکانسی و میرایی به‌ترتیب ۱/۲ و ۰/۵ در نظر گرفته شد که انحراف معیار جابجایی اولیه ۹/۳۹۴ سانتیمتر را برای جرم اصلی در پی دارد. تابع کمینه‌یاب عملیات جستجو را از نقطه مذکور که مخصوصاً دورتر از نقطه بهینه معرفی شده، آغاز نموده و پس از حدود ۲۰ مرحله تکرار، پاسخ جرم اصلی روی مقدار حداقل همگرا شده است. مقادیر بهینه نسبت فرکانسی و میرایی به‌ترتیب ۰/۹۸۴۶ و ۰/۰۶۹۱ و انحراف معیار جابجایی جرم اصلی ۶/۰۳۷ سانتیمتر به دست آمد.



شکل ۳: انحراف معیار جابجایی جرم اصلی در مقابل شماره تکرار فرآیند جستجوی پارامترهای بهینه به‌ازای  $\zeta_1 = 1\%$  و  $\mu = 2\%$

## ۵- مدل‌سازی سیستم و استخراج پارامترهای بهینه در حالات مختلف

در این تحقیق، در مرحله نخست، پارامترهای بهینه نسبت جرمی و فرکانسی به‌ازای مقادیر مختلف نسبت جرمی برای سیستم TMD تحت تحریک نوفه سفید (شکل (۲)) با شدت  $s_0 = 1 \text{ N}^2 \cdot \text{s}/\text{rad}$  تعیین شدند. در مدل مذکور، جرم اولیه  $m_1 = 100 \text{ kg}$  و سختی اولیه  $k_1 = 1 \text{ N/cm}$  فرض شد. در این حالت، هدف کنترل، کمینه نمودن جابجایی جرم اول بود. نتایج به دست آمده از این بخش با نتایج حاصل از روابط وابورتون (رابطه (۶)) مقایسه شدند تا صحت برنامه و ابزار کمینه‌یاب استفاده شده تایید شود. سپس، تابع هدف برای سیستم خودکنترلی تعیین شد و پارامترهای بهینه و پاسخ سازه تعیین و عملکرد TMD و سیستم خودکنترلی مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین، برای ارائه بهتر نتایج، از تحلیل حوزه زمان نیز استفاده شد و نتایج دو سیستم برای حالات خاصی در حوزه زمان نیز مقایسه شد. در نهایت، مثالی از ساختمان بلند در معرض باد ارائه شد و پاسخ سازه برای حالات کنترل نشده و کنترل شده با TMD و روش خودکنترلی تعیین و بررسی شد.

### ۵-۱- پارامترهای بهینه سیستم TMD

مقادیر بهینه نسبت‌های فرکانسی و میرایی برای سیستم TMD با جرم اولیه نامیرا تحت ارتعاش تصادفی نوفه سفید، با هدف کمینه

نمودن پاسخ جابجایی جرم اصلی، طبق رابطه (۶) توسط وارپورتون استخراج و ارائه شده است. برای صحت‌سنجی برنامه تهیه شده، پارامترهای بهینه در شرایط مذکور تعیین و با مقادیر محاسبه شده با رابطه وارپورتون مقایسه شد. جدول (۱) مقادیر پارامترهای بهینه را برای نسبت جرمی در محدوده ۰/۵ تا ۵ درصد مطابق رابطه وارپورتون و برنامه تهیه شده نشان می‌دهد. طبق این جدول، مقادیر استخراجی توسط نرم‌افزار انطباق دقیقی با رابطه وارپورتون دارند. لذا، برنامه تهیه شده از دقت مناسبی برای تعیین پارامترهای بهینه برخوردار است. روابط وارپورتون و سایر روابط مشابه، برای حالات خاص و محدودی از شرایط سازه‌ای، بارگذاری و هدف کنترلی ارائه شده‌اند، در صورتی که برنامه تهیه شده برای استخراج پارامترهای بهینه در حالات کلی‌تر از قبیل سازه اصلی میرا، بارگذاری‌های متنوع و اهداف بهینه‌سازی مختلفی که در مواردی از قبیل سازه‌های با قابلیت خودکنترلی مورد نیاز است قابل استفاده است.

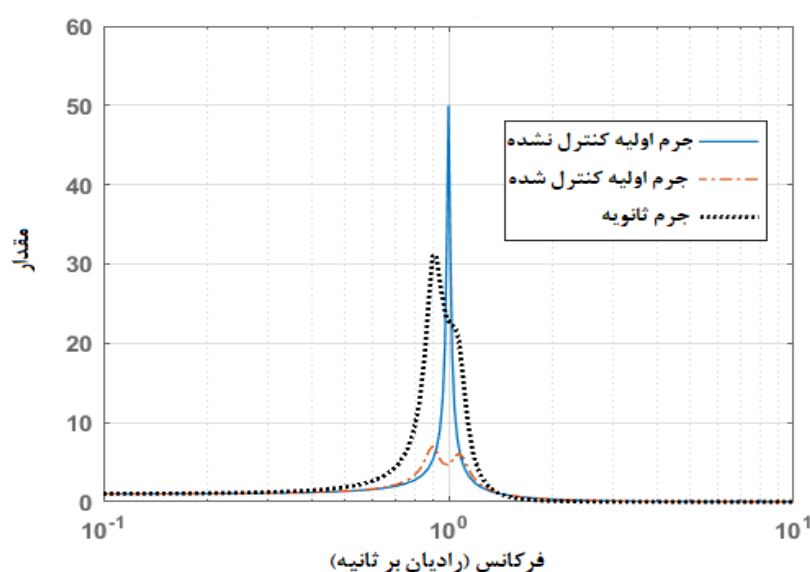
جدول ۱: پارامترهای بهینه برای مقادیر مختلف نسبت جرمی به ازای روابط وارپورتون و برنامه تهیه شده ( $\zeta_1 = 0$ )

پارامترهای بهینه تعیین شده با نرم‌افزار		پارامترهای بهینه رابطه وارپورتون		نسبت جرمی (%)
$\zeta_{2opt}$	$f_{opt}$	$\zeta_{2opt}$	$f_{opt}$	
۰/۰۳۵۲۹	۰/۹۹۶۳	۰/۰۳۵۲۹	۰/۹۹۶۳	۰/۵۰
۰/۰۴۹۸۱	۰/۹۹۲۶	۰/۰۴۹۸۱	۰/۹۹۲۶	۱/۰
۰/۰۷۰۱۹	۰/۹۸۵۳	۰/۰۷۰۱۹	۰/۹۸۵۳	۲/۰
۰/۰۸۵۶۵	۰/۹۷۸۱	۰/۰۸۵۶۵	۰/۹۷۸۱	۳/۰
۰/۰۹۸۵۴	۰/۹۷۱۱	۰/۰۹۸۵۴	۰/۹۷۱۱	۴/۰
۰/۱۰۹۷۷	۰/۹۶۴۲	۰/۱۰۹۷۷	۰/۹۶۴۲	۵/۰

