University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 55 (2025), Issue 1, 69-83

EXTENDED ABSTRACT

Designing a Fuzzy-Based Hybrid Control System to Reduce Structure Vibration Using Rooftop Tank and MR Damper

Sehraneh Ghaemi [a,*], Alireza Aran [b], Mahdi Mansoury [a], Javad Katebi [b]

[a] *Faculty of Electrical & Computer Engineering, University of Tabriz*
[b] *Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz*

Received: 29 June 2024; **Reviewed:** 01 March 2025; **Accepted:** 03 March 2025

Keywords:
Hybrid control, MR damper, Tuned liquid mass damper, Tank, Optimization, Housner model

1. Introduction

MR damper as a semi-active control tool and rooftop tank as a passive control element are effective alone in reducing structural responses. By using these two control systems in one structure, a hybrid control system is built which improves the efficiency of the structural control system. In this research, the novel hybrid control system is proposed to reduce the responses of the structure. In the proposed hybrid control system, an MR damper is considered on the last floor of the structure, and instead of adding more MR dampers to the structure, a tank is utilized as a tuned liquid mass damper on the roof of the structure.

2. Methodology

A 10-story structure equipped with MR damper and rooftop tank is considered as a hybrid control system. The optimal parameters of the tank, i.e frequency ratio (γ_b) and damping of elastomeric pads (ξ_b), are obtained using the pattern search algorithm (Table 1) and the fuzzy controller is designed for the MR damper with a capacity of 1000kN. The performance of this control system which is excited by the vibration of two far-field and two near-field earthquakes is evaluated.

3. Results and discussion

According to the obtained results, it can be seen that in most of the investigated structures, the performance of the hybrid control system is better than the passive control system and the design of this system has been successful. For example, in the structure excited by the Hector mine earthquake and equipped with a hybrid control system where a tank with a liquid height of 200 cm is used, the average displacement response has decreased by 45% and the average acceleration response has decreased by 30%. In the same conditions, the structure equipped with a passive control system has been able to reduce the average displacement response by 40% and the average acceleration response by 17% (Fig. 1).

$$J_2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(RMS_d)_c\,(i)}{\sum_{i=1}^{n}(RMS_d)_{uc}\,(i)} \quad (1)$$

Publisher: Vice Chancellery for Research & Technology, University of Tabriz
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2025.62705.2374
Online ISSN: 2717-4077
* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0002-4731-6577
E-mail addresses: a.aran@tabrizu.ac.ir (Alireza Aran), ghaemi@tabrizu.ac.ir (Sehraneh Ghaemi), mahdimansoury@tabrizu.ac.ir, jkatebi@tabrizu.ac.ir (Javad Katebi)

$$J_2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(RMS_a)_c\,(i)}{\sum_{i=1}^{n}(RMS_a)_{uc}\,(i)} \quad (2)$$

Table. 1. Optimal tank parameters for the structure excited by Hector mine earthquake

Liquid Height	Parameters	Depth Ratio				
		0.3	0.5	0.75	1.0	1.5
50 cm	γ_b	0.9409	1.1156	1.0841	1.0424	1.0246
	$\xi_b(\%)$	0.31	0.42	0.92	0.88	0.86
100 cm	γ_b	1.0335	1.1441	1.0602	1.1605	1.0738
	$\xi_b(\%)$	0.66	0.55	0.53	0.52	0.49
150 cm	γ_b	0.9974	0.8876	0.9753	1.1769	1.1178
	$\xi_b(\%)$	0.43	0.58	1.25	0.87	0.58
200 cm	γ_b	0.8482	0.8136	0.8725	0.8868	1.1894
	$\xi_b(\%)$	0.90	0.57	0.55	0.51	0.43

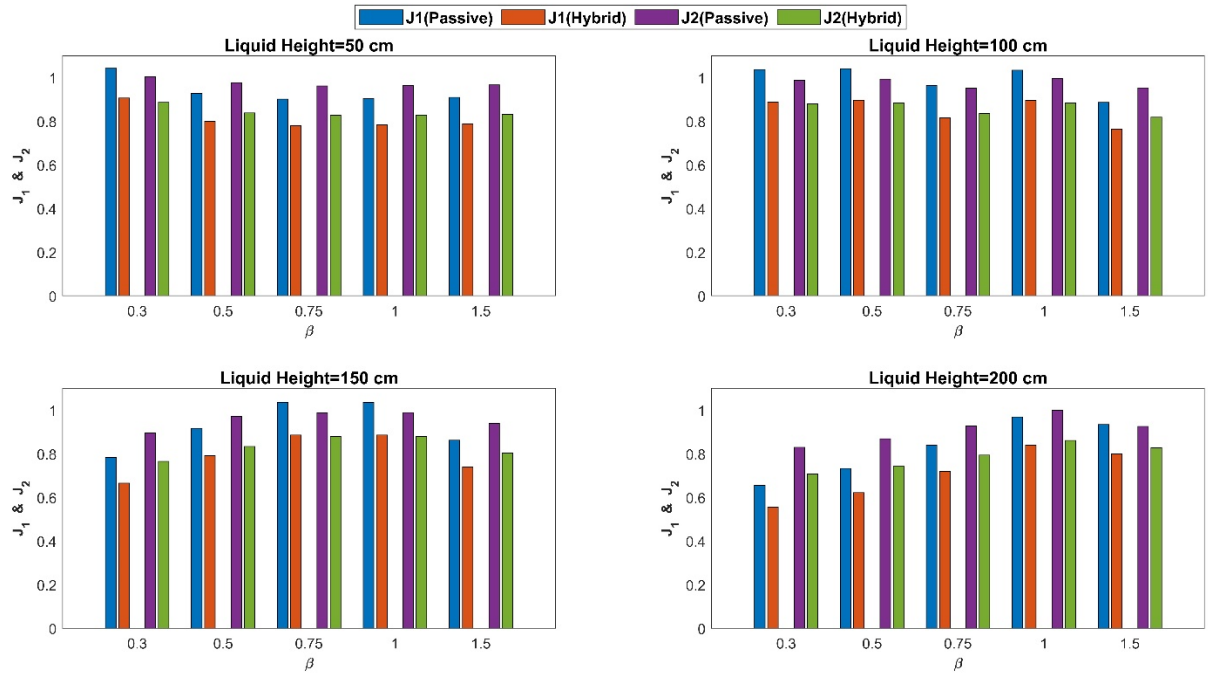


Fig. 1. Performance index J_1 and J_2 for the structure excited by Hector mine earthquake

4. Conclusions

In this research, a 10-story building structure equipped with a tank on the roof and an MR damper on the last floor (hybrid control system) was considered which is excited by two far-field earthquakes and two near-field earthquakes. The parameters of the tank used as a passive control system were optimized using the pattern search algorithm and the optimal frequency ratio of the tank was obtained about 1. Tank modeling was considered with the assumption of a depth ratio greater than 0.3 according to Housner's method for deep tanks. The used MR damper was considered as a semi-active control system with a capacity of 1000kN, and its input voltage was calculated using a fuzzy-based controller. The design of the fuzzy system was performed based on the accelerating or decelerating movements of the structure. The results illustrated that the proposed hybrid control system can reduce the average response of displacement and acceleration of the structure by 45 and 30%, respectively. Also, the analysis of 20 hybrid control systems with different dimensions of the tank excited by four different earthquakes showed that increasing the liquid height and tank volume has an effective role in reducing the response of displacement and acceleration of the structure.

طراحی سیستم کنترل ترکیبی مبتنی بر فازی برای کاهش ارتعاش سازه با استفاده از مخزن پشت‌بام و میراگر مغناطیسی

علیرضا آران[1]، مهدی منصوری[2]، سحرانه قائمی*[3]، جواد کاتبی[4]

[1] دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
[2] دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز
[3] استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز
[4] دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت: 1403/5/8، بازنگری: 1403/12/11، پذیرش: 1403/12/13، نشر آنلاین: 1403/12/13

چکیده

سیستم‌های کنترل ترکیبی به‌منظور بهره‌مندی از مزایای سیستم‌های کنترل غیرفعال و نیمه‌فعال به‌کار می‌روند. در این پژوهش یک سیستم کنترل ترکیبی نوین معرفی می‌شود که تلفیقی از میراگر جرمی مایع تنظیم‌شونده و میراگر مغناطیسی است. مخازن عمیق با استفاده از روش هازنر (Housner) به‌عنوان میراگر جرمی مایع تنظیم‌شونده در نظر گرفته می‌شوند. این مخازن که در دسته سیستم‌های کنترل غیرفعال قرار می‌گیرند، در پشت‌بام سازه نصب شده و پارامترهای آن به کمک الگوریتم جستجوی الگو بهینه‌سازی می‌شوند. میراگر مغناطیسی به‌عنوان سیستم نیمه‌فعال در طبقه آخر سازه نصب شده و ولتاژ ورودی آن با استفاده از کنترل‌کننده فازی محاسبه می‌شود. درنتیجه نیروی کنترلی لازم برای کاهش پاسخ سازه مجهز به سیستم کنترل ترکیبی به‌دست می‌آید. نتایج تحلیل 20 نوع سیستم کنترل ترکیبی با ابعاد مختلف مخزن برای دو ارتعاش زلزله حوزه دور و دو ارتعاش زلزله حوزه نزدیک نشان می‌دهند که با به‌کارگیری سیستم کنترل ترکیبی معرفی‌شده، میانگین پاسخ جابه‌جایی و شتاب سازه می‌توانند به‌ترتیب تا 40 درصد و 30 درصد کاهش یابند. همچنین با بررسی تأثیر ارتفاع مایع و حجم مخزن مشخص می‌شود که افزایش ارتفاع مایع و حجم مخزن می‌تواند بر کاهش پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب سازه تأثیر مثبت بگذارد.

کلیدواژه‌ها: کنترل ترکیبی، میراگر مغناطیسی، میراگر جرمی مایع تنظیم‌شونده، مخزن، بهینه‌سازی، مدل هازنر.

1- مقدمه

سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال[1]، تکامل‌یافته سیستم‌های کنترل غیرفعال[2] هستند که تطبیق‌پذیری بالای این سیستم‌ها، عملکرد سیستم کنترلی را بهبود می‌بخشد. در این سیستم‌ها اطلاعات تحریک یا پاسخ‌های سازه جمع‌آوری شده و رفتار میراگر کنترل‌پذیر و هوشمند براساس داده‌های به‌دست آمده تنظیم می‌شود. سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال شامل سنسورها، کنترل‌کننده، محرک‌ها و دستگاه‌های تنظیم میرایی هستند که در فرایند بهبود عملکرد سیستم به‌کار گرفته می‌شوند. در سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال برخلاف سیستم‌های کنترل فعال[3]، محرک‌ها وظیفه اعمال نیروی مستقیم به سازه را ندارند، بلکه وظیفه آن‌ها کنترل رفتار دستگاه‌های غیرفعال مانند میراگرها می‌باشد. بالا بودن قابلیت اعتماد سازه در مقابل عدم‌قطعیت‌ها و ناپایداری، هزینه پایین اجرا و انرژی پایین فرایند کنترل، مزیت این سیستم‌های کنترل در مقایسه با سیستم‌های کنترل فعال است (Cheng و همکاران، 2008).

