



Comparison of seismic performance of variably baffled TLD and the optimal TMD

Saeed Abbasi¹, Akbar Bathaei², Seyed Mehdi Zahrai^{2*}

¹School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

²School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT: In this study, to improve the efficiency of TLD, a Variably Baffled Tuned Liquid Damper (VBTLTD) has been used. The baffles are so that they divide the tank into three equal parts when they are fully closed. Furthermore, when they are open or partially closed, they can serve as some obstacles and improve the energy dissipation parameters. When this damper meets an excitation with a specific frequency, the baffles can be tuned to make the frequency of sloshing equal to that frequency. VBTLTD used in this paper could be set for the frequency range from 1.73 to 3 times of a specific frequency. Compared to a simple TLD, VBTLTD can be tuned to a range of frequencies to improve the performance of structure against external excitation. At first, the benchmark building was modeled in OpenSees, then the performance of the device was verified by previous test results. To examine the performance of VBTLTD, Tuned Mass Damper (TMD) with optimal parameters was used in this study. Results showed that when the baffles are at the best angle, VBTLTD with water depths of 42 mm has maximum response reduction for the numerical model subjected to the Kobe earthquake at intensities of 2, 4, 6, and 8% of the initial maximum acceleration of the earthquake (PGA=0.87g). The improvement of structural behavior compared to the optimal mass damper at maximum acceleration are respectively 23.1, 22, 14.6, and 10.5%, while for damper with water depths of 63 mm, they are respectively 8.17, 9.5, 6.7 and 6.8%.

Review History:

Received: 2018-10-22

Revised: 2018-11-06

Accepted: 2018-12-11

Available Online: 2018-12-22

Keywords:

Seismic behavior

Tuned Liquid Dampers (TLD)

Rotatable baffles

Tuned Mass Damper (TMD)

1. INTRODUCTION

Vibration control of structures against periodic loads such as wind, earthquake, and traffic can be performed using passive, semi-active and active control systems. Tuned liquid damper (TLD) is often utilized as a passive control system to mitigate the structural vibrations. Common TLDs should be tuned with the main frequency of structure in the first mode because it is not possible to change the characteristics of TLD during its performance. However, in this research, the new system of Variably Baffled Tuned Liquid Damper (VBTLTD) is utilized.

The liquid in TLDs produces the damping and control forces via i-laminar and turbulent movement of fluid ii-colliding with the tank walls, making a pressure difference and wave breaking, which results in an extra shear force on the tank bottom. The resultant force is applied to the structure opposite to the vibration direction. While in tuned mass dampers, the mass inertial force is the only deterrent force against the structural movement. Installation of baffles inside the TLD tank will change the fluid traveling time in the tank. Also, the baffles act as some obstacles and increase the energy dissipation.

In this paper, a new kind of TLD equipped with rotatable baffles was compared to an equivalent tuned mass damper.

*Corresponding author's email: mzahrai@ut.ac.ir

The TLD has eight vertical baffles which can be fixed at desired angles. The eight baffles are ordered at two rows each contains four baffles. Also, the baffles are flat, smooth and rigid and are installed to balance the damper's frequency to counteract the structural vibrations at various frequencies. Figure 1 shows the new system of variably baffled tuned liquid damper (VBTLTD).

2. MODELING OF THE STRUCTURE AND NUMERICAL STUDIES

To investigate the baffled liquid damper performance, an equivalent tuned mass damper is utilized. One of the common methods of passive structural control against earthquake and other excitations is to use tuned mass damper systems. These dampers consist of three parameters of mass, damping, and stiffness. Tuned mass dampers often reduce the amplitude of the responses via affecting a single mode, which is usually the first mode. As the parameters of tuned mass dampers are constant during the vibration, it is important to tune them accurately [2]. To find the optimized values for the parameters of tuned mass dampers using numerical models, numerous dynamic analyses are needed. So, the volume of essential calculations is very large! In this research, some relations which are emphasized in previous studies are utilized to tune the values of damping and optimized frequency.



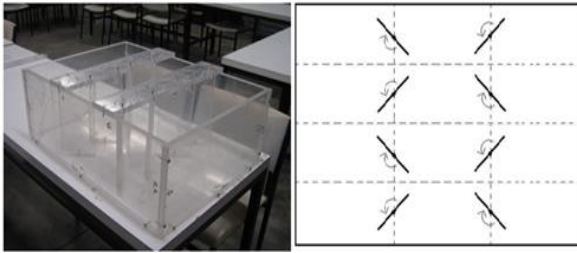


Fig. 1. The new system of variably baffled tuned liquid damper (VBTLTD) [1].

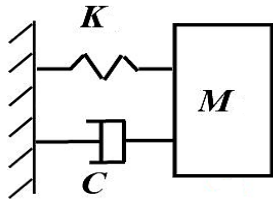


Fig. 3. The tuned mass damper modeled in the OpenSEES.



Fig. 2. The 5-story benchmark structure [3].

The mentioned damper was installed on a 5-story benchmark structure. The 5-story benchmark structure has been designed and manufactured by the Sydney University of Technology in Australia and is one of the reference models registered by the international association of structural control (IASC). The researchers set down their analytical and experimental algorithms on a benchmark structure and improved their findings by comparing them to each other. The structure's plan has 1.5 m length (2@0.75 m) and 1.0 m width (1@1.0 m). The beams are made of 75×75 mm² hollow box sections with a thickness of 4 mm. The columns are made of 25×25 mm² square steel sections. The 5-story benchmark structure is shown in Figure 2.

