

مقایسه عملکرد انواع میراگر ستون مایع تنظیم شده غیر فعال برای کنترل لرزه‌ای سازه‌ها

محمدحسین محصل^۱، احمدرضا مصطفی قره‌باغی^{۲*}، محمدرضا چناقلو^۲

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی تبریز، تبریز

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی تبریز، تبریز

*آذربایجان شرقی، صندوق پستی: ۵۱۳۳۵۱۹۹۶، m_mohasel@sut.ac.ir

چکیده

بسیاری از سازه‌های لاغر و انعطاف‌پذیر نوین به‌طور وسیعی در برابر ارتعاشات دینامیکی حساس هستند که ممکن است منجر به خرابی این نوع سازه‌ها گردد. اخیراً میراگرهای ستون مایع تنظیم شده (Tuned Liquid Column Dampers) مورد توجه بسیاری از محققین واقع شده است. در یک TLCD، حرکت سیال داخل لوله U شکل با ایجاد نیروی بازگرداننده بر روی سازه، باعث کاهش پاسخ سازه شد. از مهم‌ترین مزیت‌های این نوع میراگرها، هزینه ساخت و نگهداری پایین آن است. انواع مختلفی از میراگرهای TLCD برای کنترل ارتعاشات وجود دارد. در این مطالعه، کارایی پنج نوع مختلف میراگر غیرفعال TLCD با هم مقایسه شد. این میراگرها شامل: TLCD به شکل U، TLCD به شکل V، TLCD با مقطع غیر یکنواخت (LCVA)، TLCD توپک‌دار (TLCBD) و TLCD گازی یا دارای فنر (TLCGD) می‌باشند. برای این منظور، پاسخ یک سیستم یک درجه آزادی (SDOF) با وجود میراگرها و بدون آن تحت تحریک زلزله‌های کوبه، ال‌سترو و تفت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای بررسی کمی و دقیق کارایی هر کدام از این میراگرها و مقایسه عملکرد آن‌ها با یکدیگر، از دو شاخص ضریب کارایی و RE استفاده شد. در این مقاله معادلات حرکت سیستم سازه و میراگر با استفاده از روش عددی در نرم‌افزار متلب تحلیل می‌شود. در این تحقیق برای اولین بار عملکرد این پنج نوع میراگر بر روی سازه بررسی شد. نتایج حاصل بیانگر عملکرد مطلوب به ترتیب: TLCBD، TLCGD و LCVA نسبت به TLCD و V-TLCD می‌باشد.

واژگان کلیدی

TLCD، کنترل ارتعاش، کاهش پاسخ، ضریب کارایی

Comparison of the Performance of Tuned Liquid Column Dampers for Seismic Control of the Structures

M.H. Mohasel, A.R. Mostafa Gharabaghi, M.R. Chenaghlo

Abstract

Many modern slender and flexible structures are highly sensitive to dynamic vibrations, which may lead to the failure of these types of structures. Recently, Tuned Liquid Column Dampers (TLCDs) have gained significant attention from many researchers. In a TLCD, the fluid motion inside a U-shaped tube generates a restoring force on the structure, thereby reducing the structure's response. One of the main advantages of these dampers is their low cost of construction and maintenance. Various types of TLCDs exist for vibration control. In this study, the performance of five different types of passive TLCDs is compared. These dampers include: U-shaped TLCD, V-shaped TLCD, TLCD with non-uniform cross-section (LCVA), ball-type TLCD (TLCBD), and gas or spring-type TLCD (TLCGD). For this purpose, the response of a single degree of freedom (SDOF) system with and without the dampers is evaluated under the excitation of the Kobe, El Centro, and Taft earthquakes. To quantitatively and accurately examine the efficiency of each of these dampers and compare their performance with each other, two indicators, efficiency coefficient and RE, were used. In this paper, the equations of motion for the structure and the damper are analyzed using numerical methods in MATLAB software. In this study, for the first time, the performance of these 5 types of TLCDs on the structure was investigated. The results indicate a superior performance in the following order: TLCBD, TLCGD, and LCVA compared to TLCD and VTLCD.

Keywords

TLCD, Vibration Control, Reduced Response, Efficiency Coefficient

۱- مقدمه

ایمنی و کاربرد سازه‌های عمرانی به شدت به نحوه کنترل ارتعاشات نامطلوب ناشی از زلزله، باد شدید، امواج اقیانوس و ... وابسته است. مفهوم کنترل ارتعاش سازه‌ای احتمالاً به تمدن‌های باستانی بازمی‌گردد. برای مثال، معبد افسوس در یونان؛ آرامگاه کوروش کبیر در ایران و معبد راماپا در هند از جمله سازه‌های برجسته کنترل‌کننده ارتعاش هستند که در دوران‌های باستان ساخته شده و هنوز پابرجا مانده‌اند [۱-۴]. با این حال، تحقیقات مدرن، که به توسعه تکنیک‌هایی برای کنترل ارتعاشات سازه‌ای در برابر تحریک‌های جانبی اختصاص داده شده‌اند، حدود یک‌ونیم قرن پیش بنیان‌گذاری شد [۵] که منجر به توسعه فناوری جداسازی پایه برای بهبود عملکرد سازه‌های ساختمانی تحت تحریکات لرزه‌ای شد. با استفاده از فناوری جداسازی پایه، حرکت یک سازه از حرکت زمین در طول رویداد زلزله‌ای جدا می‌شود و در نتیجه، ارتعاش سازه کاهش می‌یابد [۶ و ۷]. اکثر جداسازهای زلزله‌ای در درجه اول، انرژی زلزله را از طریق عناصر سختی جدا می‌کنند، اما به دلیل مشارکت ناچیز میرایی، کارایی مؤثری در کاهش ارتعاش ندارند. درحالی‌که برخی از سیستم‌های دارای سختی اضافی، پیچیدگی و هزینه‌های تعمیر و نگهداری بالایی هستند. علاوه بر این، مدل‌سازی مکانیکی دقیق جداسازها و به‌کارگیری آن‌ها با سازه‌ها، به دلیل پیچیدگی ذاتی و رفتار غیرخطی توسعه چندانی نیافته است [۸].

به‌غیر از جداسازی پایه، چندین راهکار دیگر برای کاهش ارتعاشات سازه‌ای توسعه داده شده است که بر اساس یکی از دو اصل زیر عمل می‌کنند. اولین مورد، تغییر ویژگی‌های دینامیکی سازه، از جمله اصلاح سختی و تغییرات آیرودینامیکی است. اصل دوم شامل نصب قطعات میرایی مکمل است که می‌توانند بخشی از انرژی ورودی را به خود جذب کرده و مستهلک کنند [۹]. قطعات میرایی مکمل، بر اساس توان مورد نیازشان برای عملکرد، به چهار گروه عمده، یعنی قطعات غیرفعال، نیمه‌فعال، فعال و ترکیبی طبقه‌بندی می‌شوند [۱۰-۱۲]. قطعات جاذب انرژی غیرفعال به منابع انرژی اضافی برای عملکرد نیاز ندارند و با دریافت ارتعاش از سیستم (سازه) اصلی، که میراگرها به آن متصل هستند، فعال می‌شوند. قطعات نیمه‌فعال به‌عنوان قطعات غیرفعال قابل کنترل شناخته می‌شوند که در آن‌ها، رفتار یک میراگر غیرفعال، بر اساس اطلاعات به‌دست‌آمده در مورد تحریک و پاسخ سازه‌ای، با استفاده از یک فعال‌کننده مکانیکی یا الکتریکی خارجی تنظیم

می‌شود. سیستم کنترل فعال سیستمی است که در آن نیروی کنترلی لازم برای اصلاح حرکت سازه، توسط منبع نیروی خارجی بر اساس پاسخ سازه‌ای دریافت‌شده از طریق حسگر (ها) تولید می‌شود. سیستم‌های کنترل ترکیبی، ترکیب سیستم‌های مختلف غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال هستند.

در مقایسه با انواع دیگر قطعات میرایی مکمل، قطعات جاذب انرژی غیرفعال مقرون‌به‌صرفه هستند و نصب و نگهداری آن‌ها آسان است. سادگی نحوه کار و پی‌گیری این قطعات، آن‌ها را از نظر ساخت و عملکرد نسبت به سایر قطعات جاذب انرژی برجسته‌تر می‌کند. قطعات جاذب انرژی غیرفعال را می‌توان به دو دسته، یعنی سیستم‌های جاذب مبتنی بر ماده تشکیل‌دهنده و سیستم‌های جاذب اینرسی‌محور تقسیم کرد [۱۳]. میراگر فلزی [۱۴ و ۱۵]، میراگر اصطکاکی [۱۶]، میراگر ویسکوز سیال [۱۷] و میراگر ویسکوالاستیک [۱۸] نمونه‌هایی از دسته اول هستند. از سوی دیگر، میراگر جرمی تنظیم‌شده (TMD) و میراگر مایع تنظیم‌شده (TLD) نمونه‌هایی از دسته دوم هستند [۱۸]. سیستم‌های جاذب انرژی اینرسی‌محور با نیروی اینرسی ایجادشده توسط جرم کمکی متصل به سازه اصلی، ارتعاش سازه‌ای را مستهلک می‌کنند. برای به حداکثر رساندن نیروی اینرسی، جرم کمکی به‌طور کلی در نزدیکی بالای سازه اصلی و جایی که حرکت در هنگام ارتعاش حداکثر خواهد بود، قرار می‌گیرد. فرکانس طبیعی جرم کمکی تنظیم می‌شود، یعنی نزدیک به فرکانس سازه در حال ارتعاش، که برای کنترل توسط میراگر نیاز است، حفظ می‌شود. تنظیم فرکانس جرم کمکی نزدیک به فرکانس ارتعاش سازه، امکان انتقال انرژی ارتعاشی از ساختار اصلی به سیستم کمکی را از طریق تعامل دینامیکی بین آن‌ها فراهم می‌نماید. سیستم اینرسی‌محور با مکانیزم میرایی به‌منظور اتلاف انرژی جذب‌شده از سازه اصلی ارائه می‌شود. میراگر TMD که شکل ساده‌تری از سیستم‌های اینرسی‌محور است [۱۰]، به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است و نحوه نصب و عملکرد آن به واقعیت نزدیک‌تر است [۱۹-۲۲]. با این حال، این نوع میراگر محدودیت‌های خود را دارد که عمدتاً از تأمین یک جرم جامد، که برای حرکت آزادانه لازم است، و یک عنصر میرایی خارجی ناشی می‌شود. این اشکالات در میراگر TLD برطرف شده است.