یکی از روش‌های کنترل نیمه‌فعال، استفاده از میراگرهای مغناطیسی (MR)[4] است. در این میراگرها از سیال مغناطیسی

1. Semi-active control systems
2. Passive control systems
3. Active control systems
4. Magnetorheological dampers

ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز شاپا الکترونیکی: 2717-4077
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2025.62705.2374

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 041-33393740
*Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0002-4731-6577
آدرس ایمیل: a.aran@tabrizu.ac.ir (ع. آران)، mahdimansoury@tabrizu.ac.ir (م. منصوری)، ghaemi@tabrizu.ac.ir (س. قائمی)، katebi@tabrizu.ac.ir (ج. کاتبی).

جهت تنظیم نیروی میراگر استفاده می‌شود. قابلیت اعتماد بالا و پایداری این میراگرها، آن‌ها را مورد توجه قرار داده است. زمانی‌که ولتاژ ورودی سیستم تغییر می‌کند، مشخصات مکانیکی سیال مورد استفاده در میراگر به سرعت عوض می‌شوند (Ghaffarzadeh و همکاران، 2024؛ Abdul Aziz و همکاران، 2022).

امروزه الگوریتم‌های مختلفی برای استفاده در میراگرهای MR پیشنهاد شده است. استفاده از روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی مرسوم مانند کنترل‌کننده خطی درجه دوم گوسی (LQG)[1] و تنظیم‌کننده درجه دوم خطی (LQR)[2] برای میراگرهای مغناطیسی علاوه‌بر دارا بودن پیچیدگی محاسباتی، به‌دلیل دینامیک غیرخطی مدل میراگر و وجود عدم‌قطعیت مشکل است. رویکرد پیشنهادی برای غلبه بر این مشکلات، استفاده از کنترل‌کننده فازی با ساختار ساده و قدرتمند برای قوانین کنترل غیرخطی است (Schurter و Roschke، 2000؛ Zand و همکاران، 2023). الگوریتم‌های منطق فازی در مقایسه با روش‌های متعارف بسیار راحت‌تر، قابل اصلاح و اشکال‌زدایی هستند (Behinfaraz و Ghaemi، 2022).

طراحی کنترل‌کننده فازی[3] برای میراگرهای مغناطیسی نیاز به درک کامل رفتار دینامیکی سیستم دارد. همچنین برای کاهش مؤثر پاسخ‌های یک سازه ساختمانی، نیاز به استفاده از تعداد زیادی میراگر MR است که بر پیچیدگی سیستم می‌افزاید (Yan و Zhou، 2006). عملکرد سازه‌های مجهز به میراگرهای MR در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. Xu و همکاران (2003) الگوریتم شبکه عصبی را برای کنترل نیمه‌فعال سازه‌ها با استفاده از میراگرهای MR به‌کار گرفتند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با استفاده از میراگرهای MR، پاسخ سازه به‌میزان قابل‌توجه کاهش می‌یابد. Sodeyama و همکاران (2003) دو میراگر مغناطیسی با ظرفیت 20 و 200 کیلونیوتن را به‌صورت تجربی و تحلیلی آزمایش کرده و خصوصیات مکانیکی آن‌ها را استخراج کردند. Renzi و Serino (2004) یک سازه چهار طبقه مجهز به میراگرهای مغناطیسی را آزمایش کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که استفاده از میراگرهای مغناطیسی می‌تواند 30 تا 35 درصد پاسخ جابه‌جایی سازه را نسبت به سازه مجهز به سیستم غیرفعال کاهش دهد.

Xu و همکاران (2005) یک سازه 12 طبقه را با میراگرهای MR مدل‌سازی کردند و تحت ارتعاش زلزله به این نتیجه رسیدند که استفاده از سیستم کنترل نیمه‌فعال در مقایسه با سیستم غیرفعال و کنترل‌نشده، جذر میانگین مربعات (RMS)[4] جابه‌جایی و شتاب را به‌ترتیب 60 تا 70 درصد و 25 تا 35 درصد کاهش می‌دهد.

Zahrai و Salehi (2014) به بررسی کاربرد میراگرهای MR برای بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها پرداختند و عملکرد قابل قبول میراگرهای MR را در سازه‌های مختلف تأیید کردند. عملکرد مناسب میراگرهای MR تحت بار انفجار نیز مورد بررسی قرار گرفته است (Ghaffari و Ghaffarzadeh، 2023).

Bagherkhani و Baghlani (2020) قابلیت اعتماد سازه هوشمند مجهز به میراگرهای MR را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که قابلیت اطمینان سازه مجهز به میراگرهای MR وابستگی زیادی به نامعینی[5] جرم سازه دارد و بیشترین احتمال خرابی زمانی است که تمامی نامعینی‌های ممکن در سازه در نظر گرفته شوند. به منظور بهبود عملکرد سازه‌های مجهز به میراگرهای مغناطیسی، بهینه‌سازی پارامترها و موقعیت جای‌گیری میراگرها مورد توجه بوده است.

Suthar و همکاران (2022) جای‌گیری بهینه میراگرهای مغناطیسی برای سازه‌های بلند تحت اثر ارتعاش باد را بررسی کردند. پارامترهای بهینه میراگرهای مغناطیسی با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه برای سازه مجهز به جداساز لرزه‌ای به دست آمد (Abdeddaim و همکاران، 2022) و عملکرد مناسب سیستم کنترل نیمه‌فعال با میراگرهای مغناطیسی مبتنی بر الگوریتم LQG برای سازه‌های دارای طبقه نرم نشان داده شد (Bhowmik و Debnath، 2024).

منطق فازی برای مدل‌سازی مشخصات میراگرهای MR و دینامیک غیرخطی آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Kim و Kang، 2012). در پژوهش‌های مختلف، از مدل‌های غیرپارامتری مانند روش فازی- عصبی برای مدل‌سازی میراگرهای MR استفاده شده است (Wang، 2009؛ Ghasemi و Barghi، 2012). منطق فازی علاوه‌بر مدل‌سازی مشخصات میراگرهای مغناطیسی، در طراحی کنترل‌کننده برای سیستم‌های نیمه‌فعال مجهز به میراگرهای MR نیز استفاده شده است. Lin و همکاران (2020) با ارائه الگوریتم جستجوی کلاغ[6] اصلاح شده مبتنی بر منطق فازی، عملکرد سازه مجهز به میراگرهای مغناطیسی در کاهش ارتعاشات سازه‌ها تحت اثر اندرکنش خاک و سازه را بهبود بخشیدند. به منظور بهبود الگوریتم منطق فازی، ترکیب آن با الگوریتم ژنتیک چندهدفه با هدف کاهش پاسخ‌ها و افزایش مقاومت[7] در برابر عدم‌قطعیت‌ها برای سازه‌های مجهزبه میراگرهای MR ارائه شد (Bedoya و همکاران، 2025؛ Pei و همکاران، 2022).

1. Linear Quadratic Gaussian
2. Linear-quadratic regulator
3. Fuzzy
4. Root mean square
5. Uncertainty
6. Crow search algorithm
7. Robustness

باتوجه به این‌که ظرفیت میراگرهای مغناطیسی محدود است، به‌جای استفاده از تعداد زیاد میراگر، سیستم کنترل ترکیبی میراگر جرمی تنظیم‌شونده (TMD)[1] و میراگر MR پیشنهاد شد تا نواقص سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال و غیرفعال پوشش داده شوند. Bathaei و همکاران (2018) کنترل‌کننده فازی را برای سیستم ترکیبی TMD و MR پیاده‌سازی کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که استفاده از کنترل ترکیبی در مقایسه با کنترل غیرفعال عملکرد بهتری دارد و پاسخ‌های سازه را به‌طور مناسبی کاهش می‌دهد. همچنین عملکرد این سیستم برای سازه با رفتار غیرخطی و ترکیب کنترل‌کننده فازی- پیش‌بین با در نظر گرفتن عدم قطعیت تأخیر زمانی مورد بررسی قرار گرفت (Bathaei و Zahrai، 2024).

Lavassani و همکاران (2022) سیستم کنترل ترکیبی با اتصال میراگر MR به TMD را برای سازه 15 طبقه تحت ارتعاش زلزله ارزیابی کردند. سیستم مشابه با کنترل‌کننده فازی بهینه چندهدفه برای سازه 76 طبقه تحت ارتعاش باد نیز مورد بررسی قرار گرفت (Kim و Kang، 2012).

میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده وزن زیادی را به سازه اضافه می‌کنند و جابه‌جایی آن‌ها برای استهلاک نیرو نیاز به فضای زیادی دارد. میراگرهای مایع تنظیم‌شونده (TLD)[2] با هدف پوشش این نقیصه، می‌توانند جایگزین خوبی برای میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده باشند. میراگرهای TLD می‌توانند به‌صورت مخازن[3] پشت‌بام برای مقاصد غیرکنترلی مانند ذخیره آب و تفریح استفاده شوند. میراگرهای مایع تنظیم‌شونده باتوجه به خاصیت ویسکوزیته سیال، اصطکاک مایع با دیواره‌های مخزن و حرکت مواج مایع در کنترل ارتعاش سازه مؤثر هستند. یکی از انواع میراگرهای مایع تنظیم‌شونده، میراگرهای ستونی مایع تنظیم‌شونده (TLCDs)[4] هستند. عملکرد مناسب این میراگرها با ترکیب میراگرهای MR در مقایسه با میراگرهای TLD نشان داده شده‌اند (Wang و همکاران، 2005). کنترل‌پذیری سازه مجهز به میراگرهای مغناطیسی و میراگرهای ستونی مایع تنظیم‌شونده به‌صورت تئوریک و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است (Cheng و همکاران، 2015).

نتایج تحقیقات نشان دادند که برای سطح یکسان راندمان کنترل سازه، سیستم MR-TLCD به نسبت جرمی مایع کمتری در مقایسه با سیستم TLCD نیاز دارد و جابه‌جایی مایع به‌طور مؤثر کاهش می‌یابد (Roychowdhury و Gur، 2022).

علاوه‌بر سازه‌های ساختمانی، عملکرد مناسب ترکیب میراگرهای MR و TLCD در سازه‌های فراساحلی[5] تحت اثر موج و زلزله نیز بررسی شده است (Mohammadyzadeh و همکاران، 2022).