جدول (۲) نسبت‌های فرکانسی و میرایی بهینه را برای  $\zeta_1 = 1\%$  تحت ارتعاش تصادفی نوفه سفید با هدف کمینه‌سازی جابجایی جرم اصلی نشان می‌دهد. نسبت جرمی بین صفر تا ۵ درصد در نظر گرفته شده و علاوه بر پارامترهای بهینه، انحراف معیار جابجایی جرم‌ها و درصد کاهش جابجایی جرم اصلی در مقایسه با حالت کنترل نشده ارائه شده است. انحراف معیار جابجایی جرم اصلی در حالت کنترل نشده  $12/53$  سانتیمتر است. با افزایش نسبت جرمی، عملکرد کنترلی افزایش می‌یابد. به‌طور مثال، برای نسبت جرمی ۰/۵ و ۵ درصد، مقادیر کاهش پاسخ جرم اصلی  $37/38$  و  $60/42$  درصد است. پاسخ جرم ثانویه نیز با افزایش نسبت جرمی کاهش می‌یابد. انحراف معیار جابجایی جرم ثانویه برای نسبت جرمی ۰/۵ و ۵ درصد به ترتیب  $73/93$  و  $16/22$  سانتیمتر است. به عنوان نتیجه کلی دیگر می‌توان گفت برای این سیستم، انحراف معیار جابجایی جرم ثانویه در مقایسه با جرم اصلی بالاست، به‌نحوی که برای محدوده بررسی شده نسبت جرمی، جابجایی جرم ثانویه در همه حالات بیشتر از جابجایی سیستم کنترل نشده است. این نتیجه نشان می‌دهد در سیستم TMD، کمینه کردن پاسخ جرم اصلی با دامنه ارتعاش بالا برای جرم ثانویه همراه است. این موضوع در شکل (۳) که تابع‌های پاسخ فرکانسی بی‌بعد (تقسیم شده بر پاسخ استاتیکی) را برای جرم اولیه و ثانویه در مقایسه با جرم اصلی کنترل نشده به ازای  $\zeta_1 = 1\%$  و نسبت جرمی ۴ درصد نشان می‌دهد مشهود است. مطابق این شکل، پاسخ حالت تشدید سیستم کنترل نشده نسبت به حات استاتیکی، تحت ارتعاش هارمونیک وارد بر آن، ۵۰ است که با استفاده از جرم جاذب ارتعاش با نسبت جرمی ۴ درصد، به حدود  $7/04$  کاهش می‌یابد. در حالی که دامنه ارتعاشی جرم ثانویه در این حالت حدود  $31/76$  برابر پاسخ استاتیکی جرم اصلی خواهد بود. لذا با وجود کاهش قابل توجه دامنه ارتعاشی جرم اولیه، دامنه جرم ثانویه بالاست و این وضعیت در سیستم‌هایی که کنترل پاسخ جرم ثانویه نیز اهمیت دارد مطلوب نخواهد بود.

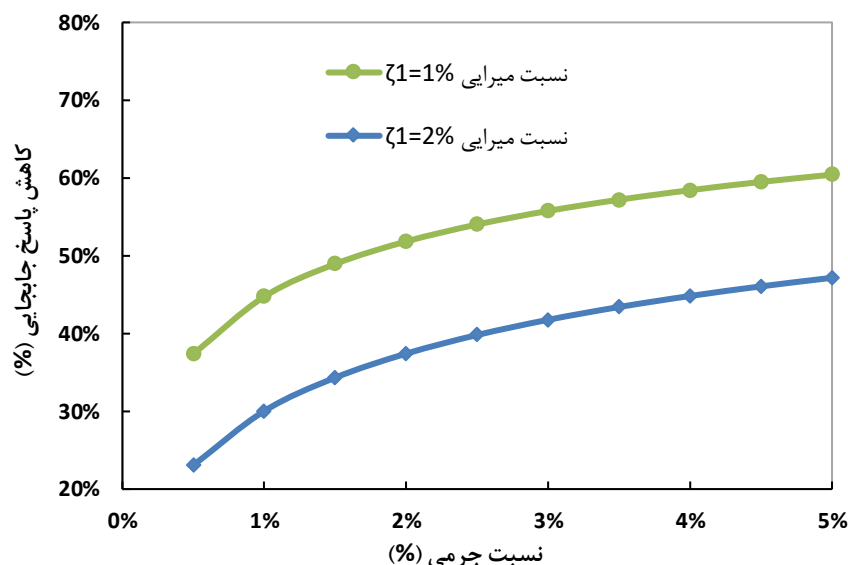
جدول ۲: پارامترهای بهینه و پاسخ جرم‌ها برای سیستم اولیه به ازای  $\zeta_1 = 1\%$

درصد کاهش پاسخ	انحراف معیار جابجایی جرم‌ها		TMD پارامترهای بهینه		نسبت جرمی (%)
	$\sigma_{y_2}$ (cm)	$\sigma_{y_1}$ (cm)	$\zeta_{2opt}$	$f_{opt}$	
		۱۲/۵۳			۰/۰
۳۷/۳۸	۷۳/۹۳	۷/۸۵	۰/۰۳۵۳	۰/۹۹۵۹	۰/۵۰
۴۴/۷۵	۴۷/۲۶	۶/۹۲	۰/۰۴۹۸	۰/۹۹۲۰	۱/۰
۵۱/۸۴	۲۹/۸۷	۶/۰۴	۰/۰۷۰۲	۰/۹۸۴۶	۲/۰
۵۵/۷۶	۲۲/۷۸	۵/۵۴	۰/۰۸۵۷	۰/۹۷۷۳	۳/۰
۵۸/۴۳	۱۸/۸۱	۵/۲۱	۰/۰۹۸۵	۰/۹۷۰۲	۴/۰
۶۰/۴۲	۱۶/۲۲	۴/۹۶	۰/۱۰۹۸	۰/۹۶۳۲	۵/۰



شکل ۴: تابع پاسخ فرکانسی بی‌بعد برای جرم اولیه و ثانویه و سیستم کنترل نشده به ازای  $\zeta_1 = 1\%$  و نسبت جرمی ۴ درصد

شکل (۵) درصدهای کاهش جابجایی جرم اولیه را برای مقادیر  $\zeta_1$  یک و دو درصد در مقابل نسبت جرمی نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود تاثیر نسبت جرمی برای سیستم اصلی با میرایی کمتر، بالاتر است. به طور مثال، درصدهای کاهش پاسخ برای نسبت جرمی ۵ درصد، برای سیستم‌های اصلی با میرایی ۱ و ۲ درصد به ترتیب حدود ۴۷ و ۶۰ درصد است. همچنین درصد کاهش پاسخ جرم اولیه با افزایش نسبت جرمی کاهش می‌یابد. لذا، مقدار نسبت جرمی مناسب با ملاحظه میزان کنترل مورد نیاز و محدودیت‌های اجرایی جرم ثانویه قابل انتخاب است.