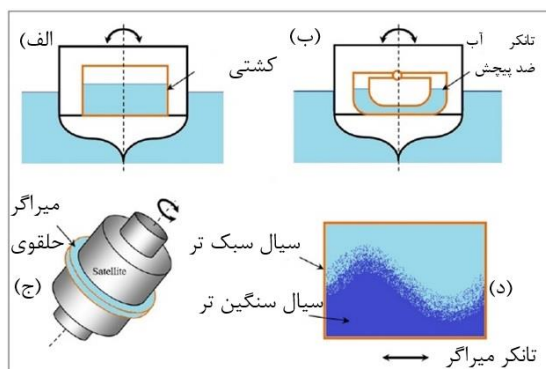
اصطلاح TLD میراگرهایی را شامل می‌شود که در آن‌ها یک مایع، معمولاً از جنس آب، تمام یا بخشی از جرم میراگر را تشکیل می‌دهد و در مکانیسم اتلاف انرژی نقش دارد. در میان انواع موجود

¹ Sensor

درجه آزادی معادل را ارائه دادند و دقت و کارایی آن‌ها را در شبیه‌سازی ویژگی‌های دینامیکی پیچیده نشان دادند.

در مطالعه دینگ^۵ و همکاران [۲۸] امکان استفاده از میراگرهای ستون مایع تنظیم‌شده غیرغوطه‌ور (TLCD) برای کاهش حرکت ارتفاع سازه‌های شناور بسیار بزرگ (VLFSS) از طریق مدل‌سازی تحلیلی و بهینه‌سازی بررسی شد و کارایی آن‌ها در مقایسه با صفحات گرمایش ثابت معمولی (FHPs) نشان داده شد.

مفهوم استفاده از حرکت مایع نگهداری‌شده در یک ظرف به منظور کنترل حرکت نامطلوب سیستمی که ظرف به آن متصل است، در نیمه دوم قرن نوزدهم آغاز شد [۲۹]. مخزن ضد غلتش دارای سطح آزاد، که برای کنترل حرکات غلتشی کشتی‌ها استفاده می‌شود، اولین کاربرد از این سیستم است [۳۰] (شکل ۱-الف)). در اوایل قرن بیستم، یک مخزن ضد غلتش پر از آب U شکل معرفی شد (شکل ۱-ب)). در طول دهه ۱۹۶۰، میراگر حلقوی، برای کنترل حرکت چرخشی ماهواره‌ها توسعه یافت [۳۱] (شکل ۱-ج)). تمامی این سیستم‌ها را می‌توان به‌عنوان پیشینه میراگر TLD مورد استفاده در کنترل ارتعاش امروزی سازه‌های عمرانی در نظر گرفت.



شکل ۱- توسعه اولیه میراگر TLD: (الف) تانکر آب ضدپیچش در کشتی، (ب) تانکر ضدپیچش U شکل در کشتی، (ج) میراگر حلقوی در کشتی و (د) میراگر سیالی با دو سیال مخلوط نشدنی. (فلش‌های دو جهته بیانگر جهت تحریک برای کنترل توسط وسیله میراگر می‌باشد). [۳۰]

احتمالاً اولین مطالعه در مورد کاربرد میراگر TLD در سازه‌های عمرانی به‌عنوان وسیله کنترل ارتعاش غیرفعال، در اواخر دهه ۱۹۷۰ توسط ون‌دیور^۶ و میتومه^۷ انجام شد [۳۲]، که نشان دادند حرکت پرتلاطم مایع در مخزنی با طراحی مناسب، که بر روی یک سکوی ثابت دریایی نصب شده، می‌تواند پاسخ دینامیکی سازه را کاهش

قطعات غیرفعال، میراگرهای TLD به دلیل پیکربندی ساده، هزینه پایین، سهولت نصب در سازه‌های جدید و همچنین در سازه‌های از پیش ساخته‌شده و حداقل نیازهای تعمیر و نگهداری، برتری دارند. همچنین، میراگر TLD، از نظر عدم نیاز به آستانه تحریک خارجی برای فعال‌سازی، عدم نیاز به عنصر میرایی خارجی، سهولت تنظیم فرکانس و امکان کنترل ارتعاش چندجهته با یک سیستم، دارای مزایای بیش‌تری نسبت به میراگر TMD است.

در مطالعه موسوی و همکاران [۲۳] کنترل نیمه‌فعال سکوی جک‌تی رسالت را با استفاده از یک میراگر مغناطیسی در مقیاس بزرگ (MR)^۱ با یک کنترل‌کننده منطق فازی بررسی شد. تجزیه و تحلیل، با در نظر گرفتن امواج با دوره‌های بازگشت مختلف، اثربخشی میراگر MR را در افزایش ایمنی و افزایش طول عمر سکو با کاهش ارتعاشات ساختاری تحت بارهای موج مختلف نشان داد. مطالعه سردار و چاکرابورتی^۲ [۲۴] اثر میراگرهای مایع تنظیم‌شده (TLD) را در کاهش ارتعاشات ناشی از موج در سکوهایی جکت دریایی ارزیابی کرد. این مطالعه با مدل‌سازی سکو و لحاظ نمودن اندرکنش شمع خاک و نشان‌دادن TLD به‌عنوان یک سیستم جرم فنی، مشخص کرد که TLD یک راه‌حل بالقوه برای کاهش ارتعاشات موج از طریق تحلیل‌های پاسخ دینامیکی تحت شرایط مختلف است.

در تحقیقات محصل و همکاران [۲۵] به بررسی دسته‌بندی میراگرهای ستون مایع تنظیم‌شده غیرفعال (TLCD) و عملکرد لرزه‌ای آن‌ها پرداخته شده است. در این مقاله فلوچارت طراحی انواع TLCD ارائه می‌شود و تأثیر کاهش سیال بر طراحی میراگر مورد بحث قرار می‌گیرد و به این نتیجه رسیدند که TLCD برای سکوهایی با فرکانس‌های طبیعی زیر ۰/۵ هرتز بهینه است و برای تمامی فرکانس‌ها TLCDG کارایی بهتری دارد.

در تحقیق دینگ‌زین^۳ و همکاران [۲۶] مطالعه تجربی بر روی یک سیستم جداسازی هوشمند با استفاده از الاستومر مغناطیسی (MRE)^۴ برای کاهش ارتعاشات ناشی از هیدرودینامیک در سکوهایی دریایی، برجسته‌کردن کنترل جداسازی در زمان واقعی، آزمایش مخزن موج، و نتایج قابل توجه سرکوب ارتعاش را مورد بحث قرار دادند.

محصل و همکاران [۲۷] دو روش را برای مدل‌سازی سکوهایی دریایی با استفاده از مدل‌های فرودی تحریف‌شده و یک سیستم

⁵ Ding
⁶ Vandiver
⁷ Mitome

¹ Magneto-Rheological
² Chakraborty
³ Dingxin
⁴ Magneto-Rheological Elastomer

دهد. پس از آن، فعالیت‌های تحلیلی و تجربی توسط سایار^۱ و بامگارتن^۲ [۳۳] برای مطالعه رفتار غیرخطی میراگر مایع صورت گرفت.

لی^۳ و ردی^۴ مطالعه‌ای پارامتریک در مورد عملکرد مخازن پر از مایع به‌عنوان وسیله‌ای برای کاهش تحرک سکوها در یابی در اثر برخورد امواج اقیانوس ارائه کرده و همچنین روش‌های ممکن برای تنظیم فرکانس‌ها بین سازه و میراگر را پیشنهاد نمودند [۳۴]. برای سرکوب ارتعاش‌های ناشی از باد در سازه‌ها، بایر^۵ میراگری را طراحی کرد که شامل یک ظرف مستطیلی شکل بود که کاملاً با دو مایع مخلوط‌نشده پر شده بودند [۳۰] (شکل (۱-د)).

السف^۶ و همکاران استفاده از مخازن نیمه پر شده با مایع متلاطم را برای کاهش حرکت نوسانی سازه پیشنهاد کردند. تمام نمونه‌های اولیه، از مدل‌های مکانیکی معادل برای نمایش مایع متلاطم استفاده می‌کردند. درحالی‌که برخی دیگر از محققین از یک مدل متمرکز معادل جرم-فنر-میراگر برای نشان دادن میراگر TLD استفاده نمودند [۳۵].

سایار و بامگارتن مایع متلاطم را از طریق یک آونگ معادل مدل‌سازی کرده و بازه فرکانسی و بازه زمانی در مطالعه سیستم‌های سازه-میراگر TLD را بررسی نمودند [۳۶]. به‌علاوه، تمام روش‌های تحلیلی، به‌جز مطالعات لی و ردی [۳۴]، با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی مدل‌های کوچک و یا با اندازه‌گیری در مقیاس کامل در سازه‌های واقعی تأیید شده‌اند.

