

## کنترل ارتعاشات ناشی از باد برج های تلویزیونی بلند با به کارگیری بخشی از سازه اصلی به عنوان زیرسازه جاذب ارتعاش

نهمت خدائی<sup>۱</sup>، هوشیار ایمانی کله سر<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### چکیده

در این مطالعه، روش جدیدی برای کنترل پاسخ برج های تلویزیونی بلند در مقابل نیروهای دینامیکی باد پیشنهاد گردید. مطابق ایده پیشنهادی، بخشی از سازه اصلی برج از آن جدا گردید و به عنوان زیرسازه جاذب ارتعاش دینامیکی در نظر گرفته شد. جهت ارزیابی روش پیشنهادی، برج ۳۱۰ متری نانجینگ در کشور چین که دارای دو سکوی تماشا در ارتفاع های ۱۸۰ و ۲۴۰ متری می باشد، مورد مطالعه قرار گرفت. پاسخ سازه برای سه حالت کنترل نشده، کنترل شده با میراگر جرمی تنظیم شونده یا TMD، و کنترل شده توسط یک زیرسازه جدا شده از سازه اصلی در محل سکوی تماشای فوقانی، مورد تحلیل قرار گرفت. سازه برج به صورت تیر طره ای قائم چند درجه آزادی در نظر گرفته شد و زیرسازه جاذب ارتعاش به صورت جرم متمرکز توسط سیستم موازی سختی و میرایی به سکوی فوقانی متصل گردید. کلیه مراحل تحلیل حوزه فرکانس، بهینه سازی سیستم، شبیه سازی تاریخچه زمانی سرعت باد و تحلیل حوزه زمان، از طریق برنامه نویسی در محیط نرم افزار متلب انجام گردید. نتایج نشان می دهد روش پیشنهادی نسبت به سیستم TMD دارای قابلیت بیشتری در کنترل ارتعاشات سازه دارد، این سیستم به طور موثری پاسخ شتاب سازه را کاهش می دهد و نقش مهمی در تامین آسایش ساکنین در شرایط بحرانی نیروهای دینامیکی باد ایفا می کند. همچنین با توجه به اینکه در روش پیشنهادی، بخشی از جرم سازه اصلی به عنوان جاذب ارتعاش عمل می نماید، محدودیت های به کارگیری سیستم TMD شامل نیاز به اختصاص بخش با ارزشی از فضای برج به جادادن یک جرم اضافی سنگین و فضای لازم برای ارتعاش آن، مرتفع می گردد.

کلمات کلیدی: پاسخ دینامیکی در برابر باد، کنترل پاسخ، جاذب ارتعاش دینامیکی، تحلیل حوزه فرکانس، سیستم خودکنترل

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.95021.1285	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.95021.1285	۱۳۹۸/۰۶/۰۱	۱۳۹۶/۱۲/۱۲	۱۳۹۶/۱۲/۱۲	۱۳۹۶/۱۱/۱۹	۱۳۹۶/۰۵/۱۹
			*نویسنده مسئول:		هوشیار ایمانی کله سر
			پست الکترونیکی:		hek@uma.ac.ir

## Wind-Induced Vibration Control of Tall TV Towers using a Part of the Main Structure as a Vibration Absorber Substructure

Nahmat Khodaie<sup>1</sup>, Houshyar Eimani Kalehsar<sup>2\*</sup>

1- Ph.D. Candidate in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2- Assistant professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

### ABSTRACT

The present paper proposes a new control strategy to mitigate wind-induced vibrations of tall TV towers. Based on the proposed idea, a part of the main structure of the tower is isolated and regarded as a dynamic vibration absorber. In order to investigate the effectiveness of the proposed system, the 310-m tall Nanjing TV tower in China, which has two observation decks at the heights 180 m and 240 m, is studied. The wind-induced responses are obtained for the following cases: uncontrolled structure; controlled structure equipped with the TMD system; and the controlled structure with an isolated substructure at the upper observation deck level. The structure is modelled as a multi-degree-of-freedom (MDOF) lumped mass vertical cantilever beam. The TMD system and the isolated substructure are modelled as a lumped mass connected to the upper observation deck by a parallel stiffness and damper system. All the calculation works related to the frequency-domain analysis, optimizing the system, simulating the wind velocity, and the time-domain analysis are carried out using the MATLAB software. The results indicate that the proposed self-control structural system has higher vibration control capacity than the TMD system. The proposed system can effectively reduce the acceleration response of the structure and improve occupant comfort during critical wind speed. In the proposed system, since a part of the main structure performs as a vibration absorber, it is not required to assign a valuable space of the observation deck for the installation of an additional mass damper and the corresponding clearance to accommodate its large strokes.

### ARTICLE INFO

Received: 10/08/2017

Revised: 08/02/2018

Accepted: 03/03/2018

### Keywords:

Wind-induced response,  
Response control,  
Dynamic vibration absorber,  
Frequency domain analysis,  
Self-control system.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.95021.1285

\*Corresponding author: Houshyar Eimani Kalehsar  
Email address: hek@uma.ac.ir

## ۱- مقدمه

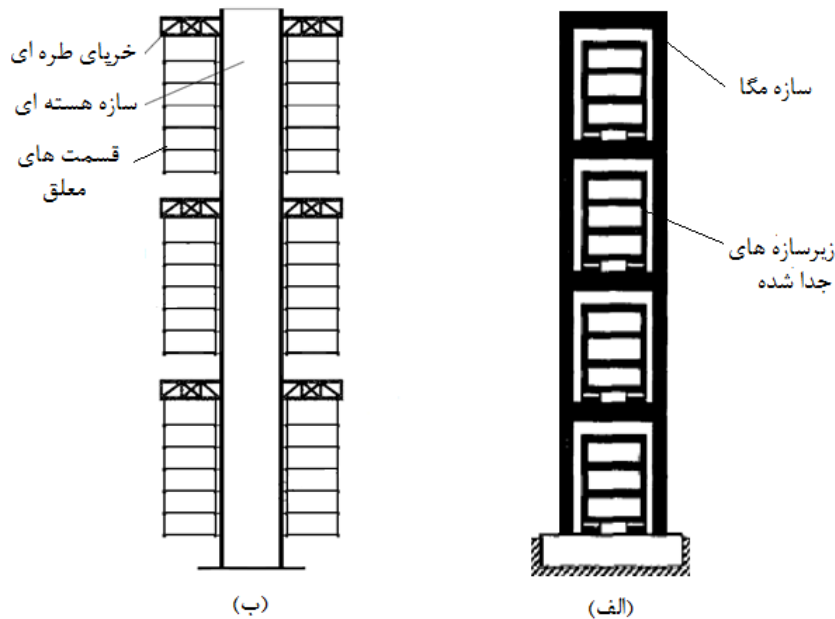
پیشرفت در تکنولوژی طراحی، روش‌های اجرایی و کیفیت مصالح در مهندسی عمران، موجب افزایش روند طراحی و ساخت سازه‌های بلند گردیده است. این موضوع لاغرتر شدن و کاهش میرایی سازه‌های بلند را در پی داشته است. با توجه به محتوای فرکانسی طیف سرعت باد، سازه‌های بلند و لاغر در مقابل نیروی دینامیکی باد حساس می‌باشند. ارتعاشات ناشی از باد از نگرانی‌های مهم در طراحی و اجرای سازه‌های بلند می‌باشد لذا کنترل و کاهش این‌گونه ارتعاشات از الزامات اساسی جهت ارتقای ایمنی سازه و آسایش ساکنین در طراحی سازه‌های بلند مدرن می‌باشد. برج‌های مخابراتی و تلویزیونی بلند از سازه‌های انعطاف‌پذیر و لاغر محسوب می‌شوند که نسبت به بارهای دینامیکی باد حساس می‌باشند. دامنه جابجایی و شتاب سکوها مشاهده‌ی برج‌ها که در قسمت فوقانی این سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود بایستی در حد آسایش و تحمل ساکنین محدود گردد. در دهه‌های اخیر مطالعات زیادی در خصوص کنترل ارتعاشات ناشی از نیروهای دینامیکی باد در ساختمانهای بلند انجام گرفته است. جرم و مایع میراگر تنظیم شونده از سیستم‌های متداول مطالعه و اجرا شده در کنترل ارتعاشات سازه‌های بلند بوده است [۱-۶]. استفاده از این سیستم‌ها مستلزم اختصاص بخشی از فضای بارش ساختمان به تجهیزات کنترلی افزوده شده به سازه می‌باشد. به‌کارگیری این روش‌ها در برج‌های مخابراتی به دلیل کمبود فضا و شرایط هندسی و شکل خاص قسمت رأس برج‌های تلویزیونی و مخابراتی با محدودیت‌های معماری مواجه می‌باشد.

در سال‌های اخیر نوع جدیدی از سیستم کنترل ارتعاشات ساختمان‌های بلند معرفی شده است که دارای قابلیت خودکنترلی<sup>۱</sup> است و بخشی از جرم سازه اصلی را به عنوان جاذب ارتعاش به کار می‌گیرد. بر خلاف روش میراگر جرمی تنظیم شونده یا TMD، در این سیستم نیازی به استفاده از جرم اضافی برای کنترل پاسخ ساختمان نمی‌باشد و چون از بخشی از سازه اصلی به عنوان جاذب ارتعاش استفاده می‌شود، محدودیتی در جرم جاذب ارتعاش وجود ندارد. سیستم غیرفعال مگا-ساب<sup>۱</sup> کنترل شده که برای نخستین بار توسط فنگ و میتا [۷] معرفی گردید، نمونه‌ای از سیستم‌های خود کنترلی می‌باشد. این سیستم همان‌گونه که در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است از دو بخش سازه مگا و زیرسازه‌ها تشکیل یافته است. زیرسازه‌ها که هر کدام چندین طبقه را در بر می‌گیرند با روش‌هایی از قبیل جداسازی پایه از سازه مگا جدا می‌شوند. در این فرم سازه‌ای، انرژی ارتعاشی ناشی از نیروی باد و زلزله از طریق سازه مگا به زیرسازه‌ها منتقل می‌شود و سپس از طریق میراگرهای نصب شده بین سازه مگا و زیرسازه‌ها مستهلک می‌گردد. جای و فنگ [۸] سازه مگا-ساب را با مدل سازه‌ای چنددرجه آزادی و تحت ارتعاشات ناشی از نیروهای دینامیکی باد مورد تحلیل قرار دادند. زانگ و همکاران [۹] به منظور رفع چالش‌های اجرایی و بهبود قابلیت کنترل روش مگا-ساب، تغییراتی را نسبت به فرم اولیه این سیستم پیشنهاد دادند. زانگ و همکاران [۱۰] مطالعه پارامتری بر روی عوامل موثر در قابلیت کنترل سیستم مگا-ساب انجام دادند. لیمازی و همکاران [۱۱] عملکرد سیستم مگا-ساب را تحت ارتعاشات ناشی از نیروی زلزله با در نظر گرفتن مدل سازه‌ای سه‌بعدی مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند. وانگ و همکاران [۱۲] و لیو و لو [۱۳] عملکرد کنترل ارتعاشات ساختمان را برای نوع دیگری از سیستم خودکنترلی که در شکل ۱ (ب) نشان داده شده است مورد ارزیابی قرار دادند. در این روش، سازه ساختمان بلند متشکل از هسته مرکزی و زیرسازه‌های معلق یا آویزان می‌باشد که در آن بخش‌های معلق به عنوان جاذب ارتعاش یا میراگر جرمی عمل می‌نمایند.