In performed experiments in the laboratory, the heights of stories were considered to be 0.72 m. The total mass of the structure without additional mass was 352.5 kg. The connections of the structure were pinned at 1th and 3rd stories and fixed at other stories. To adjust the vibration frequency of the structure, additional masses of 127 kg and 617 kg were added to the 4th and 5th stories, respectively.

3. MODELING OF THE TUNED MASS DAMPER

The viscose damping element was used to model the damping of the equivalent tuned mass damper in OpenSEES. Also, an element with elastic stiffness was used to model the stiffness, and the ZeroLength element was used to assign the damping and stiffness to the tuned mass damper on the roof. This element has connected the stiffness and damping of the tuned mass damper between the roof and the mass of tuned mass damper. The governing equations of mass dampers in MATLAB were utilized to validate the behavior of modeled tuned mass damper in OpenSEES with its real dynamic performance. Figure 3 shows the tuned mass damper modeled

in the OpenSEES.

4. EARTHQUAKE RECORD USED FOR TIME-HISTORY ANALYSIS

To investigate the seismic behavior of the structure equipped with VBTLTD, the structural model was subjected to the Kobe earthquake, Hanshin station, 1995. The Kobe earthquake was applied to the structure with PGA of 2%, 4%, 6%, and 8% of the main PGA. The performance of the structure equipped with VBTLTD under these excitations was compared to that of equivalent TMD at its optimum condition.

5. CONCLUSIONS

In this study, to improve the efficiency of TLD, a Variably Baffled Tuned Liquid Damper (VBTLTD) has been used. This damper is composed of a tank and eight rotatable baffles inside. The baffles are so that they divide the tank into three equal parts when they are fully closed. Furthermore, when they are open or partially closed, they can serve as some obstacles and improve the energy dissipation parameters. When this damper meets an excitation with a specific frequency, the baffles can be tuned to make the frequency of sloshing equal to that frequency.

To examine the performance of VBTLTD, Tuned Mass Damper (TMD) with optimal parameters was used in this study. Viscose and stiffness elastic elements respectively have been used for damping and stiffness of TMD modeling. To study the seismic performance of the structures equipped with VBTLTD and TMD, the Kobe earthquake record in Hanshin station was used.

Despite common TLDs, VBTLTD can be tuned at a frequency range of 1.73-3.00 Hz. The achieved results from excitation of such controlled structure show that utilizing

a damper with a water depth of 42 mm under PGA of 2%, 4%, 6% and 8% of the main PGA has reduced the structures displacement response by 23.1%, 22%, 14.6% and 10.5% respectively. These values for the damper with a water depth of 63 mm are 8.2%, 9.5%, 6.7% and 6.8%, respectively.

REFERENCES

[1] Zahrai, S.M., Abbasi, S., Samali, B. and Vrcelj, Z., (2012), Experimental investigation of utilizing TLD with baffles

in a scaled down 5-story benchmark building. *Journal of Fluids and Structures*, 28, pp.194-210.

[2] Chang, C., (1999), Mass dampers and their optimal designs for building vibration control. *Engineering Structures*, 21(5): pp. 454-463.

[3] Abbasi, S., (2012), Analytical and experimental study on effects of utilizing controllable baffles on performance of Tuned Liquid Damper, PhD Thesis, University of Tehran, May.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Abbasi, A. Bathaei, S.M. Zahrai, Comparison of seismic performance of variably baffled TLD and the optimal TMD, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(5) (2020) 265-268.

DOI: [10.22060/ceej.2018.15167.5842](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.15167.5842)





مقایسه تغییر مکان لرزه ای بام سازه پنج طبقه مجهز به میراگر مایع تنظیم شونده پره دار قابل دوران و میراگر جرمی تنظیم شونده بهینه

سعید عباسی^۱، اکبر بطهای^۲، سید مهدی زهرائی^{۲*}

^۱دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
^۲دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۷-۰۵
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۸-۱۷
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۹-۱۲
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۹-۲۴

کلمات کلیدی:

رفتار لرزه ای
میراگر مایع تنظیم شونده
پره های قابل دوران
میراگر جرمی تنظیم شونده

خلاصه: کنترل ارتعاشات سازه تحت اثر بارهایی نظیر باد، زلزله و ترافیک می تواند با استفاده از سیستم های کنترل غیرفعال، نیمه فعال، فعال و یا مرکب صورت گیرد. میراگر مایع تنظیم شونده معمولاً به صورت غیرفعال برای کنترل ارتعاشات سازه ها مورد استفاده قرار می گیرد. میراگرهای معمول و رایج مایع تنظیم شونده، به سبب عدم امکان تغییر مشخصات در خلال عملکرد صرفاً باید با فرکانس اصلی سازه در مد اول تنظیم گردند. برای غلبه بر این عیب اساسی در این تحقیق از یک سیستم جدید،^۱ VBTLD، میراگر مایع تنظیم شونده با پره های قابل دوران، استفاده شده است؛ که شامل مخزن میراگر به همراه هشت پره قابل تنظیم در داخل آن می باشد؛ که تحت اثر زلزله کوبه برای شتاب های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. به منظور بررسی تغییر مکان بام سازه مرجع پنج طبقه، از میراگر مایع تنظیم شونده و میراگر جرمی هم وزن معادل میراگر مایع، از نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی سازه پنج طبقه مرجع در نرم افزار^۲ OpenSEES بهره گرفته شده است. هدف از این بررسی مقایسه میراگر مایع پره دار با میراگر جرمی هم وزن خود در حالت بهینه می باشد. میراگر مایع تنظیم شونده با پره های قابل دوران می تواند به جای تنظیم در یک فرکانس خاص، در یک بازه فرکانسی بین ۱/۷۳ تا ۳/۰۰ برابر یک فرکانس خاص تنظیم شود. نتایج استخراج شده از تحریک لرزه ای سازه مجهز به میراگر پره دار نشان می دهد که استفاده از میراگر با عمق آب ۴۲ میلی متر پاسخ سازه را در برابر زلزله کوبه برای شدت های ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد شتاب اولیه این زلزله در مناسب ترین زاویه قرارگیری پره ها به ترتیب ۱/۲۳، ۲۲، ۱۴/۶ و ۱۰/۵ درصد نسبت به میراگر جرمی بهینه کاهش داده است؛ این مقادیر بهبود برای میراگر با عمق آب ۶۳ میلی متر به ترتیب ۸/۲، ۹/۵، ۶/۷ و ۶/۸ درصد می باشد.