در سال‌های اخیر تحقیقات بیش‌تری در خصوص به‌کارگیری TLD صورت پذیرفت. رزاس^۷ و همکاران [۳۷] یک TLD دوطرفه (BTLD) پیشنهاد کردند که به‌عنوان دو TLD متعامد با مایع مشترک عمل می‌کند و نیاز به مایع را ۳۰٪ در مقایسه با TLDهای مستقل دوگانه کاهش می‌دهد. تحلیل‌های تجربی و عددی کاهش جابه‌جایی قابل‌توجهی را در سازه‌های چند درجه آزادی تحت تحریک لرزه‌ای نشان دادند.

مندس^۸ و همکاران [۳۸] با استفاده از TLDهای تحت فشار (PTLCDs) نشان دادند که سختی خاک به‌شدت بر راندها میراگر تأثیر می‌گذارد. خاک‌هایی با سختی بالاتر (به‌عنوان مثال، شن متراکم) عملکرد PTLCD را تا ۴۰٪ در کاهش شتاب کف در طول زلزله کوبه افزایش دادند.

مطالعات تجربی شاه و عثمان^۹ [۳۹] بر روی یک قاب فولادی چهار طبقه نشان داد که TLDها شتاب اوج را ۲۵-۳۵٪ تحت بارهای هارمونیک و ۱۵-۲۰٪ در طول رویدادهای لرزه‌ای مانند El Centro کاهش می‌دهند. کاهش جابه‌جایی RMS در فرکانس‌های تشدید به ۳۰٪ رسید.

پاندی^{۱۰} و همکاران [۴۰] نشان دادند که محفظه‌های گاز تحت فشار در PTLCDها تنظیم برای سازه‌های فرکانس بالا را امکان‌پذیر می‌کند، با تنظیمات فشار، پهنای باند عملیاتی ۲۰ درصد بیش‌تری را در مقایسه با TLDهای معمولی فراهم می‌کند.

آیدمیر^{۱۱} و همکاران [۴۱] اشکال مختلف زانو را در TLD مقایسه کردند و نشان دادند که زانوهای باز تقریباً ۲۵٪ در عملکرد زلزله بهتر از زانوهای بسته عمل می‌کنند. این مطالعه بر اهمیت انتخاب‌های طراحی در بهینه‌سازی اثربخشی TLD تأکید می‌کند.

سرخابی و همکاران [۴۲] شبیه‌سازی‌های ترکیبی بلادرنگ را برای بررسی اثربخشی TLDهای مقیاس بزرگ در سناریوهای لرزه‌ای انجام دادند و پیچیدگی رفتار دینامیکی آن‌ها را برجسته کردند. این رویکرد نوآورانه امکان آزمایش مدل‌های بزرگ‌تر را فراهم می‌کند و بینشی در مورد عملکرد آن‌ها در شرایط واقعی ارائه می‌دهد.

دینگ و همکاران [۴۳] یک مدل تعمیم‌یافته برای TLD ایجاد کردند که نفوذ گاز را در دامنه‌های تحریک بالا به حساب می‌آورد و کاربرد مدل کلاسیک TLD را افزایش می‌دهد. این مدل به درک ویژگی‌های اتلاف انرژی و راندها کنترل، به‌ویژه تحت تحریکات دامنه بزرگ کمک می‌کند. لذا مطالعه این میراگرها از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله کارایی و عملکرد پنج نوع مختلف از این نوع میراگرها بررسی خواهد شد و در نهایت بر اساس یک سری شاخص‌ها، برتری این میراگرها نسبت به یکدیگر سنجیده می‌شود.

۲- میراگر ستون مایع تنظیم‌شده (TLCD)

میراگر ستون مایع تنظیم‌شده (TLCD) از یک ظرف U شکل تشکیل شده که قسمتی از آن با مایع پر شده و وقتی تحت تحریک جانبی قرار می‌گیرد، موجب حرکت نوسانی در ستون حاوی مایع می‌شود [۴۴ و ۴۵] (شکل (۲)). فرکانس نوسان ستون حاوی مایع، همان‌طور که در معادله (۱) نشان داده شده، با فرکانس غالب سازه

⁹ Osman

¹⁰ Pandey

¹¹ Aydemir

¹ Sayar

² Baumgarten

³ Lee

⁴ Reddy

⁵ Bauer

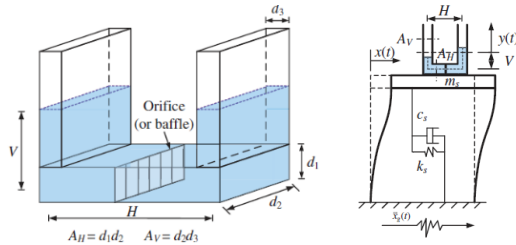
⁶ Al-Saif

⁷ Rozas

⁸ Mendes

کوچک‌تر از طول افقی میراگر است. معادله حرکت سیستم سازه-TLCD تحت بار زلزله را می‌توان از طریق فرمول لاگرانژ سیستم‌های دینامیکی به صورت زیر نوشت [۴۶]:

$$\begin{bmatrix} m_s + m_d & am_d \\ am_d & m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_s + m_d \\ am_d \end{Bmatrix} \ddot{x}_g \quad (2)$$



شکل ۲- میراگر ستون مایع تنظیم‌شده (TLCD) [۴۹]

که در رابطه (۲)، (m_s) جرم سازه، (m_d) جرم میراگر، (α) نسبت طول میراگر $(H/(H+2V))$ ، $(\dot{x})$ شتاب سازه، $(\dot{y})$ شتاب سیال، (c_s) ضریب میرایی سازه، (c_d) ضریب میرایی میراگر، $(\dot{x})$ سرعت سازه، $(\dot{y})$ سرعت سیال، (k_s) سختی سازه، (k_d) سختی میراگر، (x) جابه‌جایی سازه، (y) جابه‌جایی سیال و $(\ddot{x}_g)$ شتاب افقی حرکت زمین می‌باشد. غیرخطی بودن واقعی ناشی از میرایی مرتبه دوم در معادله حرکت TLCD به صورت زیر است:

$$C_d = \frac{1}{2} \rho A \xi |\dot{y}| \quad (3)$$

در معادله (۳)، (ρ) چگالی سیال، (A) سطح مقطع میراگر و (ξ) ضریب افت هد میراگر است. از آنجایی که C_d در رابطه (۳) به شدت غیرخطی است، روش بهینه‌سازی پیشنهادشده توسط دن هارتوگ^۱ [۵۰] در معادله (۴) برای به‌دست آوردن شکل خطی C_d و k_d اعمال می‌شود. در نهایت، C_d و k_d در معادله (۲) را می‌توان با پارامترهای بهینه به عنوان $C_d = 2m_d \zeta^* (2\pi f^*)$ ، $k_d = m_d (2\pi f^*)^2$ محاسبه کرد و جواب تحلیلی را به‌دست آورد.

$$\mu^* = \frac{\mu \alpha_1 \alpha_2}{1 + \mu(1 - \alpha_1 \alpha_2)}$$

$$f^* = \frac{f_s}{1 + \mu^*} \quad (4)$$

$$\zeta^* = \sqrt{\frac{3\mu}{8\mu(1 + \mu^*)^3}}$$

در جدول (۱)، اشکال، مشخصات، معایب و مزایای انواع مختلف میراگرهای TLCD ارائه شده است.

برای استفاده مؤثر از میراگر TLCD به عنوان یک قطعه کنترل ارتعاش تنظیم شده است.

$$\omega_{TLCD} = \sqrt{\frac{2g}{L_c}} \quad (1)$$

در معادله (۱)، (L_c) طول کل ستون مایع است.

برای مزایای میراگر TLCD می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

(الف) با در نظر گرفتن مقدار معینی از مایع، میراگر TLCD نسبت به TLD بازده حجمی بالاتری دارد، (ب) میراگر TLCD به طور مداوم در بازه وسیعی از سطوح ارتعاش عمل می‌کند، (ج) میراگر TLCD دارای یک مکانیسم میرایی بسیار واضح و متمایز است که با این مکانیسم می‌توان مقادیر میرایی را به روشی خاص محاسبه کرد، (د) از آب داخل میراگر می‌توان به عنوان سیستم اطفای حریق نیز استفاده نمود و در نهایت، (ه) با تغییر طول ستون مایع، فرکانس طبیعی میراگر TLCD را می‌توان به راحتی کنترل کرد. باین حال، میراگر TLCD متداول دو محدودیت اصلی دارد؛ اول، عملکرد میراگر TLCD متداول یک‌جهته است، درحالی‌که سازه باید در امتداد دو جهت اصلی عمل کند. دوم، از آنجایی که میراگر TLCD متداول یک سیستم ذاتاً با دوره تناوب طولانی مدت است، تنظیم آن در یک سازه با دوره تناوب اصلی نسبتاً کم (زیر ۲ ثانیه) منجر به طراحی طول ستون مایعی می‌شود که اجرای آن عملاً غیرممکن است. تلاش‌های پژوهشی قابل توجهی برای غلبه بر معایب میراگر TLCD معمولی انجام شده است و در نتیجه، برخی اشکال خاص از میراگر TLCD توسعه یافته‌اند. همچنین، برخی از تغییرات میراگر TLCD متداول برای افزایش بیش‌تر عملکرد دینامیکی، انعطاف‌پذیری بیش‌تر در طراحی آن و ایجاد سازگاری بهتر از لحاظ معماری می‌باشد. این پیکربندی‌های اصلاح‌شده در میراگر TLCD، میراگر ستون مایع V شکل [۴۶]، میراگر ستون مایع با مقطع متغیر (LCVA) [۴۶]، میراگر ستون مایع توپک‌دار (TLCBD) [۴۷] و میراگر ستون مایع گازی یا دارای فنر (TLCGD) [۴۸] را در برمی‌گیرد.