سیستم‌های خودکنترلی تشریح شده در بخش فوق، عموماً برای ساختمانها مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، ایده‌ی سیستم سازه‌ای با قابلیت خودکنترلی در مورد برج‌های تلویزیونی بلند مورد بررسی قرار گرفته است. بخشی از جرم سازه به عنوان جاذب ارتعاش در نظر گرفته شده و عملکرد این سیستم، با روش میراگر جرمی تنظیم شونده افزوده شده به سازه مورد مقایسه قرار گرفته است. برای این منظور، مطالعه موردی بر روی برج تلویزیونی نانجینگ در چین که تصویر و اجزاء آن در شکل ۲ (الف) و (ب) نشان داده شده، انجام گرفته است و سکوی مشاهده فوقانی برج به عنوان جاذب ارتعاش در نظر گرفته شده است. چون در سیستم خودکنترلی بخشی از جرم سازه اصلی به عنوان جاذب ارتعاش عمل می‌نماید. لذا در این روش، اهداف کنترلی فراتر از میراگر جرمی افزودنی<sup>۲</sup> یا TMD می‌باشد و پاسخ بخش جاذب ارتعاش نیز باید به عنوان هدف کنترلی جدید مورد ملاحظه قرار گیرد. دلیل انتخاب برج نانجینگ، تحقیقات متعدد انجام گرفته در زمینه محاسبه و کنترل پاسخ این برج در مقابل نیروهای دینامیکی باد و در دسترس بودن اطلاعات سازه‌ای از قبیل ماتریس

<sup>1</sup> Self-Control<sup>2</sup> Tuned Mass Damper (TMD)

جرم، سختی و میرایی و اطلاعات مهندسی باد مربوط به آن می باشد. مشخصات برج نانجینگ، نحوه مدلسازی سازه و خواص مهندسی باد، و نتایج تحلیل سازه در برابر نیروی باد در حوزه فرکانس و زمان در قسمت های بعد تشریح گردیده است.



شکل ۱: نمونه هایی از سازه های با قابلیت خودکنترلی: الف) سیستم مگا-ساب کنترل شده ب) سازه هسته ای با قسمت های معلق

## ۲- مدل تحلیلی برای سیستم چند درجه آزادی

### ۲-۱- خصوصیات دینامیکی سیستم در حالت کنترل نشده

شکل ۲ (ج) مدل تحلیلی برج نانجینگ را در حالت کنترل نشده نشان می دهد. مود ارتعاشی غالب برای سازه های بلند و لاغر در برابر بارهای جانبی، مود خمشی می باشد لذا در اکثر مطالعات انجام گرفته در این زمینه، رفتار سازه بلند مشابه تیر قائم چند درجه آزادی در نظر گرفته شده است. در مطالعات پیشین بر روی برج نانجینگ نیز مدل تحلیلی سازه به صورت تیر طره ای قائم چند درجه آزادی با جرم های متمرکز شده در گره ها در نظر گرفته شده است [۲۰-۱۴]. در اکثر این مطالعات، مطابق شکل ۲ (ج) تعداد جرم های متمرکز ۱۶ عدد منظور گردیده است. معادله عمومی حرکت سیستم چند درجه آزادی تحت بارهای دینامیکی به صورت زیر می باشد:

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

که در آن  $M$ ،  $C$ ، و  $K$  به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی سازه، بردار جابجایی های گرهی و  $F$  بردار نیروهای خارجی می باشد. ماتریس سختی المان تیر نسبت به جابجایی و دوران دو انتهای المان به صورت زیر است:

$$K_e = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

که در آن  $E$ ،  $I$  و  $L$  به ترتیب مدول یانگ، ممان اینرسی تیر و طول المان تیر می باشند. با ادغام ماتریس های سختی المان تیر در ماتریس سختی کل سیستم می توان نوشت:

$$K^m = \begin{bmatrix} K_{tt} & K_{tr} \\ K_{rt} & K_{rr} \end{bmatrix} \quad (3)$$

در رابطه فوق، اندیس  $t$  مربوط به حرکات انتقالی و  $r$  دوران گرهی می‌باشد. در این ماتریس کلیه درجات آزادی انتقالی در قسمت بالا آورده شده است. به منظور کاهش حجم محاسبات مربوط به استخراج ماتریس انتقال سیستم، از روش تراکم درجات آزادی استفاده شده است. با تراکم درجات آزادی دورانی در حرکات انتقالی گره‌ها، ماتریس سختی کاهش یافته سیستم به شکل زیر به دست می‌آید [۲۱]:

$$K_{red}^m = K_{tt} - K_{tr} K_{rr}^{-1} K_{rt} \quad (4)$$

ماتریس جرم متناظر با سیستم تراکم یافته، ماتریس قطری است که اعضای قطر اصلی آن، همان جرم‌های متمرکز گرهی

می‌باشند:

$$M_{red}^m = \text{diag}[m_i^m] \quad (5)$$

ماتریس میرایی ذاتی سازه، پس از تحلیل مودال سازه و محاسبه اشکال، جرم‌ها و فرکانس‌های مودی با روش زیر تعیین می‌شود:

$$C^m = \Phi^{-T} A \Phi^{-1}, \quad A = \text{diag}[2\mu_1 \zeta_1 \omega_1 \quad \dots \quad 2\mu_j \zeta_j \omega_j \quad \dots \quad 2\mu_n \zeta_n \omega_n] \quad (6)$$

که در آن  $\Phi$  ماتریس اشکال مودی و  $\mu_j$ ،  $\zeta_j$  و  $\omega_j$  به ترتیب جرم، میرایی و فرکانس‌های مودی و  $A$  ماتریس قطری است که اعضای قطر اصلی آن میرایی‌های مودی می‌باشند.

## ۲-۲- نقش سیستم جاذب ارتعاش در خصوصیات دینامیکی سیستم

در مطالعات پیشین روی سیستم خودکنترلی از قبیل مگا-ساب، زیرسازه‌های جدا شده به صورت جرم‌های متمرکز در نظر گرفته شده‌اند که با سیستم‌های موازی سختی و فنر به قاب اصلی متصل گردیده‌اند. در این مطالعه یکی از سکوه‌های مشاهده برج نانجینگ به عنوان زیرسازه جدا شده منظور گردیده است و همچنین به منظور مقایسه عملکرد سیستم پیشنهادی با سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده، پاسخ سازه در حالت مجهز به سیستم TMD نیز ارزیابی گردیده است. در هر دو حالت کنترل شده، مدل تحلیلی سازه مطابق شکل ۲ (د) می‌باشد که در آن جرم جاذب ارتعاش توسط سیستم موازی سختی و فنر به سازه متصل گردیده است. برای مدل تحلیلی مورد نظر ماتریس کلی جرم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

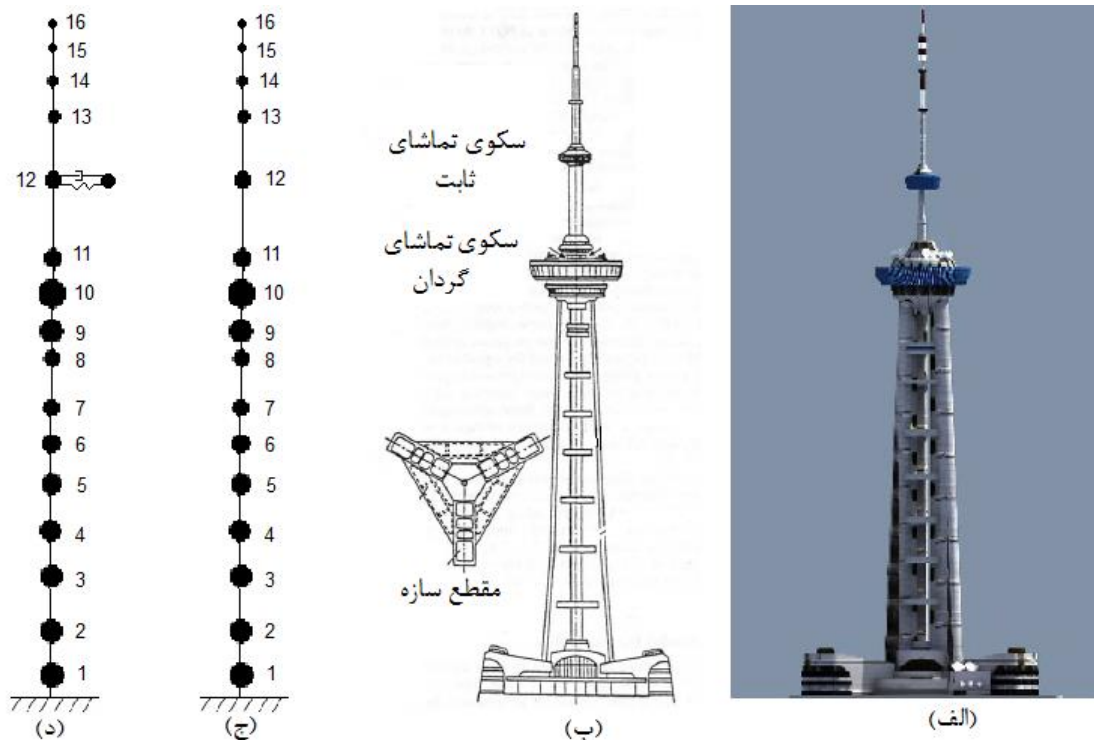
$$M_g = \begin{bmatrix} M_{red}^m & 0 \\ 0 & m_a \end{bmatrix} \quad (7)$$

که در آن  $M_g$  ماتریس جرم کلی و  $m_a$  جرم جاذب ارتعاش می‌باشد که برای سیستم TMD با علامت  $m_d$  و در سیستم خودکنترلی برای زیرسازه جدا شده با علامت  $m_g$  نشان داده خواهد شد. ماتریس‌های سختی و میرایی کلی سیستم با اضافه نمودن اثر سیستم جاذب ارتعاش به ماتریس‌های تعیین شده در بخش قبلی به صورت زیر قابل تعیین می‌باشد:

$$K_g = \begin{bmatrix} K_{red}^m + k_a & -k_a \\ -k_a & k_a \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C_g = \begin{bmatrix} C^m + c_a & -c_a \\ -c_a & c_a \end{bmatrix} \quad (9)$$

در رابطه فوق  $K_g$  و  $C_g$  به ترتیب ماتریس‌های سختی و میرایی تعمیم یافته سیستم و  $k_a$  و  $c_a$  به ترتیب سختی و میرایی سیستم جاذب ارتعاش می‌باشند.



