

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

محمدحسین محصل<sup>۱</sup>، احمدرضا مصطفی قره‌باغی<sup>۲\*</sup>، محمدرضا چناقلو<sup>۲</sup>

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، ال‌سنترو 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، TCGD، 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. Chenaghlu

### 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, TCGD, and LCVA compared to TLCD and VTLCD.

### Keywords

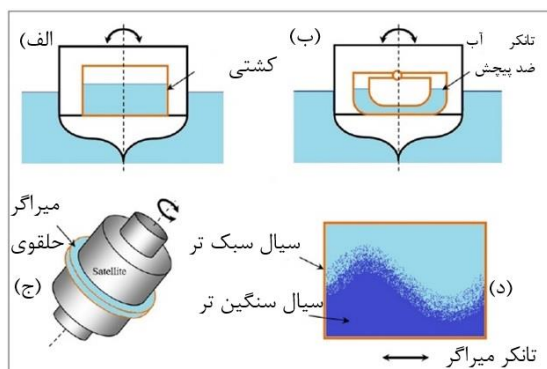
TLCD, Vibration Control, Reduced Response, Efficiency Coefficient



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

در مطالعه دینگ<sup>۵</sup> و همکاران [۲۸] امکان استفاده از میراگرهای ستون مایع تنظیم‌شده غیر غوطه‌ور (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 ضد پیچش در کشتی، (ب) تانکر ضد پیچش 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<sup>۶</sup> و میتومه<sup>۷</sup> 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) 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<sup>۲</sup> [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 نشان دادن TLD به‌عنوان یک سیستم جرم فنری، 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<sup>۳</sup> و همکاران [۲۶] مطالعه تجربی بر روی یک سیستم جداسازی هوشمند با استفاده از الاستومر مغناطیسی (MRE)<sup>۴</sup> 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

<sup>5</sup> Ding  
<sup>6</sup> Vandiver  
<sup>7</sup> Mitome

<sup>1</sup> Magneto-Rheological  
<sup>2</sup> Chakraborty  
<sup>3</sup> Dingxin  
<sup>4</sup> Magneto-Rheological Elastomer

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

**لی**<sup>۳</sup> و **ردی**<sup>۴</sup> 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**<sup>۵</sup> میراگری را طراحی کرد که شامل یک ظرف مستطیلی شکل بود که کاملاً با دو مایع مخلوط‌نشده پر شده بودند [۳۰] (شکل (۱-د)).

**السيف**<sup>۶</sup> 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**<sup>۷</sup> و **همکاران** [۳۷] یک TLD دوطرفه (BTLCD) پیشنهاد کردند که به‌عنوان دو TLCD 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**<sup>۸</sup> و **همکاران** [۳۸] با استفاده از TLDهای تحت فشار (PTLCDs) نشان دادند که سختی خاک به‌شدت بر راندمان 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**<sup>۹</sup> [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**<sup>۱۰</sup> 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**<sup>۱۱</sup> و **همکاران** [۴۱] اشکال مختلف زانو را در TLCD 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 TLCD 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 TLCD ایجاد کردند که نفوذ گاز را در دامنه‌های تحریک بالا به حساب می‌آورد و کاربرد مدل کلاسیک TLCD را افزایش می‌دهد. این مدل به درک ویژگی‌های اتلاف انرژی و راندمان 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

<sup>9</sup> Osman

<sup>10</sup> Pandey

<sup>11</sup> Aydemir

<sup>1</sup> Sayar

<sup>2</sup> Baumgarten

<sup>3</sup> Lee

<sup>4</sup> Reddy

<sup>5</sup> Bauer

<sup>6</sup> Al-Saif

<sup>7</sup> Rozas

<sup>8</sup> Mendes



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

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

در معادله (1)،  $L_c$  طول کل ستون مایع است.