۲-۱- معادلات حاکم بر حرکت سیستم

شکل شماتیک یک TLCD متداول مستقر بر روی سازه یک درجه آزادی تحت تحریک لرزه‌ای در شکل (۲) نشان داده شده است. در این بررسی، TLCD با سطح مقطع یکنواخت در کل طول خود (بخش افقی و بخش قائم) در نظر گرفته شده است. مفروضات زیر برای به‌دست آوردن معادله حرکت استفاده می‌شود: (الف) رفتار تلاطمی (Sloshing) سیال بر روی سطح مایع ناچیز است. (ب) جریان تراکم‌ناپذیر است. (ج) بُعد سطح مقطع بسیار

¹ Den Hartog

جدول ۱- انواع میراگر TLCD

شماره میراگر	نام میراگر	شکل شماتیک	اولین محقق	مزایا	معایب
T1	میراگر ستون مایع تنظیم شده U شکل متداول (U-TLCD)		ساکایی ^۱ و همکاران در سال ۱۹۸۹ [۴۵]	سادگی، هزینه ساخت و نگهداری کم	محدوده فرکانسی خاصی را پوشش می دهد. (صفر تا ۰/۵ هرتز)
T2	میراگر ستون مایع با مقطع متغیر (LCVA)		واتکینز ^۲ و هیچکاک ^۳ در سال ۱۹۹۱ [۵۱]	علاوه بر مزایای میراگر T1 پوشش فرکانس های بالا	ندارد
T3	میراگر ستون مایع V شکل (V-TLCD)		گائو ^۴ و همکاران در سال ۱۹۹۷ [۴۶]	مانند میراگر T1 اما با طول بیش تر در فضای کم تر	مانند میراگر T1
T4	میراگر توپک دار (TLCBD)		السف و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۴۷]	علاوه بر مزایای میراگر T1 دارای میرایی بیش تر	مانند میراگر T1 و هزینه ساخت و نگهداری بالا
T5	میراگر گازی (فنی) (TLCGD)		زیگلر ^۵ و هورچرینر ^۶ در سال ۲۰۰۶ [۴۸]	علاوه بر مزایای میراگر T1 پوشش فرکانس های بالا و سختی بیش تر	هزینه ساخت و نگهداری بالا

می گردد. استفاده از LCVA و TCGD به ترتیب با تعیین نسبت مساحت مناسب و فشار گاز، این مشکل را بهبود می بخشد.

۳- مطالعات عددی

در بخش قبلی معادلات حاکم بر حرکت سازه و انواع مختلف TLCD تحت تحریک زلزله نوشته شد. در این بخش برای بررسی عملکرد لرزه ای انواع TLCD، این معادلات به صورت عددی با استفاده از برنامه متلب در مدول سیمولینک و به روش رانگ کوتای مرتبه چهار حل می شود [۵۲].

در این مطالعه برای صحت سنجی و تعریف مدل سیستم برای بررسی عملکرد انواع میراگرهای TLCD، از تحقیق آزمایشگاهی ژو^۷ و همکاران استفاده شد [۵۳]. آن ها در مطالعه خود برای

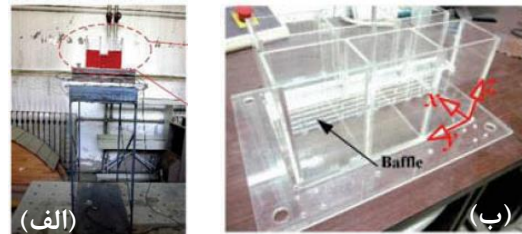
معادلات حرکت سیستم مجهز به میراگرهای اشاره شده در جدول (۱)، در مراجع ذکر شده آن ها، ارائه شده است. مهم ترین مسئله در مورد میراگرهای TLCD، پوشش فرکانسی محدود آن ها می باشد. یعنی زمانی که فرکانس اصلی سازه بین صفر تا ۰/۵ هرتز باشد می توان به صورت منطقی این میراگرها را طراحی نمود. اما زمانی که فرکانس اصلی سازه بیش تر از ۰/۵ هرتز شود، طراحی هندسی میراگر نامناسب می شود. بدین معنی که طول میراگر کوتاه تر شده اما برای جبران جرم آن (درصدی از جرم سازه) لازم است سطح مقطع آن ها افزایش یابد. هر چه فرکانس اصلی سازه از ۰/۵ هرتز دورتر شود، این ناهمگونی بیش تر و نامعقول تر

¹ Sakai
² Watkins,
³ Hitchcock
⁴ Gao
⁵ Ziegler
⁶ Hochrainer
⁷ Zhu

۳-۱- صحت‌سنجی

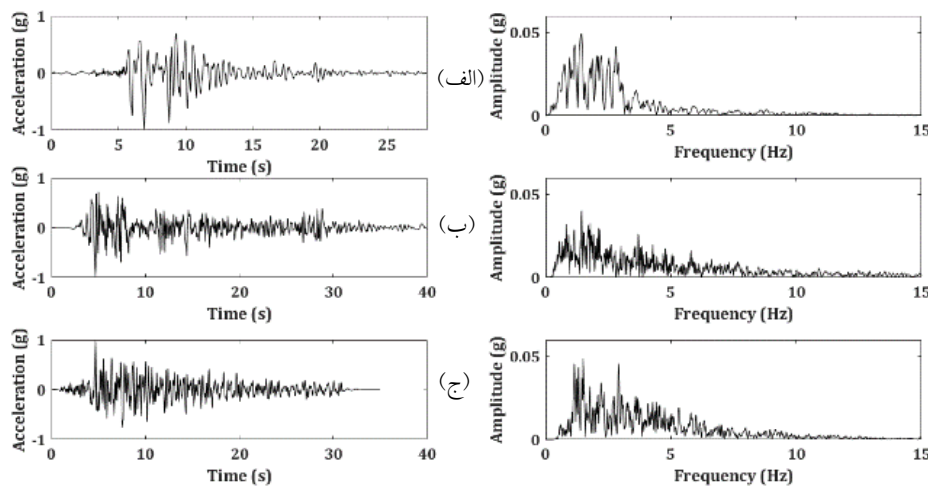
برای تعریف سازه اصلی از مدل تحقیق آزمایشگاهی ژو و همکاران استفاده شد [۵۳]. یک سازه فولادی یک درجه آزادی (SDOF) ساخته شده در آزمایشگاه دانشگاه Tsinghua به عنوان سازه اصلی در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، این سازه به صورت یک سیستم جرم-فنر-میراگر ساده شده است و پارامترهای سازه مربوطه بر اساس برنامه HAZUS استخراج شد. فرکانس اصلی سازه تقریباً ۱/۵۲۶ هرتز و نسبت میرایی سازه ۰/۵ درصد محاسبه شد. مشخصات میراگر بر اساس نسبت جرمی ۰/۷۹ درصد برای یک میراگر، به صورت جدول (۳) استخراج گردید. لذا برای نسبت جرمی ۲/۳۷ درصد از سه میراگر استفاده می‌شود (شکل ۳-ب). تاریخچه زمانی و طیف فوریه زلزله‌های کوبه، الاسترو و تفت در شکل (۴) ارائه شده است.

مدل‌سازی سیستم از روش شبیه‌سازی ترکیبی زمان واقعی (RTHS) استفاده کردند. در این روش سازه واقعی به صورت عددی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد و میراگرها به صورت فیزیکی بر روی میز لرزه قرار گرفتند. آرایش مدل میراگرهای واقع بر روی میز لرزه در شکل (۳) نشان داده شده است. در این سیستم، میز لرزه که ماهیت یک‌طرفه دارد، با کنترل جابه‌جایی، حرکت جانبی را به میراگرها اعمال می‌کند.



شکل ۳- الف) مدل آزمایشگاهی سازه مجهز به میراگر ب) شکل

شماتیک TLCD [۵۳]



شکل ۴- تاریخچه زمانی و طیف فوریه شتاب زلزله‌های الف) کوبه، ب) الاسترو و ج) تفت

RMS بیانگر ریشه میانگین مربعات متغیرها در طول زمان، with control برای حالت سازه کنترل شده و without control برای حالت سازه کنترل نشده است. در تحلیل پاسخ لرزه‌ای، RMS شتاب و جابه‌جایی یک پارامتر استاندارد یا قابل تفسیر مستقیم در مهندسی سازه نیست. با این حال، بر اساس اصول استنباط شده از مطالعات لرزه‌ای و زمینه‌های تحقیقاتی ارائه شده، ترکیبی از پیامدهای بالقوه آن است. RMS شتاب یا جابه‌جایی، مقدار کمی میانگین شدت حرکت زمین در طول زمان است. این پارامتر به ارزیابی پتانسیل آسیب تجمعی، به ویژه برای سازه‌های انعطاف‌پذیر حساس به لرزش طولانی مدت کمک می‌کند.

