

Optimal parameters of rooftop pools as the structural control system

Hossein Ghaffarzadeh^{1*}, Alireza Aran², Mohsen Hosseinlou³

1- Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- PHD student, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Master of science, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT

Nowadays, due to the increase in requests to build tanks with different usage (such as water storage or amusement) on the rooftops of the structures, it is necessary to study their effect on the behavior of the structures. During the vibration of the structures under the earthquake excitation, the dissipation of the earthquake energy is provided by the movement of liquid waves inside the pools, the friction of the liquid with the walls of the pools, and the viscosity of the fluid. In such cases, control of the structural behavior is done passively. In passive control systems, it is important to set the optimal parameters of energy-damping systems to increase the efficiency of the structure control. In this research, the behavior of the pool was modeled using the Housner model, and according to the dimensions of the pool and the depth of the liquid, the optimal frequency and damping ratio of the control system were calculated using the pattern search optimization algorithm to reduce the acceleration response. The execution method of the pool on the rooftops of the structure is assumed on elastomeric pads. The obtained results illustrated that the optimal frequency ratio is close to 1 in most cases. As the liquid depth was considered larger, the sensitivity of the optimal parameters and the acceleration of the structure increased. By increasing the depth of the liquid and keeping its ratio to the dimension of the pool constant in the direction of vibration, the control performance of the pool was improved. Also, it was observed that in most cases, increasing the number of stories leads to a decrease in the optimal damping ratio of elastomeric pads.

ARTICLE INFO

Receive Date: 19 June 2024

Revise Date: 06 September 2024

Accept Date: 02 October 2024

Keywords:

Passive Control
Pool
Optimal Parameters
Elastomeric Pads
Pattern Search Algorithm

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.460956.3432](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.460956.3432)

*Corresponding author: Hossein Ghaffarzadeh
Email address: ghaffar@tabrizu.ac.ir

پارامترهای بهینه استخرهای پشت بام به عنوان سیستم کنترل سازه

حسین غفارزاده^{۱*}، علیرضا آران^۲، محسن حسینلو^۳

۱- استاد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

امروزه با توجه به افزایش تقاضای احداث مخازن با کاربردهای مختلف (مانند ذخیره آب یا تفریح) روی پشت بام سازه‌ها، مطالعه تأثیر آن‌ها بر رفتار سازه ضرورت دارد. به هنگام ارتعاش سازه‌ها تحت تحریک نیروی زلزله، استهلاک انرژی زلزله با حرکت امواج مایع داخل استخرها، اصطکاک مایع با جداره‌های استخرها و ویسکوزیته سیال تأمین می‌شود. در چنین حالتی کنترل رفتار سازه بصورت غیرفعال انجام می‌شود. در کنترل غیرفعال سازه‌ها، تنظیم پارامترهای بهینه سیستم‌های مستهلک کننده انرژی اهمیت دارد تا بازدهی کنترل سازه افزایش یابد. در این پژوهش مدل سازی رفتار استخر با استفاده از مدل هازنر انجام شده و با توجه به ابعاد استخر و عمق مایع، نسبت فرکانسی و میرایی بهینه سیستم کنترلی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی جستجوی الگو به منظور کاهش پاسخ شتاب محاسبه شده‌اند. روش اجرایی استخر روی پشت بام سازه بر روی بالشتک‌های الاستومری فرض شده است. نتایج بدست آمده نشان دادند که نسبت فرکانس بهینه در اغلب موارد نزدیک به ۱ بدست می‌آید. با افزایش عمق مایع داخل استخر، حساسیت پارامترهای بهینه و شتاب سازه نسبت به تغییر بعد استخر بیشتر ارزیابی شد. با افزایش عمق مایع و ثابت نگه داشتن نسبت آن به بعد استخر در جهت ارتعاش، عملکرد کنترلی استخر بهبود یافت. همچنین براساس نتایج مشاهده شد که در اغلب حالات، افزایش تعداد طبقات سازه منجر به کاهش نسبت میرایی بهینه بالشتک‌های الاستومری می‌شود.

کلمات کلیدی: کنترل غیرفعال، استخر، پارامترهای بهینه، بالشتک الاستومری، الگوریتم جستجوی الگو

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.460956.3432					
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.460956.3432	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۰۷/۱۱	۱۴۰۳/۰۷/۱۱	۱۴۰۳/۰۶/۱۶	۱۴۰۳/۰۳/۳۰

*نویسنده مسئول: حسین غفارزاده

پست الکترونیکی: ghaffar@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده^۱ (TMDs) بطور گسترده در کنترل ارتعاشات سازه‌ها بکار گرفته شده‌اند. به هنگام وقوع ارتعاشات خارجی مانند زلزله و باد، پاسخ‌های سازه بدلیل ارتعاش غیر هم‌فاز میراگر جرمی با سازه کنترل می‌شوند^۱. نگرانی اصلی برای میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده، عدم قطعیت و فقدان عملکرد مقاوم^۲ آن‌ها است. باتوجه به طیف وسیع محتوای فرکانسی ارتعاشات پایه مانند زلزله، این نگرانی‌ها حتی با وجود استفاده از نسبت جرمی^۳ بزرگ برطرف نمی‌شوند. میراگرهای مایع تنظیم‌شونده^۴ (TLDs) با هدف کاهش نسبت جرمی میراگرهای TMD معرفی شدند. این میراگرها باتوجه به خاصیت ویسکوزیته سیال، اصطکاک مایع با جداره‌های مخزن و حرکت موج مایع در کنترل ارتعاش سازه‌ها مؤثر هستند. میراگرهای مایع تنظیم‌شونده می‌توانند برای اهداف غیرکنترلی مانند ذخیره آب برای مقاصد مصرفی و آتش‌نشانی استفاده شوند. میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده برای کنترل سازه‌ها نیاز به جابه‌جایی‌های بزرگ دارند. در صورتی که فضای کافی برای جابه‌جایی میراگر جرمی وجود نداشته باشد، استفاده از آن محدود می‌شود. در این شرایط استفاده از میراگرهای مایع تنظیم‌شونده، یک راهکار ایده‌آل به نظر می‌رسد.

میراگرهای مایع تنظیم‌شونده برای سازه‌های نرم با دوره تناوب طولانی تحت ارتعاش نیروی باد مؤثرتر هستند. برای عملکرد مناسب میراگر TLD، فرکانس امواج مایع که به طول مخزن در جهت ارتعاش بستگی دارد، متناسب با فرکانس سازه تنظیم می‌شود. همچنین نسبت عمق^۵ (نسبت عمق مایع به طول مخزن) پارامتر دیگری است که در طراحی میراگرهای مایع تنظیم‌شونده تأثیر دارد^{۳ و ۲}. بنابراین شکل مخزن تأثیر قابل توجهی در فرکانس ارتعاش مایع و عملکرد میراگر دارد. با بررسی مخازن آب پشت‌بام، شکلی از مخزن بدست آمد که در آن فرکانس ارتعاش مایع مستقل از عمق آب مخزن باشد^۴. عملکرد میراگرهای TLD برای کاهش ارتعاش سازه‌های بلند تحت تحریک زلزله بررسی شده‌اند^۵. یو^۶ و همکاران (۱۹۹۹) میراگر جرمی تنظیم‌شونده با رفتار غیرخطی معادل را جایگزین TLD با رفتار غیرخطی امواج در نظر گرفتند^۶. در این پژوهش، معادل‌سازی رفتار غیرخطی با فرض سختی و میرایی غیرخطی و تطبیق انرژی در سیستم مجهز به TMD و TLD تخمین زده شد. سهم مودهای بالاتر در ارتعاش سازه مجهز به میراگرهای مایع تنظیم‌شونده توسط TLDهای چندگانه لحاظ شدند^۷. به‌منظور بهبود اثر امواج مایع، میراگر جرمی تنظیم‌شونده در داخل مخزن TLD بکار گرفته شده است^{۸ و ۹}. همچنین ترکیبی از میراگرهای تنظیم‌شده که در آن TMD و TLD بصورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند، با هدف بهبود عملکرد میراگرهای جرمی و مایع تنظیم‌شونده معرفی شده است^{۱۰ و ۱۱}. لاو^۷ و تیات^۸ (۲۰۱۳) تأثیر زاویه چرخش مخزن میراگرهای TLD را بررسی کردند^{۱۲} و در پژوهش دیگری، شکل هندسی مخزن مورد بررسی قرار گرفته است^{۱۳}.

عملکرد میراگر TLD برای سرکوب ارتعاش سازه‌ها با دوره تناوب کوتاه توسط بانرجی^۹ و همکاران (۲۰۰۰) نشان داده شد^۵. با این حال، کارایی میراگر در این شرایط بدلیل عدم تنظیم مناسب و تأخیر در شکست موج‌های سطحی با مشکل مواجه می‌شود. برای جبران این نقص، گوش^{۱۰} و بیسواجیت^{۱۱} (۲۰۰۴) پیشنهاد کردند از میراگر ستون مایع تنظیم‌شونده^{۱۲} (TLCD) استفاده شود^{۱۴}. در این سیستم بجای استفاده از یک مخزن، از لوله‌ها و ستون‌های مایع استفاده می‌شود که با مکانیزم خاصی مانند استفاده از فنر به سازه متصل می‌شوند. تحقیقات مختلف نشان دادند که میراگرهای TLD زمانی که شتاب پایه آن‌ها زیاد باشد، مؤثرتر هستند. بر همین اساس، پیکربندی میراگر مایع جرمی ترکیبی^{۱۳} (HMLD) که در آن میراگر TLD بصورت ثابت روی میراگر TMD متصل می‌شود، پیشنهاد شد^{۱۵}. یک نیاز ضروری در میراگرهای TLD این است که نسبت عمق بایستی کمتر از ۰/۳ باشد^{۱۶}. برای تنظیم بهینه این میراگرها در سازه‌ها با دوره تناوب

1 Tuned mass dampers

2 Robust

3 Mass ratio

4 Tuned liquid dampers

5 Depth ratio

6 Yu

7 Love

8 Tiat

9 Banerji

10 Ghosh

11 Biswajit

12 Tuned liquid column damper

13 Hybrid mass liquid damper

کوتاه، طول مخزن غیرعملی بدست می‌آید؛ بطوریکه برای سازه با دوره تناوب اصلی 0.5 ثانیه و نسبت عمق میراگر برابر با 0.3 ، طول بهینه و مورد نیاز برای مخزن 144 میلی‌متر محاسبه می‌شود که غیرممکن است [۱۷ و ۱۸]. در این حالت، جرم شرکت‌کننده در حرکت امواج مایع و شکست امواج کاهش پیدا کرده و کارایی میراگر مختل می‌شود.

