

Effects of the soil-structure interaction on the performance of TMD used to control the seismic longitudinal response of suspension bridges

Hamed Alizadeh¹, Seyed Hossein Hosseini Lavassani^{2*}

1- Ph.D. Student, department of civil engineering, Kharazmi university, Tehran, Iran

2 -Assistant Professor, department of civil engineering, Kharazmi university, Tehran, Iran

ABSTRACT

Suspension bridges contain high towers due to having long span. Large height makes them to experience remarkable displacement responses against dynamic loading, like seismic excitation which disturbs their performance. In order to overcome this problem, control strategies, like tuned mass damper or in brief TMD as a passive system can be used. The performance of these systems can be addressed by the indices defined according to structural responses. On the other hand, its parameters should be adjusted to their optimum values to providing the best performance accessible by the meta heuristic algorithm. Here, the seismic displacement and energy responses of the Golden gate bridge considering soil-structure interaction were investigated using the optimum TMD optimized by observer teacher learner algorithm, and the performance of it was addressed by the energy indices. The results indicated that by increasing the softness of the bed soil the first mode plays the dominant role in the final response. Also, TMD was a successful system to control the vibration of the tower-pier system according to the defined energy indices for all the conditions of the bed soil considered.

ARTICLE INFO

Receive Date: 29 November 2020

Revise Date: 09 July 2021

Accept Date: 04 August 2021

Keywords:

Suspension bridge
Tuned mass damper
Performance indices
Meta heuristic algorithm
Soil-structure interaction

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.259712.2303>

*Corresponding author: Seyed Hossein Hosseini Lavassani

Email address: lavassani@khu.ac.ir

تأثیرات اندرکنش خاک و سازه بر عملکرد میراگر جرمی تنظیم شونده بهینه جهت کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای طولی پل‌های معلق

حامد علی‌زاده^۱، سید حسین حسینی لواسانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۲- استادیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

چکیده

ارتفاع زیاد برج‌های پل‌های معلق باعث می‌شود تا در برابر بارهای دینامیکی، مانند تحریکات لرزه‌ای، پاسخ‌های جابه‌جایی قابل توجهی را تجربه کنند. بدین منظور، می‌توان از سیستم‌های کنترل کننده ارتعاشات، مانند میراگر جرمی تنظیم شونده که یک سیستم غیرفعال است، استفاده کرد. عملکرد این سیستم‌ها بر اساس شاخص‌های کارایی که بر حسب پاسخ‌های سازه تعریف می‌شوند، قابل بررسی هستند. میراگرها برای اینکه بتوانند مطلوب‌ترین عملکرد خود را در کاهش ارتعاشات ارائه دهند، نیازمند این هستند که پارامترهای خود را به سمت مقادیر بهینه سوق دهند؛ این مهم را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی فراابتکاری انجام داد. در این تحقیق، پاسخ‌های لرزه‌ای طولی جابه‌جایی و انرژی پل معلق گلدن گیت تحت اثر چهار شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، با استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده که مشخصات آن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری استاد-دانش‌آموز-مبصر، بهینه و توسط شاخص‌های انرژی محور که تعریف شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که با نرم‌تر شدن خاک بستر، مود ابتدایی سازه نقش به مراتب مهمتری را در پاسخ نهایی ایفا می‌کند. همچنین، بر اساس شاخص‌های انرژی تعریف شده، میراگر جرمی تنظیم شونده یک سیستم کنترلی کاملاً موفق جهت کنترل ارتعاشات سیستم برج-شمع برای تمامی حالات خاک بستر در نظر گرفته شده، بود. میراگر بهینه با درصد جرم معادل ۵ و ۳۰ درصد میرایی که به مود اول تنظیم شده، توانست تا ۵۲ درصد پاسخ‌های لرزه‌ای را کاهش دهد. کلمات کلیدی: پل معلق، میراگر جرمی تنظیم شونده، شاخص‌های کارایی، الگوریتم‌های فراابتکاری، اندرکنش خاک-سازه.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.259712.2303	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.259712.2303	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	۱۴۰۰/۰۴/۱۳	۱۴۰۰/۰۵/۱۳	۱۴۰۰/۰۴/۱۸	۱۳۹۹/۰۹/۰۹
سید حسین حسینی لواسانی lavasani@khu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

پل‌های معلق از آن دست سازه‌هایی هستند که در معرض طیف گسترده‌ای از ارتعاشات محیطی، مانند تحریکات لرزه‌ای و آبرودینامیکی قرار دارند. در این سازه‌ها، پاسخ‌های سازه به دو قسمت کلی تقسیم‌بندی می‌شوند؛ قسمت اول، شامل پاسخ‌هایی است که در آنها سیستم معلق، یعنی کابل‌های اصلی و عرشه نقش غالب را دارند. حال آنکه در قسمت دوم، برج‌ها و شمع‌ها نقش به مراتب مهمتری را در پاسخ نهایی ایفا می‌کنند. در مورد تحریکات لرزه‌ای، می‌توان گفت که زاویه‌ی برخورد مولفه‌های افقی زلزله‌ها با پایه‌ی برج‌ها، معین مودهای ارتعاشی پل خواهد بود. هنگامی که یکی از مولفه‌های افقی در راستای محور طولی سیستم معلق به پای برج‌ها وارد شود، آنگاه پل شروع به نوسان در مود طولی خود خواهد کرد. به دلیل سختی بالای طولی سیستم معلق، پاسخ‌های طولی فقط محدود به ارتعاشات برج‌ها خواهند شد [۱].

ارتفاع زیاد برج‌ها باعث می‌شود تا جابه‌جایی‌های حاصل شده از بارهای دینامیکی، بسیار قابل توجه باشند. این اتفاق وجود یک سیستم کنترلی را ملزم می‌کند. سیستم‌های مذکور بر اساس سازه‌ی مورد نظر و به فراخور شرایط موجود، می‌بایست مطالعه و سپس مورد استفاده قرار گیرند. این سیستم‌ها در چهار دسته‌ی کلی فعال، نیمه فعال، غیر فعال و مرکب تقسیم‌بندی می‌شوند [۲]. در این بین، سیستم‌های غیرفعال را می‌توان یکی از پرکاربردترین آنها دانست. در بین تمامی دستگاه‌هایی که زیرمجموعه‌ی این سیستم هستند، میراگر جرمی تنظیم شونده ساده‌ترین ساختار را دارا است، که به دلیل همین ویژگی مطلوب، در بسیاری از سازه‌های ساخته شده به منظور کاهش ارتعاشات مورد استفاده قرار گرفته است [۳] و [۴].

میراگرهای جرمی تنظیم شونده در ساده‌ترین حالت، سه پارامتر اساسی درصد جرم، درصد میرایی و فرکانس تنظیمی را شامل می‌شوند. به منظور حصول بهترین عملکرد میراگرها، این پارامترها می‌بایست به مناسب‌ترین مقدار خود تنظیم شوند [۵]. این مهم را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌یابی بدست آورد. در این راستا، الگوریتم‌های فراابتکاری از رایج‌ترین ابزارها هستند. این الگوریتم‌ها با یک جمعیت اولیه، به عنوان حل اولیه‌ی مسئله، شروع و سپس به طور مداوم بوسیله‌ی تغییر نسل‌ها به سمت جواب بهینه حرکت می‌کنند [۶]. الگوریتم استاد-دانش‌آموز یک نمونه‌ی کاربردی از این نوع الگوریتم‌ها است. استاد شخصی است که سطح بالایی از دانش را در اختیار دارد و تمام تلاش خود را می‌کند تا دانش‌آموزان را به سطح خویش برساند. از سوی دیگر، دانش‌آموزان نیز با تعاملی که با یکدیگر دارند، سعی می‌کنند تا سطح علمی خود را بالا ببرند. افزودن یک شخص دیگر به نام مبصر باعث عملکرد هرچه بهتر این چرخه خواهد شد که موجب بوجود آمدن الگوریتم استاد-دانش‌آموز-مبصر می‌شود [۷]. محققان بسیاری از این ابزار برای بهینه کردن مشخصات میراگرها استفاده کرده‌اند [۸].

میراگر جرمی تنظیم‌شونده جهت کنترل پاسخ‌های پل‌های معلق تحت اثر پدیده‌های آبرودینامیکی و تحریکات لرزه‌ای بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [۹]. علی‌زاده و همکاران با بهره‌گیری از تحلیل حساسیت، مقدار مناسب شعاع ژیراسیون و مکان مناسب قرارگیری میراگرها را، برای حصول بیشترین مقدار سرعت پدیده‌ی آبرودینامیکی فلاتر سیستم معلق پل وینسنت توماس^۱، محاسبه کردند [۱۰]. لواسانی و همکاران با به کارگیری تحلیل حساسیت، مقادیر مطلوب پارامترهای میراگر جرمی را جهت بیشینه کاهش پاسخ لرزه‌ای پیچشی پل معلق وینسنت توماس، تحت اثر زلزله‌های حوزه‌نزدیک پالس‌دار، ارائه کردند [۱۱]. طی تحقیقی دیگر توسط همین نویسندگان، مقادیر بهینه‌ی میراگر جرمی تنظیم‌شونده‌ی فعال، که از دو نوع سیستم استنتاجی فازی نوع یک و دو بهره می‌گرفت، و میراگر جرمی تنظیم‌شونده‌ی غیرفعال، به منظور کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای قائم پل‌های معلق وینسنت توماس و گلدن گیت^۲، توسط الگوریتم فراابتکاری غرش شیر، بهینه شدند [۱۲]. علی‌زاده و لواسانی میراگرها را برای کاهش پاسخ لرزه‌ای قائم پل‌های معلق دهانه کوتاه، متوسط و بلند مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که این میراگرها در تمامی دهانه‌ها کاهش‌های مورد قبولی را ارائه می‌دهند. سپس، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای میراگرها برای هر دهانه، و با توجه به فاصله‌ی سازه‌ی پل‌ها از گسل ارائه شد [۱۳].

¹ Vincent Thomas

² Golden gate

محققان سیستم‌های کنترلی را جهت کاهش پاسخ‌های دینامیکی طولی پل‌های کابلی به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۴]. میراگر جرمی تنظیم‌شونده برای کاهش ارتعاشات ناشی از ریزش گردابه‌ها، در برج‌های پل آکاشی کایکو^۳ مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵]. یانگ و کای یک سیستم کنترلی ترکیبی غیر فعال و نیمه فعال را برای کنترل پاسخ‌های لرزه‌ای طولی پل معلق پینگ‌شنگ^۴ ارائه کرده و مشخصات و شاخص کارایی آن را بر اساس پاسخ‌های جابه‌جایی و نرخ تغییرات شتاب بدست آوردند. آنها سیستم پیشنهادی خود را تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های متفاوتی از جمله ال‌سنترو بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که سیستم مورد نظر آنها کاملاً کارا است [۱۶]. شاخص‌های کارایی ممکن است بر اساس پاسخ‌های متفاوت سازه مانند انرژی، نرخ تغییرات شتاب، جابه‌جایی و موارد دیگر تعریف شوند. هدف از در نظر گرفتن شاخص‌های کارایی، سازگاری بیشتر میراگر جرمی تنظیمی با مشخصات دینامیکی سازه و نهایتاً ارائه بهینه‌ترین حالت است.