چهار معیار که با ضرایب کارایی مشخص می‌شوند، برای ارزیابی اثربخشی کاهش پاسخ در این مقاله به منظور مقایسه استفاده شد. دو معیار اول از نظر پاسخ حداکثر و دو معیار دیگر مربوط به کاهش پاسخ RMS است که به این صورت تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned} P_d &= 1 - \frac{|\max(x_{\text{withcontrol}})|}{|\max(x_{\text{withoutcontrol}})|} \\ P_a &= 1 - \frac{|\max(\ddot{x}_{\text{withcontrol}})|}{|\max(\ddot{x}_{\text{withoutcontrol}})|} \\ R_d &= 1 - \frac{RMS(x_{\text{withcontrol}})}{RMS(x_{\text{withoutcontrol}})} \\ R_a &= 1 - \frac{RMS(\ddot{x}_{\text{withcontrol}})}{RMS(\ddot{x}_{\text{withoutcontrol}})} \end{aligned} \quad (5)$$

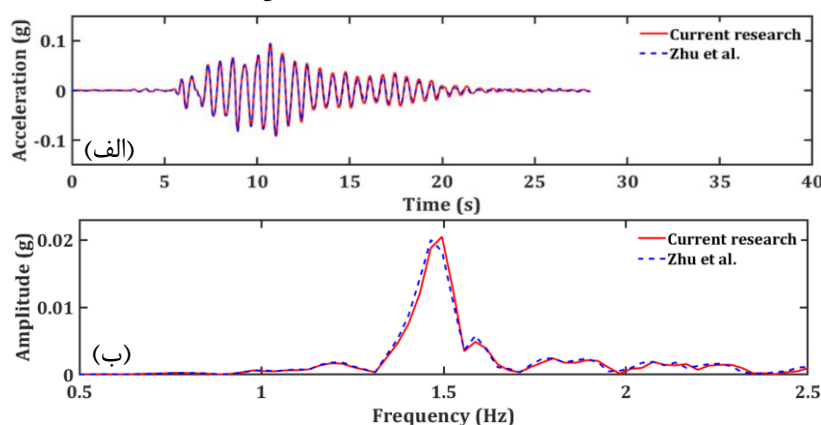
که در رابطه (۵)، (x) و $(\ddot{x})$ به ترتیب جابه‌جایی و شتاب سازه می‌باشد. همچنین اندیس‌های max بیانگر مقدار حداکثر متغیر،

جرم M_s	سختی K_s	نسبت میرایی ζ_s	فرکانس اصلی f_s
۱۹۸/۱۶ کیلوگرم	۱۸۲۱۷/۱۳۳ نیوتن بر متر	۰/۵ درصد	۱/۵۲۶ هرتز

f_r (Hz)	A_v (m ²)	A_H (m ²)	d_3 (m)	d_2 (m)	d_1 (m)	V (m)	H (m)	μ (%)
1/517	1/173	1/173	1/173	1/1	1/173	1/51	1/111	1/9

۳-۲- تحریک خارجی

در تحقیق ژو و همکاران [۵۳] برای تحریک خارجی از شتاب‌های زلزله کوبه، الاسترو و تفت برای تحریک سیستم سازه شبیه‌سازی شده استفاده شد (شکل ۴). چهار عامل در انتخاب رکوردهای زلزله دخیل هستند که عبارتند از: بزرگی، مدت زمان قابل توجه، PGA و فاصله آنها از گسل (حوزه دور یا نزدیک). تمام رکوردهای زلزله انتخابی باید بزرگی بیش‌تر از ۶/۵ داشته



شکل ۵- الف) تاریخچه زمانی پاسخ شتاب در تحقیق حاضر و تحقیق ژو و همکاران (ب) طیف فوریه پاسخ شتاب شتاب در تحقیق حاضر و تحقیق ژو و همکاران [۵۳]

مطابق نتایج حاصله از تحلیل سازه مورد نظر با کدهای نوشته شده در محیط نرم افزار متلب در این تحقیق، بر اساس جدول (۴) اختلاف ناچیزی بین نتایج مشاهده شد که بیانگر صحت روش استفاده شده در این مطالعه است.

R _a	R _d	P _a	P _d	مطالعات
۳۱/۵۱	۳۱/۱۱	۱۹/۱۶	۱۱/۲۹	تحقیق حاضر
۳۰/۲۳	۲۹/۴۱	۱۸/۳۷	۱۰/۸۵	تحقیق ژو و همکاران [۵۳]
۴/۲۳	۵/۷۸	۴/۳	۴/۰۵	اختلاف نتایج (%)

٤- نتایج و بحث

در این مقاله، هدف اصلی بررسی رفتار لرزه‌ای سازه با انواع میراگرهای TLCD و بهبود پاسخ لرزه‌ای سازه است. در این

۴-۱- مدل سازی میراگرها

به منظور مقایسه بهتر و دقیق تر، نسبت جرم μ و نسبت طول α (به ترتیب برابر با ۰/۲۳۷ و ۰/۵۲) برای همهٔ TLCDها یکسان در

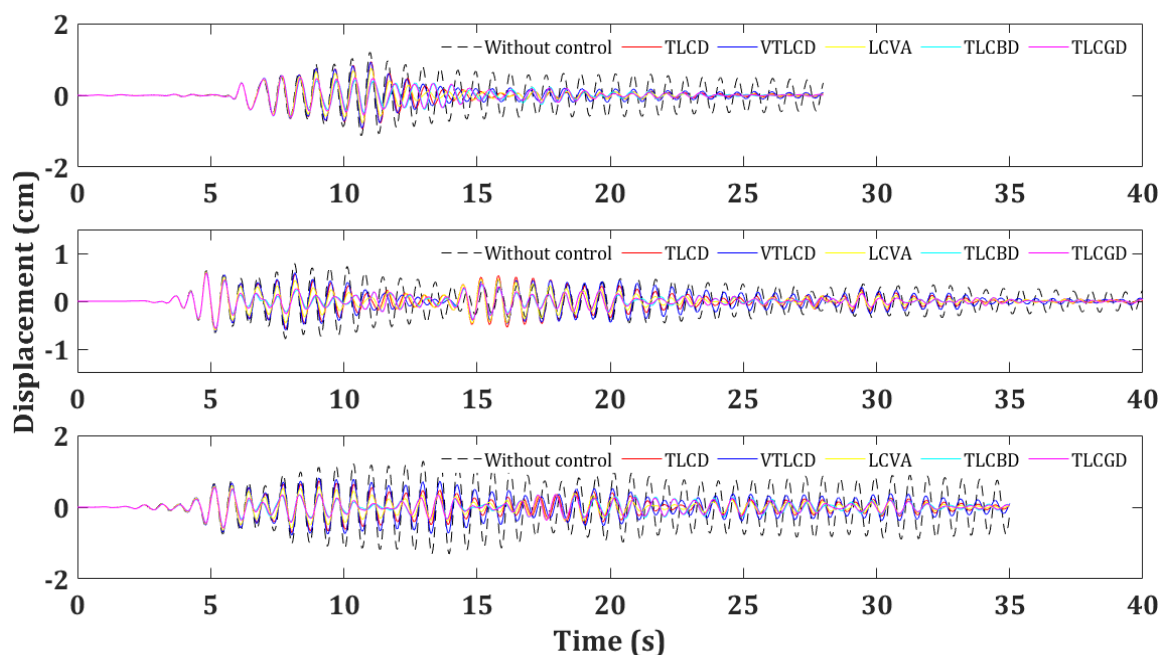
۴-۲- تاریخچه زمانی پاسخ سازه

برای نسبت جرمی ۰/۰۲۳۷ و نسبت طول ۰/۵۲ برای تمامی میراگرها، در شکل (۶) تاریخچه زمانی پاسخ جابه‌جایی و در شکل (۷) پاسخ شتاب سقف سازه تحت سه رکورد زلزله کوبه، ال‌سترو و تفت با استفاده از ۵ میراگر، نشان داده شده است. مطابق شکل‌های (۶) و (۷)، استفاده از میراگرهای ستون مایع تنظیم‌شونده تأثیر خوبی بر کاهش پاسخ سازه می‌گذارد. با بررسی دقیق‌تر مشاهده می‌شود از بین پنج میراگر تعریف‌شده، به‌ترتیب T4، T5، T3، T1 و T2 بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند. برای بررسی دقیق این موضوع می‌توان با استفاده از ضرایب کارایی میراگرها که در بخش ۳-۱ و معادله (۵) به آن‌ها اشاره شد، عملکرد هر کدام از این میراگرها را برای کاهش پاسخ جابه‌جایی و شتاب سازه به‌صورت کمی کنترل نمود.

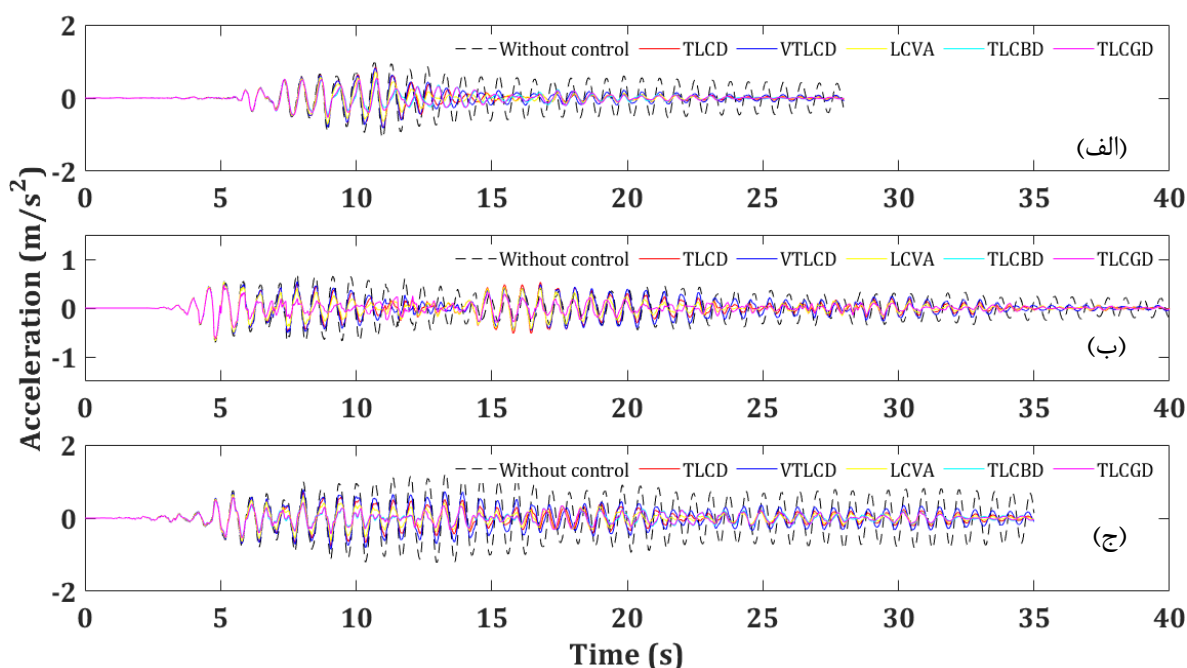
نظر گرفته شد. فرکانس f^* و ضریب میرایی ζ^* میراگرها از پارامترهای بهینه ارائه‌شده توسط **دین هارتوگ** که در بخش ۲-۲ و معادلات (۴) به آن‌ها اشاره شد، محاسبه گردید. زاویه شیب برای V-TLCD، ۶۰ درجه است. نسبت مساحت بخش قائم به بخش افقی میراگر (u)، برای همه میراگرها برابر واحد و برای میراگر LCVA مقدار ۲ در نظر گرفته شد. در TLCBD از یک توپک فولادی روکش‌دار با چگالی ۸۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت قطر توپک به قطر بخش افقی لوله میراگر، برابر ۰/۹۵ فرض گردید. برای TLCGD فشار گاز ثابت، ۰/۱ بار است. در جدول (۵) مشخصات فنی هر پنج میراگر تعریف‌شده در این مقاله ارائه شده است.