مخازن بکار رفته در بام ساختمان‌ها با هدف ذخیره آب، نمی‌توانند به‌عنوان میراگر TLD مدل‌سازی شوند؛ زیرا در این مخازن معمولاً عمق مایع زیاد است و الزامات نسبت عمق میراگر TLD رعایت نمی‌شود. یکی از روش‌های ساده مدل‌سازی مخازن عمیق، مدل هازنر^{۱۴} است. ویژگی‌های ارتعاش مایع داخل مخزن توسط هازنر بصورت تحلیلی ارائه شده [۱۷] و به‌منظور صحت‌سنجی آن، بصورت عملی آزمایش شده است [۱۹]. در این مدل، ارتعاش جرم مایع داخل مخزن با جداره‌های صلب بصورت ارتعاش دو جرم مجزای (جرم سخت^{۱۵} و جرم موج^{۱۶}) متصل به سازه بصورت سری در نظر گرفته می‌شود. در مدل هازنر، رفتار دینامیکی امواج مایع و شکست موج بصورت خطی مدل‌سازی می‌شوند و زمانی معتبر است که حدود 20% از مایع داخل مخزن ارتعاش کند. بنابراین این مدل برای مخازن عمیق با نسبت عمق بیشتر از 0.3 اعتبار دارد. براساس فرضیات مدل هازنر، دیواره‌های مخزن صلب در نظر گرفته می‌شوند که با توجه به کاربرد وسیع بتن در ساخت مخازن، این فرض برای اکثر آن‌ها برقرار است. مدل تحلیلی مخازن با دیواره‌های غیرصلب توسط هاشمی و همکاران (۲۰۱۳) بررسی شده است [۲۰]. پاندي^{۱۷} و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل هازنر، کارایی میراگر جرمی مایع تنظیم‌شونده (TLMD) را برای مخازن عمیق مورد بررسی قرار داده و از نظر عملکردی با میراگر TMD مقایسه کردند [۱۸]. پارامترهای بهینه و مشخصات کنترلی این نوع میراگرها براساس انحراف فاز^{۱۹} ارزیابی شده‌اند [۲۱]. در میراگر TLMD نیازی به استفاده از جرم تنظیم‌شونده نیست؛ زیرا جرم مخزن و جرم سخت مایع مانند TMD و جرم موج مایع مانند TLD عمل می‌کنند. بنابراین سیستم TLMD مزیت‌های دو سیستم TMD و TLD را حفظ و عیوب این دو سیستم را برطرف می‌کند. در این سیستم، مشکلاتی مانند عملکرد مقاوم، محدودیت فضا، الحاق جرم اضافی مانند TMD، محدودیت نسبت عمق و مواجهه با طول غیرقابل اجرا حل می‌شوند.

امروزه ساخت استخر در بام ساختمان‌ها مرسوم شده است. استخرها علاوه بر کاربرد تفریحی، ذخیره آب و... از نظر سازه‌ای می‌توانند در نقش کنترل رفتار سازه مؤثر واقع شوند. آگراوال^{۲۰} و واهانه^{۲۱} (۲۰۲۰) با انجام تحلیل استاتیکی، محل مناسب استخرها در بام را مشخص کردند [۲۲]. استخرها می‌توانند مانند یک میراگر جرمی تنظیم‌شونده مدل‌سازی شوند [۲۳]، اما تخمین رفتار آن بصورت TMD دقیق نیست. به‌طور مشابه داتاترای و همکاران (۲۰۱۴) عملکرد مخزن آب پشت‌بام را به‌صورت TMD تخمین زدند و نتیجه گرفتن مخازن آب پشت‌بام می‌تواند در کاهش حداکثر پاسخ سازه مؤثر باشد [۲۴]. تحلیل و طراحی استخرها شباهت زیادی به طراحی مخازن روباز دارد. بنابراین سیستم استخر می‌تواند همچون میراگر TLMD مدل‌سازی شود. در این پژوهش، تحلیل تاریخچه زمانی سازه یک طبقه و پنج طبقه دارای استخر مستطیلی در بام انجام شده است. ارتعاش مایع داخل استخر با استفاده از مدل هازنر مدل‌سازی شده و سازه استخر به‌عنوان میراگر TLMD برای کنترل سازه در نظر گرفته شده است. با بهینه‌سازی پارامترهای طراحی استخر، عملکرد کنترلی استخرهای مختلف متناسب با ارتفاع مایع داخل آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

۲- کنترل غیرفعال سازه با TLMD

استخرهای بام ساختمان‌ها را می‌توان بصورت یک میراگر جرمی مایع تنظیم‌شده (TLMD) در نظر گرفت. در این سیستم فرض می‌شود استخر و مایع داخل آن از سه جرم تشکیل شده‌اند که عبارتند از: جرم سخت، جرم موج و جرم بدنه. به منظور اتصال استخر به سازه، از چهار روش مرسوم استفاده می‌شود.

14 Housner model
15 Impulsive mass
16 Convective mass
17 Pandey
18 Tuned liquid mass damper
19 Phase deviation
20 Agrawal
21 Wahane

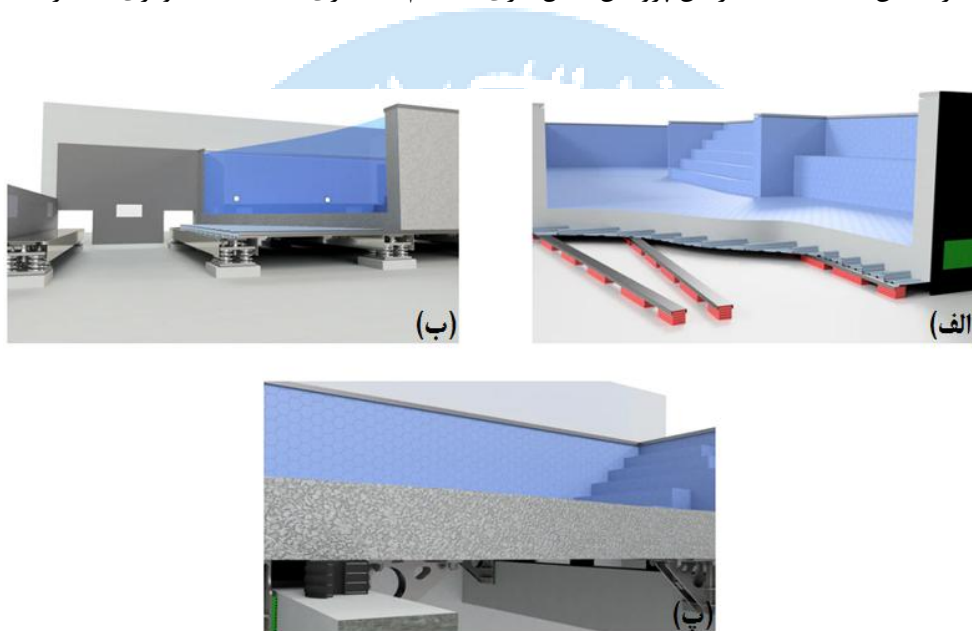
روش اول: اتصال ثابت استخر به بام سازه

روش دوم: اتصال استخر به بام سازه با استفاده از سیستم جداسازی بالشتک الاستومری^{۲۲}

روش سوم: اتصال استخر به بام سازه با استفاده از سیستم جداسازی فنری^{۲۳}

روش چهارم: اتصال استخر به بام سازه با استفاده از سیستم جداسازی لاستیک‌های چند لایه^{۲۴}[۲۵]

از بالشتک‌های الاستومری برای نصب استخر محتوی مایع بر روی سازه با هدف سازگاری مطلوب جرم سخت مایع و بدنه استخر استفاده می‌شود. استفاده از این روش برخلاف روش اتصال ثابت استخر به سازه، سازگاری عملکرد سیستم میراگر جرمی مایع تنظیم‌شونده را فراهم می‌سازد [۱۸ و ۲۶]. سیستم جداسازی فنری برای حالاتی که استخر در مجاورت یا بالای فضاها یا بحرانی مانند اتاق خواب قرار دارد، جایگزین سیستم جداسازی بالشتک‌های الاستومری می‌شود. سیستم جداسازی لاستیک‌های چندلایه با هدف کنترل ارتعاش ناشی از منبع خارجی مانند خطوط راه‌آهن، عبور وسایل نقلیه سنگین و فعالیت ماشین‌آلات برای استخرها کاربرد دارند. در شکل (۱)، سیستم‌های جداسازی استخر از سازه نشان داده شده‌اند. در این پژوهش، مدل سازی سیستم جداسازی بالشتک الاستومری مدنظر است.



شکل ۱: روش‌های جداسازی استخر از سازه (الف) بالشتک الاستومری (ب) فنری (پ) لاستیک‌های چندلایه

۲-۱ مدل سازی ارتعاش مایع استخر

برای مدل سازی رفتار مایع با عمق کم در میراگرهای TLD پیشنهادات متعددی ارائه شده است [۲۷]. با این حال، برای مدل سازی رفتار مایع با عمق زیاد، مدل هازنر مناسب بوده و در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل، فرض می‌شود که جرم مایع به هنگام ارتعاش به دو قسمت جرم سخت و جرم موج تقسیم می‌شود. رفتار غیرخطی جرم موج مایع ناشی از حرکت، شکست و اتلاف انرژی امواج بصورت خطی معادل سازی می‌شود. این معادل سازی باتوجه به کاهش دامنه‌های ارتعاش جرم موج در استخرهای عمیق فرض معقولی است [۱۸]. در مدل سازی استخر مطابق سیستم TLMD، رفتار جرم سخت مایع که به کف و دیواره‌های استخر چسبیده است،

22 Elastomeric pad mount isolation system

23 Spring mount isolation system

24 Multi-layer rubber isolation system

بصورت خطی در نظر گرفته شده و خطی سازی رفتار جرم موج مایع با استفاده از مدل هازنر انجام می شود. همچنین در مدل هازنر، اتلاف انرژی ناشی از امواج تولید شده در اثر ارتعاش خارجی با استفاده از میرایی ویسکوز معادل لحاظ می شود.