- 1 Variably Baffled Tuned Liquid Damper
- 2 The Open System for Earthquake Engineering Simulation

۱-مقدمه

آزاد و شکست موج مستهلک می شود. نیروی کنترلی که در این سیستم برای کاهش ارتعاشات سازه مورد استفاده قرار می گیرد، عمدتاً ناشی از اختلاف فشار دینامیکی مایع مخزن روی سطح جداره های انتهایی مخزن می باشد. حرکت و تلاطم مایع موجب ایجاد تفاوت در رقوم سطح آزاد مایع در جداره های انتهایی مخزن می شود. اختلاف فشار ناشی از تفاوت رقوم سطح آزاد مایع در جداره های انتهایی به صورت یک نیروی برشی در کف مخزن ایجاد می شود که این نیرو بر

میراگرهای مایع تنظیم شونده^۱ یکی از میراگرهای مکانیکی غیرفعال^۲ می باشند؛ که به منظور کاهش ارتعاشات سازه ها از طریق حرکت سیال در داخل یک مخزن صلب طراحی می شوند. انرژی ارتعاشی به صورت اصطکاک در لایه های مرزی سیال، مشارکت سطح

- 1 Tuned Liquid Damper (TLD)
- 2 Passive

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mzahrai@ut.ac.ir



روی سازه‌ها، معمولاً در بام سازه‌ها یا نقاطی که بیشترین تغییرمکان را دارند، اعمال می‌گردد.

ساتو^۱ و نیز مودی^۲ و همکاران به ترتیب در سال‌های ۱۹۸۷ و ۱۹۸۸ از اولین محققانی بودند که کاربرد سیستم‌های میراگر مایع تنظیم‌شونده را برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها پیشنهاد نمودند [۱] و [۲]. استهلاک انرژی در آب ابتدا توسط رفتار ویسکوز لایه مرزی نزدیک به تراز کف و دیواره‌های مخزن و همچنین حرکت تلاطمی سطح آزاد آب صورت می‌گیرد [۳]. در میراگر مایع که عمق آب زیاد (عمیق) می‌باشد، به دلیل اینکه که قسمت اعظم آب در تلاطم و لذا در فرایند استهلاک انرژی شرکت نمی‌کند، میزان مشارکت آب در فرآیند میرایی کمتر از حالت میراگر مایع با عمق آب کم می‌باشد [۴].

در زمینه مستهلک نمودن انرژی محققینی همچون زهرائی و امیرزاده شمس در سال ۲۰۰۷ [۵]، محبی و شعبانی در سال ۲۰۱۷ [۶] و کردی و علامتیان در سال ۲۰۱۷ [۷] مطالعات ارزنده‌ای ارائه نمودند. لو^۳ و همکاران [۸] در سال ۱۹۹۴ یک سیستم نیمه‌فعال را برای میراگر مایع تنظیم‌شونده پیشنهاد کردند. در این سیستم یک پره در داخل میراگر مایعی قرار داده شده بود که تغییر موقعیت آن می‌توانست طول موثر میراگر را تغییر دهد. وانگ^۴ در سال ۲۰۰۶ نشان داد که میرایی بیش از حد یک سیستم از یک مقدار بهینه ممکن است به سوء عملکرد میراگر در کاهش بیشینه پاسخ منجر شود [۹]. گاردارسون^۵ در سال ۱۹۹۷ یک سیستم میراگر مایع تنظیم‌شونده با کف شیبدار را مورد بررسی قرار داد. او از این موضوع که موثر بودن یک ساحل شیبدار برای استهلاک انرژی موج کاملاً شناخته شده است، برای سیستم پیشنهادی خود ایده گرفت [۱۰].

رید^۶ و همکاران در سال ۱۹۹۸ نشان دادند که به دلیل رفتار غیرخطی، پاسخ حداکثر سیستم میراگر مایع تنظیم‌شونده در فرکانسی بزرگتر از فرکانس تخمین زده شده توسط تئوری خطی موج به وجود می‌آید و به همین دلیل میراگر مایع تنظیم‌شونده برای میرا نمودن انرژی در یک بازه وسیع فرکانسی عملکرد مطلوبی ندارد [۱۱]. یانگ کیوجو^۷ در سال ۲۰۰۴ به منظور بررسی رفتار میراگر مایع با پره‌های دنداندار،