شکل ۵: درصد کاهش جابجایی جرم اولیه در سیستم TMD در مقابل نسبت جرمی به ازای  $\zeta_1 = 1\% \& 2\%$

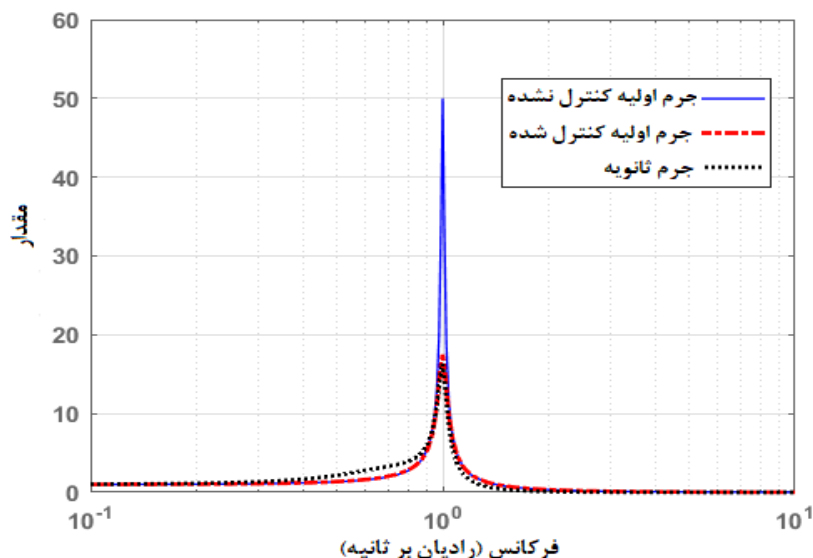
## ۲-۵- پارامترهای بهینه برای سیستم جاذب ارتعاش دینامیکی با قابلیت خودکنترلی

در سیستم جاذب ارتعاش دینامیکی با قابلیت خودکنترلی، با توجه به اینکه جرم ثانویه بخشی از سازه اصلی محسوب می‌شود، هدف کنترلی باید به نحوی تعریف شود که ارتعاشات هر دو جرم اولیه و ثانویه محدود شود. برای بررسی قابلیت کنترل سیستم در این حالت، مشابه حالت قبلی، مدل سازه‌ای طبق شکل (۲) در نظر گرفته شد و عامل تحریک به صورت ارتعاش تصادفی نوفه سفید فرض گردید. پس از بررسی‌های به عمل آمده، هدف کنترل در این حال به صورت زیر تعریف شد:

$$F = \left| \frac{\sigma_1}{\sigma_u} \right| + \left| \frac{\sigma_2}{\sigma_u} \right| + 0.3 \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_u} \right| \quad (10)$$

که در آن  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  به ترتیب انحراف معیار جابجایی جرم اولیه و ثانویه و  $\sigma_u$  انحراف معیار جابجایی سیستم کنترل نشده است. تابع فوق به نحوی تعریف شده است که علاوه بر کمینه کردن مجموع انحراف معیار جابجایی دو جرم، اختلاف پاسخ دو جرم نیز مد نظر قرار گرفته است. شکل (۶) نتایج بهینه‌سازی را در قالب منحنی تابع پاسخ فرکانسی برای جرم کنترل نشده و جرم‌های اولیه و ثانویه به‌ازای نسبت جرمی ۴ درصد و  $\zeta_1 = 1\%$  نشان می‌دهد. در این شکل نیز همانند شکل (۳)، مقدار تابع پاسخ فرکانسی بی‌بعد برابر ۵۰ است. با اعمال تابع هدف مطابق رابطه (۱۰)، مقدار ماکزیمم تابع مذکور برای جرم‌های اولیه و ثانویه به  $17/5$  و  $16/3$  رسیده است. در حالی که برای TMD، مقادیر مربوطه به ترتیب حدود ۷ و ۳۱ بودند. لذا هدف کنترلی سیستم با قابلیت خودکنترلی به نحوی انتخاب شده است که دامنه رزونانسی هر دو جرم در مقایسه با سیستم کنترل نشده تا حد مشابهی کاهش داشته‌اند. ولیکن مقدار کاهش پاسخ جرم اولیه در این حالت در مقایسه با TMD، با کاهش کمتری همراه است. لذا در سیستم با قابلیت خودکنترلی برای حصول عملکرد کنترلی بالاتر، نیاز به استفاده از نسبت‌های جرمی بزرگتری است. به همین دلیل، پارامترهای بهینه و درصد کاهش پاسخ سازه در این حالت برای محدوده نسبت جرمی گسترده‌تری تعیین شد. نتایج حاصل شامل نسبت جرمی در محدوده صفر تا ۳۲ درصد، پارامترهای بهینه، انحراف معیار جابجایی جرم اولیه و ثانویه و درصد کاهش پاسخ سیستم در جدول (۳) ارائه شده است. مطابق این جدول، نسبت فرکانسی بهینه بین  $0/611$  و  $0/687$  متغیر است و مقدار آن با افزایش نسبت جرمی کاهش می‌یابد ولی نسبت میرایی بهینه با افزایش نسبت جرمی بیشتر می‌شود. انحراف معیار

جابجایی دو جرم در هر حالت، یکسان به دست آمده است. مقدار انحراف معیار جابجایی در حالت کنترل نشده  $۱۲/۵۳$  سانتیمتر است که به طور موردی برای نسبت‌های جرمی  $۴$  و  $۳۲$  درصد به ترتیب  $۷/۴۴$  و  $۳/۵۸$  سانتیمتر به دست آمده است که به ترتیب معادل با کاهش‌های  $۴۰/۶۶$  و  $۷۱/۴۲$  درصد است.



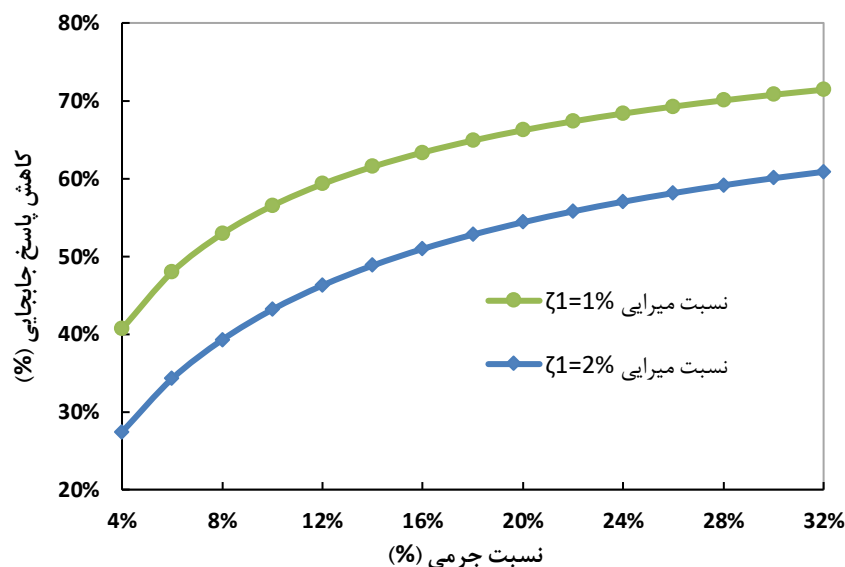
شکل ۶: تابع پاسخ فرکانسی بی‌بعد برای جرم اولیه و ثانویه و جرم اولیه کنترل نشده به ازای  $\zeta_1 = 1\%$  و نسبت جرمی  $۴$  درصد