مقدار جرم سخت (m_i) و موج مایع (m_c) از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$m_i = \alpha_i m_1 \quad (1)$$

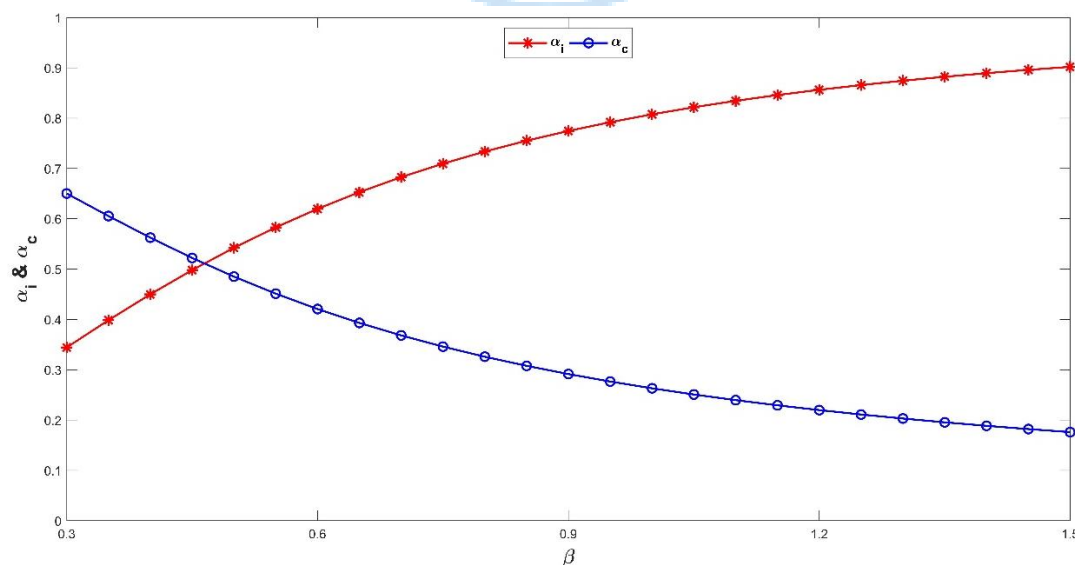
$$m_c = \alpha_c m_1 \quad (2)$$

که در آن m_1 جرم کل مایع، α_i نسبت جرم سخت به جرم کل مایع و α_c نسبت جرم موج به جرم کل مایع می باشند. مقادیر α_i و α_c از روابط زیر بدست می آیند.

$$\alpha_i = \beta \frac{\tanh\left(\frac{0,866}{\beta}\right)}{0,866} \quad (3)$$

$$\alpha_c = 0,264 \frac{\tanh(3,16\beta)}{\beta} \quad (4)$$

در روابط فوق، β نسبت عمق مایع استخر می باشد. با افزایش نسبت عمق مایع استخر، نسبت جرم سخت مایع افزایش و نسبت جرم موج مایع کاهش می یابد که در شکل (۲) نمایش داده شده است. اگر طول استخر در جهت ارتعاش حدوداً $2/15$ برابر ارتفاع مایع (یعنی نسبت عمق حدوداً برابر با $0/465$) باشد، جرم سخت و موج مایع نسبت مساوی از جرم مایع خواهند داشت.



شکل ۲: درصد نسبی جرم سخت و موج مایع استخر براساس تغییر نسبت عمق

در مدل هازنر، فرکانس، سختی و میرایی معادل ویسکوز قسمت موج مایع بصورت زیر محاسبه می‌شوند. در روابط زیر، L طول استخر در جهت ارتعاش، ω_c فرکانس، k_c سختی، c_c میرایی معادل ویسکوز و ξ_c نسبت میرایی می‌باشند. نسبت میرایی جرم موج مایع با نسبت عمق بیشتر از ۰/۲، در حدود ۱٪ یا کمتر می‌باشد [۲۸] که در این پژوهش برابر با ۱٪ فرض شده است.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{3,16g}{L} \tanh(3,16\beta)} \quad (5)$$

$$k_c = m_c \omega_c^2 \quad (6)$$

$$c_c = 2\xi_c m_c \omega_c \quad (7)$$

۲-۲ معادلات حرکت سازه دارای استخر

معادلات حرکت سازه دارای استخر همچون سیستم TLMD الحاقی به سازه، بصورت زیر نوشته می‌شود. با الحاق استخر به بام سازه برشی n طبقه مطابق شکل (۳)، دو درجه آزادی به سیستم اضافه می‌شود.

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{x}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{x}\} + [\mathbf{K}]\{x\} = -r\ddot{x}_g \quad (8)$$

که در آن ماتریس‌های $[\mathbf{M}]$ ، $[\mathbf{K}]$ و $[\mathbf{C}]$ ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه دارای استخر هستند. جابه‌جایی و مشتقات آن یعنی سرعت و شتاب مطابق بردار $\{x\} = \{x_s \quad x_b \quad x_c\}^T$ تعریف می‌شوند که در آن، x_s بردار مربوط به سازه n طبقه است. بردار $\{r\} = \text{diag}([\mathbf{M}])$ بردار تأثیر زلزله می‌باشد که نحوه اعمال تحریک وارد بر سازه را معین می‌سازد و \ddot{x}_g بیانگر شتاب زلزله است.

$$[\mathbf{M}] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{n-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n + m_b & m_b & m_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_b & m_b & m_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_c & m_c & m_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & \ddots & -c_{n-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_{n-1} & c_{n-1}+c_n & -c_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_n & c_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

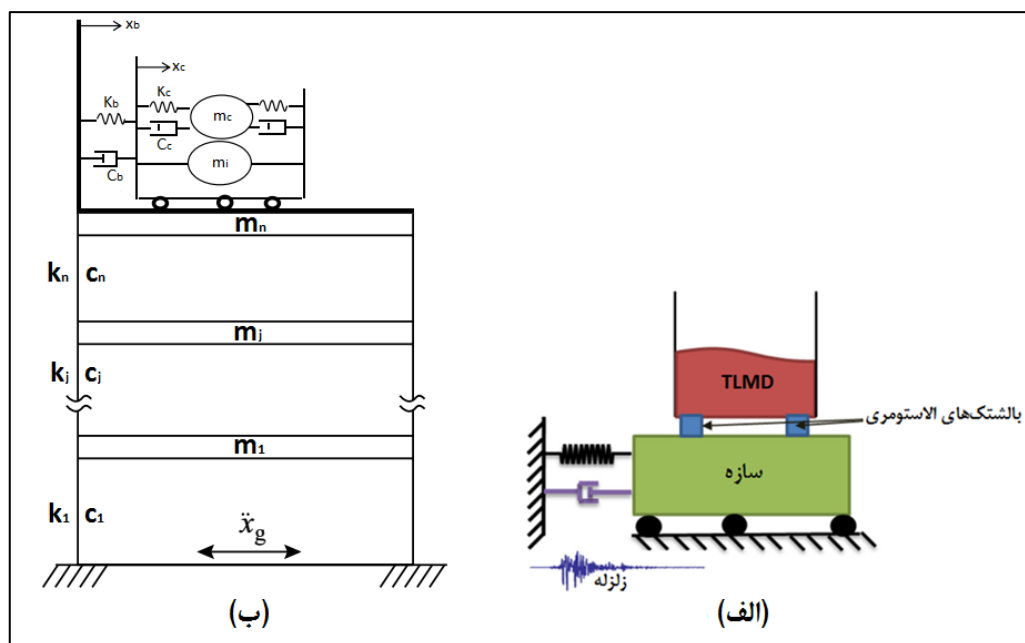
$$[K] = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & \ddots & -k_{n-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{n-1} & k_{n-1}+k_n & -k_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_n & k_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

در ماتریس‌های فوق، m_j ، c_j و k_j به ترتیب بیانگر جرم، میرایی و سختی طبقات سازه می‌باشند. k_b و c_b میرایی معادل ویسکوز و سختی بالشتک‌های الاستومری هستند. m_b برابر با مجموع جرم بدنه استخر، جرم سخت و جرم موج مایع در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، m_b و c_b بصورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$m_b = m_0 + m_i + m_c \quad (12)$$

$$c_b = 2\xi_b m_b \sqrt{\frac{k_b}{m_b}} \quad (13)$$

در این پژوهش، حل عددی معادله (۸) با استفاده از روش نیومارک-بتا مدل شتاب ثابت انجام شده است.



شکل ۳: سازه دارای استخر (الف) شماییک سیستم الحاقی TLMD به سازه (ب) مدل برشی سازه n طبقه به همراه سیستم TLMD

۲-۳ پارامترهای بهینه استخر

به منظور سازگاری ارتعاش جرم سخت مایع و بدنه استخر، بالشتک‌های الاستومری زیر استخر حاوی مایع نصب می‌شوند. برای چینش موازی بالشتک‌های الاستومری، فرکانس تنظیم بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega_e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_p} K_h}{m_i + m_0}} \quad (14)$$

که در آن ω_e فرکانس سیستم محفظه و جرم سخت مایع، n_p تعداد بالشتک‌های الاستومری و K_h سختی برشی بالشتک‌های الاستومری است. نسبت فرکانسی (γ_b) بصورت زیر تعریف می‌شود که در آن ω_1 فرکانس اصلی سازه می‌باشد. برای دستیابی به بیشینه کاهش پاسخ‌های سازه، نسبت فرکانسی بهینه بدست می‌آید که در اغلب حالات نزدیک به ۱ است.

$$\gamma_b = \frac{\omega_e}{\omega_1} \quad (15)$$

در این پژوهش، نسبت فرکانسی و نسبت میرایی بالشتک‌های الاستومری بهینه شده‌اند تا پاسخ سازه کمینه شود. در سازه‌ها با دوره تناوب کوتاه، کنترل پاسخ شتاب بحرانی‌تر از کنترل پاسخ جابه‌جایی است. بنابراین تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، کمینه کردن شتاب سازه در نظر گرفته شده است. مسئله بهینه‌سازی مربوطه به صورت زیر بیان می‌شود:

(۱۶)

بدست آوردن $\{\xi_b \text{ و } \gamma_b\}$ برای کمینه‌سازی \ddot{X}_s

که در آن نسبت جذر میانگین مربعات^{۲۵} (RMS) پاسخ شتاب طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده می‌باشد. برای تابع هدف، جذر میانگین مربعات پاسخ‌ها به حداکثر^{۲۶} پاسخ‌ها ترجیح داده شد؛ زیرا کاهش جذر میانگین مربعات پاسخ‌ها بیشتر با قابلیت میرایی سازه در حین ارتعاش سازه مرتبط است. پس از آنجایی که راندمان کاهش پاسخ‌های سازه با میرایی مؤثر سیستم TLMD ارتباط مستقیم دارد، انتخاب جذر میانگین مربعات پاسخ‌ها منطقی است.