در این تحقیق، عملکرد میراگر جرمی تنظیم‌شونده که پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم فراابتکاری استاد-دانش‌آموز-مبصر بهینه شده‌اند، در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای طولی سیستم برج-شمع پل‌های معلق، با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این راستا، برای افزایش کارایی و سازگاری میراگر با سازه‌ی اصلی، شاخص‌هایی از جنس پاسخ‌های انرژی تعریف خواهند شد که عملکرد میراگر را کمی‌سازی کرده و باعث می‌شوند تا مشخصات آن به سمت مقادیر بهینه‌ی ممکن سوق پیدا کنند. برای مطالعه‌ی عددی، سیستم برج‌شمع پل معلق گلدن گیت در نظر گرفته شده است. پس از بیان کلیات و مدل‌سازی مورد نیاز، چهار شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک پالس‌دار^۵ به سازه مورد نظر وارد شده و پس از تفصیل نتایج بدست آمده، اهم موارد در قسمت نتیجه‌گیری بیان می‌شوند.

۲- معادله‌ی حرکت

در پل‌های معلق، با توجه به جهتی که مولفه‌های زلزله به برج‌ها و مهارگرهای آن وارد می‌شوند، نوع ارتعاشات مشخص می‌شوند. در حالت کلی، می‌توان آنها را در سه حالت مجزا تقسیم‌بندی کرد: الف) زمانی که مولفه‌ی افقی بر محور طولی پل عمود باشد، آنگاه ارتعاشات جانبی برج‌ها با ارتعاشات پیچشی-جانبی سیستم معلق همراه خواهند شد. ب) زمانی که مولفه‌ی افقی زلزله با راستای طولی پل هم‌جهت باشد، آنگاه ارتعاشات طولی برج‌ها با ارتعاشات طولی سیستم معلق همراه خواهند شد. ج) نهایتاً زمانی که مولفه‌ی قائم به برج‌ها اعمال شود، برج‌ها و سیستم معلق به ترتیب با ارتعاشات مودهای افقی و قائم یکدیگر را همراهی خواهند کرد. در ضمن، به دلیل بالا بودن سختی قائم برج‌ها و طولی سیستم معلق از پاسخ‌های نظیر آنها چشم‌پوشی می‌شود [۱۷]. در اینجا، مورد (ب) و پاسخ‌های طولی برج‌ها مد نظر قرار خواهند گرفت. با استفاده از انرژی‌های جنبشی و پتانسیل و همچنین اعمال اصل هامیلتون، خواهیم داشت [۱۸]:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

که در آن M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سیستم برج-شمع هستند. همچنین، $u(t)$ نشان دهنده‌ی پاسخ‌های جابه‌جایی نظیر برج‌ها است. تعداد نقاط قرار گرفته در بالای سر آن، مرتبه‌ی مشتق نسبت به زمان را مشخص می‌کند، که یک نقطه نشان‌گر پاسخ‌های سرعت و دو نقطه نشان دهنده‌ی پاسخ‌های شتاب است. r و $\ddot{u}_g(t)$ نیز به ترتیب بردار تاثیر و شتاب‌های متناظر تحریکات زمین هستند. برای محاسبه‌ی ماتریس‌های جرم و سختی سیستم برج-شمع پل‌های معلق با استفاده از روش المان محدود و با در نظر گرفتن رفتار المان اولر-برنولی که از تاثیرات ناشی از برش چشم‌پوشی می‌کند، خواهیم داشت:

$$[k_{bs}]_i = \frac{E_i I_i}{L_i^3} \begin{bmatrix} 12 & -6L & -12 & -6L \\ -6L & 4L^2 & 6L & 2L^2 \\ -12 & 6L & 12 & 6L \\ -6L & 2L^2 & 6L & 4L^2 \end{bmatrix}, \quad [k_{gs}]_i = \frac{-P_w}{30L_i} \begin{bmatrix} 36 & -3L & -36 & -3L \\ -3L & 4L^2 & 3L & -L^2 \\ -36 & 3L & 36 & 3L \\ -3L & -L^2 & 3L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

³ Akashi Kaiyko

⁴ Pingsheng

⁵ Pulse-type

یابنگ، ممان اینرسی مرتبه‌ی دوم، طول المان و نیروی فشاری ناشی از کابل‌های اصلی هستند. در مورد ماتریس جرم نیز رابطه به صورت زیر خواهد بود.

$$[m_t]_i = \frac{m_i L_i}{420} \begin{bmatrix} 156 & -22L & 54 & 13L \\ -22L & 4L^2 & -13L & -3L^2 \\ 54 & -13L & 156 & 22L \\ 13L & -3L^2 & 22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن m مقدار جرم واحد طول هر المان است. همچنین، زیر-اندیس i نشان دهنده‌ی شماره‌ی هر کدام از المان‌های در نظر گرفته شده است. بر اساس ماتریس‌های جرم و سختی ارائه شده، و با کمک رابطه‌ی رابلی، می‌توان ماتریس میرایی را به شکل زیر نوشت:

$$[C] = a_0[K] + a_1[M] \quad (4)$$

که در آن، ضرایب a_0 و a_1 با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شوند.

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \begin{Bmatrix} \omega_i * \omega_j \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

که در آن، ξ درصد میرایی در نظر گرفته شده برای سازه، و همچنین ω_i و ω_j فرکانس نظیر مودهای i -ام و j -ام هستند. حال، می‌توان معادله‌ی حرکت را به فضای حالت انتقال داد:

$$\{\dot{Z}\}_{2n \times 1} = [A]_{2n \times 2n} \{Z\}_{2n \times 1} + \{B\}_{2n \times 1}(r) \ddot{u}_g(t) \quad (6)$$

که در آن، Z ، A و B به ترتیب بردار فضای حالت، ماتریس فضای حالت و بردار مقادیر ورودی هستند. زیراندیس n نشان دهنده‌ی تعداد کلی درجات آزادی است. پارامترهای مذکور به شکل زیر هستند:

$$[A]_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (7)$$

$$\{B\}_{2n \times 1} = \begin{Bmatrix} 0_{n \times 1} \\ 1_{n \times 1} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

I یک ماتریس یکه است. نهایتاً پاسخ‌های نهایی با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شوند:

$$\{d\} = [C1]\{Z\} \quad (9)$$

$$[C1] = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{2 \times 2n} \quad (10)$$

۳- میراگر جرمی تنظیم شونده

از مهمترین ویژگی‌های میراگرها که منجر به استقبال گسترده از آنها در انجام کارهای تحقیقاتی و پروژه‌های عملی شده است، می‌توان به روند طراحی ساده، قابلیت اعتماد بالا، کارایی مطلوب، سیستم ساده و هزینه‌های پایین نگهداری اشاره کرد. در برابر محاسن یاد شده، می‌توان از حساسیت بسیار بالای آنها در برابر تنظیم‌شوندگی، فضای زیاد برای جای‌گذاری و عدم تغییرپذیری مشخصات آنها در برابر بارهای دینامیکی، به عنوان معایب نام برد. مولفه‌های سختی و میرایی (ویسکوز) متناظر میراگر به شرح زیر محاسبه می‌شوند:

$$K_t = m_t (2\pi f_N)^2 \quad (11)$$

$$C_t = 2\xi_t m_t (2\pi f_N) \quad (12)$$

در رابطه‌های (۱۱ و ۱۲)، m_t ، ξ_t و f_N به ترتیب، بیان‌گر درصد جرم، درصد میرایی و فرکانس تنظیمی میراگر هستند. کارایی میراگرها با افزایش درصد جرم آنها بهبود می‌یابد، اما مقادیر بالای این پارامتر می‌تواند باعث تغییر در مشخصات دینامیکی طبیعی سازه‌ها شود. درصد میرایی در مقایسه با درصد جرم، تاثیر کمتری در عملکرد میراگر دارد، اما مقادیر بالای آن می‌تواند موجب استهلاک مقادیر بیشتری از انرژی‌های ناشی از بارهای اعمالی شود. البته، به کارگیری مقادیر بالای میرایی باعث بروز اختلال در حرکت مطلوب جرم میراگر خواهد شد. یکی دیگر از نقاط ضعف میراگرها محدود شدن آنها به یک محدوده‌ی فرکانسی باریک که حول فرکانس مود اصلی سازه قرار دارد، است. برای فائق آمدن بر این مشکل، می‌توان به جای استفاده از یک میراگر جرمی تنظیم شونده از چندین عدد از آنها که به

فرکانس‌های مختلفی تنظیم شده‌اند، استفاده کرد. به عنوان یک روش اقتصادی‌تر، می‌توان آنرا به گونه‌ای تنظیم کرد که مودهای آسیب-پذیر بیشتری از سازه را درگیر کند. در این راستا، به جای شیوه‌ی سنتی که یکی از مودهای (معمولا) اولیه را به عنوان مود غالب در نظر گرفته و میراگر را به آن تنظیم می‌کنند، می‌توان همان مود را در نظر گرفت و یک نسبت فرکانسی را در فرکانس آن ضرب کرد، تا این نسب توانایی انتقال فرکانس تنظیمی به بازه‌های حساس‌تر را داشته باشد. [۱۹-۲۱]. نسبت مذکور به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha_t = \frac{f_N}{f_{ns}} \quad (۱۳)$$

f_{ns} بیانگر مود اصلی سازه است، که نسبت فرکانسی بر اساس آن محاسبه خواهد شد.

نهایتا، میراگر جرمی تنظیم شونده از نظر آرایش درجات آزادی باعث اضافه شدن یک درجه‌ی آزادی جابه‌جایی طولی به مدل

المان محدود سیستم برج-شمع می‌شود. در این حالت، ماتریس‌های سختی، میرایی و جرم به صورت زیر تغییر پیدا می‌کنند.

$$k(i, i) = k(i, i) + k_{j_{tmd}}, \quad k_j(n+1, n+1) = k_{j_{tmd}}, \quad k_j(n+1, i) = k_j(i, n+1) = -k_{j_{tmd}} \quad (۱۴)$$

$$c(i, i) = c(i, i) + c_{j_{tmd}}, \quad c(n+1, n+1) = c_{j_{tmd}}, \quad c(n+1, i) = c(i, n+1) = -c_{j_{tmd}} \quad (۱۵)$$

$$m(n+1, n+1) = m_{tmd} \quad (۱۶)$$

در روابط (۱۴-۱۶) n بیانگر تعداد کل درجات آزادی مدل المان محدود سیستم برج-شمع است. i نشان‌دهنده‌ی درجه‌ی

آزادی است که میراگر جرمی تنظیم شونده به آن الحاق می‌شود.