به‌کارگیری میراگر جرمی تنظیم‌شونده در داخل مخزن (Xu و همکاران، 2018؛ Fu و همکاران، 2018) و اتصال سری آن با میراگر مایع تنظیم‌شونده (Love و Lee، 2019) تحلیل و آزمایش شده‌اند. نتایج نشان دادند که با ترکیب میراگرهای جرمی و مایع تنظیم‌شونده، عملکرد سیستم کنترلی بهبود می‌یابد. در میراگرهای TLD نسبت عمق به بعد مخزن بایستی کمتر از 0/3 باشد. برای تنظیم بهینه این میراگرها در سازه‌ها با دوره تناوب کوتاه، طول مخزن غیرعملی به‌دست می‌آید و عملکرد میراگر به‌دلیل کاهش جرم شرکت‌کننده در حرکت امواج مایع و شکست امواج مختل می‌شود (Pandey و همکاران، 2022).

مخازن به‌کار رفته در پشت‌بام ساختمان‌ها معمولاً به‌صورت میراگرهای TLD مدل‌سازی نمی‌شوند؛ زیرا به‌دلیل عمق زیاد مخازن، محدودیت نسبت عمق رعایت نمی‌شود. یک روش ساده مدل‌سازی مخازن پشت‌بام، استفاده از روش مدل هازنر[6] است (Housner، 1963). درصورت استفاده از این روش، میراگر به‌کار رفته با نام میراگر جرمی مایع تنظیم‌شونده (TLMD)[7] شناخته می‌شود.

Pandey و همکاران (2022) کارایی میراگر جرمی مایع تنظیم‌شونده را برای مخازن عمیق بررسی کرده و با میراگر جرمی تنظیم‌شونده مقایسه کردند. این میراگرها به‌طور هم‌زمان مزایای میراگرهای TMD و TLD را دارند و عیوب آن‌ها را پوشش می‌دهند.

میراگرهای مغناطیسی به‌عنوان ابزار کنترل نیمه‌فعال و مخازن پشت‌بام به‌عنوان المان مستهلک‌کننده انرژی زلزله بصورت غیرفعال، به‌تنهایی در کاهش پاسخ‌های سازه موفق عمل می‌کنند. با به‌کارگیری این دو سیستم کنترلی در یک سازه، عملکرد مجزای دو سیستم با یکدیگر تطبیق داده شده و موجب بهبود کارایی سیستم کنترلی می‌شود. پژوهش حاضر بر دو بخش اصلی تمرکز دارد:

1) معرفی و به‌کارگیری سیستم کنترل لرزه‌ای جدید شامل مخزن آب با پارامترهای بهینه و میراگر مغناطیسی

2) تعریف قوانین فازی متناسب با ساختار معرفی شده و طراحی کنترل‌کننده مبتنی بر منطق فازی برای بهره‌وری هرچه بیشتر از سیستم ترکیبی جدید معرفی شده.

1. Tuned mass damper
2. Tuned liquid dampers
3. Tank
4. Tuned liquid column dampers
5. Offshore Structures
6. Housner's model
7. Tuned liquid mass damper

در یک سازه 10 طبقه، یک میراگر MR در طبقه آخر سازه در نظر گرفته شده و به‌جای اضافه‌کردن میراگرهای مغناطیسی بیشتر به سازه، یک مخزن به‌عنوان میراگر جرمی مایع تنظیم‌شونده در پشت‌بام سازه لحاظ می‌شود. پارامترهای بهینه مخزن در سازه مجهز به سیستم غیرفعال محاسبه شده و در سیستم کنترل ترکیبی معرفی شده به‌کار گرفته می‌شوند. با در نظر گرفتن توابع عضویت سرعت و شتاب سازه به‌عنوان ورودی سیستم کنترل، کنترل‌کننده فازی برای میراگر MR طراحی شده و عملکرد سازه با سیستم کنترل ترکیبی ارزیابی می‌شود.

2- مدل‌سازی سیستم کنترل ترکیبی

2-1- مدل‌سازی سازه مجهز به سیستم کنترل ترکیبی

در این پژوهش سازه‌های مجهز به میراگر مغناطیسی در طبقه آخر و مخزن موجود در بام سازه مورد بررسی قرار می‌گیرند و عملکرد کنترل‌کننده فازی طراحی شده ارزیابی می‌شود. در مدل‌سازی مخزن به‌صورت میراگر جرمی مایع تنظیم‌شونده، فرض می‌شود مخزن و مایع داخل آن از سه جرم (جرم بدنه مخزن، جرم سخت[1] مایع و جرم مواج[2] مایع) تشکیل شده است. برای سازگاری مطلوب جرم سخت مایع با بدنه مخزن، استفاده از بالشتک‌های الاستومری برای عملکرد مناسب میراگر جرمی مایع تنظیم‌شونده برخلاف اتصال ثابت مخزن به سازه، یک راهکار مناسب است (Pandey و همکاران، 2019؛ Ghaffarzadeh و همکاران، 2024). در شکل (1)، ساختار سیستم سازه‌ای مجهز به سیستم کنترل ترکیبی نماش داده شده است. معادلات حرکت سازه مجهزبه سیستم کنترل ترکیبی TLMD+MR به‌صورت زیر است:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -\{r\}\ddot{x}_g + \{\Psi\}F \qquad (1)$$

که در آن ماتریس‌های $[M]$، $[K]$ و $[C]$ ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی سازه هستند و در ادامه تعریف می‌شوند. جابه‌جایی و مشتقات آن یعنی سرعت و شتاب مطابق بردار $\{x\} = \{x_s \quad | \quad x_b \quad x_c\}^{\mathrm{T}}$ در نظر گرفته می‌شوند که در آن، x_s بردار مربوط به سازه n طبقه است. $\{r\} = diag([M])$ بردار تأثیر زلزله می‌باشد که نحوه اعمال تحریک وارد بر سازه را معین می‌سازد و $\ddot{x}_g$ بیانگر شتاب زلزله است. F مقدار نیروی کنترلی و $\{\Psi\}$ بردار جایگیری میراگر مغناطیسی است.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{n-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n+m_b & m_b & m_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_b & m_b & m_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_c & m_c & m_c \end{bmatrix} \qquad (2)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & \ddots & -k_{n-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{n-1} & k_{n-1}+k_n & -k_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_n & k_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_c \end{bmatrix} \qquad (3)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1+c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2+c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & \ddots & -c_{n-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_{n-1} & c_{n-1}+c_n & -c_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_n & c_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_c \end{bmatrix} \qquad (4)$$

در ماتریس‌های فوق، m_j، c_j و k_j به‌ترتیب بیانگر جرم، میرایی و سختی طبقات سازه می‌باشند. c_b و k_b میرایی معادل ویسکوز و سختی بالشتک‌های الاستومری هستند. m_b برابر با مجموع جرم بدنه مخزن، جرم سخت (m_i) و جرم مواج (m_c) مایع در نظر گرفته می‌شود. درنتیجه، برای c_b و m_b می‌توان نوشت:

$$m_b = m_0 + m_i + m_c \qquad (5)$$

$$c_b = 2\xi_b m_b \sqrt{\frac{k_b}{m_b}} \qquad (6)$$

در این پژوهش، حل عددی معادله (1) با استفاده از روش نیومارک- بتا مدل شتاب ثابت انجام شده است.

2-2- مدل‌سازی ارتعاش مایع مخزن

در مخزن‌های به‌کار رفته در پشت‌بام ساختمان‌ها، معمولاً عمق مایع زیاد است. عملکرد مدل هازنر برای مدل‌سازی مخزن با عمق زیاد مناسب ارزیابی شده است و در این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل، جرم مایع داخل مخزن به دو قسمت جرم سخت و جرم مواج تقسیم می‌شود. رفتار غیرخطی امواج مایع که ناشی از حرکت، اتلاف انرژی و شکست امواج است، به‌صورت خطی معادل‌سازی می‌شوند. فرض رفتار خطی برای امواج مایع در مخازن عمیق که دامنه ارتعاش جرم مواج کاهش می‌یابد، معقول است (Pandey و همکاران، 2022). در مدل هازنر، جرم سخت و مواج مایع به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$m_i = \alpha_i m_l \qquad (7)$$

1. Impulsive mass

2. Convective mass

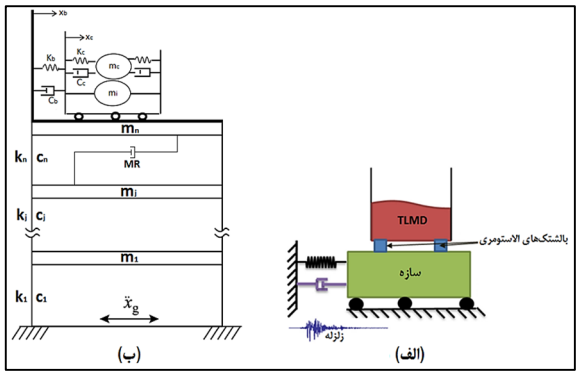
$$m_c = \alpha_c m_l \quad (8)$$

که در آن m_l جرم کل مایع، α_i نسبت جرم سخت به جرم کل مایع و α_c نسبت جرم مواج به جرم کل مایع می‌باشند. مقادیر α_i و α_c برای مخزن مستطیلی از روابط زیر به‌دست می‌آیند:

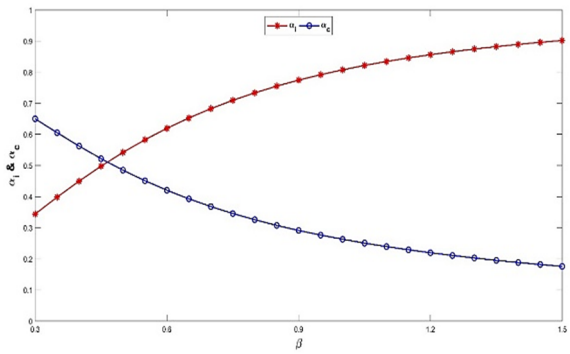
$$\alpha_i = \beta \frac{\tanh\left(\frac{0.866}{\beta}\right)}{0.866} \quad (9)$$

$$\alpha_c = 0.264 \frac{\tanh(3.16\beta)}{\beta} \quad (10)$$

در روابط فوق، β نسبت عمق مایع مخزن می‌باشد. با افزایش نسبت عمق مایع مخزن، نسبت جرم سخت مایع افزایش و نسبت جرم مواج مایع کاهش می‌یابد که در شکل (2) نمایش داده شده است.