الگوریتم جستجوی الگو^{۲۷} که یک بهینه‌ساز سراسری^{۲۸} مقاوم است، برای حل مسئله بهینه‌سازی پارامترهای استخر استفاده شده است. در این الگوریتم، دنباله‌ای از نقاط در صفحه جستجو تا نزدیک شدن به نقطه بهینه در نظر گرفته می‌شوند. در هر مرحله، الگوریتم مجموعه‌ای از نقاط را که به آن‌ها مش^{۲۹} گفته می‌شود، در اطراف نقطه فعلی جستجو می‌کند. اگر در فرایند جستجو، نقطه‌ای در حرکت بعدی یافت شود که تابع هدف را بهبود ببخشد، نقطه جدید به نقطه فعلی برای مرحله بعدی تبدیل می‌شود. ابعاد مش پس از هر جستجو یا تکرار موفقیت‌آمیز، افزایش و پس از هر جستجو یا تکرار ناموفق، کاهش می‌یابند. در این پژوهش از تولباکس Matlab جهت پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی الگو استفاده شده است.



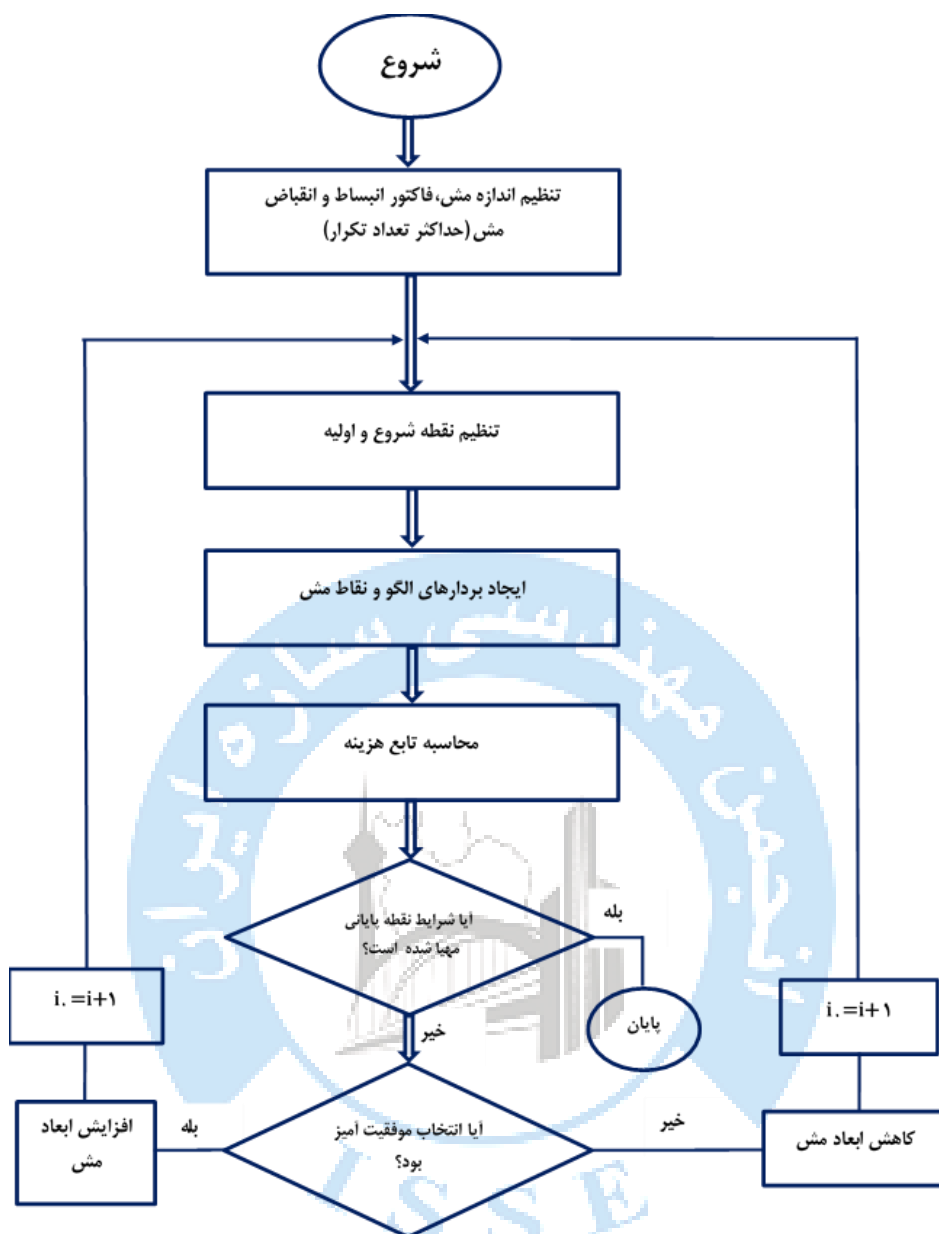
25 Root mean square

26 Peak

27 Pattern-search algorithm

28 Global

29 Mesh



شکل ۴: فلوچارت الگوریتم جستجوی الگو

۳- مثال‌های عددی

در این بخش، دو سازه یک و پنج طبقه دارای استخر در بام تحت ارتعاش زلزله‌های کوبه^۳، نورث‌ریج^۴ و لوما پریتا^{۳۲} با مشخصات مطابق جدول (۱) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پارامترهای جرم، سختی و میرایی سازه یک طبقه به ترتیب 100 ton ، 15791 kN/m و $25/1\text{ kN.s/m}$ و سازه پنج طبقه به ترتیب 100 ton ، 16000 kN/m و 800 kN.s/m لحاظ شده‌اند. در این پژوهش فرض شده است که جرم، سختی و میرایی تمامی طبقات باهم برابر هستند [۲۹ و ۳۰].

30 Kobe
31 Northridge
32 Loma-Prieta

جدول ۱: مشخصات رکوردهای زلزله

زلزله	ایستگاه	سال	PGA(g)	PGV(cm/s)	PGD(cm)
نورثریج	Saticoy	۱۹۹۴	۰/۴۲۹	۶۰/۱۴	۲۱/۸۹
کوبه	Amagasaki	۱۹۹۵	۰/۳۲۷	۴۴/۸۳	۲۷/۸۱
لوما پریتا	Saratoga	۱۹۸۹	۰/۳۲۶	۴۵/۹۵	۳۳/۳۱

۳-۱ نسبت فرکانسی و میرایی بهینه

پارامترهای بهینه استخرها یعنی نسبت فرکانسی و میرایی بالشتک‌های الاستومری با فرض ثابت بودن ارتفاع مایع و تغییر نسبت عمق مایع در جداول (۲-۷) مرتب شده‌اند. نتایج بدست آمده نشان دادند که نسبت فرکانسی بهینه در اغلب موارد در حدود ۱ بدست می‌آید. در یک نسبت عمق مشخص، با افزایش ارتفاع مایع مقدار نسبت میرایی بهینه عموماً روند صعودی دارد. زمانی که ارتفاع مایع کم است، پارامترهای بهینه استخر حساسیت کمتری نسبت به تغییر بُعد استخر در جهت ارتعاش سازه دارند، اما با افزایش ارتفاع مایع حساسیت نسبت به تغییر بُعد استخر بیشتر می‌شود. ارزیابی رفتار سازه‌های یک و پنج طبقه دارای استخر در برابر ارتعاش سه زلزله کوبه، نورثریج و لوما پریتا نشان دادند که با افزایش تعداد طبقات سازه، عموماً نسبت میرایی بهینه کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۲: پارامترهای بهینه استخر در سازه ۱ طبقه تحت ارتعاش زلزله کوبه

ارتفاع مایع (cm)	مشخصه	β						
		۱/۵	۱/۳	۱/۱	۰/۹	۰/۷	۰/۵	۰/۳
۲۰	γ	۰/۹۹۹۳	۱/۰۰۰۱	۱/۰۰۳۸	۰/۹۸۰۵	۰/۹۹۲۱	۰/۹۹۱۹	۰/۹۹۰۵
	ξ (%)	۵/۶۷	۵/۶۸	۴/۹۸	۵/۴۸	۵/۶۴	۵/۶۱	۵/۵۱
۴۰	γ	۰/۹۹۱۴	۰/۹۹۱۸	۰/۹۹۱۴	۰/۹۹۰۱	۰/۹۸۷۶	۰/۹۸۳۲	۰/۹۷۷۳
	ξ (%)	۵/۶۸	۵/۶۹	۵/۷۱	۵/۷۰	۵/۶۸	۵/۵۷	۵/۱۳
۶۰	γ	۰/۹۹۱۴	۰/۹۹۰۵	۰/۹۸۹۰	۰/۹۸۶۶	۰/۹۸۲۷	۰/۹۷۶۸	۰/۹۷۱۶
	ξ (%)	۵/۷۹	۵/۸۲	۵/۸۵	۵/۸۸	۵/۸۷	۵/۷۱	۵/۰۸
۸۰	γ	۰/۹۹۰۵	۰/۹۸۹۳	۰/۹۸۷۷	۰/۹۸۵۳	۰/۹۸۲۰	۰/۹۷۷۷	۰/۹۷۵۹
	ξ (%)	۶/۰۰	۶/۰۸	۶/۱۶	۶/۲۴	۶/۲۸	۶/۱۱	۵/۳۸
۱۰۰	γ	۰/۹۹۰۳	۰/۹۸۹۷	۰/۹۸۸۷	۰/۹۸۷۴	۰/۹۸۵۵	۰/۹۸۱۹	۰/۹۷۰۳
	ξ (%)	۶/۳۳	۶/۴۶	۶/۶۱	۶/۷۵	۶/۸۰	۶/۶۱	۶/۱۴
۱۲۰	γ	۰/۹۲۲۰	۰/۹۹۱۹	۰/۹۹۱۹	۰/۹۹۱۳	۰/۹۸۸۱	۰/۹۷۶۲	۰/۹۳۹۲