۳-۱ شاخص‌های انرژی

بر اساس مطالب گفته شده‌ی اخیر، هدف اصلی از استفاده‌ی میراگرهای تنظیم شونده در سازه‌ها، استهلاک انرژی منتقل شده به سازه از طرف بارهای دینامیکی وارده، و متعاقبا کاهش پاسخ‌های جابه‌جایی است. برای این منظور، می‌بایست کل انرژی مستهلک شده طی یک بارگذاری دینامیکی وارد بر سازه را به دو بخش تقسیم کرد. بخش اول انرژی است که توسط میرایی مکانیکی خود سیستم مستهلک شده و بخش دوم انرژی است که میراگر جرمی تنظیم شونده توانسته آن را توسط میرایی خود مستهلک کند. انرژی در حدود خطی الاستیک، در چهار حالت انرژی ورودی کلی، مستهلک شده، کرنشی و جنبشی وجود خواهد داشت. لذا، نمی‌توان برای هر کدام از آنها به طور جداگانه یک شاخص تعریف کرد و باید نحوه تغییر آنها را با شاخص‌های به مراتب کمتری بررسی کرد. بنابراین، برای مطالعه نحوه رفتار انرژی‌های مذکور، در مجموع دو شاخص در این قسمت تعریف خواهد شد. به دلیل تعریف شاخص‌های مذکور بر حسب پارامترهای انرژی، در ابتدا مقادیر انرژی متناظر سازه می‌بایست محاسبه شوند. در این راستا، انرژی ورودی (E_{ie})، انرژی مستهلک شده (E_{de})، انرژی کرنشی (E_{se}) و انرژی جنبشی (E_{ke}) به صورت روابط زیر بیان می‌شوند [۲۲] و [۲۳]:

$$E_{ie} = -\frac{1}{M_b} \sum_0^{n-1} \{du(t)\}^T [M] \{r\} \ddot{u}_g \quad (۱۷)$$

$$E_{de} = \sum_0^{n-1} \{du(t)\}^T [C] \{\dot{u}(t)\} \quad (۱۸)$$

$$E_{se} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{M_b} \right) \{u(t)\}^T [K] \{u(t)\} \quad (۱۹)$$

$$E_{ke} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{M_b} \right) \{\dot{u}(t)\}^T [M] \{\dot{u}(t)\} \quad (۲۰)$$

$du(t)$ ، اختلاف مقدار جابه‌جایی را در یک لحظه با لحظه‌ی قبل از خودش بیان می‌کند. همچنین، n تعداد مقادیر شتاب موجود

در شتاب‌نگاشت مورد استفاده است.

شاخص اول کارایی برابر است با نسبت تفاوت انرژی ورودی و مستهلک شده در حالت کنترل شده به تفاوت متناظر در حالت

کنترل نشده:

$$\beta = \frac{(E_{ie}^c - D_{de}^c)_t}{(E_{ie}^{un} - D_{de}^{un})_t} \quad (۲۱)$$

اندیس‌های un و c ، به ترتیب به معنای حالات کنترل نشده و کنترل شده، هستند. همانطور که قبلاً بیان شد، مقداری از انرژی ورودی ناشی از زلزله به سازه، توسط میرایی خود سازه و تمهیدات کنترلی احتمالی الحاقی به آن مستهلک خواهد شد و مابقی آن به صورت انرژی‌های تغییرناپذیر کرنشی و جنبشی در سازه باقی خواهند ماند. طبق مطالب گفته شده، به عملکرد میراگر جرمی تنظیم شونده زمانی می‌توان صفت مطلوب بودن را نسبت داد که بخش اعظمی از انرژی ورودی به سازه، توسط مولفه‌ی میرایی مستهلک شود. بدیهی است که در این حالت مقادیر انرژی‌های کرنشی و جنبشی که در سازه ذخیره می‌شوند، کاهش خواهند یافت. دقت شود که ممکن است با نصب میراگر جرمی تنظیم شونده به سازه، انرژی ورودی افزایش پیدا کند که این مسئله به تنهایی نمی‌تواند دلیل بر عملکرد نامطلوب آن باشد، بلکه نحوه استهلاک این انرژی (که انرژی استهلاک شده چه بخشی از انرژی کلی خواهد بود)، و شاخص دوم کارایی (که در ذیل تعریف خواهد شد)، تعیین کننده میزان کارایی آن خواهند بود. این شاخص همواره مقادیر غیر منفی را اختیار خواهد کرد، چرا که قاعدتاً مقدار انرژی ورودی در هر لحظه‌ی دلخواه بزرگتر از انرژی مستهلک شده خواهد بود، و هر قدر که مقدار آن به سمت صفر نزدیک‌تر شود عملکرد میراگر مطلوب‌تر خواهد بود.

به نسبت انرژی مستهلک شده توسط میراگر جرمی تنظیم شونده به انرژی مستهلک شده توسط میرایی مکانیکی ذاتی سازه شاخص دوم کارایی گفته می‌شود:

$$\gamma = \frac{E_{de}^T}{E_{de}^S} \quad (22)$$

اندیس‌های T و S به ترتیب، دال بر میراگر جرمی تنظیم شونده و سازه‌ی کنترل نشده، هستند. شاخص دوم کارایی هیچ‌گاه مقادیر منفی اختیار نخواهد کرد، چراکه نسبتی از دو انرژی است که همواره کمیت‌های غیر منفی هستند. زمانی که این شاخص بزرگتر می‌شود بیانگر این است که کارایی میراگر در حال افزایش است. در مواقعی که این شاخص مقادیری بزرگتر از یک را داراست، یعنی اینکه انرژی مستهلک شده توسط میراگر بزرگتر از انرژی مستهلک شده توسط میرایی ذاتی سازه است، که کارایی بسیار مطلوب آن را نشان می‌دهد. با قرار گرفتن این شاخص در نواحی نزدیک به صفر، عملکرد میراگر نیز نامطلوب خواهد بود.

در واقع می‌توان گفت که شاخص اول کارایی تاثیر میراگر جرمی تنظیم شونده را بر میزان انرژی استهلاک شده مشخص می‌کند و شاخص کارایی دوم نیز سهم این سیستم از انرژی مستهلک شده را تعیین می‌کند. به صورت کلی، در زمان‌هایی که شاخص اول کارایی کمترین و شاخص دوم بیشترین مقادیر ممکن را دارند، عملکرد میراگر جرمی تنظیم شونده در بهینه‌ترین حالت خود قرار دارد. علاوه بر شاخص‌های مذکور، پاسخ‌های جابه‌جایی نیز برای تعریف تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. دلیل این امر نیز مقادیر زیاد این پاسخ‌ها و محسوس بودن تغییرات آنها است. لذا مجذور مربعات پاسخ‌های متناظر جابه‌جایی‌های طولی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$GF = \sqrt{\sum_{k=2}^n LD_k^2} \cdot k = 2.4.6. \dots .54 \quad (23)$$

این پاسخ‌ها توسط الگوریتم فراابتکاری استاد-دانش‌آموز-مبصر (که جزئیات آن در مرجع [7] بیان شده است) طی تکرارهای مشخص شده، به سمت بهینه شدن حرکت می‌کنند.

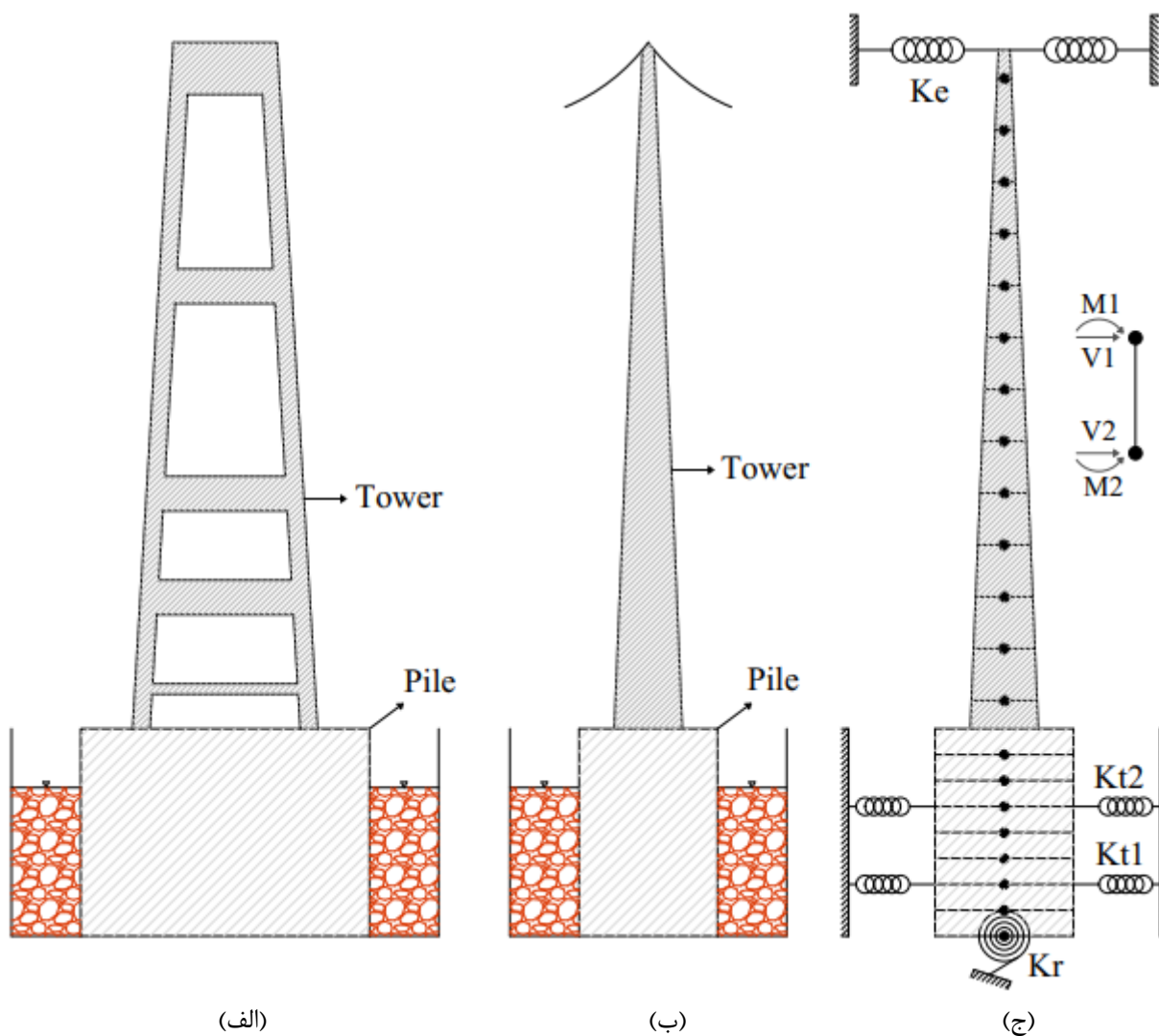
۴- مطالعه‌ی عددی

در اینجا، به منظور مطالعه‌ی عددی پاسخ‌های طولی پل‌های معلق، پل گلدن گیت، که در شکل ۱ نشان داده شده است، در نظر گرفته شده است. برای محاسبه‌ی ماتریس‌های سازه‌ای آن، از روابط (۲-۴) استفاده خواهد شد. در این راستا، روش المان محدود به کار گرفته می‌شود. شکل ۲ نشان دهنده‌ی این است که سیستم برج-شمع در راستای طولی خود به المان‌های محدودی تقسیم‌بندی شده است، که هر کدام از این المان‌ها، در دو گره انتهایی خود، دارای دو درجه‌ی آزادی جابه‌جایی جانبی (V_2 و V_1) و دوران خمشی (M_2 و M_1)

هستند. پس از محاسبه‌ی ماتریس‌های متناظر هر کدام از المان‌ها، می‌بایست آنها را گردآوری کرد، تا ماتریس‌های کلی متناظر سیستم برج-شمع بدست آید. نهایتاً پس از انجام دادن محاسبات مربوطه، پاسخ‌های طولی بر اساس شاخص‌های مذکور و تابع جابه‌جایی، بهینه می‌شوند. توابع هدف می‌توانند یکی از پاسخ‌های سازه و یا شاخص‌هایی که بر اساس پاسخ‌های مذکور تعریف می‌شوند و یا هر دو، باشند.