شکل ۲: برج نانجینگ: (الف) تصویر برج (ب) اجزاء برج (ج) مدل تحلیلی سازه در حالت کنترل نشده (د) مدل تحلیلی سازه در حالت کنترل شده با سیستم TMD و یا زیرسازه جداشده (سیستم خود کنترل)

### ۲-۳- ماتریس تابع انتقال و پاسخ حوزه فرکانس

ماتریس تابع انتقال بین جابجایی‌های سازه و نیروهای خارجی با تبدیل فوریه معادله حرکت دینامیکی به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{F}(\omega) = (-\omega^2\mathbf{M}_g + j\omega\mathbf{C}_g + \mathbf{K}_g)^{-1}\mathbf{F}(\omega) \quad (10)$$

که در آن  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای و  $\mathbf{I}$  واحد موهومی می‌باشد.  $\mathbf{H}(\omega)$  ماتریس تابع انتقال و یا ماتریس تابع پاسخ فرکانسی نامیده می‌شود. ماتریس تراکم طیفی پاسخ برای سیستم چند درجه آزادی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{S}_x(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{S}_f(\omega)\mathbf{H}^*(\omega) \quad (11)$$

که در آن  $\mathbf{H}(\omega)$  ماتریس تابع انتقال و علامت \* بیان‌کننده ترانپوز مختلط ماتریس و  $\mathbf{S}_f(\omega)$  ماتریس تراکم طیفی نیروی تحریک می‌باشد. در نهایت، واریانس جابجایی و شتاب سازه برای درجه آزادی  $i$  ام با استفاده از انتگرال عددی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$E[x_i^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{x_{ii}}(\omega) d\omega \quad \text{and} \quad E[\ddot{x}_i^2] = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^4 S_{x_{ii}}(\omega) d\omega \quad (12)$$

که در آن  $S_{x_{ii}}(\omega)$  عضو  $i$  ام روی قطر اصلی ماتریس تراکم طیفی پاسخ می‌باشد.

### ۳- خصوصیات دینامیکی باد

#### ۳-۱- طیف نیروی طولی باد

مولفه نوسانی نیروی طولی باد در واحد ارتفاع از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$f_D(z, t) = \rho_a U(z) u(z, t) C_d B \quad (13)$$

که در آن  $\rho_a$  دانسیته هوا،  $U(z)$  سرعت میانگین باد در ارتفاع  $z$ ،  $u(z, t)$  سرعت نوسانی باد،  $C_d$  ضریب پسا<sup>۳</sup> و  $B$  عرض سازه در امتداد عمود بر جهت وزش باد می باشد. مولفه نوسانی سرعت طولی باد، یک فرآیند تصادفی است که تابع تراکم طیفی نیروی آن از رابطه زیر به دست می آید:

$$S_{f_D}(\omega, z) = \rho_a^2 U(z)^2 B^2 C_d^2 S_u(\omega) \quad (14)$$

که  $S_u(\omega)$  طیف تراکم سرعت نوسانی در جهت طولی باد می باشد. داونپورت با تمرکز بر روی محدوده فرکانسی موثر در تحلیل دینامیکی سازه ها، رابطه زیر را برای تابع تراکم نوسانات سرعت طولی باد ارائه کرده است [۲۲]:

$$S_u(\omega) = \frac{2u_*^2}{|\omega|} \frac{\left(\frac{600\omega}{\pi u_{10}}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{600\omega}{\pi u_{10}}\right)^2\right]^{4/3}} \quad (15)$$

که در آن  $u_* = \sqrt{\kappa u_{10}}$  سرعت اصطکاکی باد،  $u_{10}$  سرعت میانگین باد در ارتفاع ۱۰ متری در ناحیه مورد نظر، و  $\kappa$  ضریب پسی سطحی است که وابسته به زبری ناحیه می باشد. همبستگی نوسانات سرعت باد بین دو نقطه، با افزایش فاصله آنها کاهش می یابد. ویکری [۲۳] رابطه دوبردی زیر را برای تابع همبستگی سرعت باد پیشنهاد داده است:

$$coh_{jk}(\omega) = \exp \left\{ \frac{-|\omega| \sqrt{c_z^2(z_j - z_k)^2 + c_y^2(y_j - y_k)^2}}{2\pi \frac{1}{2} [\bar{U}(z_j) + \bar{U}(z_k)]} \right\} \quad (16)$$

که در آن  $z$  و  $y$  به ترتیب مختصات افقی و ارتفاعی نقاط،  $\omega$  فرکانس زاویه ای،  $\bar{U}(z)$  سرعت میانگین باد و  $c_z$  و  $c_y$  ضرایب ثابت می باشند.

#### ۳-۲- شبیه سازی تاریخچه زمانی نیروی باد

تحلیل حوزه زمان سازه های در معرض نیروهای دینامیکی باد، مستلزم داشتن تاریخچه زمانی اندازه گیری و یا شبیه سازی شده سرعت باد می باشد. روش ارائه طیفی<sup>۴</sup> به طور وسیعی برای تولید تاریخچه زمانی سرعت باد به کار گرفته شده است [۲۴-۲۷]. در مطالعه حاضر، به منظور تحلیل حوزه زمان برج نانجینگ، روش تشریح شده توسط دئوداتیس [۲۵] جهت شبیه سازی مولفه نوسانی نیروی طولی باد مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس این روش تابع نوسانات سرعت باد برای درجه آزادی  $j$  از یک سازه  $n$  درجه آزادی به صورت زیر قابل تولید می باشد:

$$v_j(t) = 2\sqrt{\Delta\omega} \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^j |L_{jm}(\omega_{ml})| \cos(\omega_{ml}t + \varphi_{ml}) \quad (17)$$

که در آن:

$$j=1, 2, \dots, n; \quad \omega_{ml} = (l-1)\Delta\omega + \frac{m}{n}\Delta\omega; \quad m=1, 2, \dots, n; \quad l=1, 2, \dots, N; \quad \Delta\omega = \frac{\omega_u}{N}$$

<sup>3</sup> Drag Coefficient

<sup>4</sup> Spectral Representation Method

$n$  تعداد نقاط شبیه سازی سرعت باد،  $\omega_u$  حد بالای فرکانس شبیه سازی،  $\Phi_{ml}$  زوایای فاز تصادفی که به طور یکنواخت بین صفر تا  $2\pi$  توزیع شده است و  $L(\omega)$  ماتریس پایین مثلثی است که به صورت ذیل از تجزیه چولسکی<sup>۵</sup> ماتریس تابع طیف تراکم سرعت باد تعیین می شود:

$$S_p(\omega) = L(\omega)^T L(\omega) \quad (18)$$

که در آن  $S_p(\omega)$  ماتریس تابع طیف تراکم و علائم  $T$  و  $*$  به ترتیب ترانهاده و مزدوج مختلطی ماتریس را نشان می دهند.

#### ۴- مشخصات برج نانجینگ

برج نانجینگ در کشور چین، یک برج تماشا و مخابراتی با ارتفاع ۳۱۰ متر می باشد که طی سالهای ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۳ میلادی احداث گردیده است. این برج دارای یک سکوی تماشای<sup>۶</sup> گردان بزرگ در ارتفاع ۱۸۰ متر و یک سکوی تماشای کوچک ثابت در ارتفاع ۲۴۰ متر می باشد. هر دو سکو به شکل مقطع دایره ای با قطر متغیر با ارتفاع می باشند. سازه برج از هسته بتن آرمه دارای سه پایه مستطیلی با بعد متغیر در ارتفاع تشکیل شده است که به صورت متقارن نسبت به محور عمودی برج قرار گرفته اند. در بالای سکوی تماشای ثابت، یک آنتن فولادی تا راس برج ادامه یافته است. نیروهای دینامیکی باد در طراحی برج غالب بوده اند و شتاب سکوی تماشای فوقانی برج در شرایط بحرانی باد از سطح آسایش ساکنین فراتر می رود از این رو طراحی سیستم کنترلی از نوع میراگر جرمی تنظیم شونده برای برج نانجینگ مدنظر قرار گرفته است [۱۵]. این برج در مطالعات متعددی در زمینه تحلیل پاسخ برجهای تلویزیونی و مخابراتی بلند در برابر باد، به عنوان سازه مبنا در نظر گرفته شده است. در مطالعات پیشین، برج نانجینگ به صورت تیر طره ای قائم ۱۶ درجه آزادی مدل گردیده است. در این مطالعه نیز سازه فوق مطابق شکل ۲ (ج) به صورت سیستم دارای ۱۶ جرم متمرکز در نظر گرفته شد. مقادیر پارامترهای مختلف مورد نیاز برای تحلیل پاسخ باد، شامل ارتفاع درجات آزادی، عرض و سطح روبروی باد، مقادیر جرم های متمرکز و ضرایب پسا در درجات آزادی مختلف در جدول ۱ ارائه شده است [۱۹]. ماتریس سختی سازه که بر اساس روش تشریح شده در بخش ۲ تعیین شده است در مرجع [۱۴] ارائه شده است. سایر پارامترهای مربوط به طیف نیروی باد و پروفیل سرعت باد به صورت زیر می باشند [۱۷]:

سرعت میانگین در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین با دوره بازگشت ۵۰ ساله  $v_{ref} = 20/7$  m/s، ضریب پسای سطحی  $k = 0/008$ ، ضریب ارتفاعی تابع همبستگی  $C_z = 7/7$ ، دانسیته هوا  $\rho_a = 1/25$  kg/m<sup>3</sup>، مولفه توانی سرعت باد  $\alpha = 0/16$  می باشد. سایر اطلاعات لازم از قبیل موقعیت ارتفاعی درجات آزادی، مساحت بادگیر و ضریب پسای مربوط به هر کدام از درجات آزادی در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار میرایی برای مود اول سازه ۲ درصد و برای سایر مودها از رابطه زیر محاسبه گردید [۱۵]:

$$\zeta_i = \zeta_1 \left( 1 + 0.38 \left( \frac{f_i}{f_1} - 1 \right) \right) \quad (19)$$

که در آن  $f_i$  و  $\zeta_i$  به ترتیب فرکانس و میرایی مود  $i$ ام می باشند.