شکل 1- سازه مجهز به سیستم کنترلی ترکیبی:
الف) شماتیک سیستم الحاقی TLMD به سازه،
ب) مدل برشی سازه n طبقه به‌همراه سیستم TLMD+MR



شکل 2- درصد نسبی جرم سخت و مواج مایع مخزن براساس تغییر نسبت عمق

در مدل هازنر، فرکانس، سختی و میرایی معادل ویسکوز قسمت مواج مایع به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند که در آن، L طول مخزن در جهت ارتعاش است.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{3.16g}{L}\tanh(3.16\beta)} \quad (11)$$

$$k_c = m_c\omega_c^2 \quad (12)$$

$$c_c = 2\xi_c m_c \omega_c \quad (13)$$

2-2-1- بهینه‌سازی پارامترهای مخزن

بالشتک‌های الاستومری زیر مخزن حاوی مایع با هدف سازگاری ارتعاش بدنه مخزن و جرم سخت مایع به‌کار می‌روند. با فرض چینش موازی بالشتک‌های الاستومری، فرکانس ارتعاش مخزن به‌صورت 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) به‌صورت زیر تعریف می‌شود که در آن ω_2 فرکانس اصلی سازه می‌باشد:

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

برای کنترل بهینه سیستم سازه‌ای مورد نظر، نسبت فرکانس و میرایی بهینه می‌شوند تا پاسخ سازه کمینه شود. در فرایند بهینه‌سازی در تولباکس Matlab، پاسخ شتاب سازه به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مسئله بهینه‌سازی مربوطه به‌صورت زیر می‌باشد:

به‌دست آوردن $\{\xi_b$ و $\gamma_b\}$ برای کمینه‌سازی $\ddot{\bar{X}}_s$

که در آن $\ddot{\bar{X}}_s$ نسبت جذر میانگین مربعات (RMS)[1] پاسخ شتاب طبقات سازه کنترل‌شده به سازه کنترل‌نشده می‌باشد. به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای مخزن، از الگوریتم جستجوی الگو[2] که یک بهینه‌ساز سراسری[3] مقاوم است، استفاده می‌شود.

2-3- مدل‌سازی میراگر مغناطیسی

میراگر مغناطیسی به‌کمک مایع کنترل‌پذیر داخل آن، در کسری از ثانیه و تحت جریان مغناطیسی باعث تنظیم میرایی

1. Root mean square
2. Pattern-search algorithm
3. Global

می‌شود. مدل بوک- ون[1] ابتدایی‌ترین و پرکاربردترین روش مدل‌سازی رفتار هیسترزیس میراگرهای مغناطیسی است. نیروی غیرخطی برای یک مدل ایده‌آل میراگر مغناطیسی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$F = C_0\dot{x} + \alpha z \quad (16)$$

در رابطه فوق، F، $\dot{x}$ و C_0 به‌ترتیب نیرو، سرعت و میرایی است. پارامتر α مرتبط با تنش تسلیم مایع مغناطیسی بوده و پارامتر z برای توصیف تغییرشکل هیسترتیک میراگر مغناطیسی به‌کار رفته و از رابطه زیر به‌دست می‌آید. در این پژوهش، از روش رانگ- کوتای مرتبه چهار[2] برای محاسبه پارامتر z استفاده می‌شود.

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \delta\dot{x}|z|^n + A_0\dot{x} \quad (17)$$

در رابطه فوق، γ و δ پارامترهای شکی و A_0 بیانگر شیب سیکل هیسترزیس است و نحوه انتقال رفتار خطی به غیرخطی با این پارامتر توصیف می‌شود. پارامترهای C_0 و α به ولتاژ اعمالی (u) و پارامترهای ثابت حاصل از نتایج آزمایشگاهی بستگی داشته و مطابق روابط (18) و (19) به‌دست می‌آیند.

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (18)$$

$$C_0 = C_{0a} + C_{0b}u \quad (19)$$

پارامتر u بیانگر ولتاژ واقعی در روابط فوق است، امّا میراگرهای مغناطیسی قادر به اعمال تغییرات آنی ولتاژ نمی‌باشند و مدت زمانی طول می‌کشد تا ولتاژ واقعی میراگر تنظیم شود. برای جبران زمان ناشی از ولتاژ ورودی، ولتاژ مؤثر (v) با استفاده از فیلتر مرتبه اول در نظر گرفته می‌شود.

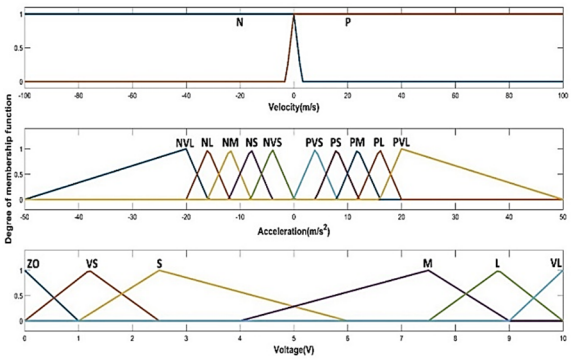
$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (20)$$

در رابطه فوق، η پارامتر ثابت مطابق نتایج آزمایشگاهی برای میراگر مغناطیسی است.

4-2- طراحی کنترل‌کننده فازی

امروزه تعداد زیادی الگوریتم کنترل نیمه‌فعال مانند الگوریتم کنترل اسکای‌هوک، الگوریتم لیاپانوف و ... برای سیستم مجهز به میراگر مغناطیسی پیشنهاد شده‌اند. در ابتدایی‌ترین مدل این الگوریتم‌ها، بین حداکثر و حداقل مقدار ولتاژ ورودی تصمیم گرفته شده و سطوح ولتاژ بین دو مقدار حدی در نظر گرفته نمی‌شود. همچنین تغییر شدید ولتاژ ورودی می‌تواند باعث افزایش ناگهانی پاسخ سازه شده که منجر به آسیب موضعی در بخش‌هایی از سازه می‌شود. بنابراین یک الگوریتم کنترل مناسب برای تغییر تدریجی ولتاژ ورودی مورد نیاز است. کنترل منطق فازی روشی مؤثر با چارچوب ساده و قدرتمند در تصمیم‌گیری است که برای کنترل سازه در حضور عدم‌قطعیت‌ها نتایج مناسبی را ارائه می‌دهد. در این پژوهش از الگوریتم کنترل منطق فازی برای تنظیم ولتاژ ورودی میراگر MR استفاده می‌شود.

در این پژوهش متغیرهای ورودی شتاب و سرعت طبقه آخر سازه و متغیر خروجی ولتاژ میراگر مغناطیسی برای تنظیم میرایی مورد نیاز در نظر گرفته می‌شود. توابع عضویت مثلثی متغیرهای ورودی و خروجی در شکل (3) نمایش داده شده‌اند. کنترل‌کننده طراحی شده طوری عمل می‌کند که اگر حاصل‌ضرب شتاب و سرعت طبقه آخر مثبت باشد، به این معنی است که سازه حرکت تندشونده دارد و نیروی کنترلی براساس قوانین تعیین شده و به سازه اعمال می‌شود. امّا اگر حاصل‌ضرب شتاب و سرعت طبقه آخر منفی باشد، سازه حرکت کندشونده دارد و حداقل نیروی کنترلی مورد نیاز است.



شکل 3- توابع عضویت مثلثی سرعت و شتاب به‌عنوان ورودی و ولتاژ به‌عنوان خروجی یک سیستم فازی

متغیرهای زبانی مورد استفاده برای مقادیر خروجی و ورودی فازی به‌ترتیب در جداول (1) و (2) ارائه شده‌اند. قوانین فازی مورد استفاده در سیستم کنترل نیز در جدول (3) نشان داده شده‌اند.

جدول 1- متغیرهای زبانی برای ولتاژ به‌عنوان خروجی

متغیر زبانی	توصیف
VL	خیلی بزرگ
L	بزرگ
M	متوسط
S	کوچک
VS	خیلی کوچک
ZO	صفر[3]

1. Bouc-Wen
2. Forth order Runge-Kutta method
3. Zero

جدول 2- متغیرهای زبانی برای شتاب به‌عنوان ورودی

متغیر زبانی	توصیف
NVL	منفی[1] خیلی[2] بزرگ[3]
NL	منفی بزرگ
NM	منفی متوسط[4]
NS	منفی کوچک[5]
NVS	منفی خیلی کوچک
PVS	مثبت[6] خیلی کوچک
PS	مثبت کوچک
PM	مثبت متوسط
PL	مثبت بزرگ
PVL	مثبت خیلی بزرگ

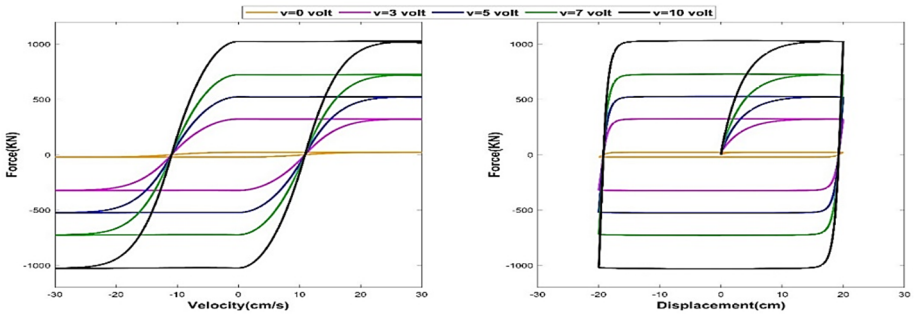
برای سرعت به‌عنوان یک متغیر ورودی، P و N مخفف مقادیر مثبت و منفی هستند. بر اساس موارد تعریف شده در جدول نیز، می‌توان یکی از قوانین را به‌طور نمونه به‌صورت زیر مطرح نمود.

If (Velocity is P) and (Acceleration is PVL) then (Voltage is VL).

در این پژوهش، از میراگر مغناطیسی با ظرفیت 1000 کیلونیوتن استفاده شده است. ولتاژ ورودی میراگرهای مغناطیسی می‌توانند بین صفر تا 10 ولت متغیر باشند که با استفاده از کنترل‌کننده فازی تعیین می‌شوند. حسگرهای لازم برای برداشت اطلاعات در طبقه آخر که میراگر MR نصب شده است، تعبیه شده‌اند. خواص مکانیکی میراگر MR در جدول (4) ارائه شده است (Bathaei و Zahrai، 2024). همچنین در شکل (4) رفتار هیسترتیک میراگر مغناطیسی با ولتاژ اعمالی صفر، 3، 5، 7 و 10 ولت نشان داده شده است.

جدول 3- قوانین فازی

	شتاب										
	NVL	NL	NM	NS	NVS	ZO	PVS	PS	PM	PL	PVL
سرعت	P	ZO	ZO	ZO	ZO	VS	S	M	L	VL	VL
	N	ZO	VL	ZO	VS	S	M	L	ZO	ZO	ZO



شکل 4- رفتار میراگر مغناطیسی در سیکل‌های بارگذاری

جدول 4- پارامترهای میراگرهای مغناطیسی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
α_a	108720 N/cm	C_{0a}	4/4 N.s/cm	δ	3 cm^{-1}
α_b	496160 N/cm.V	C_{0b}	44 N.s/cm.V	η	50 s^{-1}
A_0	1/2	γ	3 cm^{-1}	n	1

جدول 5- مشخصات رکوردهای زلزله

زلزله	ایستگاه	سال	نوع	PGA (g)
دوزچه	Bolu	1999	حوزه دور	0/8057
معدن هکتور	Hector	1999	حوزه دور	0/3283
کوبه	KJMA	1995	حوزه نزدیک	0/8342
لوما پریتا	Saratoga-Aloha	1989	حوزه نزدیک	0/3262

1. Negative
2. Very
3. Large
4. Medium
5. Small
6. Positive

3- مثال عددی

در این بخش عملکرد یک سازه 10 طبقه مجهز به یک سیستم کنترل ترکیبی پیشنهادی متشکل از سیستم کنترل غیرفعال (مخزن) در پشت‌بام و یک سیستم کنترل نیمه‌فعال (میراگر مغناطیسی) در طبقه آخر سازه تحت ارتعاش دو زلزله حوزه دور[1] و دو زلزله حوزه نزدیک[2] سنجیده می‌شود. پارامترهای جرم و سختی برای تمامی طبقات سازه مورد نظر به‌ترتیب 345/6ton و 340400kN/m می‌باشد و میرایی سازه به‌صورت رایلی با فرض نسبت میرایی 5% برای مودهای اول و دوم ارتعاش در نظر گرفته می‌شود (Rashidi و همکاران، 2019). در جدول (5) مشخصات زلزله‌های لوما پریتا[3]، کوبه[4]، معدن هکتور[5] و دوزچه[6] نمایش داده شده است.