شکل ۱. پل معلق گلدن گیت



شکل ۲. (الف) تصویر طولی، (ب) تصویر جانبی و (ج) مدل المان محدود سیستم برج-شمع

۴-۱ اندرکنش خاک و سازه

عمدتاً، در طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های معمولی، اثر اندرکنش خاک و سازه مورد اغماض واقع می‌شود، و پاسخ‌های دینامیکی سازه با فرض مقید بودن انتهای آن ارزیابی می‌شوند. با این وجود، در هنگام بارگذاری لرزه‌ای، خاک دچار تغییر شکل‌هایی می‌شود که به پی تحمیل می‌شوند؛ مسئله‌ی اصلی در این هنگام، این است که وجود سازه باعث چه تغییراتی در خاک و از سوی دیگر تغییرات خاک اطراف سازه چه تأثیراتی بر پاسخ دینامیکی سازه خواهند گذاشت؛ این تأثیر متقابل اندرکنش خاک و سازه نامیده می‌شود. خاک تغییر شکل یافته‌ی لرزه‌ای، شمع‌ها و پی تعبیه شده و متعاقباً سازه‌ی حمایت شده را مجبور به حرکت می‌کند. حتی بدون سازه‌ی فوقانی، حرکت پی به دلیل تفاوت در سختی بین خاک در اطراف شمع‌ها و پایه‌ها از حرکت میدان آزاد متفاوت خواهد بود. حرکات ایجاد شده در سطح پی، باعث ایجاد نوساناتی در سازه‌ی فوقانی می‌شوند که موجب ایجاد نیروهای اینرسی و لنگر واژگونی در پای سازه می‌شوند. بنابراین، پی، شمع‌ها، خاک اطراف و نهایتاً سازه‌ی فوقانی دچار نیروها و جابه‌جایی‌های اضافی دینامیکی می‌شوند [۲۴].

اندرکنش خاک و سازه با استفاده از دو روش مستقیم و زیر-سازه مدل می‌شود. در روش دوم، مشخصات خاک بستر را می‌توان با استفاده از چندین فنر و میراگر مدل کرد [۲۵] و [۲۶]. در این تحقیق، برای در نظر گرفتن حالات مختلف و گسترده خاک بستر، چهار نوع خاک بستر بر اساس سرعت موج برشی در نظر گرفته می‌شوند. در اولین حالت، به دلیل وجود سرعت بسیار بالا، خاک سخت و در نتیجه سیستم برج-شمع به صورت گیردار در انتها فرض می‌شود. در حالت دوم، با توجه به سرعت ۱۸۰۰ متر بر ثانیه، خاک به صورت سخت (صخره) فرض می‌شود. نهایتاً سرعت‌های ۵۸۰ و ۳۲۸ متر بر ثانیه، به ترتیب دال بر خاک‌های نسبتاً نرم و نرم هستند. مقدار سختی فنرهای نشان داده شده در شکل ۲ نشان‌دهنده‌ی مقدار سختی متناظر خاک بستر خواهد بود [۲۷].

۴-۲ مشخصات دینامیکی برج‌ها

همانطور که در قسمت‌های پیشین بیان شد، از روش المان محدود برای محاسبه‌ی مشخصات سازه‌ای سیستم برج-شمع استفاده خواهد شد. بر اساس مطالب مذکور، سیستم برج-شمع را در راستای ارتفاع خود به المان‌های مجزایی تقسیم می‌کنیم، که در انتهای خود دو گره را دارا هستند. هر کدام از این گره‌ها، مستقلاً دو درجه‌ی آزادی را، که یکی از آنها جابه‌جایی جانبی و دیگری دوران خمشی است، شامل می‌شوند. همچنین، خاک زیر برج‌ها نیز با فنرهای جانبی و پیچشی مدل شده است که سختی این فنرها به دلیل متفاوت بودن شرایط خاک بستر متفاوت خواهد بود، که در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. همچنین جداول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات هندسی و سازه‌ای المان‌های در نظر گرفته شده و مشخصات دینامیکی طبیعی سیستم برج-شمع را ارائه می‌دهند. شکل ۳ نیز نشان‌دهنده‌ی دو مود ارتعاشی ابتدایی سازه‌ی مورد نظر است.

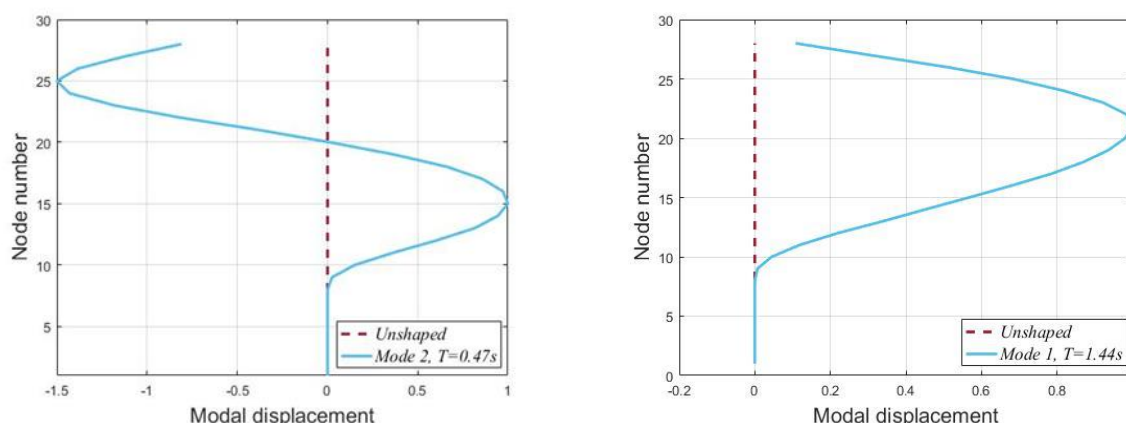
جدول ۱. مشخصات سازه‌ای و هندسی المان‌های سیستم برج-شمع پل گلدن گیت

المان	طول (m)	جرم (kg/m)	جرم متمرکز (kg)	ممان اینرسی (m ⁴)
۱ و ۲	۸/۲	۸۰۸۰۱۵۹		---
۳	۳	۷۹۰۷۷۳۱	N۳-۲۷۵۶۰۸۸۸	---
۴	۵/۲	۶۹۳۵۴۳۰	N۴-۱۰۳۵۹۰۴	---
۵	۵/۵	۴۵۱۶۶۵۱	---	---
۶	۶/۱	۱۵۶۶۲۱۹	---	---
۷	۷/۳	۱۸۲۹۶۵۱	---	---
۸	۹/۸	۹۹۰۰۲	---	۲۹۳
۹ و ۱۰	۱۲/۲	۱۱۳۸۰۲	N۹-۱۰۲۲۱۹	۱۲۵
۱۱ و ۱۲	۱۲/۲	۱۱۳۸۰۲	N۱۱-۱۰۲۲۱۹	۱۲۵
۱۳-۱۶	۱۰/۷	۹۹۰۰۲	N۱۳-۱۴۵۵۹۴	۱۲۵
۱۷-۲۰	۱۰	۸۲۲۳۸	N۱۷-۱۶۱۰۷۶	۷۰
۲۱-۲۳	۱۱/۲	۶۷۷۷۴	N۲۱-۱۲۰۸۰۵	۴۶
۲۴-۲۶	۱۰	۵۴۶۹۸	N۲۴-۱۲۳۹۰۰	۲۷
۲۷	۹/۲۲	۵۴۶۹۸	N۲۷-۱۰۲۲۱۹	۲۷

بر اساس جدول ۱، سیستم برج-شمع به ۲۷ المان که دارای مشخصات متفاوتی هستند، تقسیم می‌شود. المان‌های ۱ تا ۷ مشخصات شمع‌ها را نشان می‌دهند که دارای جرم سنگین‌تر و ممان اینرسی بزرگتر در مقایسه با المان‌های فوقانی برج هستند. مقطع عرضی شمع‌ها یک بیضی با قطرهای بزرگ و کوچک ۹۱ و ۴۷ متر است. این اقطار باعث می‌شوند تا رفتار شمع‌ها مانند رفتار جسم صلب در نظر گرفته شود. المان‌های برج از شماره ۸ آغاز و تا المان ۲۷ ادامه دارند. مقطع عرضی المان‌ها با حرکت به سمت بالای برج کوچکتر می‌شوند که باعث بوجود آمدن المان‌های سبک‌تر و ممان اینرسی‌های کوچک‌تر می‌شود.

جدول ۲. دوره تناوب سیستم برج-شمع پل گلدن گیت (ثانیه)

شماره ی مود	شرایط خاک بستر			
	انتهای گیردار	صخره	نسبتا نرم	نرم
۱	۱/۴۴۰۸	۱/۴۴۱۶	۱/۴۵۱۲	۱/۴۷۶۵
۲	۰/۴۷۳۱	۰/۴۷۳۵	۰/۴۸۰۲	۰/۵۹۹۴
۳	۰/۲۵۲۸	۰/۲۵۳۲	۰/۳۱۵۹	۰/۴۷۶۲
۴	۰/۱۶۲۵	۰/۱۶۲۹	۰/۲۵۳۱	۰/۲۷۰۳
۵	۰/۱۰۶۲	۰/۱۰۶۷	۰/۱۶۵۹	۰/۲۰۰۴
۶	۰/۰۷۱۹	۰/۰۸۶۳	۰/۱۱۷۷	۰/۱۵۲۱
۷	۰/۰۵۱۷	۰/۰۷۱۸	۰/۰۹۸۸	۰/۱۰۳۶
۸	۰/۰۳۹۴	۰/۰۵۱۸	۰/۰۷۰۱	۰/۰۷۰۶
۹	۰/۰۳۱	۰/۰۳۹۸	۰/۰۵۱۱	۰/۰۵۱۲
۱۰	۰/۰۲۴۶	۰/۰۳۲۵	۰/۰۳۹۱	۰/۰۳۹۱