جدول ۳: پارامترهای بهینه و پاسخ جرم‌ها برای سیستم اولیه با میرایی یک درصد

درصد کاهش پاسخ	انحراف معیار جابجایی جرم‌ها		TMD پارامترهای بهینه		نسبت جرمی (%)
	$\sigma_{y_2}$ (cm)	$\sigma_{y_1}$ (cm)	$\zeta_{2opt}$	$f_{opt}$	
		$۱۲/۵۳$			$۰/۰$
$۴۰/۶۶$	$۷/۴۴$	$۷/۴۴$	$۰/۳۸۶۸$	$۰/۶۸۷۲$	$۴/۰$
$۵۲/۸۹$	$۵/۹۰$	$۵/۹۰$	$۰/۳۹۲۸$	$۰/۶۷۴۴$	$۸/۰$
$۵۹/۲۸$	$۵/۱۰$	$۵/۱۰$	$۰/۳۹۸۰$	$۰/۶۶۲۶$	$۱۲/۰$
$۶۳/۳۴$	$۴/۵۹$	$۴/۵۹$	$۰/۴۰۲۵$	$۰/۶۵۱۲$	$۱۶/۰$
$۶۶/۲۲$	$۴/۲۴$	$۴/۲۴$	$۰/۴۱۴۰$	$۰/۶۴۰۵$	$۲۰/۰$
$۶۸/۳۵$	$۳/۹۷$	$۳/۹۷$	$۰/۴۲۳۳$	$۰/۶۳۰۳$	$۲۴/۰$
$۷۰/۰۴$	$۳/۷۵$	$۳/۷۵$	$۰/۴۳۰۹$	$۰/۶۲۰۵$	$۲۸/۰$
$۷۱/۴۲$	$۳/۵۸$	$۳/۵۸$	$۰/۴۳۹۱$	$۰/۶۱۱۲$	$۳۲/۰$

شکل (۷) تاثیر سیستم جاذب ارتعاش دینامیکی خودکنترل را در کاهش جابجایی جرم اصلی در مقابل نسبت جرمی به ازای  $\zeta_1$  یک و دو درصد نشان می‌دهد. برای  $\zeta_1 = 1\%$ ، کاهش جابجایی برای نسبت جرمی چهار درصد،  $۴۰/۶$  درصد است. با افزایش نسبت جرمی، قابلیت کنترل سیستم بیشتر می‌شود. برای مثال، به ازای نسبت‌های جرمی  $۲۰$  و  $۳۲$  درصد، کاهش پاسخ سیستم به ترتیب  $۶۶$  و  $۷۱/۴$  درصد است. مقایسه جدا (۲) و (۳) نشان می‌دهد برای سیستم خودکنترلی در مقایسه با TMD، به دلیل امکان استفاده از نسبت‌های

جرمی بالاتر، عملکرد کنترلی بالاتری قابل حصول است.

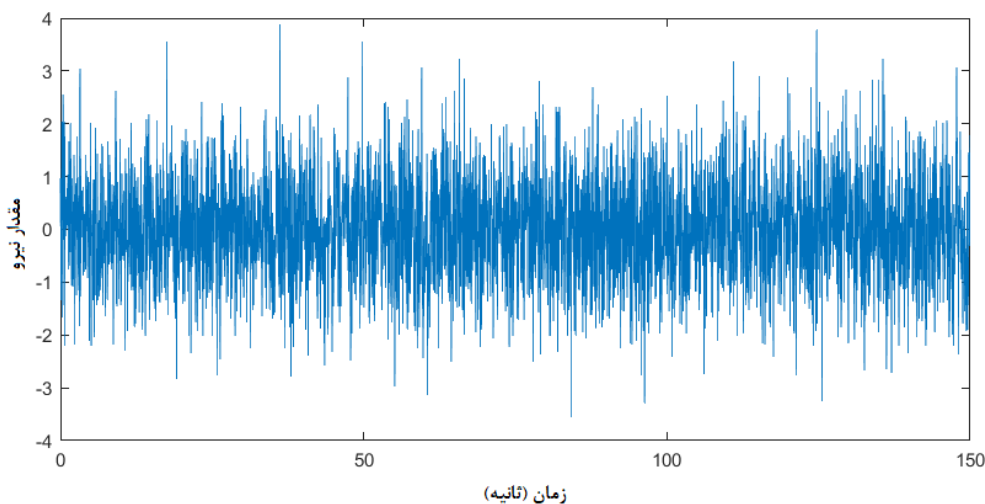


شکل ۷: تاثیر کنترلی جاذب ارتعاش دینامیکی در سیستم خودکنترل در مقابل نسبت جرمی به ازای  $\zeta_1 = 1\% \& 2\%$

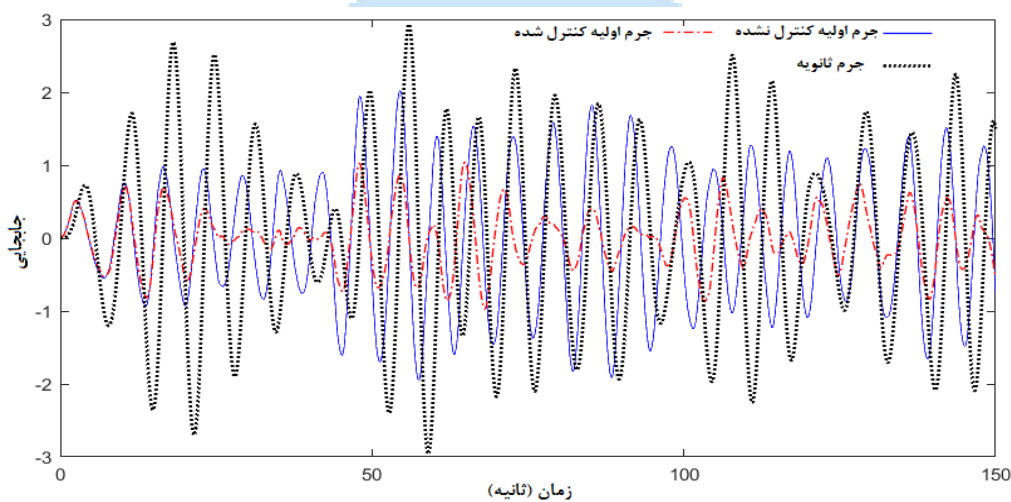
### ۵-۳- مقایسه عملکرد سیستم‌های مورد مطالعه در حوزه زمان

نتایج ارائه شده در بخش‌های قبل بر مبنای تحلیل حوزه فرکانس بود. اگر چه تحلیل مذکور نتایج مفید و موثری در قابلیت کنترل سیستم‌ها ارائه می‌دهد ولی خروجی تحلیل به صورت انحراف معیار پاسخ است و وضعیت نسبی ارتعاش دو جرم در لحظات مختلف، مشخص نمی‌شود. برای دستیابی به نتایج مذکور، از تحلیل حوزه زمان استفاده شد. برای این منظور، تاریخچه زمانی نیروی تحریک وارد بر جرم اصلی با فرض تابع تراکم نوفه سفید، با حد بالای فرکانس ده رادیان بر ثانیه و واریانس نیرو برابر یک، با استفاده از فرآیند تشریح شده در بخش ۴ برای بازه زمانی ۱۵۰ ثانیه شبیه‌سازی شد. شکل (۸) تاریخچه زمانی نیروی شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. شکل (۹) جابجایی سیستم کنترل نشده را به همراه جابجایی جرم‌های اولیه و ثانویه سیستم TMD با فرض نسبت جرمی ۴ درصد و  $\zeta_1 = 1\%$  نشان می‌دهد. مطابق شکل، کاهش دامنه جابجایی جرم اولیه با دامنه‌های ارتعاشی بالا برای جرم ثانویه همراه است.