پارامترهای مخزن‌ها که با استفاده از الگوریتم جستجوی الگو بهینه‌سازی شده، یعنی نسبت فرکانسی (γ_b) و میرایی بالشتک‌های الاستومری (ξ_b)، با فرض ثابت بودن ارتفاع مایع و تغییر نسبت عمق مایع در جداول (6) تا (9) مرتب شده‌اند. مایع داخل مخزن آب و جرم بدنه مخزن 1 تُن فرض شده است. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که نسبت فرکانسی بهینه در حدود 1 به‌دست می‌آید. پارامترهای بهینه به‌دست آمده برای سیستم کنترل غیرفعال[7] هستند و در ادامه نتایج سیستم کنترل ترکیبی[8] نیز با فرض این مقادیر برای پارامترها ارائه می‌شوند.

با فرض پارامترهای بهینه مخزن برای سیستم کنترل غیرفعال و ترکیبی، شاخص‌های عملکردی مرتبط با جابه‌جایی (J_1) و شتاب (J_2) سازه به‌دست آمده‌اند. این شاخص‌ها به‌صورت نسبت میانگین پاسخ‌های سازه کنترل‌شده به سازه کنترل‌نشده تعریف می‌شوند.

$$J_1=\frac{\sum_{i=1}^{n}(RMS_d)_c\,(i)}{\sum_{i=1}^{n}(RMS_d)_{uc}\,(i)} \quad (22)$$

$$J_2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(RMS_a)_c\,(i)}{\sum_{i=1}^{n}(RMS_a)_{uc}\,(i)} \quad (23)$$

در روابط فوق، نسبت پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب سازه n طبقه با شاخص‌های ارزیابی J_1 و J_2 معرفی می‌شوند که از تقسیم RMS[9] پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب سازه در حالت کنترل‌شده به حالت کنترل‌نشده به‌دست می‌آیند. اندیس c، uc، d و a به‌ترتیب به سازه کنترل‌شده، سازه کنترل‌نشده، جابه‌جایی و شتاب سازه اشاره دارد.

نتایج نشان می‌دهند که عموماً با افزایش ارتفاع مایع و کاهش نسبت عمق، سیستم کنترل غیرفعال و ترکیبی عملکرد بهتری دارند. مطابق نتایج به‌دست آمده، مشاهده می‌شود که در اکثر سازه‌های بررسی شده، عملکرد سیستم کنترل ترکیبی بهتر از سیستم کنترل غیرفعال است و طراحی این سیستم موفقیت‌آمیز بوده است. سازه مجهز به سیستم کنترل ترکیبی پیشنهادی توانسته است در ارتعاشات زلزله‌های مختلف، 20 تا 45% میانگین پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب سازه را کاهش دهد. برای مثال در سازه مجهز به سیستم کنترل ترکیبی که در آن مخزن با ارتفاع مایع 200 سانتی‌متر به‌کار رفته است، تحت ارتعاش زلزله معدن هکتور میانگین پاسخ جابه‌جایی 45% و میانگین پاسخ شتاب 30% کاهش پیدا کرده است. درحالی‌که در شرایط مشابه، به‌کارگیری سازه مجهز به سیستم کنترل غیرفعال توانسته است میانگین پاسخ جابه‌جایی را 40% و میانگین پاسخ شتاب را 17% کاهش دهد.

جدول 6- پارامترهای بهینه برای مخزن با ارتفاع 50 سانتی‌متر

زلزله	مشخصه	β				
		0/3	0/5	0/75	1/0	1/5
دوزچه	γ	0/9554	1/1572	1/0677	1/0274	1/0096
	ξ (%)	0/48	0/63	1/27	1/15	1/05
معدن هکتور	γ	0/9409	1/1156	1/0841	1/0424	1/0246
	ξ (%)	0/31	0/42	0/92	0/88	0/86
کوبه	γ	0/9673	1/1737	1/0710	1/0313	1/0141
	ξ (%)	0/66	1/86	1/36	1/26	1/21
لوما پریتا	γ	0/8342	1/1289	1/0550	1/0170	1/0006
	ξ (%)	0/59	0/75	0/90	0/72	0/65

1. Far-field
2. Near-field
3. Loma Prieta
4. Kobe
5. Hector Mine
6. Duzce
7. Passive
8. Hybrid
9. Root-Mean-Square

جدول 7- پارامترهای بهینه برای مخزن با ارتفاع 100 سانتی‌متر

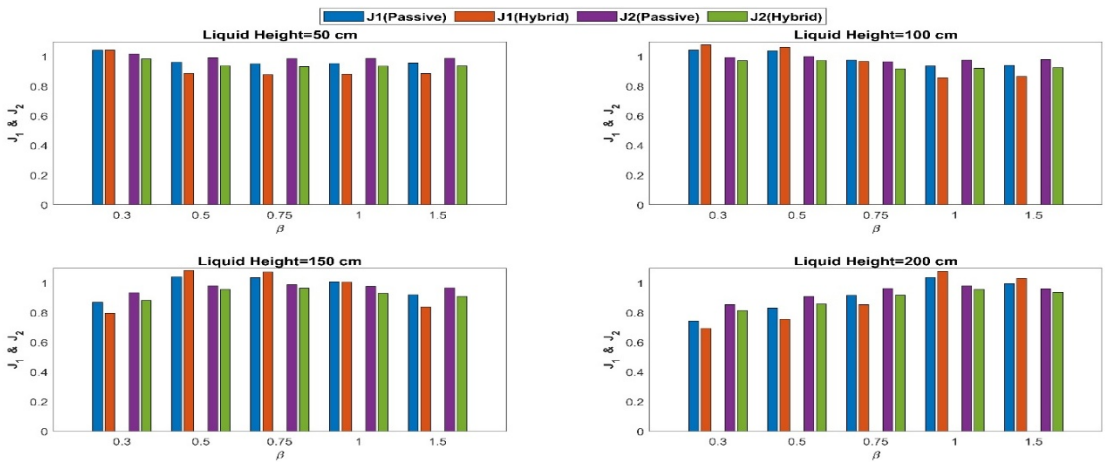
زلزله	مشخصه	β				
		0/3	0/5	0/75	1/0	1/5
دوزچه	γ	1/0708	1/1535	1/0696	1/1410	1/0603
	ξ (%)	0/58	0/60	0/68	2/08	1/5
معدن هکتور	γ	1/0335	1/1441	1/0602	1/1605	1/0738
	ξ (%)	0/66	0/55	0/53	0/52	0/49
کوبه	γ	1/0478	1/0701	1/0875	1/1424	1/0612
	ξ (%)	1/25	1/09	1/04	2/18	1/47
لوما پریتا	γ	1/0989	1/0184	1/0408	1/1113	1/0450
	ξ (%)	0/73	0/83	0/87	1/32	1/03

جدول 8- پارامترهای بهینه برای مخزن با ارتفاع 150 سانتی‌متر

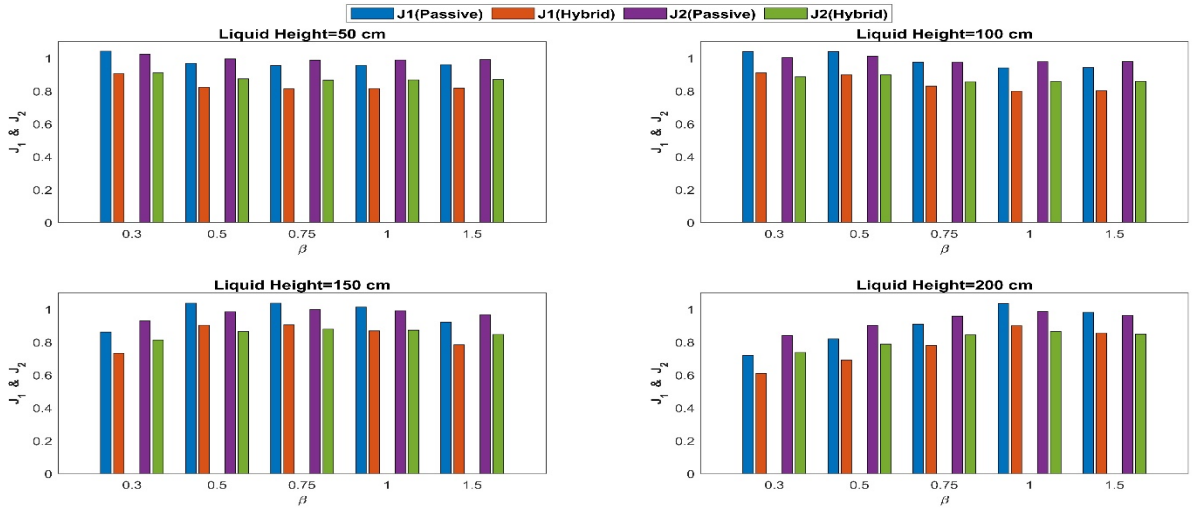
زلزله	مشخصه	β				
		0/3	0/5	0/75	1/0	1/5
دوزچه	γ	0/9671	0/8962	0/9316	1/1821	1/1980
	ξ (%)	0/68	0/69	0/76	0/82	2/46
معدن هکتور	γ	0/9974	0/8876	0/9753	1/1769	1/1178
	ξ (%)	0/43	0/58	1/25	0/87	0/58
کوبه	γ	0/9589	1/1316	1/1692	1/1964	1/1921
	ξ (%)	0/92	2/26	2/07	1/59	2/38
لوما پریتا	γ	0/9346	1/0037	1/0276	1/0459	1/1635
	ξ (%)	0/82	1/22	1/20	1/13	1/81