۶/۷۶	۶/۹۴	۷/۱۲	۷/۲۹	۷/۴۰	۷/۵۳	۷/۱۰	ξ (%)	
۰/۹۹۴۹	۰/۹۹۵۳	۰/۹۹۵۰	۰/۹۹۱۹	۰/۹۸۰۶	۰/۹۵۲۶	۰/۹۰۹۸	γ	۱۴۰
۷/۲۲	۷/۴۳	۷/۶۵	۷/۹۴	۸/۴۱	۸/۶۵	۶/۱۰	ξ (%)	
۰/۹۹۷۸	۰/۹۹۷۳	۰/۹۹۳۸	۰/۹۸۳۱	۰/۹۶۰۰	۰/۹۲۶۷	۰/۸۹۰۰	γ	۱۶۰
۷/۷۰	۷/۹۶	۸/۳۵	۸/۹۸	۹/۵۱	۸/۳۵	۵/۲۱	ξ (%)	
۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۴۶	۰/۹۸۴۳	۰/۹۶۴۵	۰/۹۳۷۰	۰/۹۱۳۹	۰/۷۸۰۴	γ	۱۸۰
۸/۲۳	۸/۶۹	۹/۳۷	۹/۹۹	۹/۴۷	۶/۶۰	۷/۹۰	ξ (%)	
۰/۹۹۴۶	۰/۹۸۴۵	۰/۹۶۷۲	۰/۹۴۳۹	۰/۹۲۳۹	۰/۹۰۰۰	۰/۴۵۵۲	γ	۲۰۰
۸/۹۹	۹/۶۸	۱۰/۳۰	۱۰/۰۹	۷/۹۷	۷/۴۵	۲/۵۸	ξ (%)	

جدول ۳: پارامترهای بهینه استخر در سازه ۱ طبقه تحت ارتعاش زلزله نورتریج

β							مشخصه	ارتفاع مایع (cm)
۱/۵	۱/۳	۱/۱	۰/۹	۰/۷	۰/۵	۰/۳		
۰/۹۶۰۵	۰/۹۵۷۵	۰/۹۷۲۷	۰/۹۶۹۲	۰/۹۶۱۶	۰/۹۵۶۲	۰/۹۵۳۴	γ	۲۰
۱۴/۹۲	۱۴/۹۸	۱۴/۵۴	۱۲/۶۳	۱۵/۰۰	۱۴/۸۶	۱۴/۵۸	ξ (%)	
۰/۹۶۹۱	۰/۹۵۸۶	۰/۹۵۶۲	۰/۹۵۳۲	۰/۹۴۹۵	۰/۹۴۳۷	۰/۹۳۴۲	γ	۴۰
۱۵/۰۰	۱۵/۱۲	۱۵/۱۰	۱۵/۱۰	۱۵/۰۶	۱۴/۸۱	۱۳/۷۰	ξ (%)	
۰/۹۵۳۲	۰/۹۵۰۹	۰/۹۴۷۷	۰/۹۴۳۱	۰/۹۳۵۸	۰/۹۲۴۰	۰/۹۰۵۸	γ	۶۰
۱۵/۳۴	۱۵/۴۱	۱۵/۴۹	۱۵/۵۷	۱۵/۵۶	۱۵/۱۶	۱۳/۴۸	ξ (%)	
۰/۹۴۶۰	۰/۹۴۲۲	۰/۹۳۶۹	۰/۹۲۹۱	۰/۹۱۷۵	۰/۹۰۰۴	۰/۸۷۸۴	γ	۸۰
۱۵/۸۶	۱۶/۰۳	۱۶/۲۳	۱۶/۴۲	۱۶/۴۶	۱۵/۹۰	۱۳/۶۷	ξ (%)	
۰/۹۳۶۷	۰/۹۳۱۱	۰/۹۲۳۴	۰/۹۱۲۹	۰/۸۹۸۷	۰/۸۸۱۲	۰/۸۶۸۹	γ	۱۰۰
۱۶/۶۳	۱۶/۹۱	۱۷/۲۱	۱۷/۴۵	۱۷/۳۸	۱۶/۳۹	۱۳/۱۷	ξ (%)	
۰/۹۲۵۸	۰/۹۱۸۵	۰/۹۰۹۳	۰/۸۹۷۹	۰/۸۸۵۴	۰/۸۷۵۷	۰/۸۷۷۹	γ	۱۲۰
۱۷/۵۴	۰/۱۷۸۸	۱۸/۱۹	۱۸/۲۹	۱۷/۸۳	۱۶/۰۶	۱۲/۰۲	ξ (%)	
۰/۹۱۴۴	۰/۹۰۶۴	۰/۸۹۷۵	۰/۸۸۸۷	۰/۸۸۳۱	۰/۸۸۴۳	۰/۸۷۰۴	γ	۱۴۰
۱۸/۴۴	۱۸/۷۵	۱۸/۸۹	۱۸/۶۲	۱۷/۵۰	۱۵/۰۲	۱۱/۸۴	ξ (%)	

۰/۹۰۴۲	۰/۸۹۷۲	۰/۸۹۱۱	۰/۸۸۸۵	۰/۸۹۰۹	۰/۸۸۸۱	۰/۸۱۴۰	γ	۱۶۰
۱۹/۱۷	۱۹/۲۹	۱۹/۰۹	۱۸/۲۷	۱۶/۶۰	۱۴/۵۸	۱۲/۶۲	ξ (%)	
۰/۸۹۷۰	۰/۸۹۳۰	۰/۸۹۲۲	۰/۸۹۵۴	۰/۸۹۵۸	۰/۸۷۰۹	۰/۷۱۴۳	γ	۱۸۰
۱۹/۵۷	۱۹/۳۷	۱۸/۷۱	۱۷/۴۷	۱۶/۱۱	۱۵/۵۶	۱۱/۲۲	ξ (%)	
۰/۸۹۴۶	۰/۸۹۵۰	۰/۸۹۸۶	۰/۹۰۰۴	۰/۸۸۸۰	۰/۸۲۸۸	۰/۴۵۲۳	γ	۲۰۰
۱۹/۵۵	۱۸/۹۷	۱۷/۹۸	۱۶/۹۹	۱۶/۸۱	۱۶/۷۶	۳/۱۱	ξ (%)	



جدول ۴: پارامترهای بهینه استخر در سازه ۱ طبقه تحت ارتعاش زلزله لوما پربتا

β							مشخصه	ارتفاع مایع (cm)
۱/۵	۱/۳	۱/۱	۰/۹	۰/۷	۰/۵	۰/۳		
۱/۰۷۴۵	۱/۰۷۵۵	۱/۰۷۱۱	۱/۰۶۴۷	۱/۰۶۸۷	۱/۰۶۷۹	۱/۰۶۶۲	γ	۲۰
۴/۲۴	۴/۵۷	۴/۱۸	۳/۳۳	۳/۹۲	۴/۰۳	۴/۰۱	ξ (%)	
۱/۰۶۸۷	۱/۰۶۸۶	۱/۰۶۷۹	۱/۰۶۶۵	۱/۰۶۴۱	۱/۰۵۹۶	۱/۰۵۲۰	γ	۴۰
۳/۸۶	۴/۰۲	۴/۱۱	۴/۱۹	۴/۲۶	۴/۳۳	۴/۵۰	ξ (%)	
۱/۰۶۷۷	۱/۰۶۶۵	۱/۰۶۴۵	۱/۰۶۰۷	۱/۰۵۳۲	۱/۰۳۷۱	۱/۰۰۷۵	γ	۶۰
۴/۴۰	۴/۵۷	۴/۸۲	۵/۲۴	۵/۹۴	۶/۹۱	۷/۲۳	ξ (%)	

۱/۰۶۳۵	۱/۰۵۹۳	۱/۰۵۱۶	۱/۰۳۸۵	۱/۰۱۹۷	۰/۹۹۷۱	۰/۹۷۶۳	γ	۸۰
۵/۵۳	۶/۱۶	۷/۰۴	۸/۰۸	۸/۸۹	۸/۹۴	۷/۴۲	(%) ξ	
۱/۰۴۸۴	۱/۰۳۷۸	۱/۰۲۴۵	۱/۰۰۹۵	۰/۹۹۴۰	۰/۹۷۹۶	۰/۹۶۷۷	γ	۱۰۰
۷/۸۱	۸/۶۷	۹/۴	۹/۸۴	۹/۷۵	۸/۸۰	۷/۰۸	(%) ξ	
۱/۰۲۵۹	۱/۰۱۵۱	۱/۰۰۴۰	۰/۹۹۳۵	۰/۹۸۴۲	۰/۹۷۳۵	۰/۹۴۰۷	γ	۱۲۰
۹/۶۶	۱۰/۱۰	۱۰/۲۹	۱۰/۱۲	۹/۴۷	۸/۶۷	۸/۲۳	(%) ξ	
۱/۰۰۹۰	۱/۰۰۱۰	۰/۹۹۳۸	۰/۹۸۷۵	۰/۹۷۸۷	۰/۹۵۴۲	۰/۹۰۱۵	γ	۱۴۰
۱۰/۴۷	۱۰/۵	۱۰/۲۸	۹/۸۳	۹/۶۱	۹/۹۴	۸/۲۳	(%) ξ	
۰/۹۹۹۳	۰/۹۹۴۳	۰/۹۸۹۶	۰/۹۸۱۸	۰/۹۶۱۶	۰/۹۲۴۵	۰/۸۶۵۶	γ	۱۶۰
۱۰/۵۹	۱۰/۳۶	۱۰/۰۸	۱۰/۲۰	۱۰/۹۱	۱۰/۵۵	۶/۴۵	(%) ξ	
۰/۹۹۴۷	۰/۹۹۰۸	۰/۹۸۳۵	۰/۹۶۶۱	۰/۹۳۶۴	۰/۸۹۸۱	۰/۸۱۸۲	γ	۱۸۰
۱۰/۴۱	۱۰/۲۸	۱۰/۶۱	۱۱/۴۶	۱۱/۶۷	۱۰/۰۱	۳/۹۰	(%) ξ	
۰/۹۹۱۴	۰/۹۸۴۳	۰/۹۶۸۸	۰/۹۴۴۰	۰/۹۱۳۳	۰/۸۷۸۷	۰/۴۷۲۳	γ	۲۰۰
۱۰/۴۷	۱۰/۹۴	۱۱/۸۱	۱۲/۲۶	۱۱/۵۲	۸/۵۷	۲/۷۱	(%) ξ	