<sup>5</sup> Cholesky Decomposition

<sup>6</sup> Observation Deck



جدول ۱: اطلاعات مدل تحلیلی برج نانچینگ مربوط به محاسبه پاسخ در برابر باد

شماره گره	ارتفاع (متر)	جرم متمرکز (تن)	سطح مقابل باد (متر مربع)	عرض مقابل باد (متر)	ضریب پسا
۱	۱۰/۱	۳۹۹۲/۹	۴۱۳/۲	۲۸/۵۶	۱/۳۹
۲	۳۲/۲	۳۱۸۶/۷	۵۳۶	۲۴/۳۵	۱/۳۹
۳	۵۸/۶	۲۸۲۰/۱	۴۶۹/۵	۲۰/۲۳	۱/۳۹
۴	۸۰/۲	۲۳۱۹/۸	۳۸۷/۲	۱۸/۷۵	۱/۳۹
۵	۱۰۱/۸	۱۹۱۸	۳۲۳/۷	۱۷/۱	۱/۳۹
۶	۱۱۹/۸	۱۶۲۴/۵	۲۷۱/۴	۱۵/۴۵	۱/۳۹
۷	۱۳۷/۸	۱۶۲۸/۱	۲۷۷/۴	۱۴/۷	۱/۳۹
۸	۱۵۸/۸	۱۳۲۲/۳	۲۳۳/۷	۱۳/۹۵	۱/۳۹
۹	۱۷۱/۸	۳۳۹۵/۳	۱۸۲/۵	۱۳/۴۲	۱/۲
۱۰	۱۸۵/۸	۵۶۷۸/۶	۱۸۳/۹	۱۳/۴۲	۱/۲
۱۱	۱۹۹/۲	۱۵۱۲/۴	۲۱۳/۵	۱۳/۴۲	۱/۲
۱۲	۲۴۰/۴	۱۲۵۴	۱۷۵/۶	۶	۱/۲
۱۳	۲۷۰/۱	۱۶۵/۱	۶۶/۴	۳/۵	۱/۳
۱۴	۲۸۶/۱	۱۸/۷	۲۱/۶	۱/۸	۱/۳
۱۵	۲۹۹/۱	۱۲	۱۱/۳	۱/۱	۱/۳
۱۶	۳۱۰/۱	۴	۴/۱	۰/۷۵	۱/۳

## ۵- تحلیل عددی و نتایج

به منظور ارزیابی تاثیر روش پیشنهادی در کنترل پاسخ برج نانچینگ، سازه برج مطابق توضیحات بخش قبل به صورت تیر طره‌ای قائم با ۱۶ جرم متمرکز منظور گردید. با توجه به اینکه مقدار پاسخ سازه در موقعیت سکوی تماشای فوقانی از نظر تامین آسایش ساکنین، دارای وضعیت بحرانی می‌باشد به همین دلیل در متن مقاله، پاسخ جابجایی و شتاب برج در موقعیت مذکور مورد بحث و بررسی قرار گرفته و برای سه حالت ارائه شده است: (۱) وضعیت موجود و یا حالت کنترل نشده سازه، (۲) حالتی که یک سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده یا TMD با جرم متغیر تا سقف ۳۰۰ تن در محل سکوی فوقانی استفاده شود و (۳) حالت سیستم خودکنترلی که در آن قسمتی از سازه اصلی در محل سکوی تماشای فوقانی به عنوان زیرسازه جاذب ارتعاش، از سازه اصلی جدا و با سیستم سختی و میرایی به سازه اصلی متصل شود. در این حالت فرض گردیده که زیرسازه‌ای با جرم متغیر بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ تن به عنوان جاذب ارتعاش عمل نماید. چون هدف از این مقاله ارزیابی سیستم خودکنترلی برای برج‌های مخابراتی می‌باشد که در آنها عموماً سکوهایی تماشا دارای جرم بسیار بالایی می‌باشند (از جمله سکوی گردان این برج که جرمی بیش از هشت هزار تن دارد)، لذا فرض گردیده که امکان تامین چنین مقادیری از جرم اصلی جاذب ارتعاش در محل سکوهایی تماشا قابل تامین باشد. در حالت ۲ و ۳ سیستم جاذب ارتعاش به صورت جرم متمرکز با یک درجه آزادی انتقالی در نظر گرفته شده که با سیستم موازی فنر و میراگر به سازه اصلی متصل شده‌است. کلیه مراحل محاسباتی پاسخ سازه شامل تعیین ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی، تعیین ماتریس تابع تراکم نیروی باد و انتگرال‌گیری عددی مطابق روش تشریح شده در بخش ۲، با برنامه نویسی در محیط نرم‌افزار متلب انجام گرفت. همچنین جهت ارائه نتایج در حوزه زمان، تاریخچه زمانی مولفه نوسانی سرعت باد برای ۱۶ گره سازه شبیه‌سازی و پاسخ زمانی آن محاسبه شد. پاسخ سازه در حالات تشریح شده در ادامه ارائه شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است. مراحل مدل‌سازی و تحلیل سازه در حوزه فرکانس را در گام‌های ذیل می‌توان بیان نمود:

- ۱- تعریف ماتریس جرم با توجه به مدل مورد نظر، ۲- تعریف ماتریس سختی سازه، ۳- تعریف مشخصات مهندسی باد از قبیل سرعت باد، دانسیته هوا، ضریب پسا، مولفه توانی و محاسبه نیروهای استاتیکی باد در گره‌ها، ۴- تحلیل مودال سازه بر اساس ماتریس‌های سختی و جرم تعیین شده، ۵- محاسبه ماتریس میرایی ذاتی سازه، ۶- ادغام ماتریس میرایی ذاتی سازه با المان میراگر، ۷- محاسبه ماتریس تابع

پاسخ فرکانسی سیستم، ۸- تعریف بردار فرکانس و تشکیل ماتریس طیف تراکم نیروی باد، ۹- انتگرال گیری عددی برای محاسبه پاسخ انحراف معیار سازه، ۱۰- کمینه سازی پاسخ سازه و استخراج پارامترهای بهینه

### ۵-۱- پاسخ سازه در حالت کنترل نشده

انحراف معیار جابجایی و شتاب سازه کنترل نشده در موقعیت سکوی تماشای فوقانی، تحت نیروی دینامیکی باد با مشخصات قید شده در بخش ۴، به ترتیب برابر با  $\sigma_{x_u} = 3/46$  cm و  $\sigma_{\ddot{x}_u} = 4/96$  cm/s<sup>2</sup> است.

### ۵-۲- پاسخ سازه در حالت مجهز به سیستم میراگر جرمی (TMD)

در این حالت، پاسخ بهینه‌ی سازه به‌ازای مقادیر مختلف جرم میراگر از ۲۵ تن تا ۳۰۰ تن تعیین شده است. در به‌کارگیری سیستم TMD، فضای کافی برای ارتعاش جرم میراگر افزوده شده تا مین می‌شود و هدف اصلی کنترل، کاهش پاسخ سازه اصلی می‌باشد. لذا به‌ازای هر مقدار مشخص جرم میراگر، پارامترهای نسبت فرکانسی و میرایی به نحوی تعیین شده‌اند که پاسخ سازه اصلی کمینه شود. پارامترهای نسبت فرکانسی  $f_d$  و میرایی  $\zeta_d$  در این حالت به‌صورت زیر تعریف گردیده‌اند:

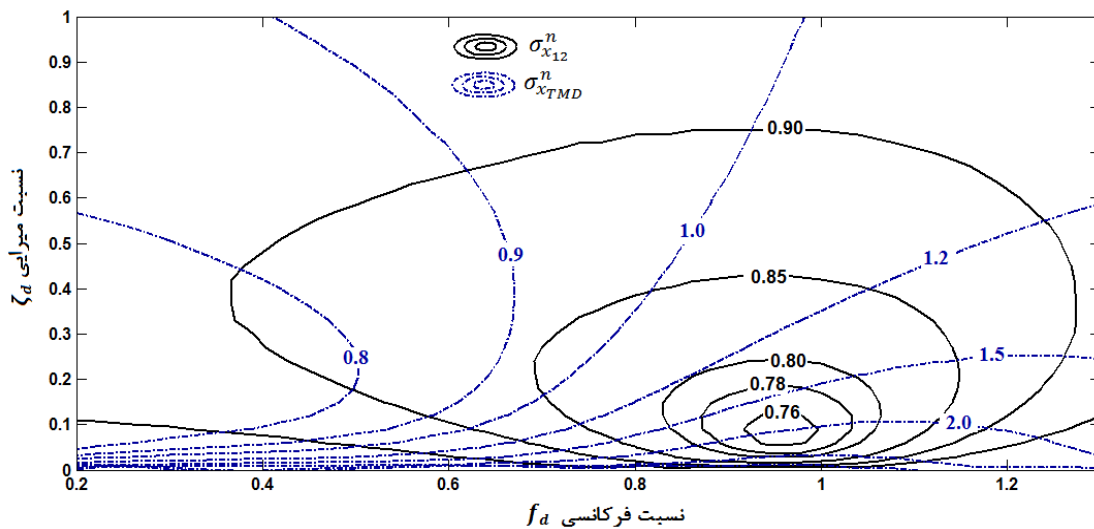
$$f_d = \omega_d / \omega_n \quad , \quad \zeta_d = c_d / (2m_d \omega_n) \quad (20)$$

که در آن  $m_d$ ،  $c_d$  و  $\omega_d$  به‌ترتیب جرم، میرایی و فرکانس سیستم TMD و  $\omega_n$  کمترین مقدار فرکانس طبیعی ساختمان می‌باشد. به‌منظور بررسی تاثیر سیستم TMD، پاسخ‌های محاسبه شده به‌صورت زیر بی‌بعد شده‌اند:

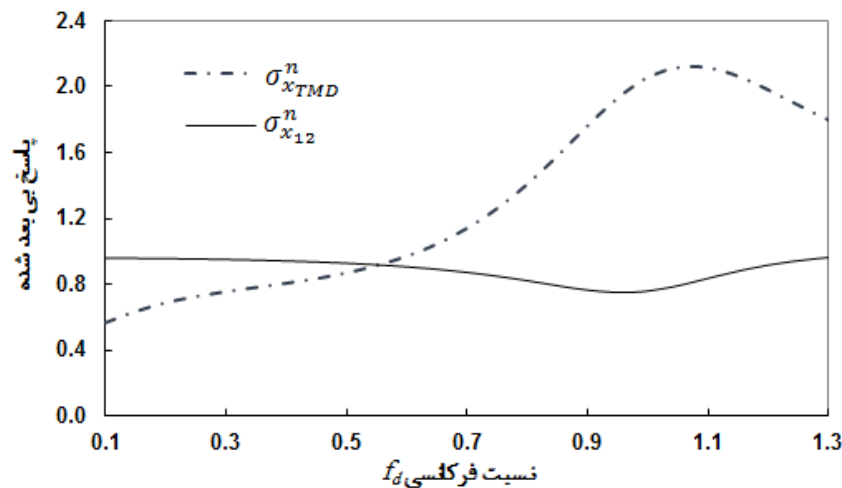
$$\sigma_{x_{12}}^n = \sigma_{x_{12}}^c / \sigma_{x_{12}}^u; \quad \sigma_{x_{TMD}}^n = \sigma_{x_{TMD}}^c / \sigma_{x_{12}}^u; \quad \sigma_{\ddot{x}_{12}}^n = \sigma_{\ddot{x}_{12}}^c / \sigma_{\ddot{x}_{12}}^u; \quad \sigma_{\ddot{x}_{TMD}}^n = \sigma_{\ddot{x}_{TMD}}^c / \sigma_{\ddot{x}_{12}}^u \quad (21)$$