- 1 Sato
- 2 Modi
- 3 Lou
- 4 Wang
- 5 Gardarson
- 6 Reed
- 7 Young-Kyu Ju

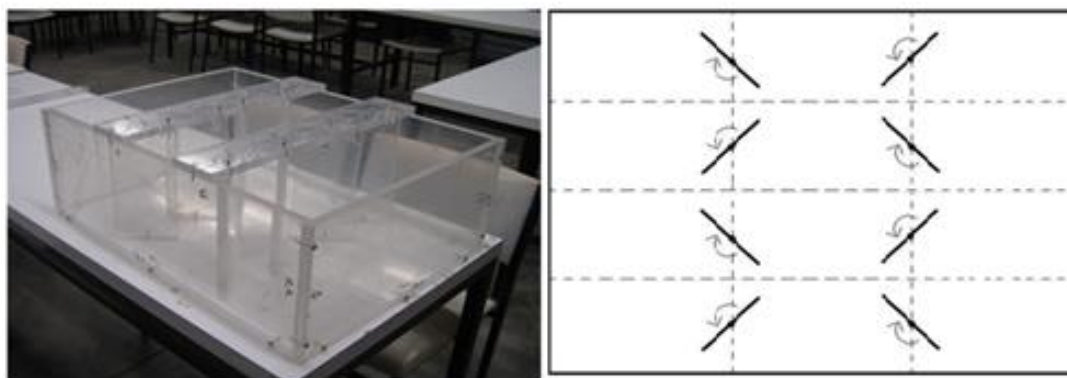
صفحات دنداندار در داخل میراگر مایع تنظیم‌شونده قرار دادند و از عملکرد مناسب این صفحات در میزان افزایش میرایی و کاهش پاسخ سازه‌ها گزارش نمودند [۱۲]. تایت^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۵ صفحات قائم و سوراخدار در داخل مخزن میراگر مایع تعبیه نمودند و تاثیر این صفحات در میرایی و عملکرد میراگر مایع را به صورت عددی بررسی نمودند [۱۳]. کی‌پیویو^۹ و همکاران در سال ۲۰۰۷ تاثیر موانعی مثلثی شکل بر میرایی یک میراگر مایع تنظیم‌شونده را بررسی کردند [۱۴].

در راستای استفاده از میراگر مایعی تنظیم‌شونده به عنوان میراگری که قابلیت سازگاری با شرایط مختلف را داشته باشد تعدادی از محققین فعالیت‌هایی در این زمینه انجام دادند؛ که از جمله آن می‌توان به کار تایت و دماستی اشاره کرد که به منظور افزایش میرایی سیستم در درون مخزن میراگر مایع تعدادی صفحه سوراخدار قرار دادند [۱۳]. لائو و تایت^{۱۰} در سال ۲۰۱۰ نیز طی کارهای متعدد تحقیقاتی اثرات حالات مختلف این صفحات سوراخدار را مورد بررسی قرار دادند که به عنوان نمونه می‌توان به شبیه‌سازی غیرخطی میراگر یاد شده اشاره کرد [۱۵].

میراگر مایع مورد استفاده در این مطالعه مخزن مستطیلی ساده با هشت پره قابل تنظیم می‌باشد؛ که تا ارتفاع ۴۲ و ۶۳ میلی‌متر با آب پر شده است (شکل ۱). این میراگر برای اولین بار توسط زهرائی و همکاران در سال ۲۰۱۲ پیشنهاد شده و مورد آزمایش قرار گرفت [۱۶]. پره‌های قابل دوران به این منظور به این میراگر اضافه شده‌اند که قابلیت توازن بیشتری به میراگر مایع معمولی بدهند. در عین حال به دلیل افزایش مساحت تماس سیال و مخزن و انحنای اجباری خطوط جریان در حالت پره‌های نیمه بسته، توانایی بیشتری در اتلاف انرژی دارد.

ژنگ^{۱۱} و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۱۷] با استفاده از میراگرهای مایع تنظیم‌شونده ستونی به کاهش ارتعاشات ناشی از بار باد بر روی تیغه‌های توربین‌های بادی پرداختند. گودرزی و دانش در سال ۲۰۱۶ [۱۸] با بهره‌گیری از مدل‌سازی‌های عددی اجزا محدود به تاثیر میرایی هیدرودینامیکی ناشی از کاربرد پره‌های قائم در مخازن مستطیلی را

- 8 Tait
- 9 Ki Piu you
- 10 Love and Tait
- 11 Zhang



شکل ۱. میراگر ارائه شده توسط زهرائی و همکاران [۱۴]
 Fig. 1. Provided damper by Zahrai et al. [14]

گرفته توسط زهرائی و همکاران در مطالعه آزمایشگاهی میراگر مایع پیشنهادی و روابط ارائه شده برای میراگر جرمی توسط چانگ استفاده شده است؛ تا عملکرد میراگر مایع پره‌دار در مقایسه با میراگر جرمی هم وزن معادل مورد ارزیابی قرار گیرد. برای نیل به این هدف از نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیل عددی برای سازه پنج طبقه مرجع تحت اثر زلزله کوبه بهره گرفته می‌شود. این میراگر مایع دارای ۸ پره در داخل مخزن مستطیلی شکل می‌باشد؛ که در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲- مدل‌سازی سازه پنج طبقه مرجع و پیاده‌سازی میراگر جرمی تنظیم‌شونده

سازه مرجع ۵ طبقه مورد استفاده در این پژوهش توسط محققین دانشگاه فناوری سیدنی استرالیا^۵ طراحی و ساخته شده است و یکی از مدل‌هایی است که توسط موسسه بین‌المللی کنترل سازه‌ای^۶ (I.A.S.C.) به‌عنوان یک سازه مرجع ثبت شده است تا محققین بتوانند در هر دو زمینه تحلیلی و آزمایشگاهی الگوریتم‌های خود را بر روی یک سازه یکسان پیاده نموده و یافته‌های خود را با همدیگر تطبیق دهند.