جدول ۵: پارامترهای بهینه استخر در سازه ۵ طبقه تحت ارتعاش زلزله کوبه

β

ارتفاع مایع (cm) مشخصه

۱/۵	۱/۳	۱/۱	۰/۹	۰/۷	۰/۵	۰/۳		
۰/۹۷۵۲	۰/۹۷۵۸	۰/۹۷۷۲	۰/۹۸۳۷	۰/۹۶۶۶	۰/۹۶۵۶	۰/۹۶۴۵	γ	۲۰
۲/۷۷	۲/۷۷	۲/۷۸	۲/۴۶	۲/۷۳	۲/۷۴	۲/۶۷	(%) ξ	
۰/۹۶۸۴	۰/۹۶۴۷	۰/۹۶۳۶	۰/۹۶۲۱	۰/۹۵۹۰	۰/۹۵۳۳	۰/۹۴۴۹	γ	۴۰
۲/۰۷	۲/۸۱	۲/۷۹	۲/۷۷	۲/۷۴	۲/۶۶	۲/۳۹	(%) ξ	
۰/۹۶۲۹	۰/۹۶۱۶	۰/۹۵۹۳	۰/۹۵۵۵	۰/۹۴۹۴	۰/۹۳۹۹	۰/۹۲۹۴	γ	۶۰
۲/۸۲	۲/۸۲	۲/۸۱	۲/۸۰	۲/۷۷	۲/۶۵	۲/۳۰	(%) ξ	
۰/۹۵۹۸	۰/۹۵۷۵	۰/۹۵۴۱	۰/۹۴۹۳	۰/۹۴۲۳	۰/۹۳۲۹	۰/۹۲۶۳	γ	۸۰
۲/۸۸	۲/۸۹	۲/۹۱	۲/۹۳	۲/۹۲	۲/۸۴	۲/۶۰	(%) ξ	
۰/۹۵۶۶	۰/۹۵۳۹	۰/۹۵۰۴	۰/۹۴۵۸	۰/۹۳۹۹	۰/۹۳۳۳	۰/۹۲۲۷	γ	۱۰۰
۲/۹۹	۳/۰۴	۳/۱۰	۳/۱۷	۳/۲۵	۳/۳۱	۳/۲۵	(%) ξ	
۰/۹۵۴۳	۰/۹۵۱۹	۰/۹۴۹۰	۰/۹۴۵۶	۰/۹۴۲۰	۰/۹۳۹۲	۰/۹۴۴۴	γ	۱۲۰
۳/۱۸	۳/۲۷	۳/۴۰	۳/۵۸	۳/۸۰	۴/۰۲	۴/۰۳	(%) ξ	
۰/۹۵۳۴	۰/۹۵۱۶	۰/۹۴۹۹	۰/۹۴۸۳	۰/۹۴۷۳	۰/۹۴۸۴	۰/۹۵۸۳	γ	۱۴۰
۳/۴۵	۳/۶۱	۳/۸۴	۴/۱۵	۴/۵۲	۴/۸۳	۴/۹۵	(%) ξ	
۰/۹۵۳۹	۰/۹۵۳۱	۰/۹۵۲۸	۰/۹۵۳۲	۰/۹۵۴۹	۰/۹۵۹۳	۰/۹۷۶۲	γ	۱۶۰
۳/۸۲	۴/۰۷	۴/۴۲	۴/۸۵	۵/۳۱	۵/۷۲	۶/۲۲	(%) ξ	
۰/۹۵۵۷	۰/۹۵۶۱	۰/۹۵۷۳	۰/۹۵۹۷	۰/۹۶۳۸	۰/۹۷۱۹	۱/۰۰۴۳	γ	۱۸۰
۴/۲۸	۴/۶۴	۵/۰۸	۵/۵۹	۶/۱۵	۶/۸۸	۷/۳۷	(%) ξ	
۰/۹۵۸۷	۰/۹۶۰۳	۰/۹۶۳۰	۰/۹۶۷۱	۰/۹۷۳۷	۰/۹۹۰۴	۱/۰۱۴۵	γ	۲۰۰
۴/۸۲	۵/۲۵	۵/۷۶	۶/۳۶	۷/۱۸	۸/۲۶	۸/۸۳	(%) ξ	

جدول ۶: پارامترهای بهینه استخر در سازه ۵ طبقه تحت ارتعاش زلزله نورث ریج

β							مشخصه	ارتفاع مایع (cm)
۱/۵	۱/۳	۱/۱	۰/۹	۰/۷	۰/۵	۰/۳		
۱/۰۱۵۳	۱/۰۱۶۰	۱/۰۱۸۳	۱/۰۳۳۵	۱/۰۰۳۹	۱/۰۰۶۰	۱/۰۰۴۸	γ	۲۰
۱/۳۷	۱/۳۷	۱/۳۷	۰/۸۷	۱/۱۵	۱/۲۸	۱/۲۷	ξ (%)	
۰/۹۹۹۹	۱/۰۰۳۶	۱/۰۰۴۱	۱/۰۰۲۹	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۴۳	۰/۹۸۶۰	γ	۴۰
۰/۸۸	۱/۲۱	۱/۲۸	۱/۳۰	۱/۲۹	۱/۲۶	۱/۱۳	ξ (%)	
۱/۰۰۳۸	۱/۰۰۲۵	۱/۰۰۰۴	۰/۹۹۶۷	۰/۹۹۰۸	۰/۹۸۱۲	۰/۹۶۸۸	γ	۶۰
۱/۳۳	۱/۳۵	۱/۳۶	۱/۳۸	۱/۳۹	۱/۳۷	۱/۲۹	ξ (%)	
۱/۰۰۱۰	۰/۹۹۸۷	۰/۹۹۵۳	۰/۹۹۰۱	۰/۹۸۱۹	۰/۹۶۹۳	۰/۹۵۳۹	γ	۸۰
۱/۴۳	۱/۴۷	۱/۵۳	۱/۶۰	۱/۷۰	۱/۷۸	۱/۶۶	ξ (%)	
۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۴۲	۰/۹۸۹۵	۰/۹۸۲۵	۰/۹۷۲۰	۰/۹۵۸۰	۰/۹۴۶۲	γ	۱۰۰
۱/۶۲	۱/۷۲	۱/۸۶	۲/۰۳	۲/۱۷	۲/۱۱	۱/۶۹	ξ (%)	
۰/۹۹۳۰	۰/۹۸۸۶	۰/۹۸۲۳	۰/۹۷۳۹	۰/۹۶۳۵	۰/۹۵۲۶	۰/۹۴۷۱	γ	۱۲۰
۱/۹۴	۲/۱۱	۲/۲۸	۲/۴۱	۲/۳۷	۲/۱۴	۲/۱۶	ξ (%)	
۰/۹۸۷۳	۰/۹۸۱۷	۰/۹۷۵۰	۰/۹۶۷۴	۰/۹۵۹۶	۰/۹۵۲۹	۰/۹۳۲۶	γ	۱۴۰
۲/۳۲	۲/۴۶	۲/۵۵	۲/۵۲	۲/۴۰	۲/۵۳	۴/۱۴	ξ (%)	
۰/۹۸۱۰	۰/۹۷۵۶	۰/۹۶۹۹	۰/۹۶۴۴	۰/۹۵۹۷	۰/۹۴۷۹	۰/۸۹۵۷	γ	۱۶۰
۲/۵۸	۲/۶۳	۲/۶۱	۲/۵۶	۲/۸۱	۴/۲۹	۵/۲۲	ξ (%)	
۰/۹۷۶۰	۰/۹۷۱۷	۰/۹۶۷۷	۰/۹۶۴۵	۰/۹۵۶۷	۰/۹۱۸۵	۰/۸۷۴۳	γ	۱۸۰

۲/۶۹	۲/۶۶	۲/۶۷	۲/۹۹	۴/۳۷	۶/۰۸	۵/۹۹	ξ (%)	۲۰۰
۰/۹۷۲۹	۰/۹۷۰۰	۰/۹۶۷۸	۰/۹۶۲۴	۰/۹۳۴۳	۰/۸۹۲۸	۰/۸۶۲۹	γ	
۲/۷۱	۲/۷۵	۳/۱۰	۴/۳۶	۶/۳۵	۶/۷۳	۸/۱۲	ξ (%)	