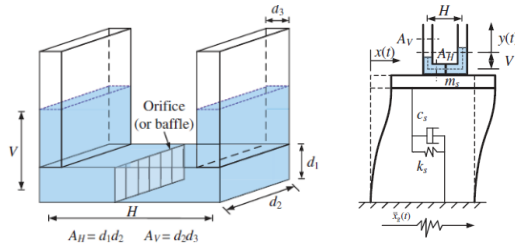
برای مزایای میراگر TLCSD می توان به موارد زیر اشاره نمود:  
 الف) با در نظر گرفتن مقدار معینی از مایع، میراگر TLCSD نسبت به TLD بازده حجمی بالاتری دارد، (ب) میراگر TLCSD به طور مداوم در بازه وسیعی از سطوح ارتعاش عمل می کند، (ج) میراگر TLCSD دارای یک مکانیسم میرایی بسیار واضح و متمایز است که با این مکانیسم می توان مقادیر میرایی را به روشی خاص محاسبه کرد، (د) از آب داخل میراگر می توان به عنوان سیستم اطفای حریق نیز استفاده نمود و در نهایت، (ه) با تغییر طول ستون مایع، فرکانس طبیعی میراگر TLCSD را می توان به راحتی کنترل کرد. باین حال، میراگر TLCSD متداول دو محدودیت اصلی دارد؛ اول، عملکرد میراگر TLCSD متداول یک جهته است، در حالی که سازه باید در امتداد دو جهت اصلی عمل کند. دوم، از آنجایی که میراگر TLCSD 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 می شود که اجرای آن عملاً غیرممکن است. تلاش های پژوهشی قابل توجهی برای غلبه بر معایب میراگر TLCSD معمولی انجام شده است و در نتیجه، برخی اشکال خاص از میراگر TLCSD توسعه یافته اند. همچنین، برخی از تغییرات میراگر TLCSD متداول برای افزایش بیش تر عملکرد دینامیکی، انعطاف پذیری بیش تر در طراحی آن و ایجاد سازگاری بهتر از لحاظ معماری می باشد. این پیکربندی های اصلاح شده در میراگر TLCSD، میراگر ستون مایع شکل [46]، میراگر ستون مایع با مقطع متغیر [46] (LCVA)، میراگر ستون مایع توپک دار (TLCBD) [47] و میراگر ستون مایع گازی یا دارای فنر (TLCGD) [48] را در بر می گیرد.

## ۲-۱- معادلات حاکم بر حرکت سیستم

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

کوچک تر از طول افقی میراگر است. معادله حرکت سیستم سازه-TLCD تحت بار زلزله را می توان از طریق فرمول لاگرانژ سیستم های دینامیکی به صورت زیر نوشت [46]:

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



شکل ۲- میراگر ستون مایع تنظیم شده (TLCSD) [49]

که در رابطه (۲)،  $m_s$  جرم سازه،  $m_d$  جرم میراگر،  $\alpha$  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،  $x$  جابه جایی سازه،  $y$  جابه جایی سیال و  $\ddot{x}_g$  شتاب افقی حرکت زمین می باشد. غیرخطی بودن واقعی ناشی از میرایی مرتبه دوم در معادله حرکت TLCSD به صورت زیر است:

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

در معادله (۳)،  $\rho$  چگالی سیال،  $A$  سطح مقطع میراگر و  $\xi$  ضریب افت هد میراگر است. از آنجایی که  $C_d$  در رابطه (۳) به شدت غیرخطی است، روش بهینه سازی پیشنهاد شده توسط دن هارتوگ<sup>۱</sup> [50] در معادله (۴) برای به دست آوردن شکل خطی  $C_d$  و  $k_d$  اعمال می شود. در نهایت،  $C_d$  و  $k_d$  در معادله (۲) را می توان 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 به دست آورد.

$$\begin{aligned} \mu^* &= \frac{\mu \alpha_1 \alpha_2}{1 + \mu(1 - \alpha_1 \alpha_2)} \\ f^* &= \frac{f_s}{1 + \mu^*} \\ \zeta^* &= \sqrt{\frac{3\mu}{8\mu(1 + \mu^*)^3}} \end{aligned} \quad (4)$$