شکل ۳. اشکال مودی ابتدایی برج‌های انتها گیردار پل گلدن گیت

۳-۴ شتاب‌نگاشت‌ها

به طور کلی زلزله‌هایی که در شعاع ۱۵ کیلومتری گسل قرار دارند را می‌توان در زمره‌ی زلزله‌های حوزه نزدیک قرار داد. از ویژگی‌های این نوع شتاب‌نگاشت‌ها می‌توان به جهت‌داری، پالس سرعت، جابه‌جایی پسماند و مولفه‌های متمایز قائم و پیچشی اشاره کرد. در میان ویژگی‌های مذکور، پالس سرعت را شاید بتوان مهمترین ویژگی در نظر گرفت. چراکه، بخش اعظمی از انرژی زلزله به یکباره در خلل این پالس به سازه منتقل خواهد شد. لذا پریود و دامنه‌ی این پالس بسیار حائز اهمیت خواهند بود [۲۸]. در این تحقیق، پاسخ‌های لرزهای طولی سیستم برج-شمع، تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک پالس‌دار بررسی می‌شوند. چراکه، این نوع از شتاب‌نگاشت‌ها به دلیل دارا بودن پالس سرعت ابتدایی و تقارن احتمالی دوره‌ی تناوب (پریود) این پالس با یکی از مودهای اساسی سازه، می‌توانند به شدت مخرب باشند. با توجه به مطالب گفته شده، چهار شتاب‌نگاشت بدین منظور انتخاب شده‌اند که مشخصات آنها در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳. مشخصات شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده

شماره	زلزله	ایستگاه	بزرگا	بیشینه شتاب زمین (g)	بیشینه سرعت زمین ($\frac{cm}{s}$)	پریود (ثانیه)
۱	Tabas	Tabas	۷/۳۵	۰/۸۵	۱۲۱	۴/۵
۲	El Centro	07	۶/۵۳	۰/۴۶	۱۰۹	۳
۳	Erzincan	Erzincan	۶/۷	۰/۵۱	۸۴	۳
۴	Northridge	Rinaldi	۶/۷	۰/۸۴	۱۶۷	۱

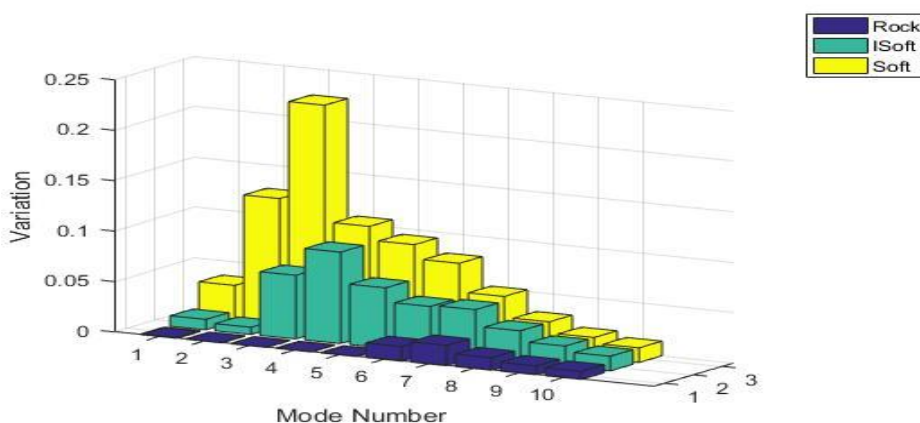
۵- بحث و تفصیل نتایج

پس از مدل‌سازی ریاضی سیستم برج-شمع و الگوریتم فراابتکاری مذکور و اعمال شتاب‌نگاشت‌ها به صورت متوالی به برج‌ها در نرم‌افزار MatlabR2016b، مقادیر توابع هدف و هر کدام از پارامترهای بهینه به شرح جدول ۴ محاسبه شدند. پارامترهای درصد جرمی (m_t)، درصد میرایی (ξ_t)، نسبت فرکانسی (α_t) و گره میزبان (گره‌ی که میراگر در آن به سازه الحاق می‌شود)، به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، مقادیر مجاز متغیرها در قسمت زیرین پارامترها در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. شایان ذکر است که مود اول به عنوان مود اصلی انتخاب شده است.

جدول ۴. مقادیر بهینه‌ی پارامترهای میراگر جرمی تنظیم شونده

نوع خاک	پارامترها				تابع هدف جابه-جایی
	درصد جرمی [۵-۰]	درصد میرایی [۳۰-۰]	نسبت فرکانسی [۰/۱-۵/۵]	گره میزبان [۲۷-۱]	
انتها گیردار	۵	۲۹	۰/۷	۱۹	۰/۴۹
سخت	۵	۲۹	۰/۷۶	۲۰	۰/۴۴
نسبتا نرم	۵	۳۰	۰/۷۸	۲۱	۰/۷۳
نرم	۵	۳۰	۰/۹۶	۲۲	۲/۴۹

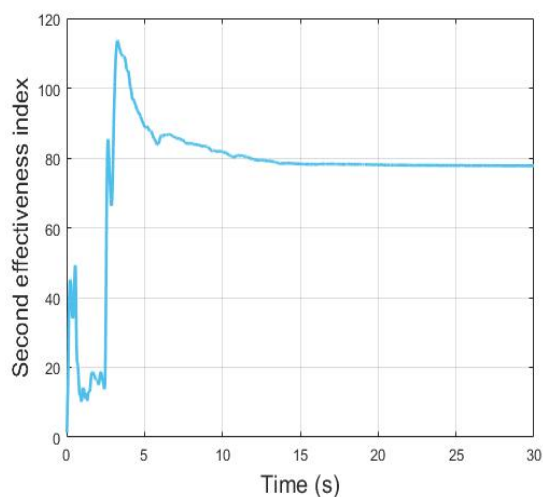
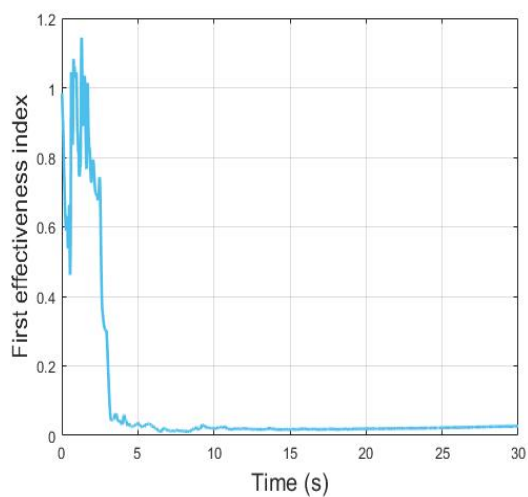
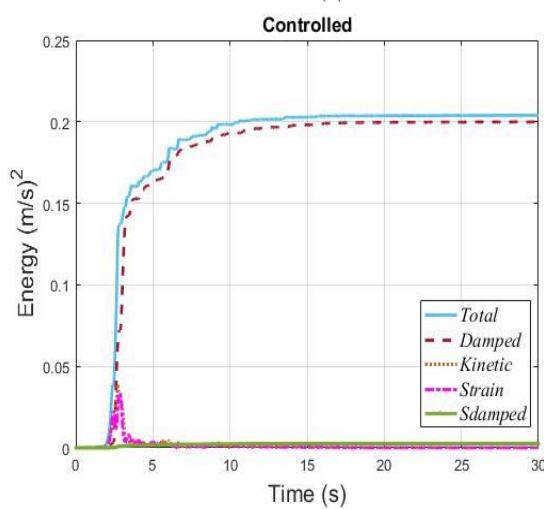
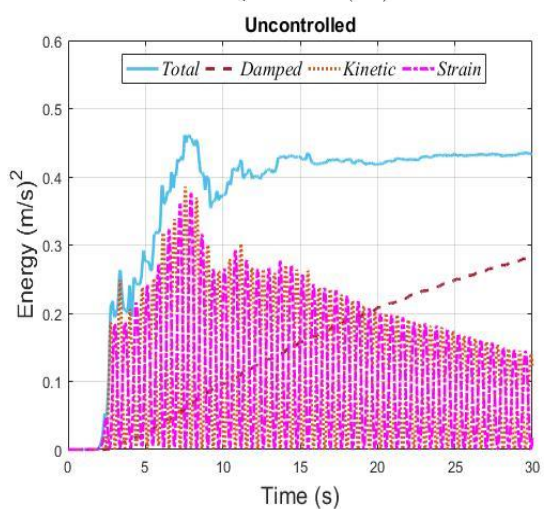
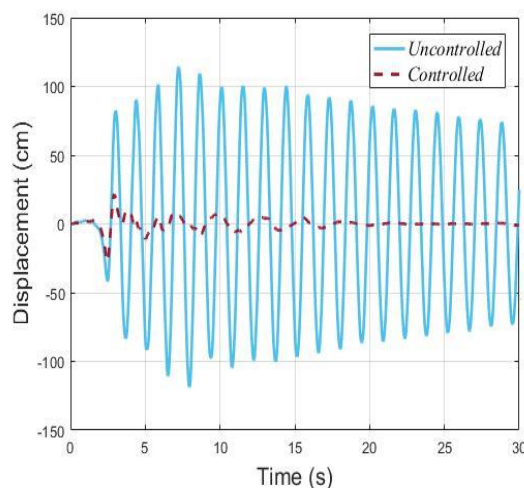
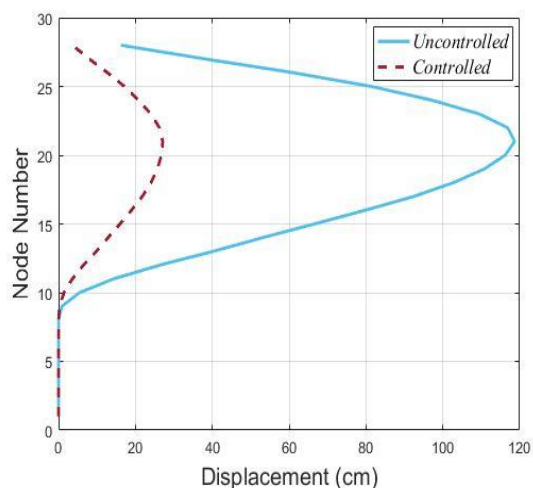
با دقت در جدول ۴ مشخص می‌شود که درصد جرم برای تمامی حالات خاک بستر، بیشینه مقدار مجاز را اختیار کرده است، که نشان از این حقیقت دارد که کارایی میراگر با افزایش جرم، بهبود پیدا می‌کند، و در نتیجه تمایل دارد که بیشینه مقدار را در اختیار داشته باشد. در مورد پارامتر درصد میرایی نیز می‌توان گفت که شرایط تقریباً مشابه با درصد جرم است. اگرچه، مقدار این پارامتر در حالت گیردار و خاک سخت مقدار جزئی کمتر است. در مقایسه‌ی پارامتر نسبت فرکانسی، در ابتدا، شکل ۴ که نشان دهنده‌ی تغییرات فرکانس‌های مودهای حالت‌های خاک بستر سخت، نسبتا نرم و نرم با حالت گیردار است، مورد بررسی قرار می‌گیرد.