که در این رابطه  $\sigma_{x_{12}}^c$  و  $\sigma_{\ddot{x}_{12}}^c$  به‌ترتیب انحراف معیار جابجایی و شتاب سازه در حالت کنترل شده در محل سکوی فوقانی یا گره شماره ۱۲،  $\sigma_{x_{TMD}}^c$  و  $\sigma_{\ddot{x}_{TMD}}^c$  پاسخ‌های مذکور برای میراگر جرمی و  $\sigma_{x_{12}}^u$  و  $\sigma_{\ddot{x}_{12}}^u$  پاسخ‌های سازه در حالت کنترل نشده است و اندیس n مربوط به پاسخ‌های انحراف معیار بی‌بعد شده می‌باشد. شکل ۳ پاسخ‌های انحراف معیار جابجایی بی‌بعد شده سازه  $\sigma_{x_{12}}^n$  و میراگر جرمی  $\sigma_{x_{TMD}}^n$  را به‌ازای مقادیر مختلف نسبت‌های میرایی و فرکانسی برای  $m_d = 200$  ton نشان می‌دهد. منحنی پاسخ به‌صورت خطوط کنترل هم‌اندازه نشان داده شده است تا تغییرات پاسخ به‌ازای هر دو پارامتر نسبت فرکانسی و میرایی قابل مشاهده باشد. مقادیر خطوط کنترل نشان داده شده برای  $\sigma_{x_{12}}^n$  بین ۰/۷۶ تا ۰/۹۰ و برای  $\sigma_{x_{TMD}}^n$  بین ۰/۸۰ تا ۲/۰ متغیر می‌باشد. با توجه به اینکه هدف اصلی از به‌کارگیری سیستم TMD، کاهش پاسخ سازه اصلی می‌باشد لذا با انتخاب مقادیر نسبت‌های فرکانسی و میرایی در داخل محدوده خط کنترل  $\sigma_{x_{12}}^n = 0/76$ ، پاسخ سازه اصلی کمینه خواهد شد. بر اساس روش حداقل سازی مستقیم<sup>۷</sup> که در نرم‌افزار متلب فراهم می‌باشد مقدار بهینه دقیق پاسخ بی‌بعد سازه  $(\sigma_{x_{12}}^n)_{opt} = 0/751$  می‌باشد که به‌ازای پارامترهای بهینه  $f_{d,opt} = 0/958$  و  $\zeta_{d,opt} = 0/82$  حاصل می‌شود و در این حالت، پاسخ متناظر برای میراگر جرمی،  $\sigma_{x_{TMD}}^n = 2/03$  می‌باشد. در نتیجه با به‌کارگیری سیستم TMD با جرم ۲۰۰ تن، پاسخ سازه در مقایسه با حالت کنترل نشده ۲۵/۹ درصد قابل کاهش می‌باشد که برای حصول آن، میراگر جرمی بایستی پاسخی معادل ۲/۰۳ برابر پاسخ سازه کنترل نشده را تجربه کند. شکل ۴ تغییرات پاسخ‌های انحراف معیار جابجایی بی‌بعد شده را به‌ازای میرایی بهینه در مقابل تغییر نسبت فرکانسی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳ نیز مشاهده گردید در حالت بهینه پاسخ سازه اصلی، پاسخ میراگر جرمی حداکثر می‌باشد و با افزایش یا کاهش نسبت فرکانسی در مقایسه با فرکانس بهینه، اختلاف پاسخ سازه و میراگر جرمی کاهش می‌یابد.

<sup>7</sup> Direct Minimization Method



شکل ۳: تغییر پاسخ‌های انحراف معیار جابجایی بی‌بعد شده به‌ازای مقادیر مختلف نسبت میرایی و فرکانسی

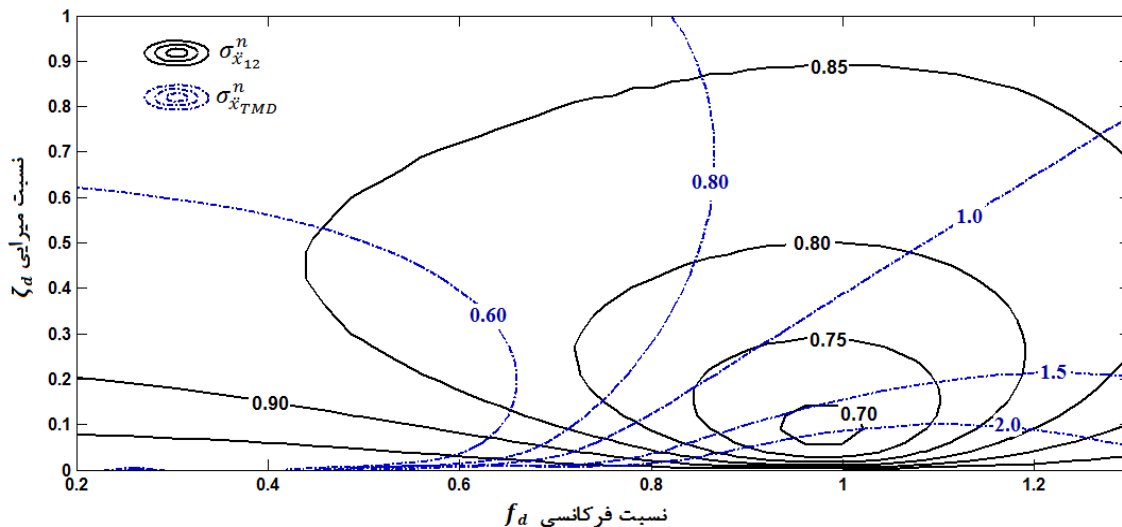


شکل ۴: تغییرات پاسخ‌های انحراف معیار جابجایی بی‌بعد شده را به‌ازای میرایی بهینه در مقابل تغییر نسبت فرکانسی

شکل ۵ منحنی‌های کنتور پاسخ‌های انحراف معیار شتاب بی‌بعد شده سازه  $\sigma_{\ddot{x}_{12}}^n$  و میراگر جرمی  $\sigma_{\ddot{x}_{TMD}}^n$  را به‌ازای مقادیر مختلف نسبت‌های میرایی و فرکانسی به‌ازای  $m_d=200$  ton نشان می‌دهد. حداقل منحنی کنتور پاسخ سازه  $\sigma_{\ddot{x}_{12}}^n=0.7$  می‌باشد و مقدار پاسخ TMD در داخل این منحنی کنتور، بین  $1/5$  تا  $2/0$  متغیر می‌باشد بر اساس روش حداقل‌سازی مستقیم، مقدار بهینه شده دقیق پاسخ شتاب سازه  $(\sigma_{\ddot{x}_{12}}^n)_{opt}=0.688$  می‌باشد که به‌ازای پارامترهای بهینه  $f_{d_{opt}}=0.98$  و  $\zeta_{d_{opt}}=0.089$  حاصل می‌شود و در این حالت پاسخ متناظر برای میراگر جرمی  $\sigma_{\ddot{x}_{TMD}}^n=1.90$  می‌باشد. در نتیجه پاسخ شتاب سازه در مقایسه با حالت کنترل نشده  $31/2$  درصد کاهش نشان می‌دهد و در این حالت میراگر جرمی پاسخی معادل  $1/9$  برابر پاسخ سازه در حالت کنترل نشده را تجربه می‌کند.

جدول ۲ نتایج به‌کارگیری و بهینه‌سازی میراگر جرمی با مقادیر مختلف جرم تا  $300$  تن را نشان می‌دهد. پارامترهای نسبت میرایی و فرکانسی بهینه برای پاسخ‌های انحراف معیار جابجایی و شتاب به نحوی بهینه شده‌اند که در هر حالت پاسخ سازه کمینه شود. نسبت فرکانسی بهینه در حالات مختلف نزدیک عدد یک می‌باشد و مقدار میرایی بهینه، با افزایش جرم TMD افزایش می‌یابد. برای TMD  $25$  تنی مقدار پاسخ انحراف معیار جابجایی و شتاب بی‌بعد شده‌ی سکوی فوقانی در حالات بهینه به‌ترتیب برابر  $\sigma_{\ddot{x}_{12}}^n=0.85$  و  $\sigma_{\ddot{x}_{12}}^n=0.87$  می‌باشد. در نتیجه در این حالت، کاهش پاسخ انحراف معیار جابجایی و شتاب نسبت به وضعیت کنترل نشده سازه به‌ترتیب  $13$  و  $15$  درصد می‌باشد که لازمه آن به‌ترتیب تحمل پاسخ‌های نسبی  $\sigma_{\ddot{x}_{TMD}}^n=6/27$  و  $\sigma_{\ddot{x}_{TMD}}^n=6/64$  برای سیستم TMD می‌باشد. با افزایش جرم سیستم

TMD، قابلیت کنترلی آن افزایش و مقدار پاسخ میراگر جرمی کاهش می‌یابد، به نحوی که برای جرم  $m_d=300\text{ ton}$  کاهش پاسخ‌های انحراف معیار جابجایی و شتاب سازه به ترتیب ۲۷ و ۳۴ درصد باشد و در این حالت پاسخ‌های میراگر جرمی  $\sigma_{x_{TMD}}^n=1/43$  و  $\sigma_{x_{12}}^n=1/64$  خواهد بود. با این حال، نکته مهمی که در جدول ۲ مشهود می‌باشد این است که با افزایش جرم TMD، مقدار تغییرات در قابلیت کنترل سیستم کاهش می‌یابد. به طور مثال با افزایش کمیت مذکور از ۲۵۰ به ۳۰۰ تن، قابلیت کنترل جابجایی و شتاب سیستم به طور میانگین فقط ۱/۲۵ درصد افزایش می‌یابد، در نتیجه برای افزایش قابل توجه در قابلیت کنترل سیستم TMD، نیاز به جرم خیلی سنگین‌تری از آن می‌باشد که این امر ضمن افزایش وزن سازه، مستلزم اختصاص بخش قابل توجهی از فضای با ارزش برج به یک جرم افزودنی می‌باشد. با استفاده از بخشی از جرم سازه به عنوان زیرسازه‌ی جاذب ارتعاش، محدودیت‌های ذکر شده رفع می‌گردد و امکان تامین جرم بالای جاذب ارتعاش بدون اضافه شدن وزن سازه و بدون نیاز به اختصاص فضای اضافی فراهم می‌شود.