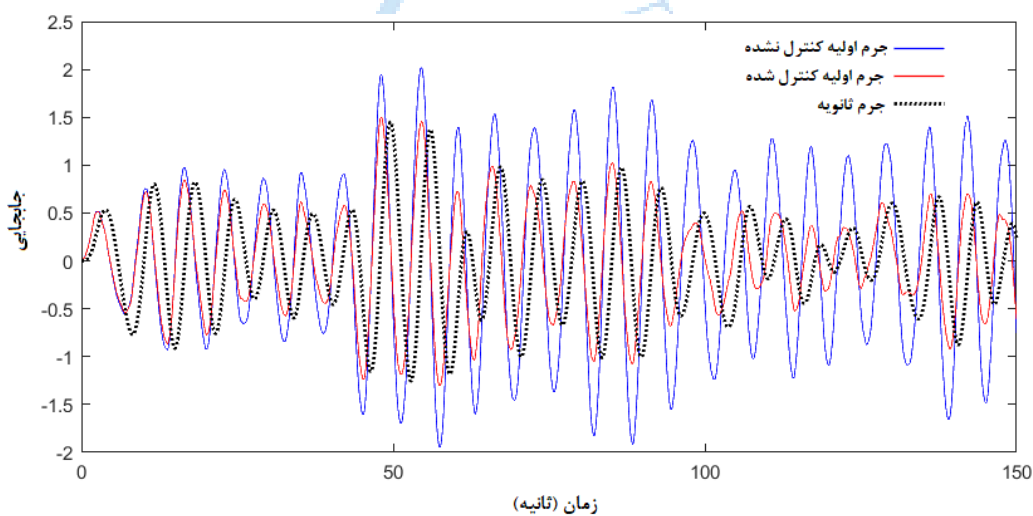
شکل (۱۰) جابجایی‌ها را برای سیستم کنترل نشده و کنترل شده بهینه‌سازی شده با فرض قابلیت خودکنترلی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه ارتعاشی جرم اولیه و ثانویه مشابه هم هستند و هر دوی آن‌ها در مقایسه با جابجایی جرم اصلی کاهش یافته‌اند. تفاوت ارتعاش دو جرم، مربوط به اختلاف فاز بین آن‌ها یا زمان وقوع مینیمم‌ها و ماکزیمم‌های منحنی است که زمینه را برای عملکرد میراگر بین آن‌ها و کنترل ارتعاشات سیستم فراهم می‌آورد.



شکل ۸: نیروی تصادفی شبیه‌سازی شده در حوزه زمان برای بازه زمانی ۱۵۰ ثانیه



شکل ۹: تغییرات جابجایی جرم کنترل نشده و جرم‌های اولیه و ثانویه در سیستم TMD به ازای نسبت جرمی ۴ درصد و  $\zeta_1 = 1\%$



شکل ۱۰: تغییرات جابجایی جرم کنترل نشده و جرم‌های اولیه و ثانویه سیستم خودکنترل به ازای نسبت جرمی ۴ درصد و  $\zeta_1 = 1\%$

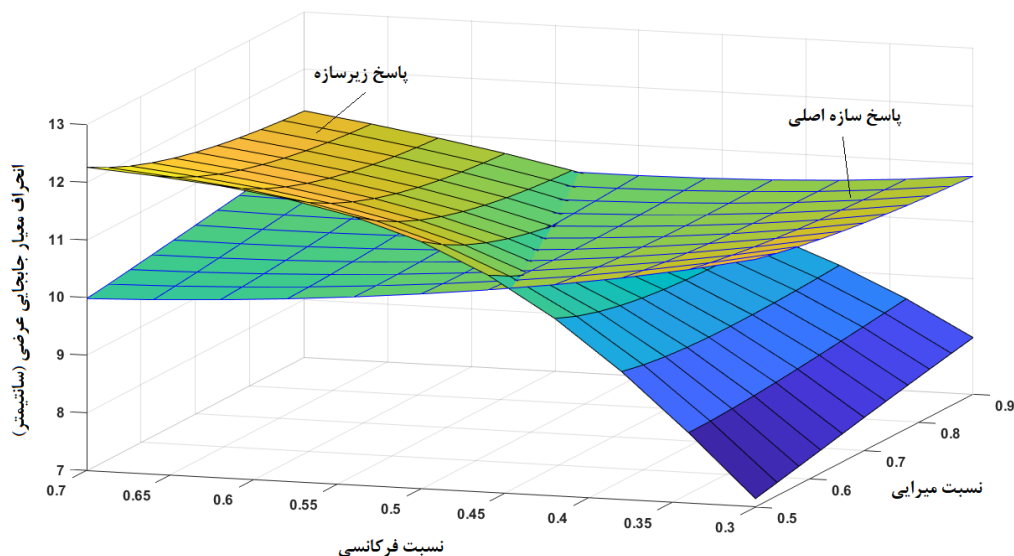
## ۴-۵- مقایسه عملکرد مدل مفهومی و سازه بلند

برای بررسی تاثیر روش خودکنترلی در کاهش ارتعاشات سازه‌ها و مقایسه عملکرد کنترلی و پارامترهای بهینه آن با مدل مفهومی دو درجه آزادی، مثالی از ساختمان بلند در معرض نیروهای دینامیکی باد ارائه و بررسی شد. برای این منظور، از مثال ساختمان بلند و خصوصیات باد ارائه شده در مرجع [۱۶] استفاده شد. ساختمان مذکور به ارتفاع ۴۰۰ متر با مقطع عرضی مربع با ابعاد پلان در ترازهای تحتانی و فوقانی به ترتیب ۵۰ و ۴۰ متر است. جرم حجمی ساختمان ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت میرایی سازه یک درصد فرض شده است. خصوصیات سختی ساختمان به نحوی انتخاب شده است که شاخص جابجایی نسبی مجاز در شرایط باد طراحی را تامین نماید. سایر فرضیات شامل مشخصات سازه، خواص مهندسی باد و اطلاعات آیرودینامیکی در مرجع مذکور قابل مشاهده است.