جدول ۷: پارامترهای بهینه استخر در سازه ۵ طبقه تحت ارتعاش زلزله لوما پربتا

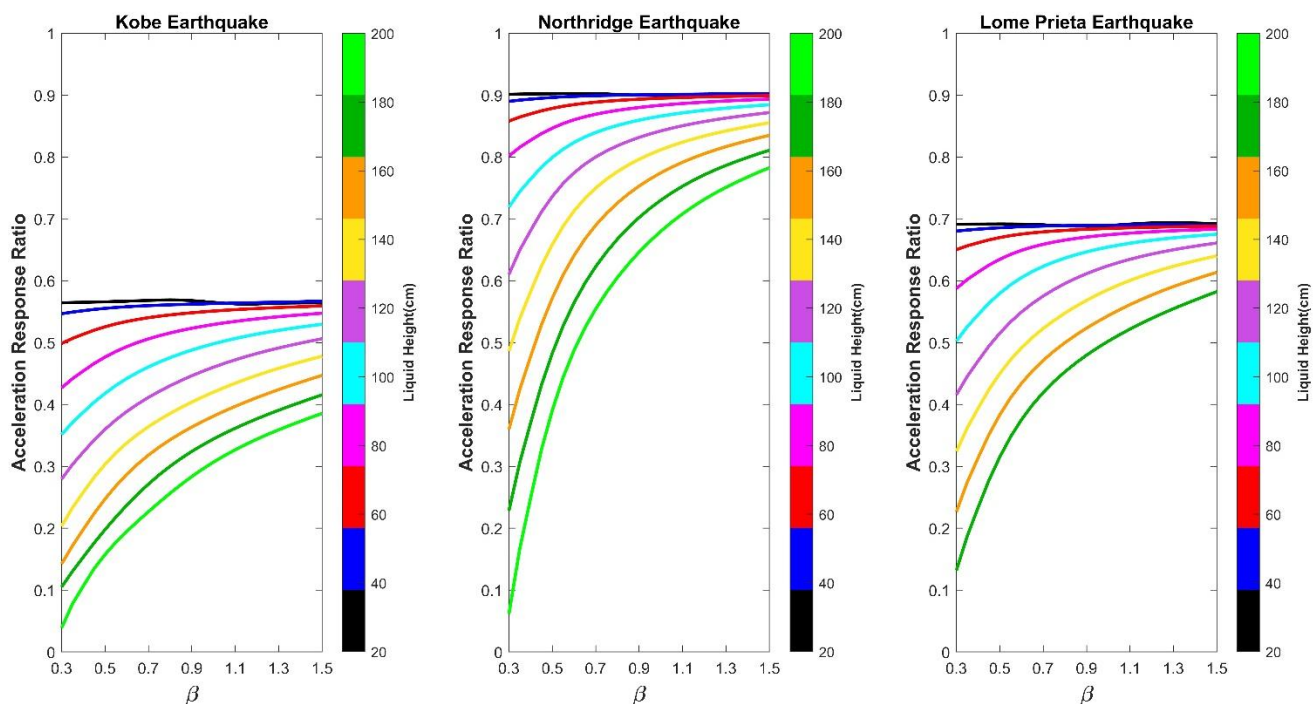
β							مشخصه	ارتفاع مایع (cm)
۱/۵	۱/۳	۱/۱	۰/۹	۰/۷	۰/۵	۰/۳		
۰/۹۷۹۰	۰/۹۷۹۵	۰/۹۸۰۷	۰/۹۸۵۴	۰/۹۶۵۸	۰/۹۶۸۵	۰/۹۶۷۹	γ	۲۰
۳/۳۹	۳/۴۰	۳/۴۰	۲/۲۳	۳/۳۹	۳/۳۵	۳/۲۷	ξ (%)	
۰/۹۸۶۵	۰/۹۶۵۷	۰/۹۶۶۴	۰/۹۶۵۶	۰/۹۶۲۹	۰/۹۵۷۸	۰/۹۵۰۸	γ	۴۰
۳/۴۷	۳/۴۳	۳/۴۲	۳/۴	۳/۳۸	۳/۳۰	۳/۰۱	ξ (%)	
۰/۹۶۶۹	۰/۹۶۶۱	۰/۹۶۴۴	۰/۹۶۱۴	۰/۹۵۶۴	۰/۹۴۸۶	۰/۹۴۰۹	γ	۶۰
۳/۴۷	۳/۴۸	۳/۴۹	۳/۵۰	۳/۴۸	۳/۳۵	۲/۹۱	ξ (%)	
۰/۹۶۶۰	۰/۹۶۴۵	۰/۹۶۲۲	۰/۹۵۸۷	۰/۹۵۳۳	۰/۹۴۵۶	۰/۹۳۸۸	γ	۸۰
۳/۵۹	۳/۶۳	۳/۶۶	۳/۶۹	۳/۶۷	۳/۵۰	۳/۰۰	ξ (%)	
۰/۹۶۵۴	۰/۹۶۳۸	۰/۹۶۱۵	۰/۹۵۸۱	۰/۹۵۲۸	۰/۹۴۴۸	۰/۹۳۵۸	γ	۱۰۰

۳/۷۷	۳/۸۳	۳/۸۸	۳/۹۲	۳/۸۹	۳/۷۱	۳/۲۲	ξ (%)	
۰/۹۶۵۵	۰/۹۶۴۰	۰/۹۶۱۶	۰/۹۵۷۹	۰/۹۵۱۷	۰/۹۴۱۹	۰/۹۲۹۶	γ	۱۲۰
۳/۹۸	۴/۰۵	۴/۱۱	۴/۱۶	۴/۱۵	۳/۹۹	۳/۵۳	ξ (%)	
۰/۹۶۵۹	۰/۹۶۴۱	۰/۹۶۱۲	۰/۹۵۶۴	۰/۹۴۸۵	۰/۹۳۶۶	۰/۹۲۳۸	γ	۱۴۰
۴/۱۹	۴/۲۷	۴/۳۶	۴/۴۳	۴/۴۵	۴/۳۲	۴/۱۴	ξ (%)	
۰/۹۶۵۸	۰/۹۶۳۳	۰/۹۵۹۳	۰/۹۵۳۰	۰/۹۴۳۵	۰/۹۳۱۲	۰/۹۲۳۶	γ	۱۶۰
۴/۴۱	۴/۵۱	۴/۶۲	۴/۷۲	۴/۷۷	۴/۸۱	۵/۶۵	ξ (%)	
۰/۹۶۴۶	۰/۹۶۱۱	۰/۹۵۵۸	۰/۹۴۸۳	۰/۹۳۸۴	۰/۹۲۸۲	۰/۹۳۷۲	γ	۱۸۰
۴/۶۴	۴/۷۷	۴/۹۰	۵/۰۳	۵/۲۱	۵/۹۱	۷/۸۴	ξ (%)	
۰/۹۶۲۲	۰/۹۵۷۷	۰/۹۵۱۴	۰/۹۴۳۵	۰/۹۳۴۷	۰/۹۳۲۲	۰/۹۶۲۵	γ	۲۰۰
۴/۸۹	۵/۰۳	۵/۱۹	۵/۴۲	۶/۰۷	۷/۸۸	۹/۵۴	ξ (%)	

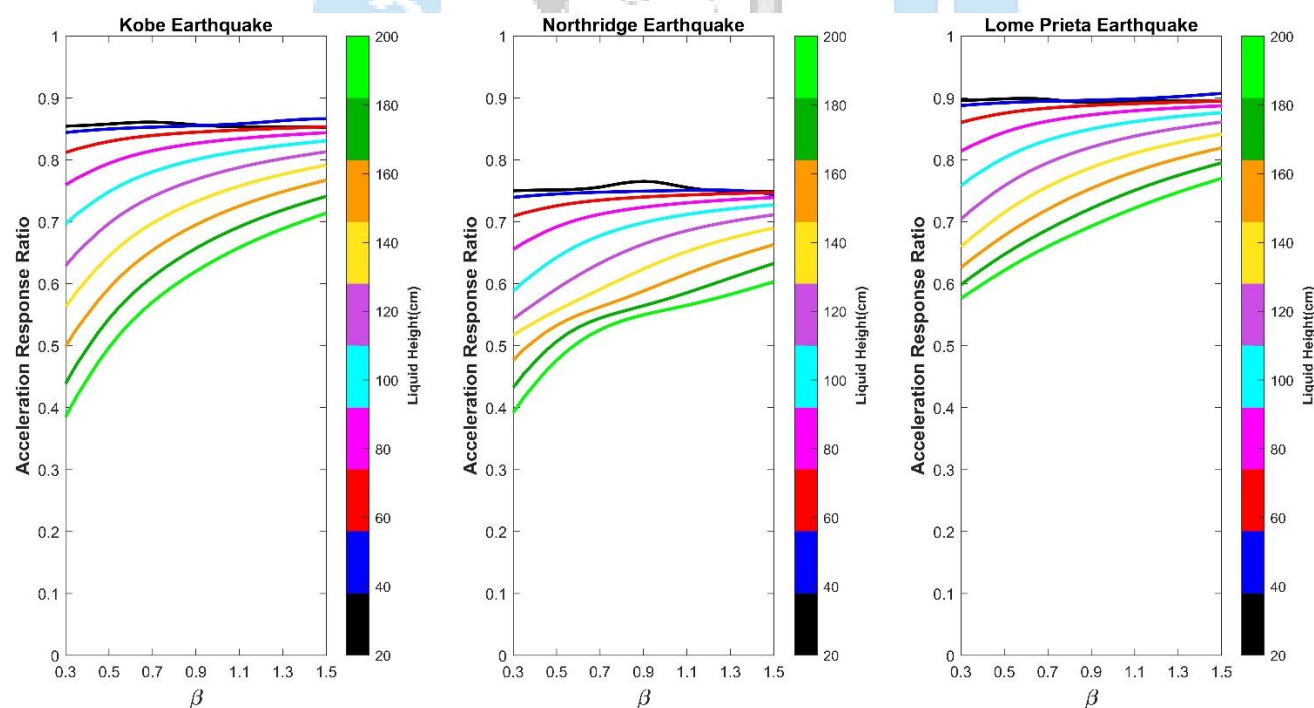
۳-۲ نسبت پاسخ شتاب سازه به عنوان تابع هدف

در شکل (۵-۶) روند تغییر نسبت جذر میانگین مربعات^{۳۳} پاسخ شتاب طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده با افزایش نسبت عمق مایع نشان داده شده است. مطابق این نتایج، با افزایش عمق مایع، حساسیت نسبت پاسخ شتاب در مقابل افزایش نسبت عمق، بیشتر می شود. از طرفی با افزایش ارتفاع مایع در یک نسبت عمق ثابت، عملکرد کنترلی استخرها در کاهش پاسخ شتاب بهتر می شود. برای مثال، سازه یک طبقه و پنج طبقه دارای استخر مستطیلی با نسبت عمق ۰/۳ و ارتفاع مایع ۲ متری تحت ارتعاش زلزله های کوبه و نورث ریج، به ترتیب ۰/۹۵٪ و ۰/۶۰٪ پاسخ شتاب سازه را کاهش می دهند.

33 Root mean square



شکل ۵: نسبت پاسخ شتاب سازه یک طبقه دارای استخر



شکل ۶: نسبت پاسخ شتاب سازه پنج طبقه دارای استخر

۳-۳ مقایسه پاسخ سازه دارای استخر و میراگر TMD

یکی از راه‌های مؤثر کنترل ارتعاش سازه، استفاده از میراگرهای غیرفعال TMD است. جرم میراگر ۱ تا ۵ درصد جرم کل سازه در نظر گرفته می‌شود و در بخشی از سازه که بیشترین جابه‌جایی را دارد، نصب می‌شود. فرکانس ارتعاش میراگر TMD معمولاً مطابق فرکانس اصلی ارتعاش سازه لحاظ می‌شود. زمانی که تحت ارتعاش سازه جرم تنظیم‌شده حرکت می‌کند، بخشی از انرژی ورودی زلزله مستهلک می‌شود. علی‌رغم عملکرد مناسب این میراگرها تحت ارتعاش زلزله و باد، نیاز به فضای بزرگ جهت نصب و حرکت جرم تنظیم‌شده و هزینه بالای تجهیزات و نگهداری از جمله معایب این میراگرها می‌باشند.

در این پژوهش نسبت جرمی میراگر به کل سازه برابر با ۰.۲٪ در نظر گرفته شده است و پارامترهای بهینه میراگر از روابط زیر به دست آمدند [۳۱]:

$$f_{TMD} = \frac{f_1}{1 + \mu} \quad (17)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (18)$$

که در آن f_1 و f_{TMD} به ترتیب فرکانس TMD و فرکانس اصلی سازه هستند. همچنین μ و ζ_{opt} به ترتیب بر نسبت جرمی و نسبت میرایی بهینه دلالت دارند.