شکل ۵: تغییر پاسخ‌های انحراف معیار شتاب بی‌بعد شده به‌ازای مقادیر مختلف نسبت‌های میرایی و فرکانسی

جدول ۲: نتایج به کارگیری سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده با مقادیر جرم متفاوت برای برج نانجینگ

پارامترهای پاسخ شتاب				پارامترهای پاسخ جابجایی				جرم TMD (تن)
$\sigma_{x_{TMD}}^n$	$\sigma_{x_{12}}^n$	$f_{opt}$	$\zeta_{d,opt}$	$\sigma_{x_{TMD}}^n$	$\sigma_{x_{12}}^n$	$f_{opt}$	$\zeta_{d,opt}$	
	۱/۰				۱/۰			۰
۶/۶۴	۰/۸۴۷	۰/۹۹۷	۰/۰۳۳	۶/۲۷	۰/۸۷۳	۰/۹۹۱	۰/۰۳۳	۲۵
۴/۴۹	۰/۷۹۶	۰/۹۹۳	۰/۰۴۶	۴/۳۵	۰/۸۳۲	۰/۹۸۳	۰/۰۴۵	۵۰
۲/۹۸	۰/۷۴۲	۰/۹۸۸	۰/۰۶۳	۲/۹۸	۰/۷۹۲	۰/۹۷۵	۰/۰۶۰	۱۰۰
۲/۳۱	۰/۷۱۰	۰/۹۸۴	۰/۰۷۶	۲/۳۸	۰/۷۶۶	۰/۹۶۷	۰/۰۷۲	۱۵۰
۱/۹۰	۰/۶۸۸	۰/۹۸۰	۰/۰۸۹	۲/۰۳	۰/۷۵۱	۰/۹۵۸	۰/۰۸۲	۲۰۰
۱/۶۳	۰/۶۷۱	۰/۹۷۶	۰/۱۰۱	۱/۸۰	۰/۷۴۰	۰/۹۵۰	۰/۰۹۱	۲۵۰
۱/۴۳	۰/۶۵۵	۰/۹۷۲	۰/۱۱۳	۱/۶۴	۰/۷۳۱	۰/۹۴۱	۰/۰۹۸	۳۰۰

### ۵-۳- پاسخ سازه در حالت استفاده از زیرسازه‌ی جاذب ارتعاش

همان‌گونه که در مقدمه این بخش تشریح گردید در این حالت قسمتی از جرم سازه اصلی در محل سکوی تماشای فوقانی به عنوان جاذب ارتعاش عمل می‌کند. در این حالت فرض گردیده که جرم زیرسازه جاذب ارتعاش، بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ تن متغیر باشد. پاسخ سیستم تابع دو پارامتر نسبت فرکانسی  $f_s$  و مقدار میرایی  $\zeta_s$  می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

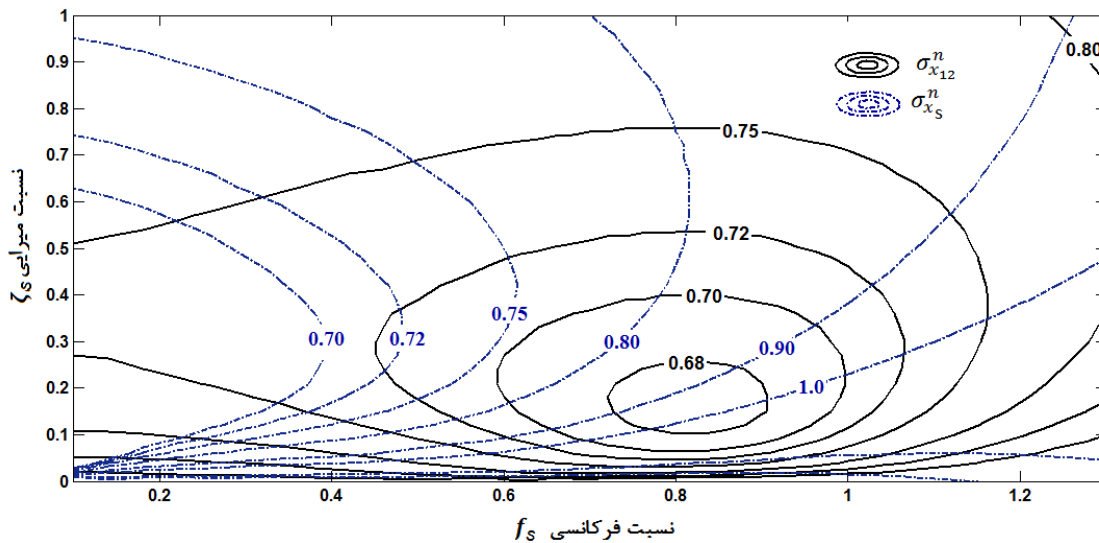
$$f_s = \omega_s / \omega_n \quad \text{and} \quad \zeta_s = c_s / (2m_s \omega_n) \quad (22)$$

که در آن  $m_s$ ،  $c_s$  و  $\omega_s$  به ترتیب جرم، میرایی و فرکانس سیستم جاذب ارتعاش و  $\omega_n$  کمترین فرکانس طبیعی ساختمان می‌باشد. مشابه بخش قبل در خصوص پاسخ میراگر جرمی، به منظور بررسی تاثیر سیستم خودکنترل، پاسخ‌های محاسبه شده به صورت زیر بی‌بعد شده اند:

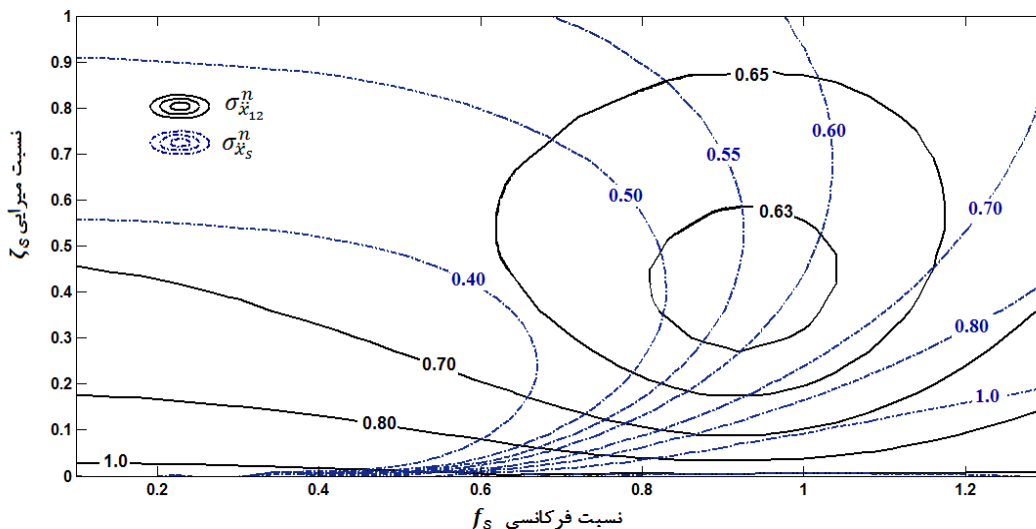
$$\sigma_{x_{12}}^n = \sigma_{x_{12}}^c / \sigma_{x_{12}}^u; \quad \sigma_{x_s}^n = \sigma_{x_s} / \sigma_{x_{12}}^u; \quad \sigma_{\ddot{x}_{12}}^n = \sigma_{\ddot{x}_{12}}^c / \sigma_{\ddot{x}_{12}}^u; \quad \sigma_{\ddot{x}_s}^n = \sigma_{\ddot{x}_s} / \sigma_{\ddot{x}_{12}}^u \quad (23)$$

که در این رابطه  $\sigma_{x_{12}}^c$  و  $\sigma_{\ddot{x}_{12}}^c$  به ترتیب انحراف معیار جابجایی و شتاب سازه در حالت کنترل شده،  $\sigma_{x_s}$  و  $\sigma_{\ddot{x}_s}$  پاسخ‌های مذکور برای زیرسازه و  $\sigma_{x_{12}}^u$  و  $\sigma_{\ddot{x}_{12}}^u$  مطابق بخش ۵-۱ پاسخ‌های سازه در حالت کنترل نشده است و اندیس n مربوط به پاسخ‌های انحراف معیار بی‌بعد شده می‌باشد. شکل ۶ پاسخ‌های انحراف معیار جابجایی بی‌بعد شده سازه  $\sigma_{x_{12}}^n$  و زیرسازه  $\sigma_{x_s}^n$  را به ازای مقادیر مختلف نسبت‌های میرایی و فرکانسی برای  $m_s = 1000$  ton، به صورت خطوط کنتور یا هم‌اندازه نشان می‌دهد. مقادیر خطوط کنتور نشان داده شده برای  $\sigma_{x_{12}}^n$  بین ۰/۶۸ تا ۰/۸۰ و برای  $\sigma_{x_s}^n$  بین ۰/۷۰ تا ۱/۰ متغیر می‌باشد. مقایسه این شکل با شکل ۳ مربوط به استفاده از سیستم TMD دوپست تنی نشان می‌دهد که زیرسازه به دلیل دارا بودن جرم بیشتر نسبت TMD پاسخ کمتری تجربه می‌کند. با این حال با توجه به اینکه در این سیستم، زیرسازه بخشی از سازه اصلی محسوب می‌شود، پاسخ زیرسازه نیز باید به عنوان هدف کنترلی در نظر گرفته شود. برای این منظور، در این حالت هدف کنترل به صورت  $\sigma_{x_c}^n = \text{Max}(\sigma_{x_{12}}^n, \sigma_{x_s}^n)$  تعریف می‌شود و نقطه بهینه پاسخ سازه به نحوی تعیین می‌گردد تا هدف کنترل را کمینه کند. بر اساس روش حداقل‌سازی مستقیم، مقدار بهینه دقیق پاسخ بی‌بعد سازه به ازای پارامترهای  $f_{d_{opt}} = 0/4957$  و  $\zeta_{d_{opt}} = 0/2915$  حاصل می‌شود که مقدار هدف کنترل در آن  $\sigma_{x_c}^n = 0/717$  می‌باشد. مقادیر پاسخ بی‌بعد شده سازه و زیرسازه در این نقطه برابر با هدف کنترل  $\sigma_{x_{12}}^n = \sigma_{x_s}^n = \sigma_{x_c}^n$  می‌باشد. وضعیت منحنی‌های کنتور شکل ۶ نیز موید این مطلب است به نحوی که در مقادیر نسبت‌های فرکانسی و میرایی قید شده، مقادیر خطوط کنتور پاسخ‌های سازه و زیرسازه نزدیک به هم می‌باشند. نتیجه مذکور نشان می‌دهد که زیرسازه ۱۰۰۰ تنی در شرایط بهینه تعریف شده، قادر به کاهش پاسخ جابجایی سازه و زیرسازه به میزان ۲۸/۳ درصد می‌باشد.