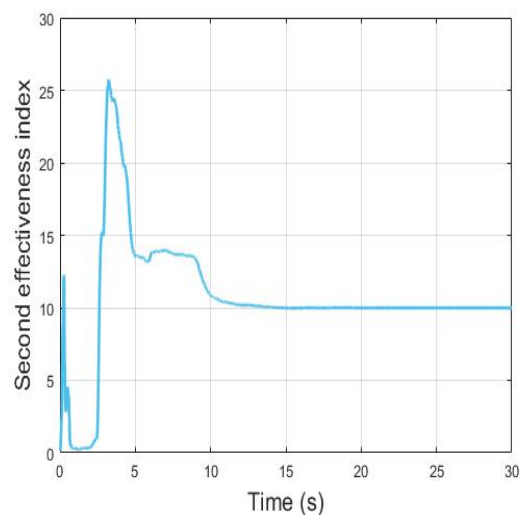
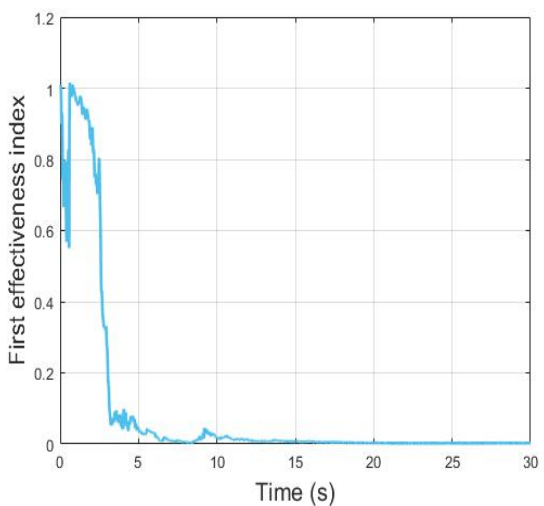
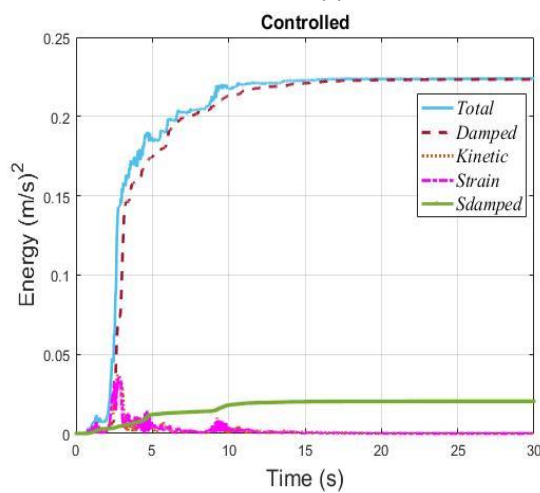
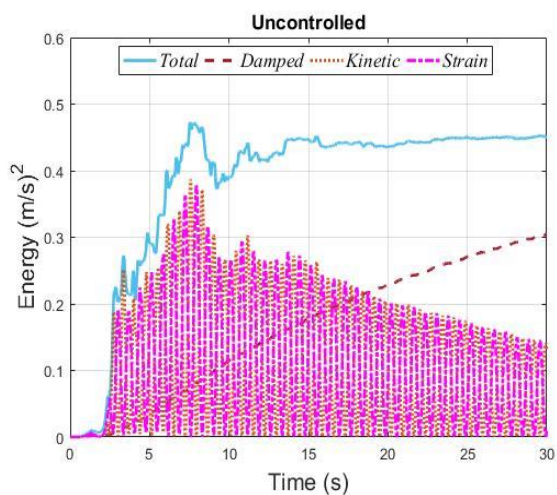
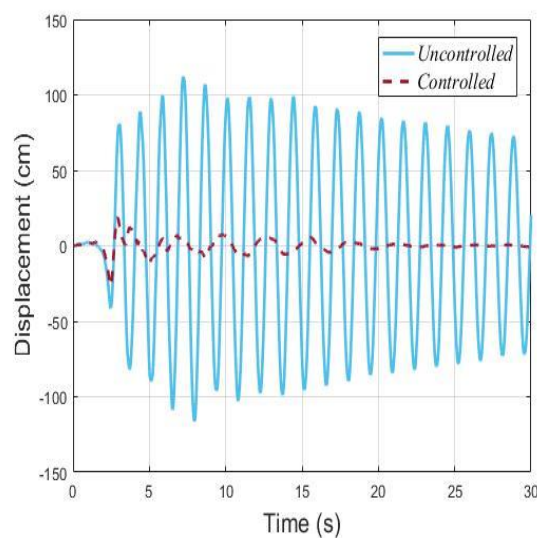
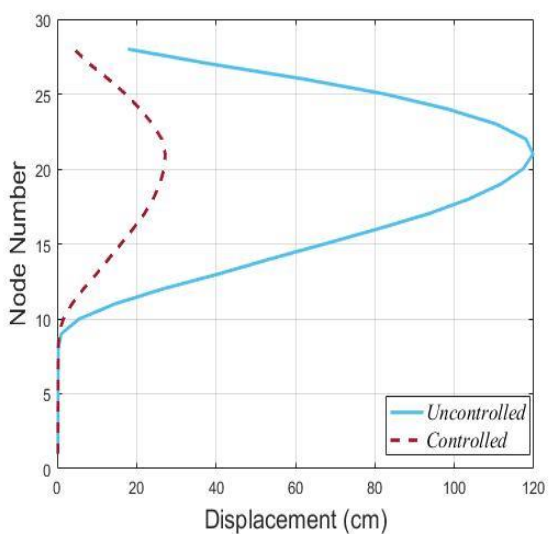
شکل ۴. تغییرات فرکانس‌های مودهای برج‌ها بر حسب تغییرات خاک بستر

همانطور که در شکل ۴ قابل مشاهده است، بیشترین تغییرات فرکانس برای خاک‌های سخت، نسبتا نرم و نرم به ترتیب در مودهای هفتم، چهارم و سوم رخ داده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با نرم‌تر شدن خاک بستر، مودهای ابتدایی تغییرات بیشتری را متحمل می‌شوند. از طرفی، نتایج حاکی از آن است که با نرم‌تر شدن خاک بستر مقدار نسبت فرکانسی نیز افزایش پیدا کرده است. بر این اساس، می‌توان گفت که با نرم‌تر شدن خاک بستر مودهای ابتدایی نقش به مراتب تعیین کننده‌تری دارند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در نرم‌ترین خاک، مود اول بیشترین تغییرات را نسبت به حالت گیردار تجربه کرده و نقش غالب را در پاسخ نهایی خواهد داشت، و در نتیجه نسبت فرکانسی نیز برابر یک خواهد بود. اما، زمانی که خاک بسیار سخت است، مودهای ابتدایی بیشتری در پاسخ نهایی نقش داشته و نسبت فرکانسی با اختیار کردن مقادیر کوچک‌تر سعی در لحاظ کردن نقش آنها دارد.

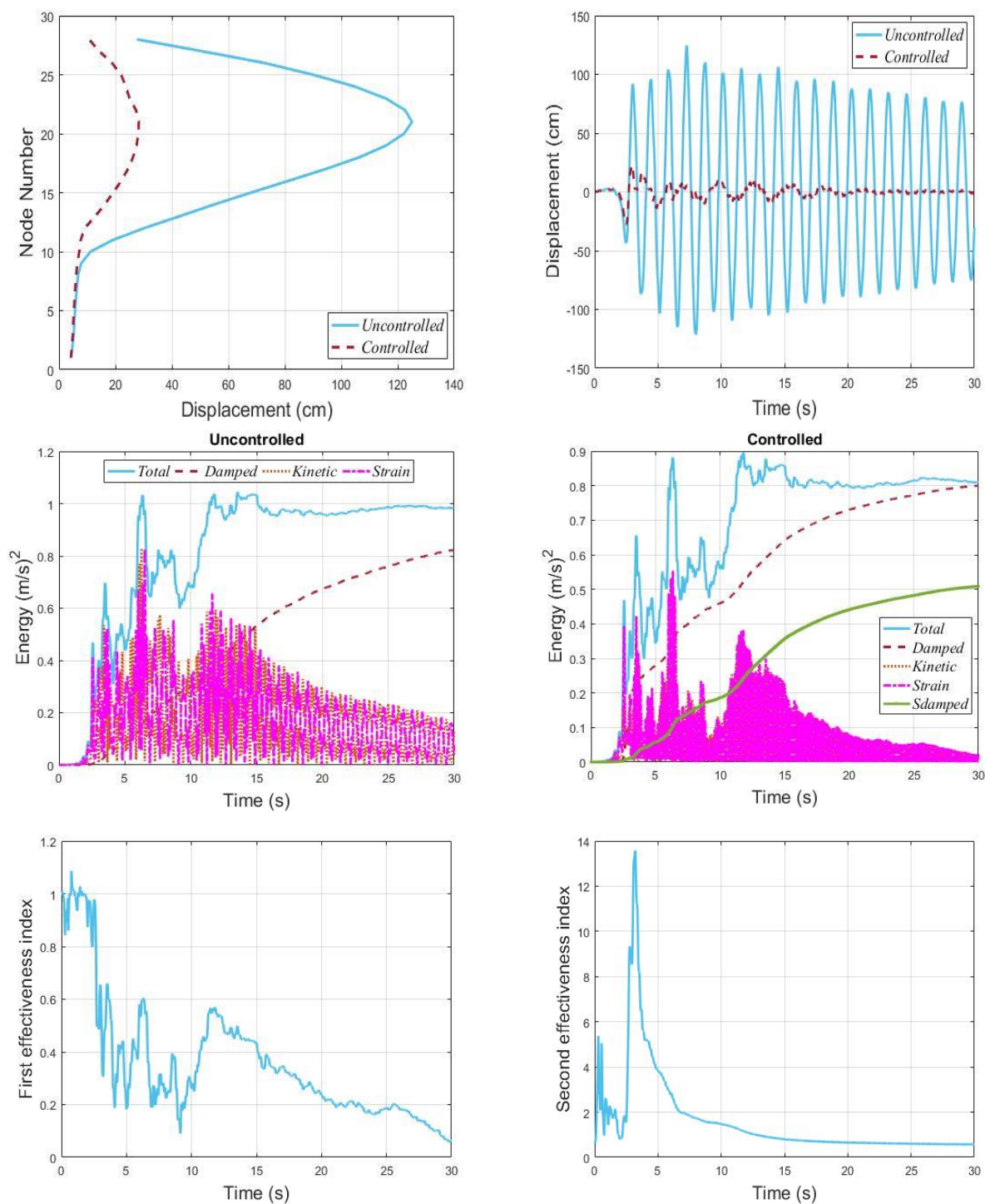
در رابطه با پارامتر گره میزبان نیز با افزایش نرمی خاک بستر، مقادیر بیشینه پاسخ در ارتفاعات بالاتر برج رخ می‌دهند، که همین امر موجب می‌شود که میراگر به ارتفاعات بالاتر انتقال یابد. در ضمن، بدیهی است که با افزایش نرمی خاک، مقادیر تابع هدف بزرگتر شوند. اشکال ۵-۸ پاسخ‌های جابه‌جایی سازه و انرژی‌ها را برای حالات مختلف خاک بستر نشان می‌دهند. در ضمن، به دلیل پاسخ‌های مشابه در برابر رکوردهای انتخابی، تنها پاسخ‌های متناظر شتاب‌نگاشت رینالدی مورد بررسی قرار می‌گیرند.