جدول 9- پارامترهای بهینه برای مخزن با ارتفاع 200 سانتی‌متر

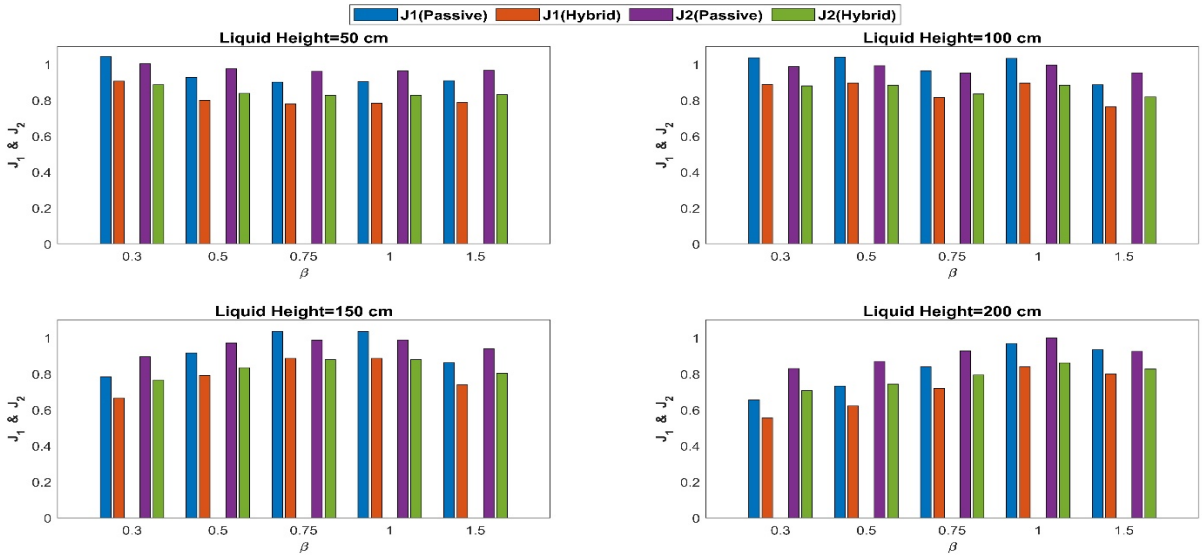
زلزله	مشخصه	β				
		0/3	0/5	0/75	1/0	1/5
دوزچه	γ	0/8147	0/8024	0/8700	0/9024	1/0059
	ξ (%)	4/47	1/88	0/96	0/61	0/13
معدن هکتور	γ	0/8482	0/8136	0/8725	0/8868	1/1894
	ξ (%)	0/90	0/57	0/55	0/51	0/43
کوبه	γ	0/8333	0/8967	0/8576	1/0582	1/1965
	ξ (%)	2/31	1/92	1/24	2/68	2/01
لوما پریتا	γ	0/8074	0/8704	0/8297	1/0306	1/0513
	ξ (%)	2/02	1/74	0/86	1/47	1/26



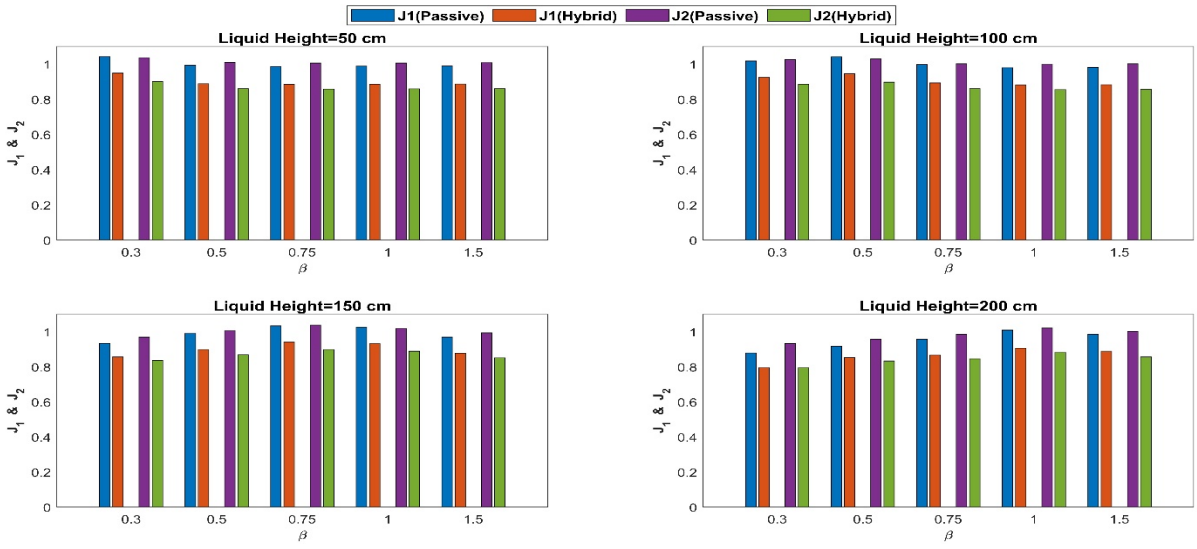
شکل 5- مقادیر شاخص‌های عملکردی J_1 و J_2 برای سازه تحت ارتعاش زلزله لوما پریتا



شکل 6- مقادیر شاخص‌های عملکردی J_1 و J_2 برای سازه تحت ارتعاش زلزله کوبه

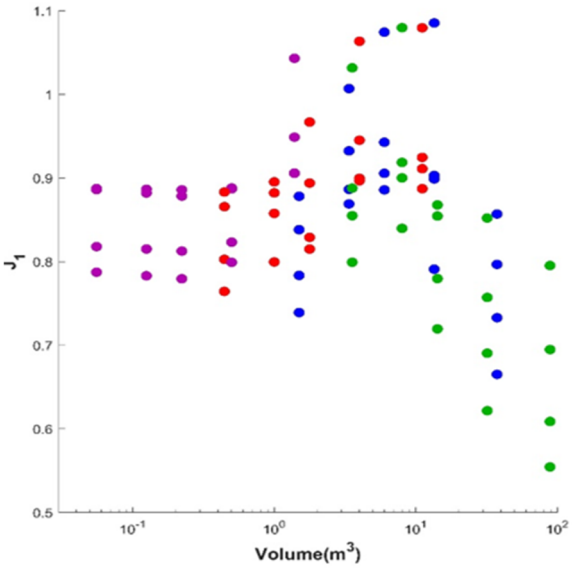


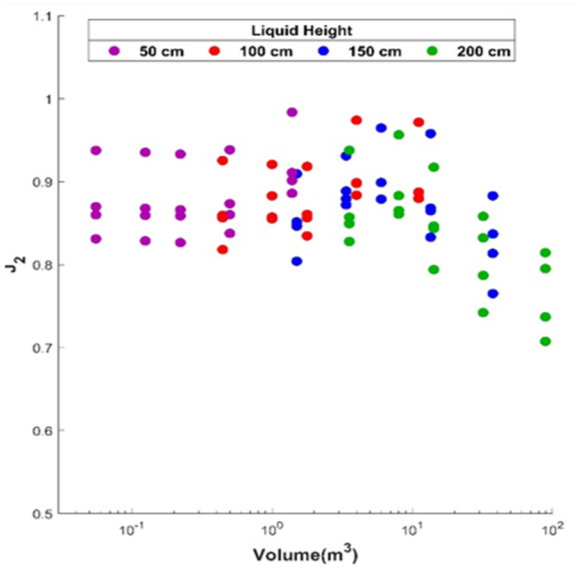
شکل 7- مقادیر شاخص‌های عملکردی J_1 و J_2 برای سازه تحت ارتعاش زلزله معدن هکتور



شکل 8- مقادیر شاخص‌های عملکردی J_1 و J_2 برای سازه تحت ارتعاش زلزله دوزچه

یکی از پارامترهای مؤثر در افزایش قدرت استهلاک انرژی و کاهش پاسخ‌های سازه توسط میراگر مایع تنظیم‌شونده، حجم آب به‌کار رفته در مخزن است. در شکل (9)، تأثیر حجم آب داخل 20 نوع مخزن تحت چهار ارتعاش زلزله بر شاخص‌های عملکردی نشان داده شده است. مطابق نتایج کسب شده مشاهده می‌شود که پاسخ‌های سازه با افزایش حجم مایع روند نزولی دارند؛ امّا لزوماً افزایش حجم مایع داخل مخزن بهترین نتیجه را به‌دست نمی‌دهد، بلکه می‌توان با به‌کار بردن مقدار مایع کمتر، نتایج بهتری را کسب کرد. همچنین نتیجه می‌شود که افزایش ارتفاع مایع با هدف افزایش حجم آن منطبق بر روش هازنر برای مخازن عمیق است.





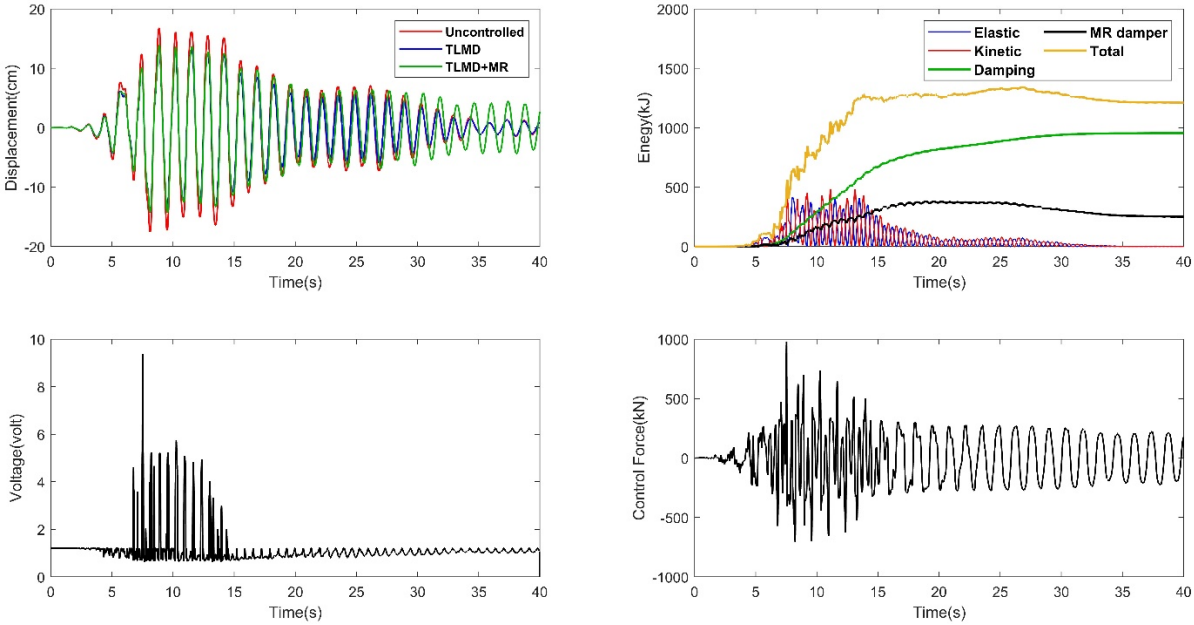
شکل 9- تأثیر حجم مایع مخزن بر مقادیر شاخص‌های عملکردی

بیشینه پاسخ‌های جابه‌جایی، سرعت، شتاب، دریفت طبقات و نیروی کنترلی میراگر مغناطیسی یک سازه مجهز به سیستم ترکیبی با ابعاد مخزن 2x2x2 متر به‌عنوان مثال موردی بررسی شد. در جدول (10) مقادیر پیشینه پاسخ‌های سازه کنترل‌شده و سازه کنترل‌نشده محاسبه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند سیستم کنترل ترکیبی طراحی شده می‌تواند تا 15 درصد بیشینه پاسخ سیستم کنترل غیرفعال را بهبود بخشد. برای سازه تحت ارتعاش زلزله دوزچه، معدن هکتور، کوبه و لوما پریتا بیشینه نیروی کنترلی به‌ترتیب 988، 968، 971 و 990 کیلونیوتن به‌دست آمد. این نتیجه نشان می‌دهد از ظرفیت 1000 کیلونیوتنی میراگر مغناطیسی به‌طور مناسب استفاده شده است.