شکل ۷ منحنی‌های کنتور پاسخ‌های انحراف معیار شتاب بی‌بعد شده  $\sigma_{\ddot{x}_{12}}^n$  و  $\sigma_{\ddot{x}_s}^n$  را به ازای مقادیر مختلف نسبت‌های میرایی و فرکانسی به ازای  $m_s = 1000$  ton نشان می‌دهد. مقادیر خطوط کنتور نشان داده شده برای  $\sigma_{\ddot{x}_{12}}^n$  بین ۰/۶۳ تا ۰/۸۰ و برای  $\sigma_{\ddot{x}_s}^n$  بین ۰/۴۰ تا ۱/۰ متغیر می‌باشد. در این حالت نیز مشابه پاسخ جابجایی، تابع هدف کنترل به صورت  $\sigma_{x_c}^n = \text{Max}(\sigma_{\ddot{x}_{12}}^n, \sigma_{\ddot{x}_s}^n)$  تعریف می‌شود و نقطه بهینه پاسخ سازه به نحوی تعیین می‌شود تا هدف کنترل را کمینه کند. بر اساس روش حداقل‌سازی مستقیم، مقدار بهینه شده دقیق پاسخ بی‌بعد سازه به ازای پارامترهای  $f_{d_{opt}} = 0/9288$  و  $\zeta_{d_{opt}} = 0/4042$  حاصل می‌شود که مقدار هدف کنترل در آن  $\sigma_{x_c}^n = 0/625$  می‌باشد مقادیر پاسخ بی‌بعد شده سازه و زیرسازه در این نقطه برابر با  $\sigma_{\ddot{x}_{12}}^n = 0/625$  و  $\sigma_{\ddot{x}_s}^n = 0/56$  می‌باشد. در نتیجه زیرسازه ۱۰۰۰ تنی در شرایط بهینه تعریف شده، قادر به کنترل پاسخ شتاب سازه و زیرسازه به ترتیب به میزان ۳۷/۵ و ۴۴ درصد نسبت به سازه کنترل نشده می‌باشد.



شکل ۶: تغییر پاسخ‌های انحراف معیار جابجایی بی‌بعد شده برای سازه خود کنترل با زیرسازه ۱۰۰۰ تنی



شکل ۷: تغییرات پاسخ‌های انحراف معیار شتاب بی‌بعد شده برای سازه خود کنترل با زیرسازه ۱۰۰۰ تنی

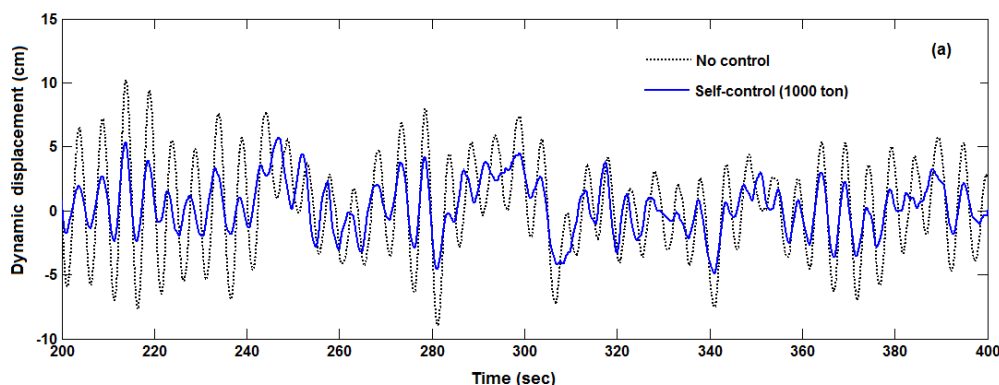
جدول ۳ نتایج به‌کارگیری و بهینه‌سازی سیستم خودکنترل با مقادیر جرم زیرسازه بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ تن را نشان می‌دهد. پارامترهای نسبت میرایی و فرکانسی بهینه برای پاسخ‌های انحراف معیار جابجایی و شتاب سازه و زیرسازه به نحوی بهینه شده‌اند که توابع اهداف تعریف شده در پاراگراف قبل کمینه شوند. این جدول نشان می‌دهد که با افزایش جرم زیرسازه، قابلیت کنترل سیستم افزایش می‌یابد. این روند در مورد پاسخ شتاب سازه مشهودتر می‌باشد. به‌طور مثال کاهش پاسخ شتاب سازه برای زیرسازه‌های ۵۰۰ و ۱۵۰۰ تنی به ترتیب ۲۷/۸ و ۵۳/۲ درصد است که موید نقش موثر افزایش جرم زیرسازه در ارتقای قابلیت کنترل سیستم می‌باشد. برای TMD سیصد تنی با توجه به جدول ۲، کاهش پاسخ‌های انحراف معیار جابجایی و شتاب سازه به ترتیب ۲۷ و ۳۴ درصد می‌باشد. در حالی که به‌ازای زیرسازه ۱۵۰۰ تنی مقادیر کاهش انحراف معیار جابجایی و شتاب میانگین سازه و زیرسازه، به ترتیب ۳۰/۳ و ۴۸/۸ درصد می‌باشد که بیان‌کننده قابلیت بیشتر سیستم خودکنترل در کاهش پاسخ سیستم می‌باشد. نکته قابل تامل در جدول ۳ و اشکال ۶ و ۷ این است که پارامترهای بهینه پاسخ‌های جابجایی و شتاب، فاصله نسبتاً زیادی از همدیگر دارند، به‌طور مثال برای زیرسازه ۱۰۰۰ تنی، مقادیر نسبت فرکانسی بهینه پاسخ جابجایی و شتاب به ترتیب ۰/۴۴ و ۰/۹۱ می‌باشند. با توجه به این نتیجه، برای طراحی این سیستم در اهداف عملی، بهتر است تابع هدف کنترلی به‌نحوی تعریف شود که هر دو پاسخ جابجایی و شتاب را بر حسب اهمیت مورد نظر در برگیرد. عموماً پاسخ

شتاب سازه به دلیل نقش مهم تر در معیار آسایش ساکنین، از اهمیت بیشتری برخوردار است. با توجه به اینکه سیستم خودکنترلی، قابلیت بیشتری در کنترل پاسخ سازه به ویژه پاسخ شتاب دارد، استفاده از این سیستم با زیرسازه سنگین، به طور موثری موجب بهبود آسایش ساکنین در شرایط بحرانی وزش باد خواهد شد.

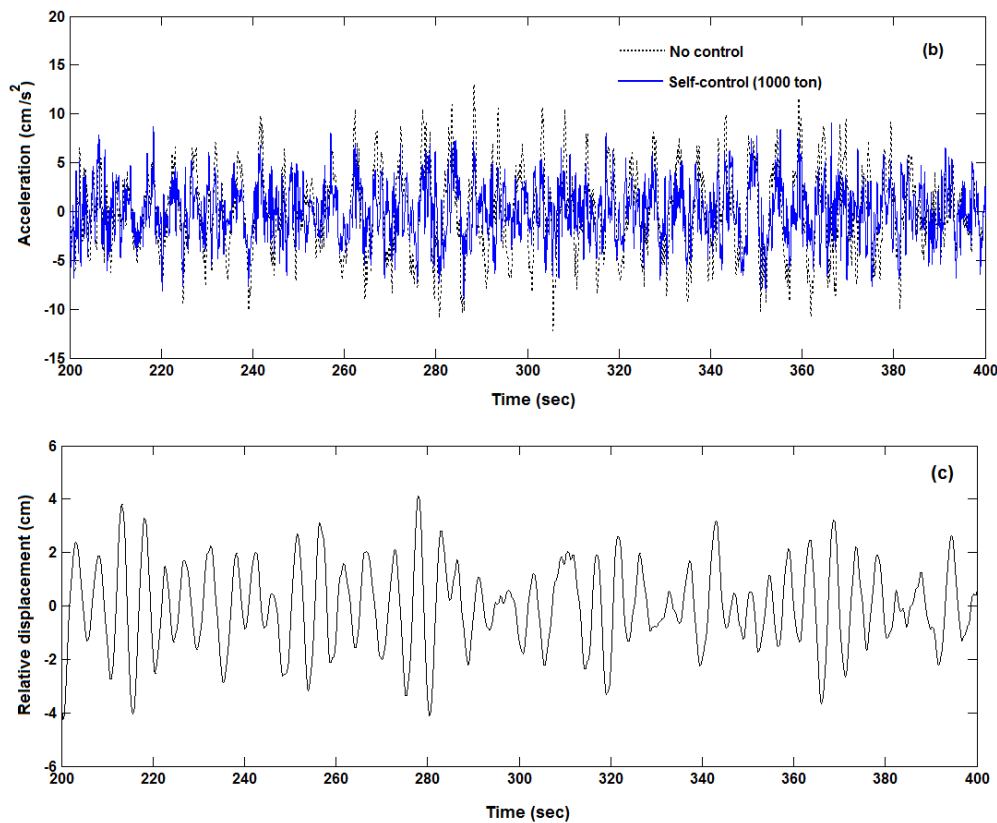
جدول ۳: نتایج به کارگیری و بهینه سازی سیستم خودکنترل با مقادیر جرم زیرسازه بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ تن

پارامترهای پاسخ شتاب				پارامترهای پاسخ جابجایی				جرم زیرسازه (تن)
$\sigma_{\ddot{x}_s}^n$	$\sigma_{\ddot{x}_{12}}^n$	$f_{d_{opt}}$	$\zeta_{d_{opt}}$	$\sigma_{x_s}^n$	$\sigma_{x_{12}}^n$	$f_{d_{opt}}$	$\zeta_{d_{opt}}$	
	۱/۰				۱/۰			۰
۰/۷۲۲	۰/۷۲۲	۰/۱۸۸۶۴	۰/۲۷۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۵۴۸۳	۰/۲۸۸۷	۵۰۰
۰/۶۶۳	۰/۶۶۵	۰/۹۳۹۲	۰/۳۰۵۷	۰/۷۳۴	۰/۷۳۴	۰/۵۰۷۲	۰/۲۹۳۷	۷۵۰
۰/۵۶۰	۰/۶۲۵	۰/۹۲۸۸	۰/۴۰۴۲	۰/۷۱۷	۰/۷۱۷	۰/۴۷۱۵	۰/۲۹۵۷	۱۰۰۰
۰/۵۰۶	۰/۵۸۹	۰/۹۱۸۴	۰/۴۸۳۴	۰/۷۰۵	۰/۷۰۵	۰/۴۴۰۵	۰/۲۹۵۵	۱۲۵۰
۰/۴۶۸	۰/۵۵۶	۰/۹۰۷۵	۰/۵۴۷۱	۰/۶۹۷	۰/۶۹۷	۰/۴۱۳۶	۰/۲۹۲۹	۱۵۰۰