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

<sup>1</sup> Den Hartog



جدول ۱- انواع میراگر TLCDC

شماره میراگر	نام میراگر	شکل شماتیک	اولین محقق	مزایا	معایب
T1	میراگر ستون مایع تنظیم شده U شکل متداول (U-TLCD)		ساکایی <sup>۱</sup> 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 <sup>۲</sup> و هیچکاک <sup>۳</sup> در سال ۱۹۹۱ [۵۱]	علاوه بر مزایای میراگر T1 پوشش فرکانس های بالا	ندارد
T3	میراگر ستون مایع V شکل (V-TLCD)		گائو <sup>۴</sup> 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) (TLGGD)		زیگلر <sup>۵</sup> و هورچرینر <sup>۶</sup> 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 TLGGD 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 TLCDC تحت تحریک زلزله نوشته شد. در این بخش برای بررسی عملکرد لرزه ای انواع TLCDC، 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 TLCDC، از تحقیق آزمایشگاهی ژو<sup>۷</sup> و همکاران استفاده شد [۵۳]. آن ها در مطالعه خود برای

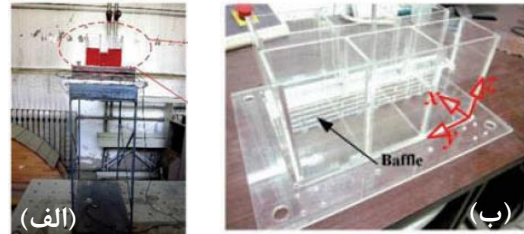
معادلات حرکت سیستم مجهز به میراگرهای اشاره شده در جدول (۱)، در مراجع ذکر شده آن ها، ارائه شده است. مهم ترین مسئله در مورد میراگرهای TLCDC، پوشش فرکانسی محدود آن ها می باشد. یعنی زمانی که فرکانس اصلی سازه بین صفر تا ۰/۵ هرتز باشد می توان به صورت منطقی این میراگرها را طراحی نمود. اما زمانی که فرکانس اصلی 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- صحت سنجی

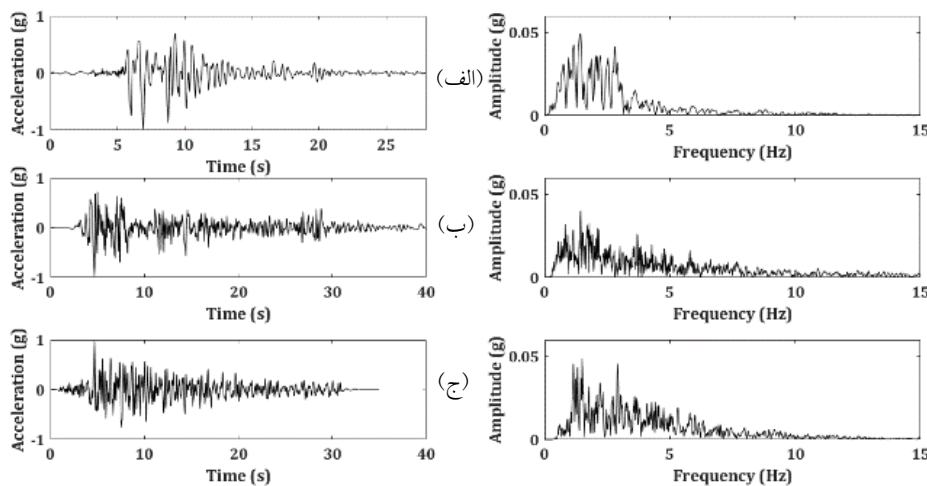
برای تعریف سازه اصلی از مدل تحقیق آزمایشگاهی ژو و همکاران استفاده شد [۵۳]. یک سازه فولادی یک درجه آزادی (SDOF) ساخته شده در آزمایشگاه دانشگاه Tsinghua به عنوان سازه اصلی در نظر گرفته شده است. همان طور که در جدول (۲) نشان داده شده است، این سازه به صورت یک سیستم جرم-میراگر ساده شده است و پارامترهای سازه 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 می شود (شکل ۳-ب). تاریخچه زمانی و طیف فوریه زلزله های کوبه، الاسترو و تفت در شکل (۴) ارائه شده است.