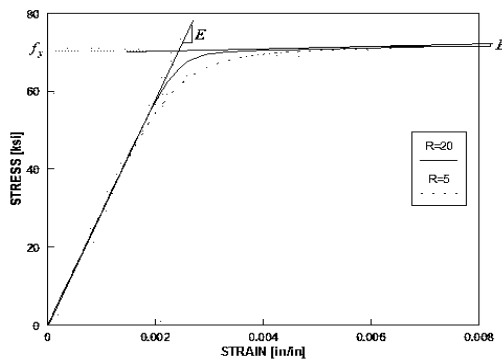
قاب این سازه که در شکل ۲ نشان داده شده است ۱/۵ متر طول (دو دهانه ۰/۷۵ متری) و ۱/۰ متر عرض (یک دهانه ۱/۰ متری) دارد. تیرهای این سازه از مقطع قوطی توخالی با فولاد معمولی به ابعاد ۷۵ میلی‌متر در ۷۵ میلی‌متر و با ضخامت ۴ میلی‌متر ساخته شده است. ستون‌های این سازه نیز از مقطع مربع توپر با فولاد معمولی به ابعاد

مورد مطالعه خود قرار دادند. رویز^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۹] با ارائه میراگرهای مایع تنظیم‌شونده با سقف شناور، به بررسی اثر بخشی این میراگرها و ساده بودن مدل‌سازی آن‌ها پرداختند. عنایتی و زهرائی در سال ۲۰۱۷ [۲۰] میراگر مایع تنظیم‌شونده با پره‌های قابل دوران را تحت اثر زلزله‌های حوزه دور و نزدیک روی سازه پنج طبقه مورد بررسی قرار دادند که پره‌های میراگر با استفاده از الگوریتم نیمه‌فعال قابل دوران می‌باشد. داس و چادھاری^۲ در سال ۲۰۱۷ [۲۱] به بررسی رفتار میراگر مایع تنظیم‌شونده مستطیلی شکل روی سازه بتنی سه طبقه، که در مقیاس یک-چهارم در آزمایشگاه ساخته شده است، در دو حالت مایع آب و مایع آب شیرین شده (محلول آب و شکر) پرداختند. علی^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۲۲] به بررسی ارتعاش و جابجایی مایع در مخزن تانکرهای جاده‌ای، که به طور قابل توجهی تعداد حوادث جاده‌ای را در چند دهه گذشته افزایش داده است، پرداختند. کاوالگلی^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۲۳] مطالعه تجربی-عددی بر روی میراگر مایع با مقطع مستطیلی انجام دادند که مقطع پایین میراگر به طول ۴۰ و عرض ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد که تحت تحریک خارجی هارمونیک قرار گرفته است. نتایج مطالعه ایشان نشان از تطابق بسیار خوب نتایج عددی و آزمایشگاهی دارد که با استفاده از مدل‌سازی عددی توانستند میزان انرژی مستهلک شده را تعیین نمایند.

به منظور مقایسه عملکرد میراگر مایع با پره‌های قابل دوران و میراگر جرمی تنظیم‌شونده با پارامترهای بهینه، از مطالعات انجام

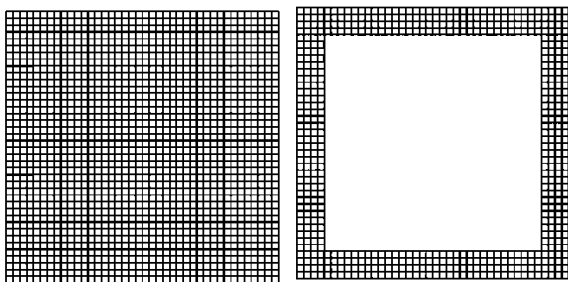
5 University of Technology Sydney, Australia (UTS)
 6 International Association for Structural Control (I.A.S.C)

1 Ruiz
 2 Das and Choudhury
 3 Ali
 4 Cavalagli



شکل ۳. نمودار تنش- کرنش فولاد تعریف شده در نرم افزار [۲۴]

Fig. 3. Stress-strain curve for defined steel in the software [25]



شکل ۴. مقاطع پیچ زده شده در مدل سازی تیر و ستون

Fig. 4. Patched sections in beam and column modeling

دوره تناوب اصلی ۰/۶۹۵ ثانیه می باشد؛ که مقدار خطای موجود برای مدل سازی برابر ۴ درصد می باشد.

با توجه به اینکه سازه پنج طبقه مورد آزمایش فولادی می باشد در نتیجه رفتار فولاد در نرم افزار OpenSEES با استفاده از uniaxialMaterial Steel02 تعریف شده است. تنش تسلیم فولاد و مدول الاستیسیته آن به ترتیب برابر ۲۴۰۰ و ۲۱۰۰۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب سختی برای ناحیه غیرخطی مصالح ۰/۰۱ سختی ناحیه الاستیک اعمال شده است. مصالح uniaxialMaterial Steel02 برای ساخت ماده فولاد با سخت شونده گی کرنش ایزوتروپیک به کار می رود. منحنی رفتار ماده در شکل ۳ نشان داده شده است. جرم سازه و بارهای ثقیلی وارده به آن به صورت متمرکز در نقاط برخورد تیرها و ستون ها در طبقات تعریف شده است. جرم هر گره ۱۱/۷۵ کیلوگرم می باشد. المان های تیر و ستون از نوع element nonlinearBeamColumn با المان های تیر و ستون غیرخطی^۱ تعریف شده است. المان تیرستون غیرخطی توزیع گسترده ی پلاستیسیته در طول المان را در نظر می گیرد. همچنین



شکل ۲. سازه مرجع دانشگاه فناوری سیدنی استرالیا [۱۶]

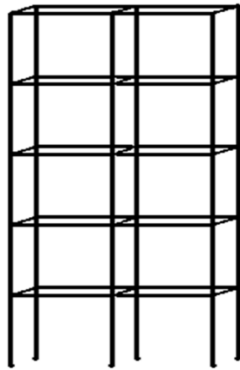
Fig. 2. Benchmark structure of University of Technology Sydney, Australia [24]

۲۵ میلی متر در ۲۵ میلی متر ساخته شده است.