جدول ۵- مشخصات فنی هر میراگر

نام میراگر	H (m)	V (m)	A _H (m ²)	f _r (Hz)	ζ_d
T1	۰/۱۱۱	۰/۰۵۱	۰/۰۲۲	۱/۵۱۶	۰/۰۵
T2	۰/۰۳۱	۰/۰۰۲	۰/۰۶۶	۱/۵۱۶	۰/۰۵
T3	۰/۰۹۲	۰/۰۳۹	۰/۰۲۲	۱/۵۰۷	۰/۰۷۲
T4	۰/۱۱۱	۰/۰۵۱	۰/۰۲۲	۱/۵۱۶	۰/۰۵
T5	۰/۱۴۸	۰/۰۳۷	۰/۰۲۱	۱/۵۱۶	۰/۰۵



شکل ۶- تاریخچه زمانی پاسخ جابه‌جایی سقف سازه برای زلزله: الف) کوبه، ب) ال‌سترو و ج) تفت



شکل ۷- تاریخچه زمانی پاسخ شتاب سقف سازه برای زلزله: الف) کوبه، ب) الاسترو و ج) تفت

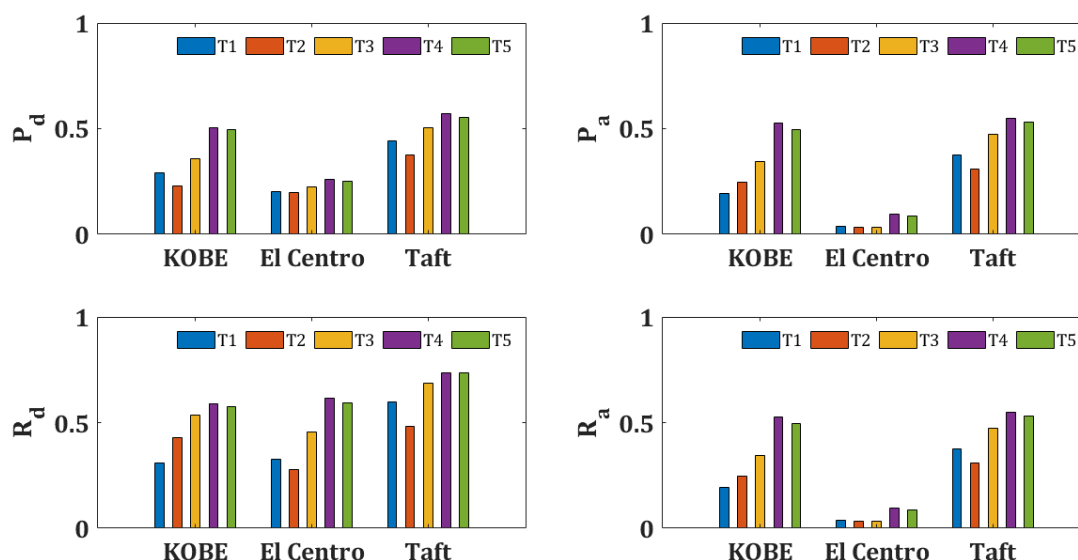
۳-۴- کارایی میراگرها

همچنین بهترین عملکرد برای کاهش ریشه میانگین مربعات جابه‌جایی سقف و شتاب سازه نیز به‌ترتیب برای میراگرهای T4، T5، T3، T1 و T2 می‌باشد.

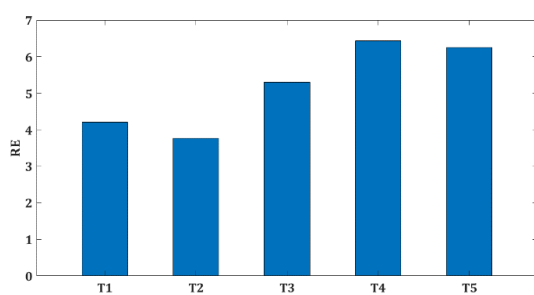
برای بررسی کمی و کیفی بهتر عملکرد هر کدام از میراگرها در این تحقیق، ضریب کارایی میراگرها، برای هر سه رکورد مورد نظر در جدول (۶) و شکل (۸) ارائه شده است. طبق جدول (۶) و شکل (۸)، بهترین عملکرد برای کاهش پاسخ حداکثر جابه‌جایی سقف سازه به‌ترتیب برای میراگرهای T4، T5، T3، T1 و T2 می‌باشد. بهترین عملکرد برای کاهش پاسخ حداکثر شتاب سقف سازه به‌ترتیب برای میراگرهای T4، T5، T3، T1 و T2 هستند.

جدول ۶- ضرایب کارایی میراگرها

نام میراگر	کوبه				الاسترو				تفت			
	(%) R _a	(%) R _d	(%) P _a	(%) P _d	(%) R _a	(%) R _d	(%) P _a	(%) P _d	(%) R _a	(%) R _d	(%) P _a	(%) P _d
T1	۳۱/۵۱	۳۱/۱۱	۱۹/۱۶	۱۱/۲۹	۳۲/۹۵	۳۲/۷۱	۳/۵۹	۱۸/۳۰	۵۹/۵۰	۵۹/۶۰	۳۷/۳۹	۴۴/۱۴
T2	۲۷/۴۵	۲۸/۲۷	۱۹/۶۶	۱۱/۴۸	۲۷/۱۵	۲۷/۸۸	۳/۳۸	۱۷/۹۲	۴۷/۹۷	۴۸/۲۴	۳۰/۸۱	۳۷/۶۲
T3	۵۵/۲۲	۵۳/۵۲	۳۴/۵۴	۳۵/۸۶	۴۴/۹۰	۴۵/۶۹	۳/۴۰	۲۰/۲۴	۶۸/۳۵	۶۸/۴۷	۴۷/۴۰	۵۰/۴۸
T4	۶۲/۵۲	۵۹/۰۳	۵۲/۵۱	۵۰/۲۴	۶۰/۳۵	۶۱/۷۳	۹/۶۰	۲۴/۰۲	۷۵/۶۳	۷۳/۵۴	۵۵/۰۳	۵۶/۴۵
T5	۵۸/۲۴	۵۹/۰۳	۵۲/۰۷	۴۹/۸۱	۵۹/۱۵	۶۰/۴۹	۸/۹۹	۲۵/۵۶	۷۵/۴۴	۷۳/۷۲	۵۴/۰۸	۵۶/۰۸



شکل ۸- ضرایب کارایی میراگرها



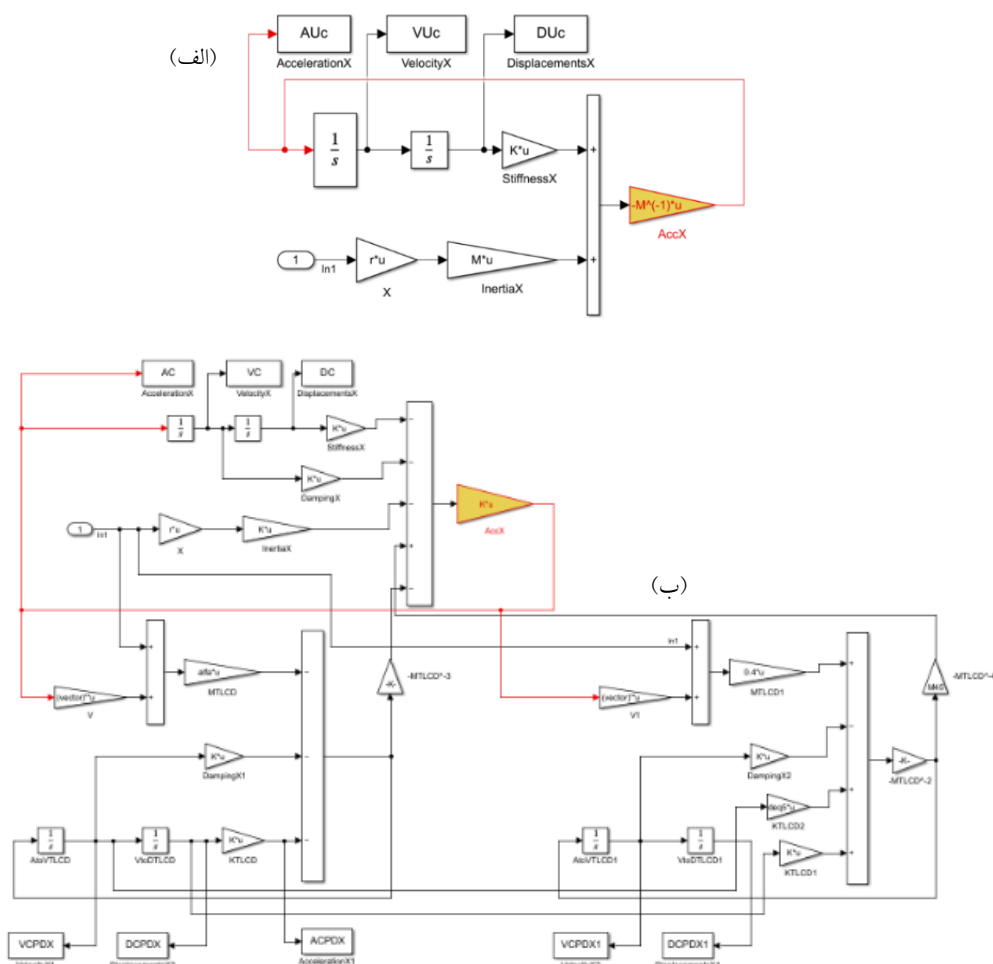
شکل ۹- ضرایب کلی کارایی میراگرها

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای تحلیل عددی پاسخ سازه مجهز به میراگرهای TLCD، از برنامه رایانه‌ای متلب و مدول سیمولینک استفاده شد. روش تحلیلی استفاده شده برای حل معادلات دینامیکی حرکت سیستم در سیمولینک متلب، رانگ کوتای مرتبه ۴ بود که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