مدل سازی سیستم از روش شبیه سازی ترکیبی زمان واقعی (RTHS) استفاده کردند. در این روش سازه واقعی به صورت عددی در نرم افزار متلب شبیه سازی 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 یک طرفه دارد، با کنترل جابه جایی، حرکت جانبی را به میراگرها اعمال می کند.



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

شماتیک TLCSD [۵۳]



شکل ۴- تاریخچه زمانی و طیف فوریه شتاب زلزله های 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 لرزه ای، RMS شتاب و جابه جایی یک پارامتر استاندارد یا قابل تفسیر مستقیم در مهندسی سازه نیست. با این حال، بر اساس اصول استنباط شده از مطالعات لرزه ای و زمینه های تحقیقاتی ارائه شده، ترکیبی از پیامدهای بالقوه آن است. RMS شتاب یا جابه جایی، مقدار کمی میانگین شدت حرکت زمین در طول زمان است. این پارامتر به ارزیابی پتانسیل آسیب تجمعی، به ویژه برای سازه های انعطاف پذیر حساس به لرزش طولانی مدت کمک می کند.

چهار معیار که با ضرایب کارایی مشخص می شوند، 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 می شوند.

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

که در رابطه (۵)، (x) و (x-dot) به ترتیب جابه جایی و شتاب سازه می باشد. همچنین اندیس های max بیانگر مقدار حداکثر متغیر،

جدول ۲- مشخصات فنی سازه اصلی [۵۳]

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

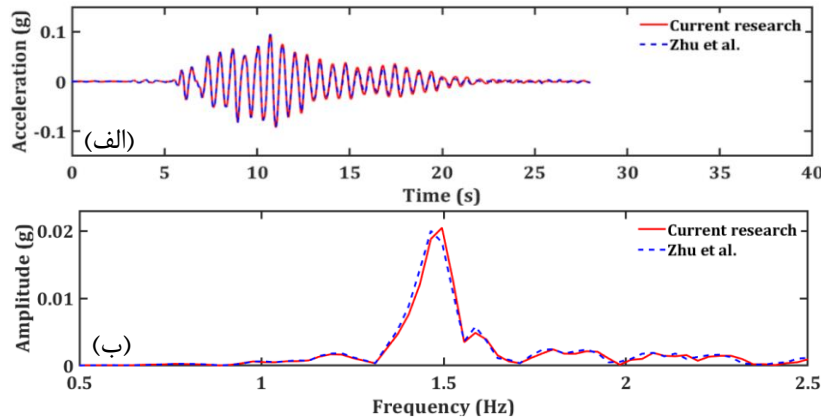
جدول ۳- مشخصات فنی یک میراگر [۵۳]

$f_i$ (Hz)	$A_v$ (m <sup>2</sup> )	$A_H$ (m <sup>2</sup> )	$d_3$ (m)	$d_2$ (m)	$d_1$ (m)	$V$ (m)	$H$ (m)	$\mu$ (%)
۱/۵۲۷	۰/۰۰۷۳۴	۰/۰۰۷۳۴	۰/۰۷۳۴	۰/۱	۰/۰۷۳۴	۰/۰۵۱	۰/۱۱۱	۰/۷۹

### ۲-۳- 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

باشند. طبق شکل (۴)، زلزله‌های کوبه و تفت، زلزله حوزه دور و زلزله الاسترو، زلزله حوزه نزدیک هستند. برای این که سازه تحت بارگذاری لرزه‌ای در محدوده خطی قرار گیرد، مقدار حداکثر شتاب‌های زمین به مقادیر ۰/۲۵g مقیاس شد. برای صحت‌سنجی کدهای نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب، تاریخچه زمانی و طیف فوریه پاسخ شتاب-شتاب سازه در تحقیق ژو و همکاران [۵۳] و تحلیل عددی انجام‌شده در این مقاله تحت تحریک زلزله کوبه در شکل (۵) و جدول (۴) مقایسه شد.