در مدل آزمایش انجام شده توسط زهرائی و همکاران ارتفاع کلیه طبقات ۰/۷۲ متر در نظر گرفته شده است [۲۴] جرم کل سازه بدون بار اضافی برابر ۳۵۲/۵ کیلوگرم است.

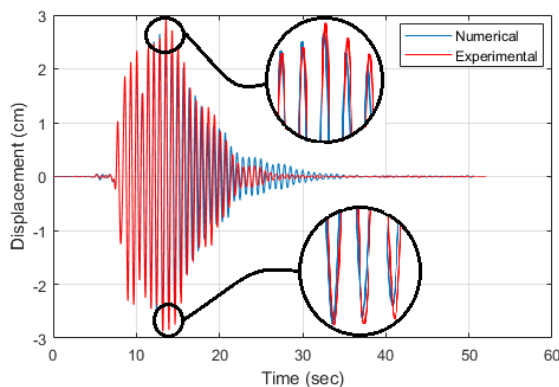
اتصالات سازه مورد آزمایش در طبقه اول و سوم به صورت اتصالات مفصلی ایجاد شده است، همچنین برای طبقه چهارم و پنجم به ترتیب بارافزوده ۱۲۷ و ۶۱۷ کیلوگرم جرم اضافه شده است تا فرکانس ارتعاشی سازه کاهش یابد. سازه مرجع مورد آزمایش بدون بار افزون دارای ارتعاشی سریع با فرکانس بالا می باشد که برای انجام آزمایش مناسب نمی باشد. با توجه به اینکه در طبقه پنجم سازه فضای کافی برای افزودن باری بیش از ۶۱۷ کیلوگرم موجود نمی باشد، در طبقه چهارم سازه مرجع نیز ۱۲۷ کیلوگرم قرار داده شده است. مقدار این بار افزوده شده برحسب فرکانس میراگر مایع تنظیم شونده در حالت زاویه صفر درجه می باشد تا بتوان فرکانس سازه مرجع و میراگر مایع تقریباً یکسان نمود؛ چرا که این میراگرها بر اساس فرکانس سازه تنظیم می شوند تا بیشترین کارایی آن ها حاصل گردد. فرکانس سازه با بارافزوده برابر ۱/۴۹ هرتز و دوره تناوب اصلی آن برابر ۰/۶۷۱ ثانیه می باشد [۱۶] مدل ساخته شده در نرم افزار OpenSEES، که در شکل ۳ نشان داده شده است، دارای فرکانس اصلی ۱/۴۳ هرتز و

1 ¹ Element nonlinearBeamColumn



شکل ۷. سازه مرجع ۵ طبقه مدل شده در نرم افزار OpenSEES

Fig. 7. Benchmark 5-story structure modeled in OpenSEES software

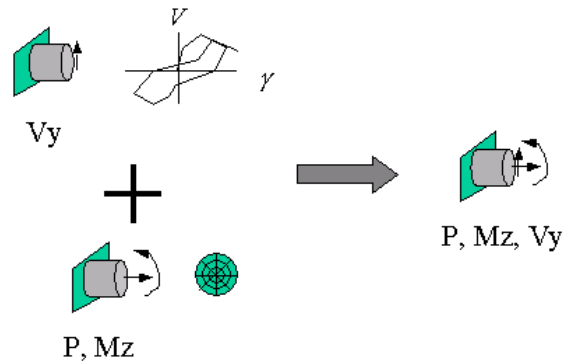


شکل ۸. تغییر مکان بام سازه برای مدل آزمایشگاهی و نرم افزاری

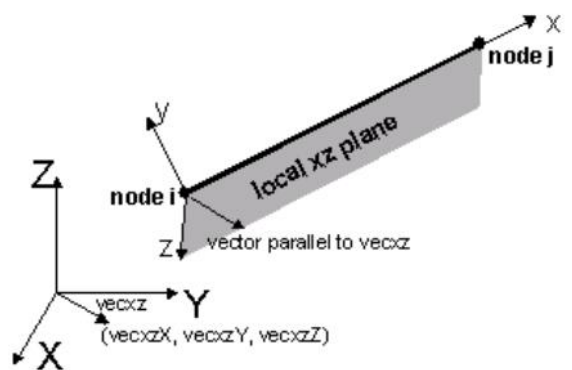
Fig. 8. Roof displacement of structure for experimental and numerical model

ثقلی و در نهایت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای زلزله مذکور انجام شده است.

رفتار لرزه‌ای سازه برای زلزله کوبه در حالت بدون میراگر نیز مقایسه شده تا از صحت رفتاری مناسب مدل ایجاد شده در نرم افزار اصمینان حاصل شود. شکل ۸ نشان دهنده رفتار لرزه‌ای سازه می‌باشد. مقدار حداکثر پاسخ سازه برای تراز بام در مدل آزمایشگاهی تحت اثر زلزله کوبه با نسبت بیشینه شتاب ۸ درصد برابر بیشینه شتاب اولیه، برابر ۲۹/۵۱ میلی‌متر و در مدل نرم‌افزاری برابر ۲۹/۴ میلی‌متر می‌باشد. مقدار خطای موجود در مدل نرم‌افزاری نسبت به مدل آزمایشگاهی برای حداکثر پاسخ سازه تحت اثر زلزله کوبه برابر ۰/۳۷ درصد می‌باشد. مقادیر خطای مدل ساخته شده در محدوده خطای مهندسی قرار دارد و صحت مدل‌سازی عددی را تایید می‌نماید. میراگر جرمی هم وزن میراگر مایع با پره‌های قابل دوران در جایی که میراگر مایع نصب شده است، قرار گرفته است (شکل ۹).