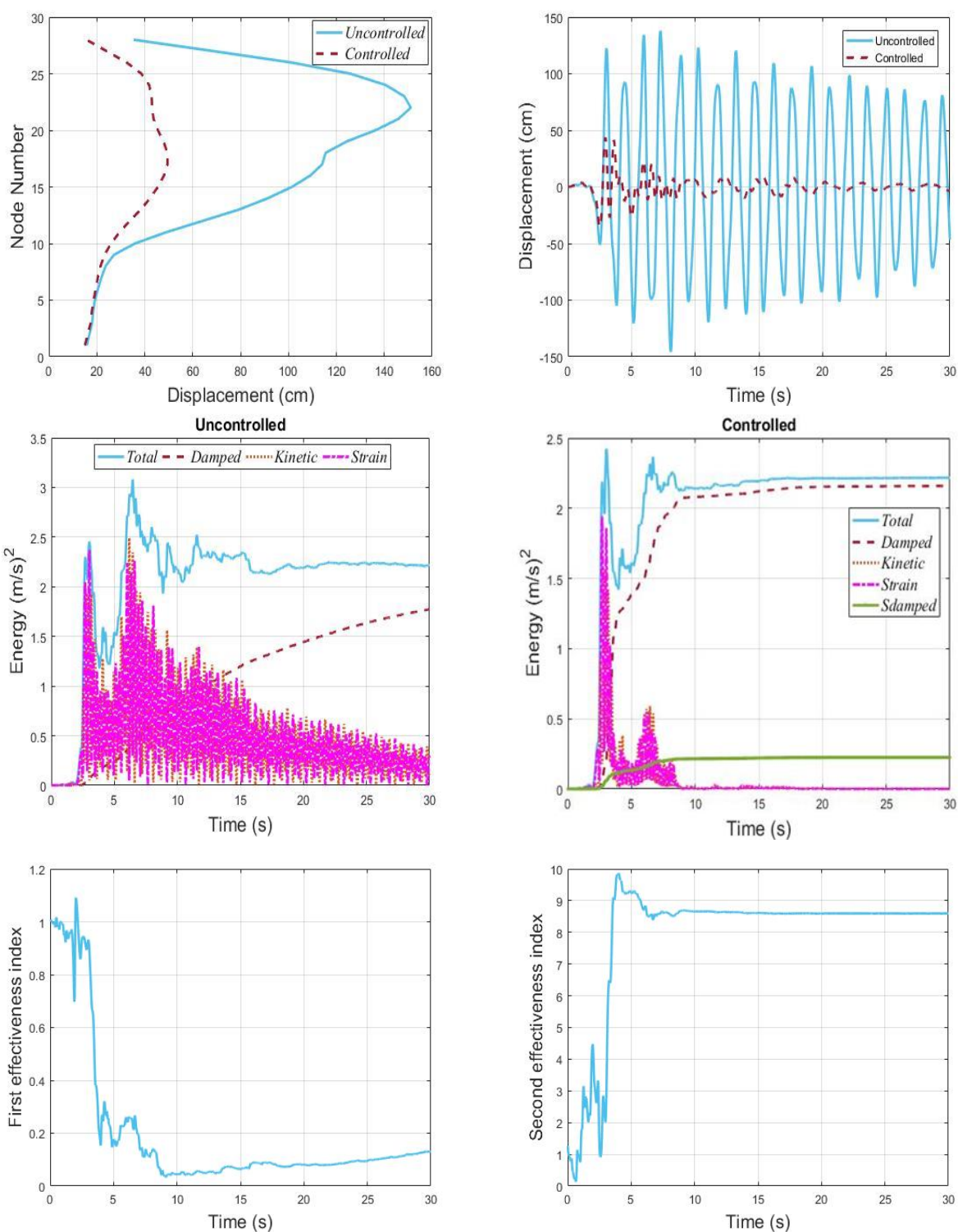
شکل ۵. پاسخ‌های جابه‌جایی، انرژی و شاخص‌های کارایی پل در شرایط انتها گیردار



شکل ۶. پاسخ‌های جابه‌جایی، انرژی و شاخص‌های کارایی پل در شرایط قرار گرفته بر روی خاک سخت



شکل ۷. پاسخ‌های جابه‌جایی، انرژی و شاخص‌های کارایی پل در شرایط قرار گرفته بر روی خاک نسبتاً نرم



شکل ۸. پاسخ‌های جابه‌جایی، انرژی و شاخص‌های کارایی پل در شرایط قرار گرفته بر روی خاک نرم

شکل ۵ بیان می‌کند که میراگر بهینه توانسته است جابه‌جایی تمام گره‌ها را به صورت کاملاً مناسبی کاهش دهد. تاریخچه‌ی زمانی پاسخ‌های جابه‌جایی متناظر با گره ۲۱ که بیشترین جابه‌جایی‌ها را در حالت کنترل نشده ارائه داده است، حاکی از آن است که پس از نصب میراگر، برج‌ها جابه‌جایی‌های به مراتب کمتری را تحمل کرده‌اند. علاوه بر آن، این جابه‌جایی‌ها به طرز چشمگیری میرا شده‌اند که

نشان دهنده‌ی عملکرد فوق‌العاده‌ی میراگر در کاهش پاسخ‌های جابه‌جایی است. در مقایسه‌ی انرژی‌های مربوطه در دو حالت کنترل شده و کنترل نشده، می‌توان فهمید که در حالتی که هیچ‌گونه سیستم کنترلی به سازه متصل نیست بخش قابل توجهی از انرژی ورودی به صورت انرژی‌های جنبشی و کرنشی ذخیره شده است، اما با اتصال یک میراگر، این انرژی‌ها به صورت چشم‌گیری کاهش پیدا کرده‌اند. موضوع دیگری که از شکل مربوط به انرژی‌ها در حالت کنترل شده مشخص است تاثیر بسیار پایین میرایی مکانیکی سازه در استهلاک انرژی ورودی است که از طریق شاخص‌های کارایی بررسی می‌شود. شاخص اول کارایی مبین این است که در یک بازه ابتدایی زمان، که کوچک نیز است، مقدار انرژی‌های ذخیره شده در سازه در حالت کنترل شده با حالت کنترل نشده برابر است، اما پس از این بازه انرژی ذخیره شده‌ی حالت کنترل نشده به شدت کاهش یافته است. شاخص دوم کارایی هم نشان می‌دهد که میرایی میراگر بهینه شده به تنهایی توانسته است بخش قابل توجهی انرژی ورودی را میرا کند و انرژی مستهلک شده توسط میرایی ذاتی سازه بسیار کم است، که نشان از کارایی فوق‌العاده میراگر است.

عملکرد میراگر در شرایطی که برج‌ها بر روی خاک بسیار سخت قرار گرفته‌اند، که در شکل ۶ نمایش داده شده است، تقریباً مشابه با حالت انتها گیردار است. با این تفاوت که مقدار کارایی میراگر کاهش یافته است.

در مورد شکل ۷ که متناظر با حالت خاک بستر نسبتاً نرم است، با مشاهده نمودارهای مربوط به جابه‌جایی‌های بیشینه رخ داده در طول برج و تاریخچه‌ی زمانی متناظر با گرهی که بیشترین جابه‌جایی را تجربه کرده است می‌توان فهمید که میراگر بهینه در کنترل و کاهش جابه‌جایی‌ها عملکرد بسیار مناسبی را از خود ارائه داده است. اما با دقت در نمودارهای مربوط به انرژی روشن می‌شود که انرژی‌های ذخیره شده در سازه، یعنی انرژی‌های کرنشی و جنبشی، به مانند حالت‌های قبلی کاهش نیافته‌اند. در واقع، مولفه‌های میرایی در حالت کنترل شده نتوانسته‌اند مانند حالت‌های قبلی، بخش قابل توجهی از انرژی ورودی را مستهلک کنند. شاخص اول کارایی مبین این موضوع است که مقدار انرژی ذخیره شده رو به کاهش است، اگرچه، آهنگ این کاهش نسبت به حالت‌های قبلی کندتر است. شاخص دوم نیز نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که میراگر جرمی در ابتدای وقوع زمین لرزه بخش زیادی از انرژی ورودی را مستهلک می‌کرده است، اما با ادامه‌ی زمین لرزه این شاخص به عدد یک افول کرده و روند ثابتی را طی کرده است که منحنی مربوط به انرژی میرا شده توسط میرایی سازه در حالت کنترل شده نیز مؤید این موضوع است.

نمودارهای جابه‌جایی‌های شکل ۸ که مختص حالتی است که برج‌ها بر روی خاک نرم قرار گرفته‌اند نشان می‌دهند که اولاً بر خلاف حالت‌های قبل ممکن است جابه‌جایی در دو نقطه‌ی مختلف بیشینه باشند، هر چند که یکی از آنها جابه‌جایی بیشینه‌ی مطلق است. دوماً، پاسخ تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی متناظر با گرهی که بیشینه جابه‌جایی را تجربه می‌کند نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که این پاسخ نسبت به حالت‌های قبل دیرتر میرا می‌شود. دلیل بروز هر دوی این حالت‌ها به نرم شدن خاک بستر برج‌ها مربوط می‌شود. همچنین، با نرم شدن خاک بستر مشاهده می‌شود که انرژی ذخیره شده در این حالت نسبت به حالت خاک نسبتاً نرم کاهش یافته است و رفتاری مانند انتهای گیردار و خاک سخت ارائه شده است. شاخص‌های اول و دوم و همچنین منحنی متناظر با انرژی مستهلک شده توسط میرایی ذاتی سازه مؤید این موضوع است.

۱-۵ مقایسه‌ی کارایی میراگر تنظیمی با سایر سیستم‌های کنترلی

به منظور بررسی کارایی میراگر جرمی تنظیم شونده‌ای که بر اساس شاخص‌ها و تابع مذکور بهینه شد، درصد کاهش پاسخ‌های این سیستم با سایر سیستم‌هایی که توسط دیگر محققان ارائه شده است در جدول ۵ جمع‌آوری شده است. شایان ذکر است که شاخص کارایی جدول ۵ بر اساس درصد افزایش یا کاهش پاسخ مورد نظر هر محقق است، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma = \left| \frac{CR - UCR}{UCR} \right| \quad (24)$$

در رابطه‌ی (۲۴) CR نشان‌دهنده‌ی پاسخ کنترل شده و UCR بیانگر پاسخ کنترل نشده است.