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

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

جدول ۴- مقایسه ضرایب کارایی میراگرها

مطالعات	$R_a$	$R_d$	$P_a$	$P_d$
تحقیق حاضر	۳۱/۵۱	۳۱/۱۱	۱۹/۱۶	۱۱/۲۹
تحقیق ژو و همکاران [۵۳]	۳۰/۲۳	۲۹/۴۱	۱۸/۳۷	۱۰/۸۵
اختلاف نتایج (%)	۴/۲۳	۵/۷۸	۴/۳	۴/۰۵

### ۴- نتایج و بحث

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

مطالعه، جابه‌جایی و شتاب سازه با و بدون سیستم میراگر با تحلیل تاریخچه زمانی خطی در مدول سیمولینک نرم‌افزار متلب اندازه‌گیری و با تعیین ضریب کارایی، عملکرد هر کدام از میراگرها برای بهبود پاسخ سازه بررسی و تحلیل شد. سیستم سازه‌ای استفاده‌شده برای این تحقیق، مدل به‌کاررفته در تحقیق ژو و همکاران [۵۳] می‌باشد (جدول (۲)). برای تحریک خارجی از رکوردهای ارائه‌شده در بند ۳-۱ (شکل (۴)) استفاده شد که برای قرارگیری سازه در محدوده خطی تحت بارگذاری لرزه‌ای، مقدار حداکثر شتاب‌های زمین برای هر سه رکورد، به مقادیر ۰/۲۵g مقیاس شدند.

#### ۴-۱- مدل‌سازی میراگرها

به‌منظور مقایسه بهتر و دقیق‌تر، نسبت جرم  $\mu$  و نسبت طول  $\alpha$  (به ترتیب برابر با ۰/۰۲۳۷ و ۰/۵۲) برای همه TLCDها یکسان در