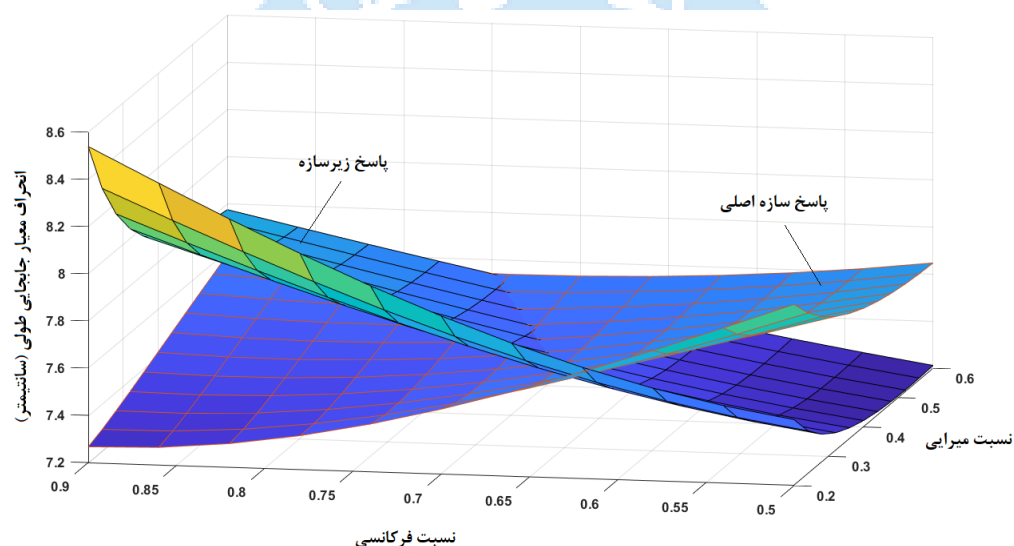
پاسخ دینامیکی ساختمان بلند در مقابل باد، شامل دو مولفه‌ی طولی (در امتداد باد) و عرضی (عمود بر جهت باد) است. مولفه طولی در اثر نوسانات سرعت باد در امتداد وزش آن رخ می‌دهد. پاسخ عرضی به ارتعاشات سازه در جهت عمود بر امتداد وزش باد گفته می‌شود. با عبور جریان باد از اطراف ساختمان، جریان‌های پیچشی در ناحیه پشت سازه شکل گرفته و موجب ایجاد نیروهای عرضی می‌شوند. فرکانس جریان‌های پیچشی وابسته به سرعت باد، عرض بادگیر و شکل مقطع عرضی سازه است. طیف نیروی عرضی باد در مقایسه با طیف نیروی طولی آن، دارای محدوده فرکانسی باریک‌تری است و وقتی که فرکانس جریان‌های پیچشی به فرکانس اصلی سازه نزدیک شود می‌تواند موجب تشدید ارتعاشات سازه شود.

در این تحقیق، ارتعاشات ناشی از باد سازه در هر دو امتداد طولی و عرضی سازه محاسبه شد. برای این منظور، مدل سازه به صورت تیر طره‌ای قائم با جرم‌های متمرکز شده در گره‌ها در نظر گرفته شد که شامل ۲۵ گره بود. برای کاهش حجم محاسبات، درجات آزادی دورانی با استفاده از روش تراکم درجات آزادی، با درجات آزادی انتقالی ادغام شد. سرعت مبنای باد ۳۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد و پاسخ تراز فوقانی سازه در امتدادهای طولی و عرضی برای سه حالت شامل سازه کنترل نشده، سازه کنترل شده با TMD با نسبت جرمی یک درصد و سازه کنترل شده با زیرسازه‌ای در بخش فوقانی آن با نسبت جرمی ده درصد در بخش فوقانی تعیین شد. نسبت‌های جرمی مذکور معادل با نسبت جرم سیستم کنترلی به جرم تعمیم یافته مود اول سازه (که برای ساختمان مورد نظر حدود ۲۰ درصد جرم کل آن بود) بودند.

برای بررسی تغییرات پاسخ‌های دینامیکی سازه اصلی و زیرسازه در مقابل نسبت‌های فرکانسی و میرایی، مقادیر انحراف معیار جابجایی طولی و عرضی بخش‌های سازه‌ای مذکور، به ازای مقادیر مختلف نسبت‌های مذکور، محاسبه شد. نتایج برای پاسخ عرضی و طولی به صورت سطوح سه‌بعدی به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. مطابق این اشکال، پاسخ سازه و زیرسازه به طور متقابل تغییر می‌کنند، به این نحو که افزایش پاسخ هر کدام از آن‌ها، با کاهش پاسخ دیگری همراه است. مقادیر بهینه نسبت‌های فرکانسی و میرایی بر روی منحنی تقاطع سطوح مذکور با کمترین مقدار پاسخ قرار دارد. طبق شکل‌های ۱۱ و ۱۲، ارتعاشات عرضی سازه بیشتر از ارتعاشات طولی هستند، همچنین، محدوده تغییرات پاسخ عرضی در مقابل نسبت‌های فرکانسی و میرایی بیشتر از آن برای پاسخ طولی است. پارامترهای نسبت فرکانسی و میرایی بهینه ساختمان بلند برای پاسخ‌های طولی و عرضی، با استفاده از تابع کمینه‌یاب نرم‌افزار متلب که در بخش ۴ معرفی شد، تعیین شدند تا با پارامترهای بهینه محاسبه شده برای مدل مفهومی دو درجه آزادی مقایسه شوند.



شکل ۱۱- تغییرات انحراف معیار جابجایی عرضی سازه اصلی و زیرسازه در مقابل نسبت‌های فرکانسی و میرایی



شکل ۱۲- تغییرات انحراف معیار جابجایی طولی سازه اصلی و زیرسازه در مقابل نسبت‌های فرکانسی و میرایی

جدول (۴) پارامترهای بهینه و انحراف معیار جابجایی طولی و عرضی تراز فوقانی ساختمان بلند در حالات کنترل نشده و کنترل شده با سیستم‌های TMD و خودکنترلی با شرایط تشریح شده در پاراگراف قبلی را به همراه نتایج مربوط به مدل مفهومی دو درجه آزادی تحت ارتعاش نوفه سفید با شدت واحد را نشان می‌دهد. انحراف معیار جابجایی طولی تراز فوقانی سازه در حالت کنترل نشده ۹/۷ سانتیمتر است که برای سازه مجهز به TMD، مقدار آن ۱۸/۷۷ درصد کاهش می‌یابد. پارامترهای نسبت فرکانسی و میرایی بهینه برای TMD در این حالت، به ترتیب ۰/۹۸۸۵ و ۰/۰۴۷۷ است که اختلاف ناچیزی با مقادیر بهینه متناظر با مدل دو درجه آزادی (به ترتیب ۰/۹۹۲ و ۰/۰۴۹۸) دارند. در سیستم خودکنترلی ساختمان بلند، پارامترهای نسبت فرکانسی و میرایی بهینه پاسخ طولی به ترتیب ۰/۶۸۲۵ و ۰/۴۰۷۰ است که در مقایسه با مقادیر متناظر در سیستم دو درجه آزادی یعنی ۰/۶۶۸۵ و ۰/۳۹۷۳ اختلاف حدود دو درصدی دارند که نشان می‌دهد مدل مفهومی، پیش‌بینی نسبتاً مناسبی از پارامترهای بهینه پاسخ طولی ساختمان بلند دارد. این نتیجه را می‌توان به دلیل تشابه نسبی بین ارتعاشات

تصادفی نوفه سفید و طیف نیروهای طولی باد دانست که در محدوده فرکانسی وسیعی توزیع شده‌اند.