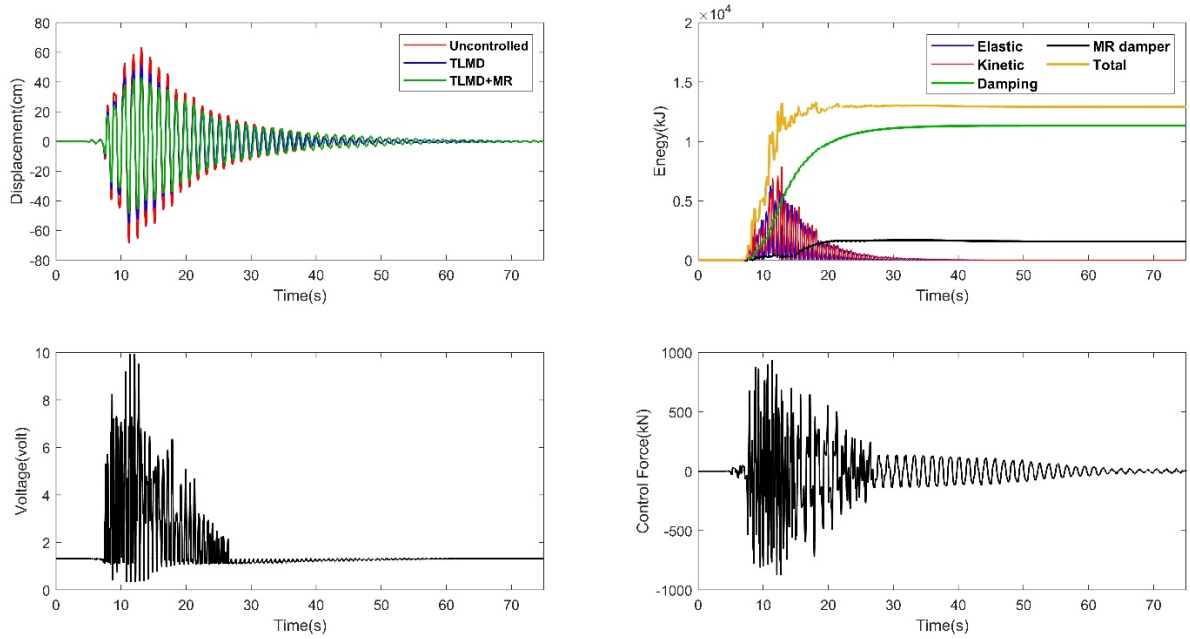
جدول 10- مقادیر بیشینه پاسخ‌های سازه کنترل‌شده و سازه کنترل‌نشده

زلزله	سازه	جابه‌جایی (cm)	سرعت (m/s)	شتاب(m/s^2)	دریفت (cm)
	کنترل نشده	36/00	2/01	15/80	5/15
دوزچه	کنترل غیرفعال	29/52	1/77	13/11	4/02
	کنترل ترکیبی	28/08	1/75	12/64	3/98
	کنترل نشده	33/16	1/73	10/26	5/33
معدن هکتور	کنترل غیرفعال	32/16	1/54	9/74	5/01
	کنترل ترکیبی	27/85	1/42	8/51	4/64
	کنترل نشده	68/33	3/98	25/35	12/17
کوبه	کنترل غیرفعال	56/03	3/38	20/28	10/10
	کنترل ترکیبی	49/88	3/14	18/25	9/12
	کنترل نشده	17/54	0/97	9/60	3/32
لوما پریتا	کنترل غیرفعال	14/38	0/85	7/96	2/82
	کنترل ترکیبی	13/68	0/84	7/68	2/78

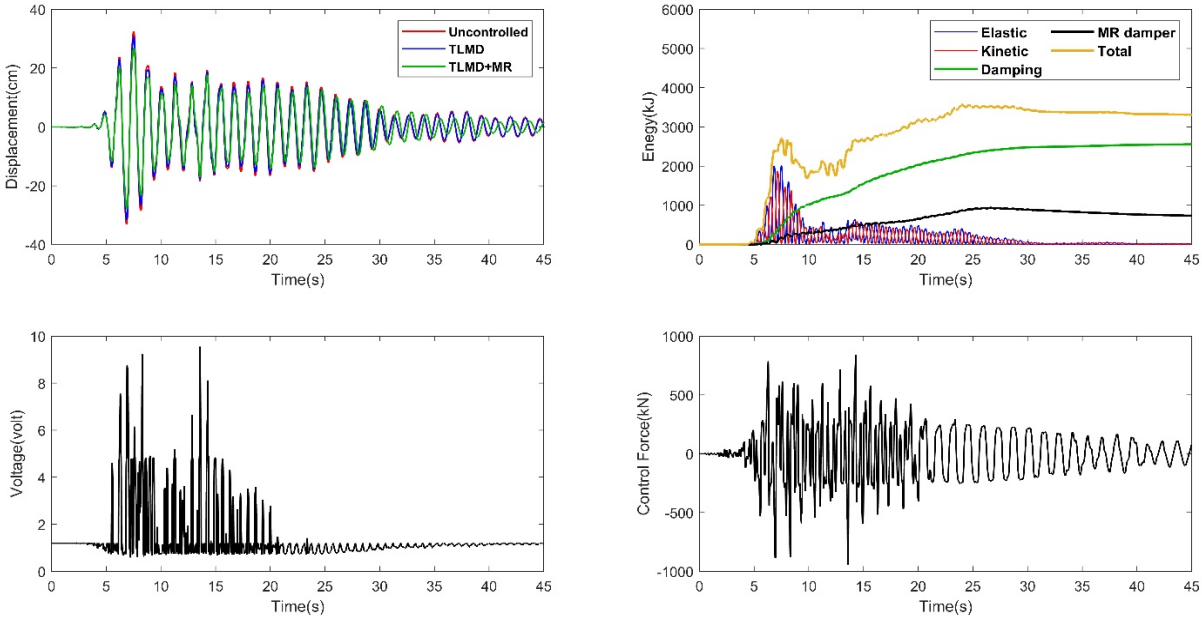
در شکل‌های (10-13) تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام سازه‌های کنترل نشده، کنترل شده با سیستم TLMD و کنترل شده با سیستم ترکیبی TLMD و MR نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که سیستم کنترل ترکیبی بیشینه پاسخ جابه‌جایی را کاهش داده است. همچنین میزان اتلاف انرژی زلزله توسط میراگر مغناطیسی در سیستم کنترل ترکیبی در مقایسه با انرژی کرنشی الاستیک، جنبشی و میرایی سازه مجهز به مخزن ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که میزان اتلاف انرژی میراگرهای مغناطیسی در محدوده بیشینه شتاب زمین سیر صعودی داشته و کنترل‌کننده طراحی شده عملکرد مناسبی دارد. میزان انرژی میراگر مغناطیسی تحت ارتعاش زلزله دوزچه، معدن هکتور و لوما پریتا تقریباً نصف انرژی میرایی سازه به‌دست آمده است. نتایج تاریخچه زمانی نیروی کنترلی و ولتاژ میراگر مغناطیسی نیز نشان می‌دهند که هدف تأمین حدوداً 1000 کیلونیوتن نیروی کنترلی با ولتاژ 10 وُلت برای سیستم کنترل ترکیبی تحت ارتعاش چهار رکورد زلزله، تأمین شده است.



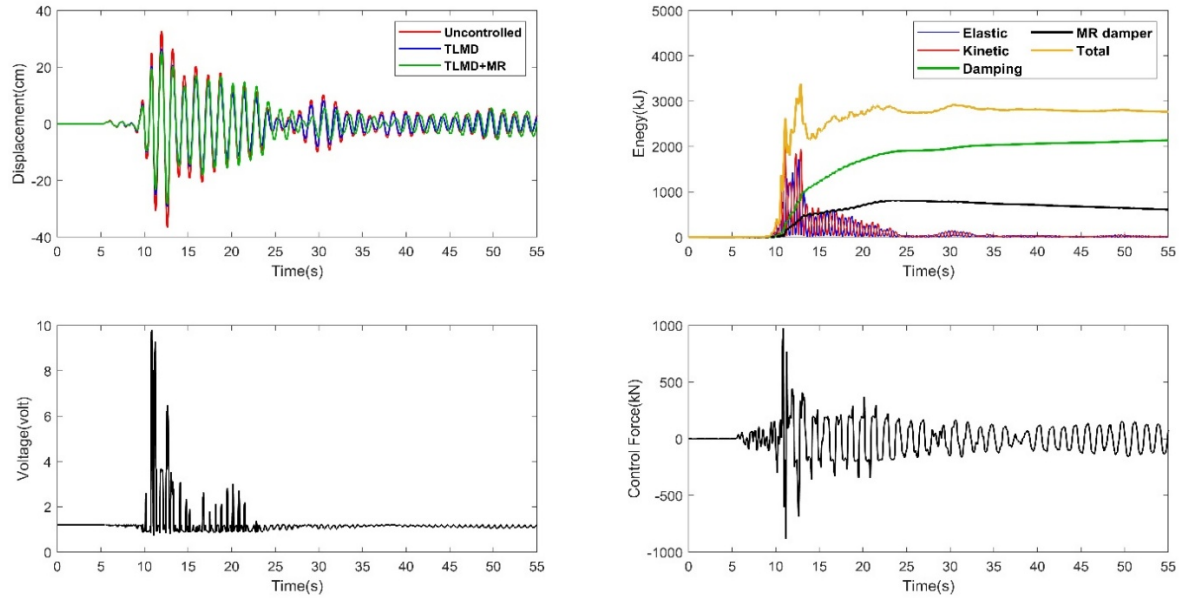
شکل 10- تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام سازه‌ها، انرژی، نیروی کنترلی و ولتاژ میراگر MR برای سازه تحت ارتعاش زلزله لوما پریتا



شکل 11- تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام سازه‌ها، انرژی، نیروی کنترلی و ولتاژ میراگر MR برای سازه تحت ارتعاش زلزله کوبه