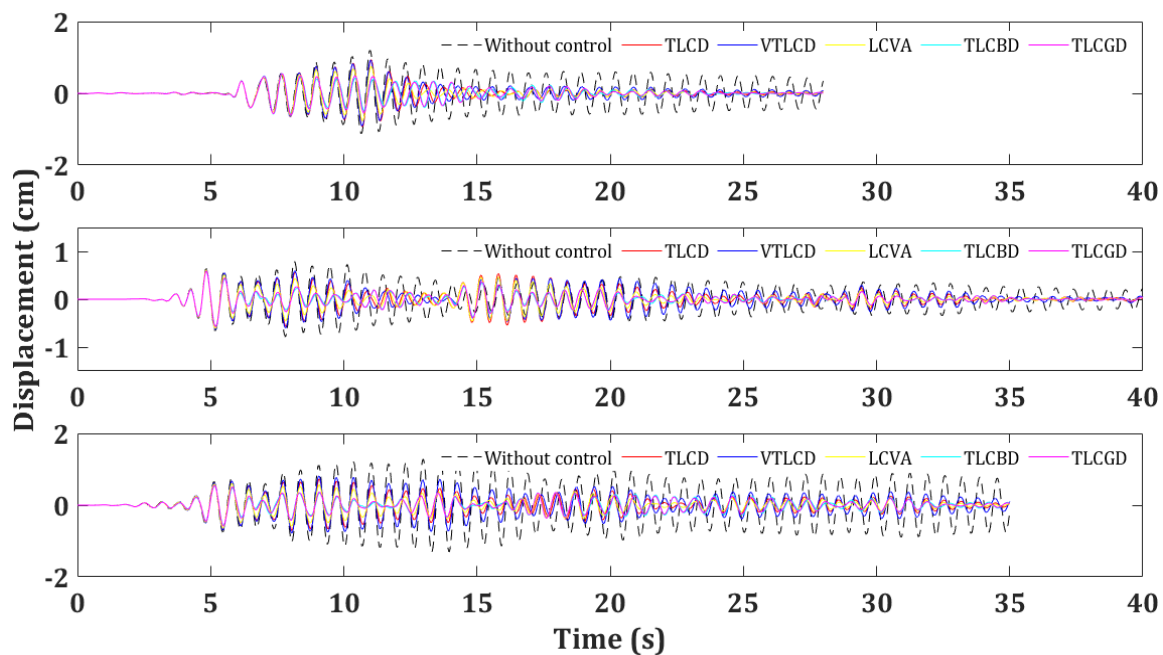
#### ۴-۲- تاریخچه زمانی پاسخ سازه

برای نسبت جرمی ۰/۲۳۷ 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، ال‌سنتر 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، به ترتیب T4، T5، 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 به صورت کمی کنترل نمود.

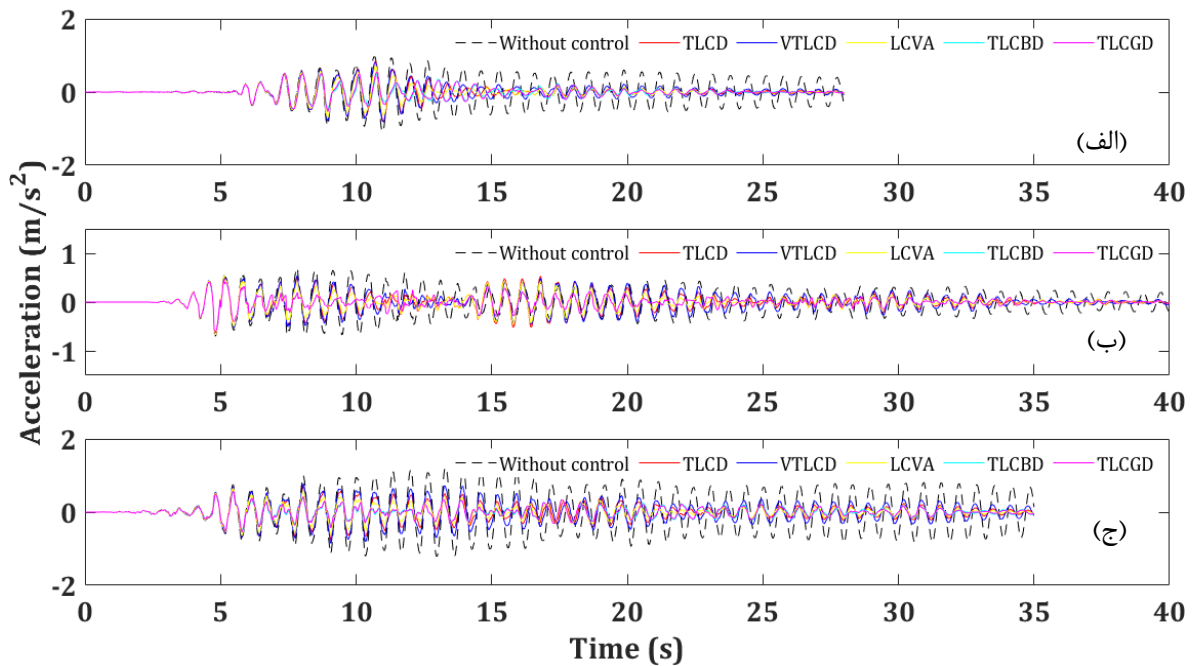
نظر گرفته شد. فرکانس  $f^*$  و ضریب میرایی  $\zeta^*$  میراگرها از پارامترهای بهینه ارائه‌شده توسط **دن هارتوگ** که در بخش ۲-۲ و معادلات (۴) به آن‌ها اشاره شد، محاسبه گردید. زاویه شیب برای V-TLCD، ۶۰ درجه است. نسبت مساحت بخش قائم به بخش افقی میراگر (u)، برای همه میراگرها برابر واحد و برای میراگر LCVA 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 <sub>H</sub> (m <sup>2</sup> )	f <sub>r</sub> (Hz)	$\zeta_d$
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) ال‌سنتر و ج) تفت