شکل ۵. ترکیب مقاطع با استفاده از دستور section Aggregator
Fig. 5. Composition of sections using section Aggregator command



شکل ۶. تبدیل مختصات محلی به مختصات کلی در اعضای تیر و ستون تعریف شده [۲۴]

Fig. 6. Conversion local coordinates to general coordinates in defined beam and column elements [25]

تعداد نقاط انتگرال‌گیری (نقاط گوس) نیز پنج نقطه تعریف شده است.

مقاطع قوطی شکل تیرها و ستون‌ها با استفاده از دستور section Fiber ایجاد شده است. این مقطع یک شکل هندسی عمومی دارد؛ که از نواحی با اشکال ساده‌تر و منظم‌تر مانند نواحی مستطیلی، دایروی و مثلثی تشکیل شده است. نواحی نام برده اصطلاحاً 'پچ' نامیده می‌شود (شکل ۴). همچنین برای در نظر گرفتن نیروی برشی و لنگر خمشی به صورت ترکیبی از دستور section Aggregator استفاده شده است. به منظور تعریف مختصات محلی و کلی در نرم افزار OpenSEES از دستور geomTransf PDelta بهره گرفته شده است تا تاثیر پی-دلتا در تحلیل‌ها در نظر گرفته شود (شکل‌های ۵ و ۶). در تحلیل‌ها نیز ابتدا تحلیل مودال انجام گرفته است تا دوره تناوب سازه مدل‌سازی شده تعیین گردد و سپس تحلیل استاتیکی

فرض بر این است که سیال تراکم‌ناپذیر و غیرچرخشی است و مخزن در معرض تحریک افقی $x(t)$ قرار دارد. فرض دیگر این که سطح سیال در تمام طول شبیه‌سازی پیوسته باقی می‌ماند (شکست موج اتفاق نمی‌افتد) و فشار $p(x, z, t)$ در تمام این سطح آزاد ثابت باقی خواهد ماند. با استفاده از تئوری خطی لایه مرزی، فرکانس طبیعی ارتعاش سیال عبارت خواهد بود از [۲۵]:

$$\omega_{TLD} = \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} \quad (1)$$

نسبت میرایی نیز با رابطه ۲ قابل محاسبه است [۱۹]:

$$\xi_{TLD} = \frac{1}{\sqrt{2h}} \sqrt{\frac{\nu}{\omega_f} \left(1 + \frac{h}{b}\right)} \quad (2)$$

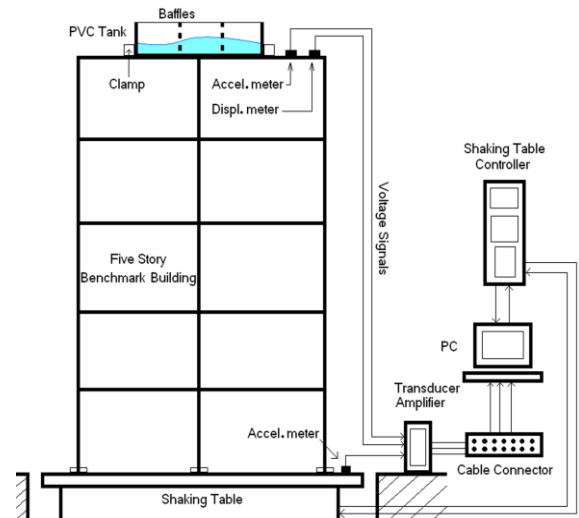
که در آن b عرض مخزن را نشان می‌دهد.

به منظور عملکرد بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده باید مقادیر بهینه میرایی و فرکانس این میراگرها را به دست آورد. برای به دست آوردن این مقادیر بهینه از مطالعه چانگ [۲۶] استفاده گردیده است. چانگ مقادیر بهینه را با فرض اینکه سازه تحت بار نویز سفید گوسین^۱ قرار دارد، به دست آورده است. روابط به دست آمده برای مقادیر فرکانس و میرایی بهینه به صورت روابط ۳ و ۴ می‌باشد. مقادیر بهینه میراگر جرمی برای دو سطح آب ۲۴ و ۳۶ میلی‌متر در جدول ۱ آمده است.

$$\omega_{optTMD} = \omega_x \sqrt{\frac{1 + \mu - \frac{1}{2}\gamma}{1 + \mu}} \quad (3)$$

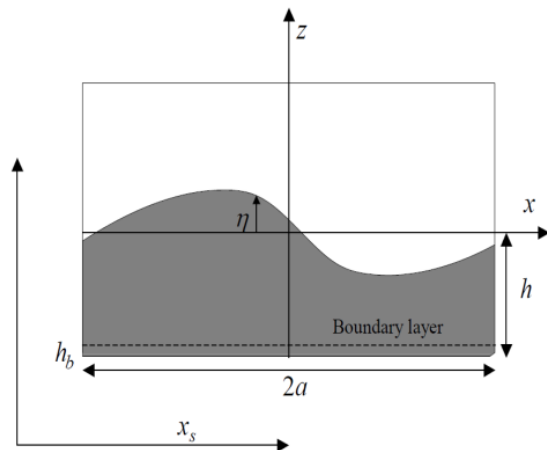
$$\xi_{optTMD} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\gamma \left(1 + \mu - \frac{1}{4}\gamma\right)}{(1 + \mu) \left(1 + \mu - \frac{1}{2}\gamma\right)}} \quad (4)$$