با بررسی دقیق جدول (۶) و شکل (۸) مشاهده می‌شود که رفتار برخی میراگرها مانند TLCD و VTLCD برای زلزله‌ها کمی متفاوت است. لذا برای کنترل نهایی عملکرد این میراگرها بر روی رفتار لرزه‌ای سازه، برای یک میراگر، این چهار ضریب کارایی با لحاظ همه رکوردهای زلزله مورد نظر، با هم جمع شده و با عنوان ضریب کارایی کلی که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود، در نمودار شکل (۹) برای هر پنج میراگر ترسیم می‌گردد.

$$RE = W_1[P_d(Kobe) + P_a(Kobe) + R_d(Kobe) + R_a(Kobe)] + W_2[P_d(Elcentro) + P_a(Elcentro) + R_d(Elcentro) + R_a(Elcentro)] + W_3[P_d(taft) + P_a(taft) + R_d(taft) + R_a(taft)] \quad (6)$$

که در رابطه بالا، (RE) حاصل جمع ضرایب کارایی هر یک از میراگرها برای جابه‌جایی حداکثر پاسخ، (P_d) جابه‌جایی، (P_a) شتاب و همچنین RMS جابه‌جایی (R_d) و شتاب سقف سازه (R_a) تحت هر سه رکورد زلزله کوبه، ال‌سنتر و تفت می‌باشد. همچنین (W_i)ها ($i=1, 2, 3$) اوزان مربوط به زلزله‌ها است که بسته به سلیقه طراح (بزرگی، نوع گسل و ...) می‌تواند متغیر باشد. در این تحقیق مقادیر وزن‌ها برابر با یک فرض شده است.



شکل ۱۰- مدل سیمولینک الف) ارتعاش سازه بدون میراگر و ب) ارتعاش سازه با میراگر

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد انواع میراگرهای ستون مایع تنظیم شده در حالت غیرفعال برای کاهش پاسخ سازه مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی صحت روش عددی مورد استفاده در این مقاله که با استفاده از نرم‌افزار مدول سیمولینک متلب بود، از نتایج تجربی تحقیق ژو و همکاران استفاده شد، که نتایج حاصل بیانگر درستی روش مورد استفاده بود (شکل ۵) و جدول (۴)). این میراگرها به‌طور جداگانه بر روی مدل سازه تعریف شده در بخش ۴ نصب شدند و مجموعه‌ای از تحلیل‌های عددی برای مطالعه رفتار لرزهای آنها تحت زلزله‌های کوبه، الاسترو و تفت انجام شد.

تاریخچه زمانی پاسخ جابه‌جایی و شتاب سازه با و بدون میراگرها به‌صورت کیفی در شکل‌های (۶) و (۷)، و کارایی میراگرها هم به‌صورت کمی و کیفی در جدول (۶) و شکل (۸) ارائه گردید. همان‌طور که مشاهده شد، طبق شکل‌های (۶) الی (۸)، میراگرهای TLCBD، TLCGD و LCVA بهترین عملکرد و

میراگر TLCD و V-TLCD کم‌ترین عملکرد برای کاهش پاسخ سازه را از خود نشان دادند.

با بررسی دقیق شکل (۸) مشاهده شد که برخی از میراگرها مانند TLCD و VTLCD رفتارها و کارایی متفاوتی در برابر زلزله‌ها از خود نشان دادند لذا برای کنترل این موضوع از یک ضریب با عنوان ضریب کارایی کلی که بیانگر تأثیر تمامی رکوردها و هر چهار ضریب رابطه (۵) بود، استفاده شد؛ که در رابطه (۶) این ضریب ارائه شده است. همچنین شکل (۸) نشان می‌دهد کارایی میراگر برای زلزله‌های حوزه دور بهتر از حوزه نزدیک است.

ضریب RE در شکل (۹) برای هر پنج میراگر ترسیم شد. مطابق شکل (۹)، بهترین عملکرد کنترلی میراگر ستون مایع تنظیم شده به ترتیب مربوط به میراگرهای T1، T3، T5، T4 و T2 بود که قبلاً در شکل‌های (۶) و (۷) نیز مشاهده شد. طبق شکل (۹)، کارایی کلی برای میراگرهای TLCD، در حدود ۴/۲۱؛ VTLCD در حدود ۳/۷۷؛ LCVA در حدود ۵/۳؛ TLCBD در حدود ۶/۴۳ و TLCGD در حدود ۶/۳۵ محاسبه شد. لذا طبق

محاسبات، میراگرهای TLCBD، TLCGD و LCVA بهترین عملکرد را از خود نشان دادند. دلیل برتری میراگر TLCBD وجود گوی داخل میراگر است که با ایجاد نیروی اینرسی، میرایی و الاستیک مضاعف سبب بهبود پاسخها می‌شود. برای میراگر TLCGD نیز وجود فشار مضاعف در دو انتهای اعضای قائم، سبب انعطاف‌پذیری طراحی میراگر برای فرکانس‌های مختلف و نیز افزایش سختی سیستم از طریق فشار گاز می‌شود. موضوع مهم‌تر این است که اصلی‌ترین عیب این نوع میراگرها، محدودیت فرکانسی آنها بین صفر الی ۰/۵ هرتز می‌باشد که با لحاظ این مسئله و همچنین محدودیت‌های معماری در سازه، میراگرهای LCVA و TLCGD می‌تواند پیشنهاد شود. اما نکته مهم‌تر اجرای ساده و هزینه ساخت این میراگرها نیز می‌باشد. در میراگر TLCBD نیاز به تعبیه یک گوی فولادی در داخل بخش افقی لوله است. به دلیل استمرار حضور این گوی در محیط آبی داخل لوله که منجر به زنگ‌زدگی و خوردگی این گوی می‌شود، و همچنین عدم دسترسی به گوی جهت انجام بازرسی و سرویس‌دهی به آن به هنگام بهره‌برداری، امکان خرابی و تغییر خصوصیات مکانیکی آن وجود دارد. همچنین ممکن است در اثر ارتعاشات شدید و نیز تغییر شکل اعضای میراگر، گوی به اعضای قائم میراگر برخورد کرده و سبب آسیب به اعضای میراگر و سازه اصلی شود. لذا میراگر TLCBD متحمل هزینه‌های بالایی می‌شود. البته با ایجاد پوشش بر روی گوی (Coating) می‌توان این مشکل را حل نمود. همچنین برای میراگر TLCGD نیز لازم است دو انتهای قائم میراگر بسته و تحت فشار قرار گیرد، که این موضوع مستلزم هزینه و بازرسی‌های دوره‌ای خاص (ایجاد پوشش (Coating) خاص در محل اتصالات) برای کنترل عدم نشتی و ... اعضای قائم میراگر می‌باشد. لذا از بین این سه میراگر، ظاهراً میراگر LCVA به دلیل سادگی و انعطاف‌پذیری خوب خود در برابر محدوده‌های فرکانسی متعدد سازه و نیز ملاحظات خاص معماری سازه، گزینه بسیار مناسبی برای به‌کارگیری این نوع میراگر است.