در مورد پاسخ عرضی ساختمان بلند، با وجود اینکه پارامترهای بهینه‌سازی TMD ساختمان بلند و سیستم دو درجه آزادی، نزدیک به هم هستند، ولی پارامترهای بهینه سیستم‌های خودکنترل در حالات مذکور اختلاف نسبتاً زیادی دارند. نسبت‌های فرکانسی و میرایی بهینه برای ساختمان بلند ۰/۴۹۴۱ و ۰/۷۱۲۷ و برای سیستم دو درجه آزادی ۰/۶۶۸۵ و ۰/۳۹۷۳ است. لذا استفاده از مقادیر بهینه مدل مفهومی برای استخراج پاسخ عرضی ساختمان بلند با دقت مناسبی همراه نخواهد بود که این موضوع را می‌توان به دلیل تفاوت محسوس بین ارتعاش تصادفی نوفه سفید و طیف نیروی عرضی باد دانست. زیرا طیف نیروی عرضی بر خلاف نوفه سفید، دارای محدوده فرکانسی باریک است که عمدتاً وابسته به مشخصات هندسی سازه و سرعت باد می‌باشد. در مورد پاسخ عرضی سازه، استفاده از سیستم خودکنترلی با کاهش پاسخ ۳۴/۸۸ درصدی بود که عملکرد کنترلی آن بالاتر از سیستم TMD بررسی شده (با کاهش پاسخ ۳۰/۰۵ درصدی) بود.

در مجموع می‌توان گفت مدل مفهومی دو درجه آزادی با جرم اصلی تحت تحریک ارتعاش تصادفی با تراکم نوفه سفید، برای مقایسه عملکرد کنترلی سیستم TMD و خود کنترلی مفید است و در شرایطی که بارگذاری وارده به سازه (همانند نیروهای طولی باد) دارای پهنای فرکانسی عریض هستند تخمین مناسبی از پارامترهای بهینه برای سیستم‌های خودکنترل ارائه می‌دهند، با این وجود، چون سازه‌ها دارای مودهای ارتعاشی متفاوتی هستند و بر حسب مشخصات بارگذاری ممکن است مودهای مختلف فعال شوند و همچنین بارگذاری واقعی مثل نیروهای عرضی می‌تواند خواصی متفاوت با ارتعاش نوفه سفید نشان دهند، پیشنهاد می‌شود استخراج پارامترهای بهینه با مدل دقیق‌تر از سازه مانند سیستم‌های چند درجه آزادی و شرایط واقعی‌تری از بارگذاری انجام پذیرد. همچنین، با عنایت به اهداف متعدد موثر در طراحی سازه‌ها مثل جابجایی، شتاب، جابجایی نسبی طبقات و نیروهای داخلی، می‌توان از معیارهای بهینه‌سازی چندهدفی برای استخراج پارامترهای بهینه استفاده نمود.

جدول ۴: مقایسه پارامترهای بهینه مدل دو درجه آزادی مفهومی تحت ارتعاش تصادفی نوفه سفید و ساختمان بلند در معرض ارتعاشات طولی و عرضی ناشی از باد در شرایط مختلف کنترلی

درصد کاهش پاسخ	انحراف معیار جابجایی جرم‌ها		پارامترهای بهینه TMD		نسبت جرمی (%)	حالت مورد نظر	سیستم مورد مطالعه
	$\sigma_{y_2}$ (cm)	$\sigma_{y_1}$ (cm)	$\zeta_{2opt}$	$f_{opt}$			
۴۴/۷۵	۴۷/۲۶	۶/۹۲	۰/۰۴۹۸	۰/۹۹۲۰	۱/۰	کنترل نشده	مدل مفهومی دو درجه آزادی
۵۶/۵۰	۵/۴۵	۵/۴۵	۰/۳۹۷۳	۰/۶۶۸۵	۱۰/۰	سیستم خودکنترل	
۱۸/۷۷	۲۷/۴۵	۷/۸۷	۰/۰۴۷۷	۰/۹۸۸۵	۱/۰	کنترل نشده	پاسخ طولی ساختمان بلند
۲۲/۹۹	۷/۴۷	۷/۴۷	۰/۴۰۷۰	۰/۶۸۲۵	۱۰/۰	سیستم خودکنترل	
۳۰/۰۵	۵۵/۰۹	۱۱/۱۵	۰/۰۴۶۹	۰/۹۸۶۹	۱/۰	کنترل نشده	پاسخ عرضی ساختمان بلند
۳۴/۸۸	۱۰/۳۸	۱۰/۳۸	۰/۷۱۲۷	۰/۴۹۴۱	۱۰/۰	سیستم خودکنترل	

## ۶- نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف استخراج پارامترهای بهینه نسبت میرایی و فرکانسی برای مدل مفهومی سیستم خودکنترلی که در آن بخشی از جرم سازه اصلی به عنوان کنترل کننده ارتعاش عمل می‌کند، انجام گرفت. پس از صحت‌سنجی، عملکرد سیستم مذکور با سیستم TMD که در آن جرم ثانویه به صورت جرم افزودنی عمل می‌کند، مقایسه شد. پارامترهای بهینه و پاسخ برای حالات متنوعی تعیین شدند و نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفت. به موازات تحلیل حوزه فرکانس، برای بررسی وضعیت ارتعاش نسبی جرم‌ها در لحظات مختلف، از تحلیل حوزه زمان نیز استفاده شد. در ادامه، مثالی از ساختمان بلند در معرض باد ارائه شد و ارتعاشات عرضی و طولی آن در سه حالت کنترل نشده، کنترل شده با TMD و کنترل شده با روش خودکنترلی تعیین و مقایسه گردید. خلاصه‌ای از نتایج به شرح ذیل است:

- برای سیستم TMD، کاهش انحراف معیار جابجایی جرم اصلی با نسبت میرایی یک درصد، به‌ازای نسبت‌های جرمی یک و پنج درصد، به ترتیب ۴۴/۷۵ و ۶۰/۴۲ درصد بود. هدف اصلی در این سیستم کنترل پاسخ جرم اصلی است که با دامنه‌های ارتعاشی بالا برای جرم ثانویه همراه است. برای مثال، به‌ازای نسبت جرمی ۲ درصد، انحراف معیار جابجایی جرم ثانویه حدود ۵ برابر کمیت مذکور برای جرم اصلی بود.
- برای سیستم با قابلیت خودکنترلی، جرم ثانویه بخشی از سازه اصلی است و محدودیتی برای آن وجود ندارد. لذا در این حالت، نتایج برای محدوده گسترده‌تری از نسبت جرمی بین صفر تا ۳۲ درصد تعیین شد و پاسخ هر دو جرم کنترل گردید. با افزایش نسبت جرمی، قابلیت کنترل ارتعاشات سیستم افزایش داشت. به‌ازای نسبت‌های جرمی ۲۰ و ۳۲ درصد، انحراف معیار جابجایی جرم‌ها در مقایسه با جرم اصلی کنترل نشده، به‌ترتیب ۶۶/۲۰ و ۷۱/۴۲ درصد کاهش داشت که بالاتر از مقادیر حاصل برای سیستم TMD بود.
- طبق تحلیل حوزه زمان برای سیستم با قابلیت خودکنترلی، دامنه ارتعاشی جرم اولیه و ثانویه به‌طور مشابهی کاهش یافتند و ارتعاش آن‌ها با هم اختلاف فاز داشت، به این معنی که نقاط بیشینه یا کمینه آن‌ها در زمان‌های متفاوتی اتفاق می‌افتاد که این موضوع، زمینه مناسبی برای عملکرد میراگر و کاهش ارتعاش جرم‌ها فراهم می‌آورد.
- برای ساختمان بلند در معرض باد، استفاده از سیستم خودکنترلی نقش موثری در کاهش ارتعاشات عرضی و طولی سازه داشت. پارامترهای بهینه استخراج شده مدل مفهومی، انطباق نزدیکی با مقادیر متناظر در پاسخ طولی ساختمان بلند داشتند، ولی در مورد پاسخ عرضی ساختمان، تفاوت محسوسی بین پارامترهای بهینه بود که می‌تواند به دلیل ماهیت طیف نیروهای عرضی باد باشد که دارای محدوده فرکانسی باریک است.