**تحلیل حوزه زمان:** به منظور ارزیابی سیستم کنترلی و بررسی و مقایسه وضعیت پاسخها در حوزه زمان، با استفاده از روش تشریح شده در بخش ۳-۳، تاریخچه نوسانات نیروی طولی باد شبیه سازی گردید. تولید تاریخچه زمانی نیروی باد برای ۱۶ درجه آزادی انتقالی سیستم و بازه زمانی حدود هزار ثانیه انجام گرفت. شکل ۸(الف) تاریخچه زمانی پاسخ جابجایی دینامیکی را برای حالات کنترل شده سازه با زیرسازه هزار تنی، و کنترل نشده در بازه زمانی ۲۰۰ تا ۴۰۰ ثانیه نشان می دهد. پاسخ شتاب نیز برای شرایط قید شده، در شکل ۸(ب) ارائه شده است. اشکال مذکور نقش موثر استفاده از سیستم خودکنترلی را در کاهش پاسخهای دینامیکی سازه تایید می کنند. در سیستم خودکنترلی، میراگرهای نصب شده بین سازه و زیرسازه موجب کاهش سرعت نسبی بین آنها شده و با جذب انرژی ارتعاشی، پاسخ سیستم را در مقابل بارهای دینامیکی باد کاهش می دهند. برای تامین عملکرد فوق بایستی در مراحل طراحی و اجرای سازه، فضای آزاد لازم بین سازه و زیرسازه تامین گردد تا امکان حرکت نسبی بین آنها فراهم شود. شکل ۸(ج) تاریخچه زمانی حرکت نسبی بین سازه و زیرسازه را برای سیستم دارای زیرسازه هزار تنی نشان می دهد. مقدار جابجایی نسبی حداکثر حدود ۴ سانتیمتر می باشد که با توجه به عملکرد موثر کنترلی سیستم، توجیه پذیر بوده و از نظر طراحی و اجرایی قابل تامین خواهد بود.



شکل ۸: نتایج تحلیل تاریخچه زمانی برای سیستم دارای زیرسازه هزار تنی (الف) پاسخ جابجایی دینامیکی را برای حالات کنترل شده و کنترل نشده (ب) پاسخ شتاب برای حالات کنترل شده و کنترل نشده (ج) جابجایی نسبی بین سازه و زیرسازه



ادامه شکل (۸):

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، تاثیر استفاده از بخشی از برج‌های تلویزیونی و مخاراتی به عنوان زیرسازه جاذب ارتعاش در کنترل پاسخ سازه در برابر نیروهای دینامیکی باد مورد ارزیابی قرار گرفت. مطالعه موردی بر روی برج ۳۱۰ متری نانجینگ واقع در کشور چین انجام گرفت. پاسخ سازه برای سه حالت مورد محاسبه قرار گرفت: (۱) حالت کنترل نشده سازه، (۲) حالتی که یک سیستم میراگر جرمی تنظیم شونده یا TMD دارای جرم متغیر تا سقف ۳۰۰ تن در محل سکوی فوقانی استفاده شود و (۳) حالت سیستم خودکنترلی که در آن قسمتی از سازه اصلی در محل سکوی تماشای فوقانی با جرم متغیر بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ تن به عنوان زیرسازه جاذب ارتعاش عمل نماید. نتایج کلی حاصل از مطالعه انجام پذیرفته به شرح ذیل قابل بیان می‌باشد:

- نتایج به‌کارگیری و بهینه‌سازی میراگر جرمی تنظیم شونده یا TMD نشان می‌دهد با افزایش جرم TMD قابلیت کنترلی آن افزایش می‌یابد، با این حال مقدار تغییرات در قابلیت کنترل سیستم کاهش می‌یابد، به‌طور مثال با افزایش جرم TMD از ۲۵۰ به ۳۰۰ تن، قابلیت کنترل جابجایی و شتاب سیستم به‌طور میانگین فقط ۱/۲۵ درصد افزایش می‌یابد. در نتیجه، برای افزایش قابل توجه در قابلیت کنترل این سیستم، نیاز به جرم TMD خیلی سنگین‌تری خواهد بود. استفاده از جرم سنگین TMD ضمن افزایش وزن سازه، مستلزم اختصاص بخش قابل توجهی از فضای با ارزش سازه به یک جرم افزودنی و دامنه ارتعاش آن می‌باشد.
- با به‌کارگیری بخشی از جرم سازه به عنوان زیرسازه‌ی جاذب ارتعاش، محدودیت‌های مربوط به سیستم TMD رفع می‌گردد و امکان تامین جرم بالای جاذب ارتعاش بدون اضافه شدن وزن سازه و یا نیاز به اختصاص فضای اضافی فراهم می‌شود. نتیجه به‌کارگیری زیرسازه جاذب ارتعاش نشان می‌دهد با افزایش جرم زیرسازه، قابلیت کنترل سیستم افزایش می‌یابد، این روند در مورد پاسخ شتاب سازه مشهودتر می‌باشد. به‌طور مثال، کاهش پاسخ شتاب سازه برای زیرسازه‌های ۵۰۰ و ۱۵۰۰ تنی به ترتیب ۲۷/۸ و



۵۳/۲ درصد می‌باشد. با توجه به اینکه پاسخ شتاب سازه به دلیل نقش مهم‌تر در معیار آسایش ساکنین، از اهمیت بیشتری برخوردار است، استفاده از سیستم پیشنهادی با زیرسازه سنگین، به‌طور موثری موجب کنترل پاسخ سیستم و بهبود آسایش ساکنین در شرایط بحرانی وزش باد خواهد گردید.

• با توجه به اینکه میراگرهای نصب شده بین سازه و زیرسازه، باعث کاهش سرعت نسبی بین آن‌ها و جذب انرژی ارتعاشی می‌شوند، در مراحل طراحی و اجرای این سیستم بایستی فضای آزاد لازم بین سازه و زیرسازه تامین گردد. برای مثال، در مورد سیستم خودکنترلی با زیرسازه هزار تنی، بر اساس تحلیل تاریخچه زمانی، مقدار جابجایی نسبی حداکثر بین سازه و زیرسازه حدود ۴ سانتیمتر می‌باشد که با توجه به عملکرد موثر کنترلی سیستم توجیه‌پذیر بوده و از نظر طراحی و اجرایی قابل تامین خواهد بود.

## مراجع:

- [1] Varadarajan N. and Nagarajaiah S. (2004), "Wind Response Control of Building with Variable Stiffness Tuned Mass Damper Using Empirical Mode Decomposition/Hilbert Transform"; *Journal of Engineering Mechanics*, 130, 451-458
- [2] Moon K. (2010), "Vertically distributed multiple tuned mass damper in tall buildings: performance analysis and preliminary design"; *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 19, 347-366
- [3] Roffel A. J., Narasimhan S., Haskett T. (2012), "Performance of pendulum tuned mass dampers in reducing the responses of flexible structures"; *Journal of Structural Engineering*, 04013019(13).
- [4] Modi V.J., Akinturk A. (2002), "An efficient liquid sloshing damper for control of wind-induced instabilities"; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 1907-1918.
- [5] Samali B., Mayol E., Kwok K.C.S., Mack A., Hitchcock P. (2004), "Vibration control of the wind-excited 76-story benchmark building by liquid column vibration absorbers"; *Journal of Engineering Mechanics*, 130(4) , 478-485.
- [6] Pirner M., Urushadze S. (2007), "Liquid damper for suppressing horizontal and vertical motions-parametric study"; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, 1329-1349
- [7] Feng M.Q., Mita A. (1995), "Vibration control of tall buildings using mega sub configuration"; *Journal of Engineering Mechanics*, 121(10), 1082-1088
- [8] Chai W., Feng M. Q. (1997), "Vibration control of super tall buildings subjected to wind loads"; *Int. J. Non-Linear Mech.*, 32(4), 657-668.
- [9] Zhang X., Zhang J. L., Wang D., 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.
- [10] Zhang X., Qin X., Cherry S., Lian L., Zhang J., Jiang J. (2009), "A New Proposed Passive Mega-sub Controlled Structure and Response Control"; *Journal of Earthquake Engineering*, 13, 252-274.
- [11] Limazie T., Zhang X., Wang X. (2013), "Vibration control parameters investigation of the Mega-sub Controlled Structure System (MSCSS)"; *Earthquakes and Structures*, 5(2), 225-237.
- [12] Wang Ch., Lü Z., 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.
- [13] Liu Y., Lu Z. (2014), "Seismic Performance and Storey-Based Stability of Suspended Buildings"; *Advances in Structural Engineering*, 17(10), 1531-1550
- [14] Reinhorn A. M., Soong T. T. and Cao H. (1995), "Preliminary evaluation of wind induced response of Nanjing TV tower" *Report of US/PRC Coordination Program*, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY.
- [15] Kareem A., Kabat S., Haan F. L. (1998), "Aerodynamics of Nanjing Tower: A case study"; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 77&78, 725-739.
- [16] Cheng W., Qu W., and Li A. (1994), "Hybrid vibration control of Nanjing TV tower under wind excitation"; *Proc. 1st World Conf. Structural Control, Pasadena, CA*, 1, 32-34
- [17] Wu J. C. and Yang J. N. (1998), "Active control of transmission tower under stochastic wind"; *Journal of Structural Engineering*, 124(2), 1302-1312
- [18] H. Cao, A. M. Reinhorn and T. T. Soong (1998), "Design of an active mass damper for a tall TV tower in Nanjing China"; *Engineering Structures*, 2(3), 134-143
- [19] Feng M. Q. and Zhang R. (1997), "Wind-induced vibration characteristics of Nanjing TV tower"; *Int. J. Non-Linear Mechanics*, 32(4), 693-706
- [20] Feng M. Q., Kim J. M., Xue H. (1998), "Identification of a dynamic system using ambient vibration measurements"; *Journal of Applied Mechanics*, ASME, 1998, 65(4), 1010-1021
- [21] Paz M. (1991), "Structural Dynamics", Van Nostrand Reinhold, New York, USA.

- [22] Davenport A.G. (1967), "Gust loading factors"; *Journal of the Structural Division*, ASCE, 93, 11-34
- [23] Vickery B.J. (1970), "On the reliability of gust loading factors"; Proc., *Technical Meeting Concerning Wind Loads on Buildings and Structure*, 30, 296-312.
- [24] Shinozuka M., Deodatis G. (1988), "stochastic process models for earthquake ground motion"; *Probabilistic Engineering Mechanics*, 3(3).
- [25] Deodatis G. (1996), "Simulation of ergodic multivariate stochastic processes"; *Journal of engineering mechanics*, 122, 778-787
- [26] Togbenou K., Li Y., Chen N., Liao H. (2016), "An efficient simulation method for vertically distributed stochastic wind velocity field based on approximate piecewise wind spectrum"; *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 151, 48-59
- [27] Ubertini F., Giuliano F. (2010), "Computer Simulation of Stochastic Wind Velocity Fields for Structural Response Analysis: Comparisons and Applications"; *Advances in Civil Engineering*, Article ID 749578.