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

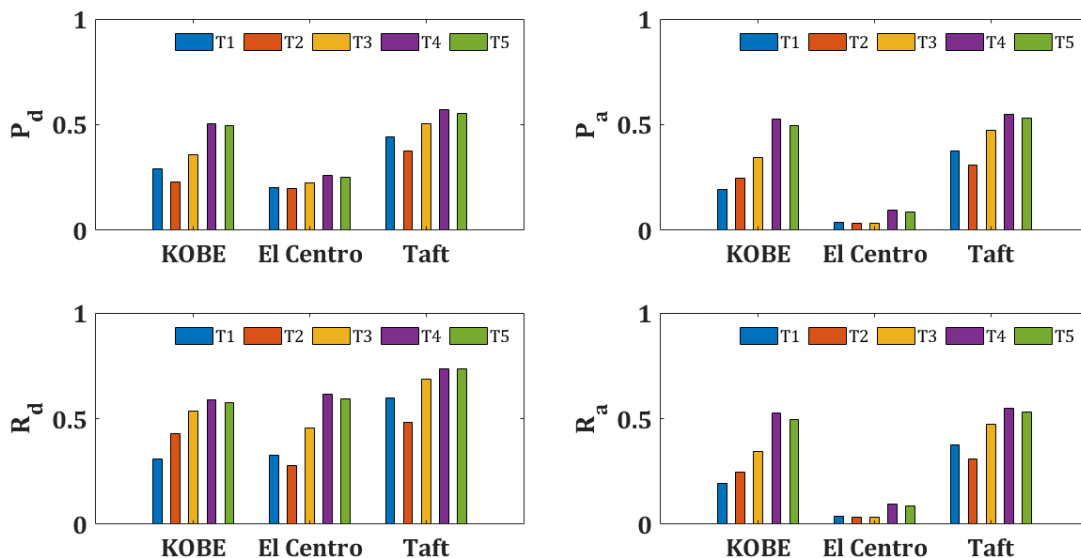
#### ۳-۴- کارایی میراگرها

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 به ترتیب برای میراگرهای T4، T3، T5، T1 و T2 می‌باشد. بهترین عملکرد برای کاهش پاسخ حداکثر شتاب سقف سازه به ترتیب برای میراگرهای T4، T5، T1، T3 و T2 هستند.

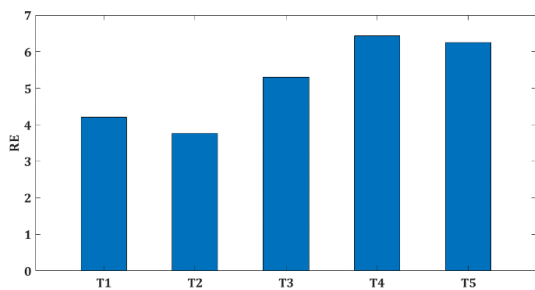
همچنین بهترین عملکرد برای کاهش ریشه میانگین مربعات جابه‌جایی سقف و شتاب سازه نیز به ترتیب برای میراگرهای T4، T5، T3، T1 و T2 می‌باشد.

جدول ۶- ضرایب کارایی میراگرها

نام میراگر	کوبه				الاسترو				تفت			
	(%) R <sub>a</sub>	(%) R <sub>d</sub>	(%) P <sub>a</sub>	(%) P <sub>d</sub>	(%) R <sub>a</sub>	(%) R <sub>d</sub>	(%) P <sub>a</sub>	(%) P <sub>d</sub>	(%) R <sub>a</sub>	(%) R <sub>d</sub>	(%) P <sub>a</sub>	(%) P <sub>d</sub>
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