استخرها به عنوان مایع جرمی تنظیم‌شونده می‌توانند جایگزین میراگر TMD شوند و معایب آن را پوشش دهند. با در نظر گرفتن استخر آب با ارتفاع مایع یک و دو متر و نسبت عمق ۱ و ۰/۹ به ترتیب برای سازه یک و پنج طبقه، عملکرد سازه کنترل‌شده توسط استخر و میراگر TMD با یکدیگر مقایسه شدند (جدول ۸).

جدول ۸: مقایسه حداکثر پاسخ سازه کنترل‌نشده، سازه کنترل‌شده با TMD و سازه کنترل‌شده با استخر

حداکثر پاسخ	زلزله	سازه ۱ طبقه			سازه ۵ طبقه		
		کنترل‌نشده	TMD	استخر	کنترل‌نشده	TMD	استخر
کوبه		۹/۲۹	۷/۸۹	۷/۶۴	۹/۹۷	۷/۴۰	۷/۴۰
جابه‌جایی (cm)	نورثریج	۱۰/۵۶	۱۰/۵۵	۹/۸۶	۱۵/۲۲	۱۱/۱۲	۱۱/۰۲
لوما پریتا		۵/۰۸	۴/۰۵	۳/۹۷	۵/۱۰	۴/۴۹	۴/۳۸
کوبه		۱۳/۷۰	۱۱/۵۷	۱۱/۱۹	۱۱/۷۲	۹/۴۲	۹/۴۲
شتاب ($\frac{m}{s^2}$)	نورثریج	۱۸/۷۳	۱۵/۵۶	۱۵/۹۳	۲۰/۴۵	۱۵/۷۹	۱۵/۷۰
لوما پریتا		۸/۴۶	۶/۹۸	۶/۹۲	۷/۸۷	۶/۷۵	۶/۷۳

نتایج به دست آمده نشان دادند که سازه مجهز به استخر می تواند با جرم کمتر از میراگر TMD، حداکثر پاسخ جابه جایی و شتاب سازه را به طور مؤثرتری کاهش دهد. برای مثال در سازه یک طبقه مجهز به استخر تحت ارتعاش زلزله نورث ریج، میزان کاهش حداکثر پاسخ جابه جایی سازه ۶/۵٪ بیشتر از سازه مجهز به میراگر TMD به دست آمده است.

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش عملکرد کنترلی سازه دارای استخر در مقایسه با سازه بدون استخر تحت تحریک زلزله های کوبه، نورث ریج و لوما پریتا سنجیده شد. سیستم اجرای استخر در بام سازه بر روی بالشتک های الاستومری فرض شده و از مدل هازنر جهت مدل سازی رفتار استخر استفاده شد. برای بهینه سازی پارامترهای استخر، از الگوریتم جستجوی الگو که یک بهینه ساز سراسری است، استفاده شد و نسبت میرایی بهینه و فرکانس بهینه برای حالات مختلف بدست آمد. نتایج حاصل از بهینه سازی و تحلیل پاسخ های سازه در حالت کنترل شده نسبت به حالت کنترل نشده موارد زیر را نشان دادند.

- ۱) نسبت فرکانسی بهینه که نسبت فرکانس سیستم محفظه و جرم سخت مایع به فرکانس اصلی سازه است، در اغلب موارد نزدیک به ۱ بدست می آید.
- ۲) در استخرهای با عمق کمتر، شتاب سازه، نسبت فرکانس بهینه و نسبت میرایی بهینه حساسیت کمتری نسبت به تغییر بعد استخر در جهت ارتعاش دارند.
- ۳) با افزایش تعداد طبقات سازه، نسبت میرایی بهینه بالشتک های الاستومری کاهش پیدا می کند.
- ۴) با افزایش عمق مایع استخر و ثابت نگه داشتن نسبت عمق (نسبت ارتفاع مایع به بعد استخر در جهت ارتعاش)، عملکرد کنترلی استخر بهبود پیدا می کند.
- ۵) استخرها به عنوان جایگزین میراگرهای TMD می توانند با جرم کمتر، حداکثر پاسخ جابه جایی و شتاب سازه را بیشتر کاهش دهند.

مراجع

- [1] Greco, R., & Morga, M. (2019). *Optimum design of tuned mass dampers for different earthquake ground motion parameters and models*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 28(17), e1672.
- [2] Modi, V. J., & Welt, F. (1988). *Damping of wind induced oscillations through liquid sloshing*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 30(1-3), 85-94.
- [3] Tamura, Y., Fujii, K., Ohtsuki, T., Wakahara, T., & Kohsaka, R. (1995). *Effectiveness of tuned liquid dampers under wind excitation*. Engineering structures, 17(9), 609-621.
- [4] Bandyopadhyay, R., Maiti, S., Ghosh, A., & Chatterjee, A. (2018). *Overhead water tank shapes with depth-independent sloshing frequencies for use as TLDs in buildings*. Structural Control and Health Monitoring, 25(1), e2049.
- [5] Banerji, P., Murudi, M., Shah, A. H., & Popplewell, N. (2000). *Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures*. Earthquake engineering & structural dynamics, 29(5), 587-602.

- [6] Yu, J. K., Wakahara, T., & Reed, D. A. (1999). *A non-linear numerical model of the tuned liquid damper*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 28(6), 671-686.
- [7] Li, H. N., Jia, Y., & Wang, S. Y. (2004). *Theoretical and experimental studies on reduction for multi-modal seismic responses of high-rise structures by tuned liquid dampers*. Journal of Vibration and Control, 10(7), 1041-1056.
- [8] Xu, X., Guo, T., Li, G., Sun, G., Shang, B., & Guan, Z. (2018). *A combined system of tuned immersion mass and sloshing liquid for vibration suppression: Optimization and characterization*. Journal of Fluids and Structures, 76, 396-410.
- [9] Fu, L., Guo, T., & Li, G. (2018). *Investigation on damping performance of new type oscillator-liquid combined damper*. International Journal of Mechanical Sciences, 135, 53-62.
- [10] Love, J. S., & Lee, C. S. (2019). *Nonlinear series-type tuned mass damper-tuned sloshing damper for improved structural control*. Journal of Vibration and Acoustics, 141(2), 021006.
- [11] Love, J. S., McNamara, K. P., Tait, M. J., & Haskett, T. C. (2020). *Series-type pendulum tuned mass damper-tuned sloshing damper*. Journal of Vibration and Acoustics, 142(1), 011003.
- [12] Love, J. S., & Tait, M. J. (2013). *The influence of tank orientation angle on a 2D structure-tuned liquid damper system*. Journal of Vibration and Acoustics, 135(1), 011010.
- [13] Tait, M. J., & Deng, X. (2010). *The performance of structure-tuned liquid damper systems with different tank geometries*. Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures, 17(3), 254-277.
- [14] Ghosh, A., & Basu, B. (2004). *Seismic vibration control of short period structures using the liquid column damper*. Engineering Structures, 26(13), 1905-1913.
- [15] Banerji, P., & Samanta, A. (2011). *Earthquake vibration control of structures using hybrid mass liquid damper*. Engineering structures, 33(4), 1291-1301.
- [16] Pandey, D. K., Sharma, M. K., & Mishra, S. K. (2019). *A compliant tuned liquid damper for controlling seismic vibration of short period structures*. Mechanical Systems and Signal Processing, 132, 405-428.
- [17] Housner, G. W. (1963). *The dynamic behavior of water tanks*. Bulletin of the seismological society of America, 53(2), 381-387.
- [18] Pandey, D. K., Mishra, S. K., & Chakraborty, S. (2022). *A tuned liquid mass damper implemented in a deep liquid storage tank for seismic vibration control of short period structures*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 31(8), e1928.
- [19] Haroun, M. A., & Housner, G. W. (1982). *Dynamic characteristics of liquid storage tanks*. Journal of the Engineering Mechanics Division, 108(5), 783-800.
- [20] Hashemi, S., Saadatpour, M. M., & Kianoush, M. R. (2013). *Dynamic analysis of flexible rectangular fluid containers subjected to horizontal ground motion*. Earthquake engineering & structural dynamics, 42(11), 1637-1656.
- [21] Hu, J., & Xu, J. (2020). *Parameter Optimization and Control Characteristics Analysis of TLMD System Based on Phase Deviation*. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 25, 372-383.
- [22] Sara, D. S., & Kumar Aswathy, S. *Study on the Effect of Swimming Pool as Tuned Mass Damper*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN, 2278-0181.
- [23] Agrawal, A., & Wahane, A. (2020). *Analysis of Elevated Swimming Pool with Different Positions on the Terrace of RCC Frames using STAAD Pro*. IRJET e-ISSN2395-0056, p-ISSN, 2395-0072.
- [24] Dattatray, B., Patil, G. R., & Maskar, S. (2014). *Use of overhead water tank to reduce peak response of the structure*. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 4, 60-64.

- [25] Hosseini, P., Hosseini, M., & Omranizadeh, S. M. (2019). *The Effect of Height of Structure on the Accuracy of Nonlinear Static Analysis Methods in Steel Structures with Lead Rubber Bearing (LRB) Base Isolators*. Civil Infrastructure Researches, 5(1), 35-49.
- [26] Pandey, D. K., Sharma, M. K., & Mishra, S. K. (2019). *A compliant tuned liquid damper for controlling seismic vibration of short period structures*. Mechanical Systems and Signal Processing, 132, 405-428.
- [27] Konar, T., & Ghosh, A. (2023). *A review on various configurations of the passive tuned liquid damper*. Journal of Vibration and Control, 29(9-10), 1945-1980.
- [28] Li, Y., Di, Q., & Gong, Y. (2012). *Equivalent mechanical models of sloshing fluid in arbitrary-section aqueducts*. Earthquake engineering & structural dynamics, 41(6), 1069-1087.
- [29] Zhang, D., & Johnson, E. A. (2009, June). *Design of a VSDD brace control system for parameter estimation of shear structures*. In 2009 American Control Conference (pp. 4575-4580). IEEE.
- [30] Ferreira, F., Moutinho, C., Cunha, Á., & Caetano, E. (2018). *Proposal of optimum tuning of semiactive TMDs used to reduce harmonic vibrations based on phase control strategy*. Structural Control and Health Monitoring, 25(4), e2131.
- [31] Pastia, C., & Luca, S. G. (2013). *Vibration control of a frame structure using semi-active tuned mass damper*. Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura, 59(4), 31.