جدول ۵. مقایسه کارایی میراگر جرمی تنظیم شونده در حالات مختلف

شماره	محقق	نام پل	مود پل	بار دینامیکی	سیستم کنترلی	پاسخ متناظر	Γ (%)
۱	گو و همکاران [۲۹]	تایگر	قائم و پیچش	فلاتر	میراگر جرمی تنظیم شونده	سرعت	۴۵
۲	کوان و پارک [۳۰]	گلدن گیت	قائم و پیچش	فلاتر	میراگر جرمی تنظیم شونده	سرعت	۸۰
۳	پورزیلی و داتا [۳۱]	وینسنت توماس	قائم و پیچش	فلاتر	میراگر جرمی تنظیم شونده	سرعت	۱۰۰
۴	یانگ و کای [۱۶]	پینگشنگ	طولی	لرزه‌ای و نقلیه	غیرفعال	جابه‌جایی	۵۵
۵	میائو و همکاران [۳۲]	-	طولی	لرزه‌ای	میراگر ویسکوز	جابه‌جایی	-
۶	یانگ و همکاران [۳۳]	پینگشنگ	طولی	لرزه‌ای	دمپر مغناطیسی	جابه‌جایی	۶۵
۷	مطالعه‌ی حاضر	گلدن گیت	طولی	لرزه‌ای	میراگر جرمی تنظیم شونده	جابه‌جایی	۵۲

همانطور که از جدول ۵ مشخص است، کارایی میراگر تنظیمی بر حسب کاهش پاسخ‌های جابه‌جایی عدد قابل اطمینانی را ارائه کرده است. این کارایی، حاصل میانگین کارایی میراگر جرمی تنظیمی برای تمام حالات خاک بستر در قبال تمامی شتاب‌نگاشت‌های جدول ۳ است.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، عملکرد میراگر جرمی تنظیم شونده‌ی بهینه در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای طولی سیستم برج-شمع پل‌های معلق با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه مورد بررسی قرار گرفت که اهم نتایج به شرح زیر بدست آمدند:

- در کلیه‌ی حالات خاک بستر، درصد جرمی جهت ارائه‌ی عملکرد بهینه‌خود، بیشینه مقدار مجاز که برابر با ۵ درصد است را، اختیار می‌کند. درصد میرایی نیز رفتار مشابهی با درصد جرم خواهد داشت و مقدار بهینه‌ی آن ۳۰ درصد است. با نرم‌تر شدن خاک بستر، موده‌های ابتدایی دچار تغییرات بیشتری نسبت به سایر مودها می‌شوند و نقش غالب‌تری را در پاسخ‌های نهایی ایفا می‌کنند که پارامتر نسبت فرکانسی برای در نظر گرفتن این اتفاق اعداد نزدیک به یک را اختیار می‌کند. بیشترین تغییر فرکانس بر حسب تغییر نرمی خاک بستر، در نرم‌ترین خاک، و در مود اول رخ خواهد داد که منجر به نسبت فرکانسی یک خواهد شد. با توجه به نوع خاک بستر، نسبت فرکانسی بهینه در بازه‌ی ۰/۷-۱ قرار دارد. علاوه بر این، نرم‌شدن خاک بستر باعث می‌شود تا جابه‌جایی‌های بیشینه در نقاط مختلفی در طول برج دیده شوند، که به سمت نوک برج نیز میل می‌کنند. جابه‌جایی‌های بیشینه نیز، به صورت بدیهی با نرم‌تر شدن خاک افزایش پیدا می‌کنند.
- طبق تعریف شاخص اول کارایی، در تمامی حالات خاک بستر، در لحظات ابتدایی مقدار انرژی ذخیره شده در سازه در حالت کنترل شده و نشده تقریباً یکسان است. همچنین، با گذشت زمان، آهنگ استهلاک انرژی با نرم‌تر شدن خاک بستر کند می‌شود. به طور کلی، با افزایش نرمی خاک بستر، شاخص اول کارایی کاهش پیدا می‌کند.
- طبق تعریف شاخص دوم کارایی، بهینه‌ترین عملکرد میراگر جرمی تنظیم شونده متناظر شرایط انتها گیردار است. در حالی که، این عملکرد در خاک بستر نسبتاً نرم، نسبت به سایر حالات کمتر است، اما در حالت کلی، عملکرد قابل قبولی دارد.
- بر اساس شاخص‌های کارایی (مبتنی بر انرژی) اول و دوم، میراگر جرمی تنظیم شونده به عنوان یک سیستم کنترلی غیر فعال، عملکرد کاملاً مطلوبی را در کاهش پاسخ‌های جابه‌جایی و انرژی لرزه‌ای طولی سیستم برج-شمع برج‌های معلق (با در نظر گرفتن هر نوع خاک بستری) دارد.

- میراگر جرمی تنظیم شونده بهینه می تواند به صورت میانگین تا ۵۲ درصد پاسخهای لرزه‌ای را کاهش دهد.

مراجع

- [1] Abdel-Ghaffar, A.M., Rubin, L.I. (1983). Vertical seismic behavior of suspension bridge. *Earthq Eng. Struct. Dyn*, 11(1), 1-19.
- [2] Rahman Shokrgozar, H., Naeim, K., Imani Kalasar, H. (2017). Comparison of the Efficiency of Tuned Mass and Tuned Liquid Dampers at High-Rise Structures under Near and Far Fault Earthquakes, *Journal of structural and construction*, 3(4), 105-119.
- [3] Amini, F., Doroudi, R. (2010). Control of a building complex with magneto-rheological dampers and tuned mass damper. *Structural Engineering and Mechanics*, 36(2), 181–195.
- [4] Elias, S., Matsagar, V. (2017). Effectiveness of tuned mass dampers in seismic response control of isolated bridges including soil-structure interaction. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(13), 2324–2341.
- [5] Alizadeh, H., Lavasani, S.H.H., Kordi, A. (2018). Investigating the performance of tuned mass damper on tall buildings under pulse type ground motions. In: 3rd. International Conference & 4th. national Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Design, Tabriz: Tabriz Islamic Art University.
- [6] Pourzeynali, S., Lavasani, H.H., Modarayi, A.H. (2007). Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms. *Engineering Structures*, 29(3), 346–357.
- [7] Shahrouzi, M., Aghabagloua, M., Rafiee, F. (2017). Observer-teacher-learner-based optimization: An enhanced metaheuristic for structural sizing design. *Struct. Eng. Mech.*, 62(5), 537-550.
- [8] Alizadeh, H., Hosseini Lavassani, S.H. (2021). Flutter control of long span suspension bridges in time domain using optimized TMD. *Int J Steel Struct* (2021). <https://doi.org/10.1007/s13296-021-00469-y>.
- [9] Bathaei A., Ramezani M., Ghorbani-Tanha A.K. (2017) Vibration control of the College Bridge using tuned mass dampers. *IQBQ*, 16 (20), 21-32.
- [10] Alizadeh, H., Lavasani, H.H., Pourzeynali, S. (2018). Flutter instability control in suspension bridge by TMD. The Proceedings of the 11th International Congress on Civil Engineering., Tehran: Tehran university.
- [11] Lavassani, H.H., Alizadeh, H., Homami, P. (2020). Optimizing tuned mass damper parameters to mitigate the torsional vibration of a suspension bridge under pulsetype ground motion: A sensitivity analysis. *Journal of Vibration and Control*, 26(11-12), 1054-1067.
- [12] Lavassani, H.H., Alizadeh, H., Doroudi, R., Homami, P. (2020). Vibration control of suspension bridge due to vertical ground motions. *Advances in Structural Engineering*, 23(12), 2626-2641.
- [13] Alizadeh, H., Lavasani, H.H. (2020). TMD parameters optimization in different length suspension bridges using OTLBO algorithm under near and far field ground motions. *Earthquakes and Structures*, 18(5), 625-635.
- [14] Xu L., Gao Q., Zheng J., Ding Ch., Liu K. (2020). Seismic response mitigation of a long-span tower bridge with two types of constraint system. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, Article ID 8846467, 12 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8846467>.
- [15] Casciati F., Giuliano F. (2009). Performance of multi-TMD in the towers of suspension bridges. *Journal of Vibration and Control*, 15(6), 821-847.
- [16] Yang MG., Cai CS. (2015). Longitudinal vibration control for a suspension bridge subjected to vehicle braking forces and earthquake excitations based on magnetorheological dampers. *Journal of Vibration and Control*, 22(17), 3659-3678.
- [17] Altin, S., Kaptan, K., Tezcan, S.S. (2011). Dynamic analysis of suspension bridges and full scale testing. *Open Journal of Civil Engineering*, 2, 58-67.
- [18] Abdel-Ghaffar, A.M. (1980). Vertical vibration analysis of suspension bridges. *Journal of Structural Division*, 106(10), 2053-2075.
- [19] Debbarma, R., Das, D., (2016) Vibration control of building using multiple tuned mass dampers considering real earthquake time history. *International journal of civil and environmental engineering*, 10(6), 694-704.
- [20] Bortoluzzi, D., Casciati, S., Elia, L., Faravelli, L. (2015). Design of a TMD solution to mitigate wind-induced local vibrations in an existing timber footbridge. *Smart Structures and Systems*, 16(3), 459-478.
- [21] Lievens, K., Lombaert, G., De-Roeck, G., Van-den-Broeck, P. (2016). Robust design of a TMD for the vibration serviceability of a footbridge. *Engineering Structures*, 123, 408–418.

- [22] Elias, S. (2018). Seismic energy assessment of buildings with tuned vibration absorbers. *Shock and Vibration*, Volume 2018, Article ID 2051687.
- [23] Bhardwaja, A., Matsagar, V., Nagpal, A.K. (2016). Energy balance assessment of tall buildings equipped with friction dampers for earthquake response control. *Journal of Structural Engineering*, 43(1), 91-101.
- [24] Pecker A. (2007). Soil Structure Interaction. In: Pecker A. (eds) *Advanced Earthquake Engineering Analysis*. CISM International Centre for Mechanical Sciences, vol 494. Springer, Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-211-74214-3_3.
- [25] Khazaei, J., Amiri, A. (2017). Evaluation of the dynamic responses of high rise buildings with respect to the direct methods for soil-foundation-structure interaction effects and comparison with the approximate methods. *Journal of structural and construction*, 4(2), 106-122.
- [26] Etedadi Aliabadi, F., Memarpour, M.M. (2019). Investigation of the Seismic Behavior of Framed Tube Buildings Considering Soil Structure Interaction. *Journal of structural and construction*, 6(2), 119-140.
- [27] Rubin, L.I., Abdel-Ghaffar, A.M., Scanlan, R.H. (1983). *Earthquake response of long-span suspension bridges*. Princeton: Department of Civil Engineering, Princeton University, 1-576.
- [28] Grimaz, S., MaliSan, P. (2014). Near field domain effects and their consideration in the international and Italian seismic codes. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 55(4), 717-738.
- [29] Gu, M., Chang, C., Wu, W., Xiang, H. (1998). Increase of critical flutter wind speed of long-span bridges using tuned mass dampers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 73, 111–123.
- [30] Kwon, SD., Park, KS. (2004). Suppression of bridge flutter using tuned mass dampers based on robust performance design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92, 919–934.
- [31] Pourzeynali, S., Datta, TK. (2002). Control of flutter of suspension bridge deck using TMD. *Wind and Structure*, 5(5), 407-422.
- [32] Miao, F., Tian, P., Guan, P. (2017). Longitudinal damping parameter sensitivity analysis of self-anchored suspension bridge with viscous dampers. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(5), 110-113.
- [33] Yang, MG., Chen ZQ., Hua XG. (2011). An experimental study on using MR damper to mitigate longitudinal seismic response of a suspension bridge. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31, 1171–1181.