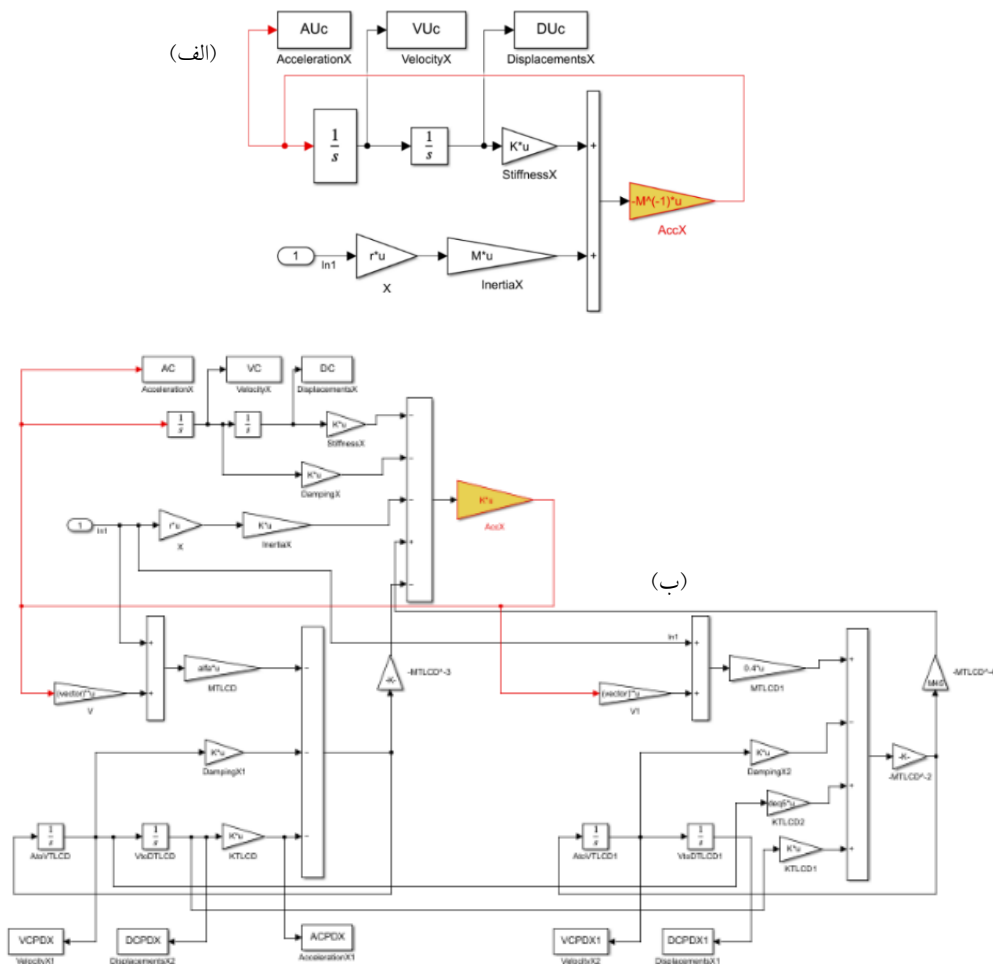
شکل ۹- ضرایب کلی کارایی میراگرها

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 استفاده‌شده 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، ال‌سنترو 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- نتیجه گیری

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 نرم افزار 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 به طور جداگانه بر روی مدل سازه تعریف شده در بخش ۴ نصب شدند و مجموعه‌ای از تحلیل‌های عددی برای مطالعه رفتار لرزای آنها تحت زلزله‌های کوبه، ال‌سترو و تفت انجام شد.

تاریخچه زمانی پاسخ جابه‌جایی و شتاب سازه با و بدون میراگرها به صورت کیفی در شکل‌های (۶) و (۷)، و کارایی میراگرها هم به صورت کمی و کیفی در جدول (۶) و شکل (۸) ارائه گردید. همان‌طور که مشاهده شد، طبق شکل‌های (۶) الی (۸)، میراگرهای TLCGD، TLCBD 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؛ در VTLCD در حدود ۳/۷۷؛ در LCVA در حدود ۵/۳؛ در 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 نشستی 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., Khezzzadeh, 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] Gavvani, 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 Chenaghloou, 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 Chenaghloou, M.R. (2024), "Comparative Analysis of Distorted Froudean 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 Chenaghloou, 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.