با توجه به تجربیات حاصل از این تحقیق، مدل مفهومی بررسی شده برای سیستم خودکنترلی، معیار مناسبی برای مقایسه عملکرد آن با سیستم TMD ارائه می‌دهد. با این حال، استفاده از مدل سازه‌ای چند درجه آزادی و تخمین و اعمال دقیق نیروهای خارجی در درجات آزادی مختلف، با نتایج مطلوب‌تری برای پیش‌بینی پارامترهای بهینه و عملکرد کنترل آن همراه است.

رویکرد اصلی این تحقیق، با فرض اعمال بار به جرم یا سازه اصلی بود که در مورد بارگذاری‌هایی مثل اثر باد قابل اعمال است. ارزیابی سیستم خودکنترلی برای مهار ارتعاشات ناشی از زمین‌لرزه در سازه‌های مختلف می‌تواند زمینه‌ای برای تحقیقات بیشتر در این مورد باشد. علاوه بر این، در این تحقیق، روی پاسخ جابجایی سازه تمرکز گردید؛ در حالی که عملکرد سازه‌ها عموماً با اهداف مختلف دیگری نیز از قبیل شتاب، جابجایی نسبی طبقات و نیروهای داخلی ارزیابی می‌شود. برای این منظور، انجام تحقیقاتی در زمینه بهینه‌سازی چندهدفه سازه‌های با قابلیت خودکنترلی در معرض نیروهای دینامیکی مختلف حائز اهمیت خواهد بود.

## • مراجع:

- [1] Anh N D, Nguyen N X and Hoa L T (2013) Design of three-element dynamic vibration absorber for damped linear structures. *Journal of Sound and Vibration* 332:4482–4495.

- [2] Ormondroyd J and Den Hartog J P (1928) The theory of the dynamic vibration absorber. *ASME Journal of Applied Mechanics* 50(7) 9-22.
- [3] Hahnkamm E (1932) Die dämpfung von fundaments-chwingungen bei veranderlicher erregerfrequenz. *Ing Arch.* 4:192-201.
- [4] Brock J E (1946) A note on the damped vibration absorber. *ASME Journal of Applied Mechanics* 13(4): A-284.
- [5] Crandall S H and Mark W D (1963) *Random vibration in mechanical systems*. Academic Press, New York.
- [6] Warburton G B (1981) Optimum absorber parameters for minimizing vibration response. *Earthquake Engineering and structural Dynamics* 9:251-262.
- [7] Warburton G B (1982) Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters. *Earthquake Engineering and structural Dynamics* 10:381-401.
- [8] Nishihara O and Asami T (2002) Closed-Form Solutions to the Exact Optimizations of Dynamic Vibration Absorbers (Minimizations of the Maximum Amplitude Magnification Factors). *Journal of Vibration and Acoustics* 124(4): 576-582.
- [9] Viana F A C, Kotinda G I, Rade D A and Steffen Jr V (2008), Tuning dynamic vibration absorbers by using ant colony optimization. *Computers & Structures* 86(13-14): 1539-1549.
- [10] Brown B and Singh T (2011) Minimax Design of Vibration Absorbers for Linear Damper Systems. *Journal of Sound and Vibration* 330: 2437-2448.
- [11] Tigli O F (2012) Optimum vibration absorber (tuned mass damper) design for linear damped systems subjected to random loads. *Journal of Sound and Vibration* 331:3035-3049.
- [12] Etedali S, Akbari M, & Seifi M, (2019). MOCS-based optimum design of TMD and FTMD for tall buildings under near-field earthquakes including SSI effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 36-50.
- [13] Hosseinaei S, Ghasemi M R, Etedali S, Optimal Design of Passive and Active Control Systems in Seismic-excited Structures Using a New Modified TLBO, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(1), pp. 37-55, 2021.
- [14] Etedali S, & Mollayi N, (2018), Cuckoo Search-Based Least Squares Support Vector Machine Models for Optimum Tuning of Tuned Mass Dampers, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 18(02), 1850028.
- [15] Yang, F., Sedaghati, R. and Esmailzadeh, E., (2022), Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review, *Journal of Vibration and Control*, 28(7-8):812-836.
- [16] Khodaie N., (2020), Vibration control of super-tall buildings using combination of tapering method and TMD system, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 196, 104031.
- [17] Elias, S., Matsagar, V., & Datta, T. K., (2019), Along-wind response control of chimneys with distributed multiple tuned mass dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(1), e2275
- [18] He, Y. C., & Li, Q., (2014), Dynamic responses of a 492-m-high tall building with active tuned mass damping system during a typhoon. *Structural Control and Health Monitoring*, 21(5), 705-720.
- [19] Zhou, K., Li, Q.-S., & Li, X., (2020), Dynamic Behavior of Supertall Building with Active Control System during Super Typhoon Mangkhut, *Journal of Structural Engineering*, 146(5), 04020077.
- [20] Feng M Q and Mita A (1995) Vibration control of tall buildings using mega sub configuration. *Journal of Engineering Mechanics* 121(10):1082-1088.
- [21] Zhang X, Qin X, Cherry S, Lian L, Zhang J and Jiang J A (2009) New Proposed Passive Mega-Sub Controlled Structure and Response Control, *Journal of Earthquake Engineering* 13: 252-274.
- [22] Zhang X, Zhang J L, Wang D and Jiang J S (2005), Controlling characteristics of passive mega-sub controlled frame subjected to random wind loads, *Journal of Engineering Mechanics*, 131(10): 1046-1055
- [23] Limazie T, Zhang X and Wang X (2013), Vibration control parameters investigation of the Mega-Sub Controlled Structure System (MSCSS). *EARTHQ. STRUCT.* 5(2): 225-237.
- [24] Wang Ch, Lü Z and Tu Y (2011), Dynamic Responses of Core-Tubes with Semi-Flexible Suspension Systems Linked by Viscoelastic Dampers under Earthquake Excitation. *Advances in Structural Engineering* 14(5): 801-813.
- [25] Liu Y and Lu Z (2014), Seismic Performance and Story-Based Stability of Suspended Buildings. *Advances in Structural Engineering* 17(10) 1531-1550.
- [26] Moon K (2009), Tall Building Motion Control Using Double Skin Facades. *Journal of Architectural Engineering* 15(3): 84-90.
- [27] Makino A, Imamiya J and Sahashi N (2008), Seismic vibration control of a high-rise R.C. building by a large tuned mass damper utilizing whole weight of the top floor. *The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.

- [28] Kalehsar H.E., Khodaie N, (2018), Optimization of Response of a Dynamic Vibration Absorber Forming Part of the Main System by the Fixed-point Theory. *KSCE J Civ Eng* 22, 2354–2361.
- [29] Deodatis G (1996), Simulation of ergodic multivariate stochastic processes, *Journal of engineering mechanics*, 122, 778–787