- future", *Journal of Engineering Mechanics*, 123(9), pp.897-971.
- [13] Alhasan, A.A., Vafaei, M., and C Alih, S. (2022), "Viscoelastic dampers for protection of structures against seismic actions", *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(5), p.309.
- [14] Aghlara, R., and Tahir, M.M. (2018), A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures", *Engineering Structures*, 159, pp.185-197.
- [15] Jarrah, M., Khezzadeh, H., Mofid, M., and Jafari, K. (2019), "Experimental and numerical evaluation of piston metallic damper (PMD)", *Journal of Constructional Steel Research*, 154, pp.99-109.
- [16] Del Gobbo, G.M., Williams, M.S., and Blakeborough, A. (2018), "Comparing fluid viscous damper placement methods considering total-building seismic performance", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(14), pp.2864-2886.
- [17] Zhong, J., Hu, Z., Yuan, W., and Chen, L. (2018), "System-based probabilistic optimization of fluid viscous dampers equipped in cable-stayed bridges", *Advances in Structural Engineering*, 21(12), pp.1815-1825.
- [18] Barzegar, V., Laflamme, S., Downey, A., Li, M., and Hu, C. (2020), "Numerical evaluation of a novel passive variable friction damper for vibration mitigation", *Engineering Structures*, 220, p.110920.
- [19] Bekdaş, G., and Nigdeli, S.M. (2011), "Estimating optimum parameters of tuned mass dampers using harmony search", *Engineering Structures*, 33(9), pp.2716-2723.
- [20] Hoang, N., Fujino, Y., and Warnitchai, P. (2008), "Optimal tuned mass damper for seismic applications and practical design formulas", *Engineering Structures*, 30(3), pp.707-715.
- [21] Rana, R., and Soong, T.T. (1998), "Parametric study and simplified design of tuned mass dampers", *Engineering Structures*, 20(3), pp.193-204.
- [22] Xu, S., Fang, G., Zhang, M., Øiseth, O., Zhao, L., and Ge, Y. (2023), "Optimization of tuned mass dampers for multiple mode vortex-induced vibration mitigation in flexible structures: An application to multi-span continuous bridge", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 205, p.110857.
- [23] Gavgani, S.A.M., Jalali, H.H., and Farzam, M.F. (2021), "Semi-active control of jacket platforms under wave loads considering fluid-structure interaction", *Applied Ocean Research*, 117, p.102939.
- [1] Altay, O., and Klinkel, S. (2018), "A semi-active tuned liquid column damper for lateral vibration control of high-rise structures: theory and experimental verification", *Structural Control and Health Monitoring*, 25(12), p.e2270.
- [2] Wang, W., and Wang, X. (2023), "Seismic behaviour of structures under long-duration ground motions: A review", In *Structures*, Vol. 54, pp.1224-1236
- [3] López-Castañeda, A.S., Reinoso, E., and Martín del Campo, J.O. (2022), "Influence of site-specific strong-motion duration on structural performance", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(13), pp.7047-7075.
- [4] Cimellaro, G.P., Marasco, S., Cimellaro, G.P., and Marasco, S. (2018), "Tuned-mass dampers", *Introduction to Dynamics of Structures and Earthquake Engineering*, pp.421-438.
- [5] Bosco, M., and Tirca, L. (2023), "A novel design criterion for I-shape beams of steel MRF buildings in subduction-zone earthquake-prone areas", In *Structures*, Vol. 48, pp. 2098-2115.
- [6] Makris, N. (2019), "Seismic isolation: Early history", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 48(2), pp.269-283.
- [7] Yang, T.Y., Xu, H.C. and Tobber, L. (2020), "Mechanism and experimental validation of innovative self-centering conical friction damper", *Structural Control and Health Monitoring*, 27(10), p.e2609.
- [8] Xu, Z.D., Gai, P.P., Zhao, H.Y., Huang, X.H., and Lu, L.Y. (2017), "Experimental and theoretical study on a building structure controlled by multi-dimensional earthquake isolation and mitigation devices", *Nonlinear Dynamics*, 89, pp.723-740.
- [9] Kareem, A., Kijewski, T., and Tamura, Y. (1999), "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications", *Wind and Structures*, 2(3), pp.201-251.
- [10] Constantinou, M.C., Soong, T.T., and Dargush, G.F. (1998), "Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit", *MCEER*.
- [11] Elias, S., and Matsagar, V. (2017), "Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers", *Annual Reviews in Control*, 44, pp.129-156.
- [12] Housner, G., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F., and Yao, J.T. (1997), "Structural control: past, present, and

- [36] Sayar, B.A., and Baumgarten, J.R. (1982), "Linear and nonlinear analysis of fluid slosh dampers", *AIAA Journal*, 20(11), pp.1534-1538.
- [37] Rozas, L., Boroschek, R.L., Tamburrino, A., and Rojas, M. (2016), "A bidirectional tuned liquid column damper for reducing the seismic response of buildings", *Structural Control and Health Monitoring*, 23(4), pp.621-640.
- [38] Mendes, M.V., Ribeiro, P.M.V., and Pedrosa, L.J. (2019), "Effects of soil-structure interaction in seismic analysis of buildings with multiple pressurized tuned liquid column dampers", *Latin American Journal of Solids and Structures*, 16, p.e225..
- [39] Shah, M.U., and Usman, M. (2022), "An experimental study of tuned liquid column damper controlled multi-degree of freedom structure subject to harmonic and seismic excitations", *Plos one*, 17(6), p.e0269910.
- [40] Pandey, D.K., Mishra, S.K., and 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), p.e1928.
- [41] Aydemir, M.C., Damcı, E., Taşkın, Y., and Şekerci, Ç. (2024), "Comparison of the Dynamic Characteristics of Tuned Liquid Column Dampers with Different Elbow Forms", *Turkish Journal of Civil Engineering*, 35(6).
- [42] Ashasi Sorkhabi, A., Qiu, B., and Mercan, O. (2024), "Investigating Large-Scale Tuned Liquid Dampers through Real-Time Hybrid Simulations", *Buildings*, 14(7), p.2017.
- [43] Ding, H., Zhang, J., and Wang, J.T. (2025), "Generalized Mathematical Modeling of Tuned Liquid Column Dampers Under Varying Excitation Amplitudes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- [44] Saoka, Y., Sakai, F., Takaeda, S., and Tamaki, T. (1988), "On the suppression of vibrations by tuned liquid column dampers", In *Annual Meeting of JSCE. Japan Society of Civil Engineers Tokyo, Japan*.
- [45] Sakai, F. (1989), "Tuned liquid column damper-new type device for suppression of building vibration", In *Proceedings of International Conference on High-rise Buildings*, pp.926-931.
- [46] Gao, H., Kwok, K.C.S., and Samali, B. (1997), "Optimization of tuned liquid column dampers", *Engineering Structures*, 19(6), pp.476-486.
- [24] Sardar, R., and Chakraborty, S. (2022), "Wave vibration control of jacket platform by tuned liquid dampers", *Ocean Engineering*, 247, p.110721.
- [25] Mohasel, M.H., Mostafa Gharabaghi, A.R., and Chenaghlo, M.R. (2023), "Presenting an Optimal Design Procedure for a Variety of TLCs to Improve the Seismic Response of Offshore Platforms", *Computational Engineering and Physical Modeling*, 6(3), pp.1-26.
- [26] Leng, D., Lv, P., Zhu, Z., Li, Y., and Liu, G. (2024), "Experimental study on semi-active magnetorheological elastomer based isolation system for offshore platform using wave tank", *Ocean Engineering*, 292, p.116467.
- [27] Mohasel, M., Mostafa Gharabaghi, A.R., and Chenaghlo, M.R. (2024), "Comparative Analysis of Distorted Froude and Equivalent Single Degree of Freedom Models in Offshore Jacket Platform Seismic Simulation", *International Journal Of Coastal, Offshore And Environmental Engineering (ijcoe)*.
- [28] Ding, H., Ma, R., Wang, J., Bi, K., Fang, X., and Song, J. (2025), "Using tuned liquid column dampers (TLCs) for heave motion mitigation of very large floating structures (VLFSs)", *Ocean Engineering*, 321, p.120391.
- [29] Mohasel, M.H., Mostafa Gharabaghi, A.R., and Chenaghlo, M.R. (2023), "Presenting an Optimal Design Procedure for a Variety of TLCs to Improve the Seismic Response of Offshore Platforms", *Computational Engineering and Physical Modeling*, 6(3), pp.1-26.
- [30] Bauer, H.F. (1984), "Oscillations of immiscible liquids in a rectangular container: a new damper for excited structures", *Journal of Sound and Vibration*, 93(1), pp.117-133.
- [31] Carrier, G.F., and Miles, J.W. (1960), "On the annular damper for a freely precessing gyroscope".
- [32] Vern, S., Shrimali, M.K., Bharti, S.D., and Datta, T.K. (2022), "Optimum Seismic Control and Safety Measures in Liquid Storage Tanks by the Amalgamation of Different Passive Control Devices", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 36(3), p.04022026.
- [33] Sayar, B.A., and Baumgarten, J.R. (1981), "Pendulum analogy for nonlinear fluid oscillations in spherical containers".
- [34] Lee, S.C. and Reddy, D.V., 1982. Frequency tuning of offshore platforms by liquid sloshing. *Applied ocean research*, 4(4), pp.226-231.
- [35] El-Sherif, F.S., Farghaly, S.H., Farghaly, M.H., and El-Mandy, T.H. (1985), "Analysis of fluid sloshing in tanks for vibration control", In *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation*

- [47] Al-Saif, K.A., Aldakkan, K.A., and Foda, M.A. (2011), "Modified liquid column damper for vibration control of structures", *International Journal of Mechanical Sciences*, 53(7), pp.505-512.
- [48] Reiterer, M., and Ziegler, F. (2006), "Control of pedestrian-induced vibrations of long-span bridges", *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*, 13(6), pp.1003-1027.
- [49] Wang, L., Bergua, R., Robertson, A., Wright, A., Zalkind, D., Fowler, M., Lenfest, E., Viselli, A., Goupee, A., and Kimball, R. (2024), "Experimental investigation of advanced turbine control strategies and load-mitigation measures with a model-scale floating offshore wind turbine system", *Applied Energy*, 355, p.122343.
- [50] Den Hartog, J.P. (1985), "Mechanical vibrations.", Courier Corporation.
- [51] Watkins, R.D. (1991), "Tests on various arrangements of liquid column vibration absorbers", *NASA STI/Recon Technical Report N*, 92, p.26506.
- [52] Hokmabady, H., Mohammadyzadeh, S., and Mojtahedi, A. (2019), "Suppressing structural vibration of a jacket-type platform employing a novel Magneto-Rheological Tuned Liquid Column Gas Damper (MR-TLCGD)", *Ocean Engineering*, 180, pp.60-70.
- [53] Zhu, F., Wang, J.T., Jin, F., and Lu, L.Q. (2016), "Seismic performance of tuned liquid column dampers for structural control using real-time hybrid simulation", *Journal of Earthquake Engineering*, 20(8), pp.1370-1390.