شکل 12- تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام سازه‌ها، انرژی، نیروی کنترلی و ولتاژ میراگر MR برای سازه تحت ارتعاش زلزله معدن هکتور



شکل 13- تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام سازه‌ها، انرژی، نیروی کنترلی و ولتاژ میراگر MR برای سازه تحت ارتعاش زلزله دوزچه

4- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک ساختمان 10 طبقه مجهز به مخزن در پشت‌بام و میراگر مغناطیسی در طبقه آخر (سیستم کنترل ترکیبی) تحت ارتعاش دو زلزله حوزه دور و دو زلزله حوزه نزدیک در نظر گرفته شد. پارامترهای مخزن به‌کار رفته به‌عنوان یک سیستم کنترل غیرفعال با استفاده از الگوریتم جستجوی الگو بهینه‌سازی شد و نسبت فرکانس بهینه مخزن در حدود یک به‌دست آمد. مدل‌سازی مخزن با فرض نسبت عمق بیشتر از 0/3 و منطبق بر روش هازنر برای مخازن عمیق لحاظ شد. میراگر مغناطیسی به‌کار رفته به‌عنوان سیستم کنترل نیمه‌فعال با ظرفیت 1000 کیلونیوتن در نظر گرفته شده و ولتاژ ورودی آن با استفاده از کنترل‌کننده فازی محاسبه شد. طراحی سیستم فازی بر اساس حرکات شتاب‌دهنده یا کاهنده سازه انجام شد و نتایج بدست آمده نشان دادند که سیستم کنترل ترکیبی معرفی شده می‌تواند میانگین پاسخ جابه‌جایی و شتاب سازه را به‌ترتیب تا 45 و 30 درصد کاهش دهد. همچنین تحلیل 20 سیستم کنترل ترکیبی با ابعاد مختلف مخزن تحت 4 ارتعاش مختلف زلزله نشان داد که افزایش ارتفاع مایع و حجم مخزن نقش مؤثری در کاهش پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب سازه دارند.

5- مراجع

Abdeddaim M, Djerouni S, Ounis A, Athamnia B, Farsangi EN, "Optimal design of magnetorheological damper for seismic response reduction of base-isolated structures considering soil-structure interaction", InStructures 2022, 38 (1), 733-752. Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.039

Abdul Aziz M, Mohtasim SM, Ahammed R, "State-of-the-art recent developments of large magnetorheological (MR) dampers: a review", Korea-Australia Rheology Journal, 2022, 34 (2), 105-136. https://doi.org/10.1007/s13367-022-00021-2

Bagherkhani A, Baghlani A, "Structure-MR damper reliability analysis using weighted uniform simulation method", InStructures 2020, 26 (1), 284-297. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.013

Bathaei A, Zahrai SM, "Vibration control of an eleven-story structure with MR and TMD dampers using MAC predictive control, considering nonlinear behavior and time delay in the control system", InStructures 2024, 60 (1), 105853. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105853

Bathaei A, Zahrai SM, Ramezani M, "Semi-active seismic control of an 11-DOF building model with TMD+ MR damper using type-1 and-2 fuzzy algorithms. Journal of vibration and control", 2018, 24 (13), 2938-2953. https://doi.org/10.1177/1077546317696369

Behinfaraz R, Ghaemi S, "Identification and synchronization of switching fractional-order complex networks with time-varying delays based on a fuzzy method", International Journal of Fuzzy Systems, 2022, 24 (5), 2203-2214. https://doi.org/10.1007/s40815-022-01285-0

Bedoya-Zambrano D, Lara-Valencia L, Blandón-Valencia J, "Optimization of control forces in a three-dimensional frame with magnetorheological dampers using a hybrid algorithm", Journal of Building Engineering, 2025, 15, 100, 111697. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111697

Bhowmik K, Debnath N, "Semi-active Vibration Control of Soft-Storey Building with Magnetorheological Damper Under Seismic Excitation", Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2024, 12 (4), 6943-6961. https://doi.org/10.1007/s42417-024-01292-5

Cheng CW, Lee HH, Luo YT, "Experimental study of controllable MR-TLCD applied to the mitigation of structure vibration", Smart Structures and Systems. 2015, 15 (6), 1481-1501. https://doi.org/10.12989/sss.2015.15.6.1481

Cheng FY, Jiang H, Lou K, "Smart structures: innovative systems for seismic response control", CRC press; 2008, Feb 25. https://doi.org/10.1201/9781420008173

Fu L, Guo T, Li G, "Investigation on damping performance of new type oscillator-liquid combined damper", International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 135, 53-62. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.11.018

Ghaffarzadeh H, Aran A, Hosseinlou M, "Optimal parameters of rooftop pools as the structural control system", Journal of Structural and Construction Engineering, 2024 Oct 2. https://doi.org/10.22065/jsce.2024.460956.3432

Ghaffarzadeh H, Aran A, Javadi Amoodizaj F, "Phase motion predictive control for a structure equipped with MR dampers", Journal of Structural and Construction Engineering, 2024 Sep 17. https://doi.org/10.22065/jsce.2024.451732.3388

Ghaffari AH, Ghaffarzadeh H, "Mine blast-induced ground motion response reduction using semi-active devices", The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2023, 32 (8-9), e2005. https://doi.org/10.1002/tal.2005

Ghasemi MR, Barghi E, Estimation of inverse dynamic behavior of MR dampers using artificial and fuzzy-based neural networks. https://doi.org/103792120303

Housner GW, "The dynamic behavior of water tanks. Bulletin of the seismological society of America", 1963, 53 (2), 381-387. https://doi.org/10.1785/BSSA0530020381

Jung HJ, Spencer Jr BF, Ni YQ, Lee IW, "State-of-the-art of semiactive control systems using MR fluid dampers in civil engineering applications. Structural Engineering and Mechanics", 2004,17 (3-4), 493-526. https://doi.org/10.12989/sem.2004.17.3_4.493

Kim HS, Kang JW, "Semi-active fuzzy control of a wind-excited tall building using multi-objective genetic algorithm', Engineering Structures, 2012, 41, 242-257. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.038

Lavassani SH, Shangapour S, Homami P, Gharehbaghi V, Farsangi EN, Yang TY, "An innovative methodology for hybrid vibration control (MR+ TMD) of buildings under seismic excitations", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022,155, 107175. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107175

Lin X, Chen S, Lin W, "Modified crow search algorithm-based fuzzy control of adjacent buildings connected by magnetorheological dampers considering soil-structure interaction", Journal of Vibration and Control, 2021, 27 (1-2), 57-72. https://doi.org/10.1177/1077546320923438

Love JS, Lee CS, "Nonlinear series-type tuned mass damper-tuned sloshing damper for improved structural control", Journal of Vibration and Acoustics, 2019, 141 (2),021006. https://doi.org/10.1115/1.4041513

Mohammadyzadeh S, Mojtahedi A, Hokmabady H, Farajpour I, "Performance of a magnetorheological tuned liquid column damper (MR-TLCD) in mitigating vibration of an offshore structure", Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2022, 10 (8), 2999-3010. https://doi.org/10.1007/s42417-022-00532-w

Pandey DK, Mishra SK, Chakraborty S, "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, 2022, 31 (8), e1928. https://doi.org/10.1002/tal.1928

Pandey DK, Sharma MK, Mishra SK, "A compliant tuned liquid damper for controlling seismic vibration of

131 (6), 890-899. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:6(890)

Xu ZD, Shen YP, Guo YQ, "Semi-active control of structures incorporated with magnetorheological dampers using neural networks", Smart materials and structures, 2003, 12 (1), 80. https://doi.org/10.1088/0964-1726/12/1/309

Yan G, Zhou LL, "Integrated fuzzy logic and genetic algorithms for multi-objective control of structures using MR dampers", Journal of sound and vibration, 2006, 296 (1-2), 368-82. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.03.011

Zahrai SM, Salehi H, "Semi-active seismic control of mid-rise structures using magneto-rheological dampers and two proposed improving mechanisms. Iranian Journal of Science and Technology", Transactions of Civil Engineering, 2014, 38 (C1), 21. https://doi.org/10.22099/ijstc.2014.1841

Zand JP, Katebi J, Yaghmaei-Sabegh S, "A generalized ANFIS controller for vibration mitigation of uncertain building structure", Structural Engineering and Mechanics, 2023, 87 (3), 231-42. https://doi.org/10.12989/sem.2023.87.3.231

short period structures", Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 132, 405-428. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.07.002

Pei P, Peng Y, Qiu C, "An improved semi-active structural control combining optimized fuzzy controller with inverse modeling technique of MR damper", Structural and Multidisciplinary Optimization, 2022, 65 (9), 272. https://doi.org/10.1007/s00158-022-03365-z

Rashidi H, Khanlari K, Zarfam P, Ghafory-Ashtiany M, "A novel approach of active control of structures based on the critically damped condition", Journal of Vibration and Control, 2021, 27 (13-14), 1511-1523. https://doi.org/10.1177/1077546320944300

Renzi E, Serino G, "Testing and modeling a semi-actively controlled steel frame structure equipped with MR dampers", Structural Control and Health Monitoring, 2004, 11 (3), 189-221. https://doi.org/10.1002/stc.36

Roychowdhury D, Gur S, "MR tuned liquid colum damper (Mr-Tlcd) for seismic vibration control", InASPS Conference Proceedings 2022, 4 (1), 1139-1147. https://doi.org/10.38208/acp.v1.633

Schurter KC, Roschke PN, "Fuzzy modeling of a magnetorheological damper using ANFIS", In Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE 2000 (Cat. No. 00CH37063) 2000, 7 (1), 122-127. https://doi.org/10.1109/FUZZY.2000.838645

Sodeyama H, Sunakoda K, Fujitani H, Soda S, Iwata N, Hata K, "Dynamic tests and simulation of magnetorheological dampers", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2003, 18 (1), 45-57. https://doi.org/10.1111/1467-8667.t01-1-00298

Suthar SJ, Patil VB, Jangid RS, "Optimization of MR dampers for wind-excited benchmark tall building", Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2022, 27 (4), 04022048. https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000733

Wang H, "Modeling of magnetorheological damper using neuro-fuzzy system", In Fuzzy Information and Engineering, Springer Berlin Heidelberg, 2009, 2, 1157-1164. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03664-4_123

Wang JY, Ni YQ, Ko JM, Spencer Jr BF, "Magnetorheological tuned liquid column dampers (MR-TLCDs) for vibration mitigation of tall buildings: modeling and analysis of open-loop control", Computers & structures, 2005, 83 (25-26), 2023-34. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.03.011

Xu X, Guo T, Li G, Sun G, Shang B, Guan Z, "A combined system of tuned immersion mass and sloshing liquid for vibration suppression: Optimization and characterization", Journal of Fluids and Structures, 2018, 76, 396-410. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2017.10.011

Xu YL, Chen J, Ng CL, Qu WL, "Semiactive seismic response control of buildings with podium structure", Journal of Structural Engineering, 2005,