در رابطه بالا ω_{optTMD} فرکانس بهینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده، ω_x فرکانس سازه، μ نسبت جرمی میراگر جرمی تنظیم‌شونده به جرم سازه، γ شاخص تاثیر میراگر جرمی که در مطالعه چانگ این ضریب برای میراگر جرمی برابر μ می‌باشد و ξ_{optTMD} درصد میرایی



شکل ۹. محل قرارگیری میراگر مایع و سیستم ثبت اطلاعات لرزه‌ای سازه

Fig. 9. Location of liquid damper and structural seismic information recording system

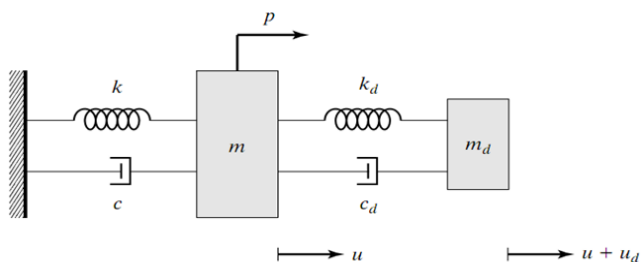


شکل ۱۰. معرفی پارامترهای میراگر مایع تنظیم‌شونده [۲۵]

Fig. 10. Introducing TLD parameters [26]

مخزن با پره‌های متحرک به عنوان امتیاز عملکردی آن، دارای یک دامنه فرکانسی است. بدین معنا که فرکانس نوسان آب داخل مخزن از یک مقدار حداقل تا یک مقدار حداکثر قابل تغییر است. به عنوان مثال به ازای عمق آب برای ۷۰ میلی‌متر این دامنه بین ۰/۶۴ هرتز در حالت پره‌های کاملاً باز تا ۱/۷۷ هرتز در حالت پره‌های کاملاً بسته است؛ که برای تعیین این مقادیر می‌توان از روابط ۱ و ۲ بهره گرفت.

یک مخزن مستطیلی به طول $2a$ که حاوی سیالی با ویسکوزیته ν با عمق h ، که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، می‌توان در نظر گرفت.



شکل ۱۲. سیستم یک درجه آزادی مجهز شده به میراگر جرمی

Fig. 12. Single degree of freedom structure equipped with TMD

است. معادله ماتریسی حاکم بر جرم اولیه به صورت رابطه ۶ و معادله حاکم بر میراگر به صورت رابطه ۷ و در نهایت معادله ماتریسی حاکم بر کل سیستم همانند رابطه ۸ خواهد بود.

$$(1 + \bar{m})\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \omega^2u = \frac{P}{m} - \bar{m}\ddot{u}_d \quad (6)$$

$$\ddot{u}_d + 2\xi_d\omega_d\dot{u}_d + \omega_d^2u_d = -\ddot{u} \quad (7)$$

$$[M]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = -[M]\ddot{u}_g \quad (8)$$

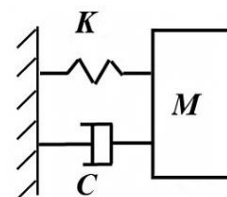
که در روابط بالا اندیس d معرف روابط میراگر جرمی و c و M ، k به ترتیب ماتریس جرم، میرایی و سختی سیستم دو درجه آزادی می‌باشد. پارامترهای ξ ، ω ، \bar{m} به ترتیب درصد میرایی، فرکانس و نسبت جرم میراگر به جرم سازه (سازه اولیه) می‌باشد. P و \ddot{u}_g نیز به ترتیب نیروی وارد به جرم اولیه و شتاب ناشی از بارگذاری زلزله می‌باشند و با حل رابطه ۸ پاسخ سیستم مجهز به میراگر تعیین می‌گردد؛ که به منظور راستی‌آزمایی مدل میراگر جرمی در نرم‌افزار OpenSEES، سازه یک درجه آزادی با جرم ۵۰۰۰ کیلوگرم با دوره تناوب ۰/۵ ثانیه و درصد میرایی ۲ درصد در هر دو نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. نسبت جرمی میراگر جرمی برابر ۳ درصد جرم سازه می‌شود و برای تعیین فرکانس و میرایی میراگر جرمی از روابط ۳ و ۴ استفاده شده است.

نمودار تایخچه زمانی مدل یک درجه آزادی با حل عددی در نرم‌افزار MATLAB و OpenSEES، تحت اثر زلزله کوبه معرفی شده، در شکل ۱۳ ارائه شده است که مقدار خطا ۰/۴ درصد می‌باشد و نشان از رفتار و مدل‌سازی صحیح میراگر جرمی در نرم‌افزار OpenSEES می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات میراگر جرمی هم وزن مایع درون مخزن

Table 1. Parameters of the TMD with a weight equal to the weight of the water in the liquid damper

| ارتفاع آب mm | جرم آب (kg) | سختی TMD (kN/m) | میرایی TMD (kN.s/m) |
|-----------------|----------------|-----------------------|---------------------------|
| ۴۲ | ۱۱/۹۱ | ۴۹۲/۱۱ | ۶۶/۱۴ |
| ۶۳ | ۱۷/۸۶ | ۷۲۹/۵۸ | ۱۳۷/۹۱ |



شکل ۱۱. نمایی از میراگر جرمی تنظیم‌شونده

Fig. 11. View of the TMD

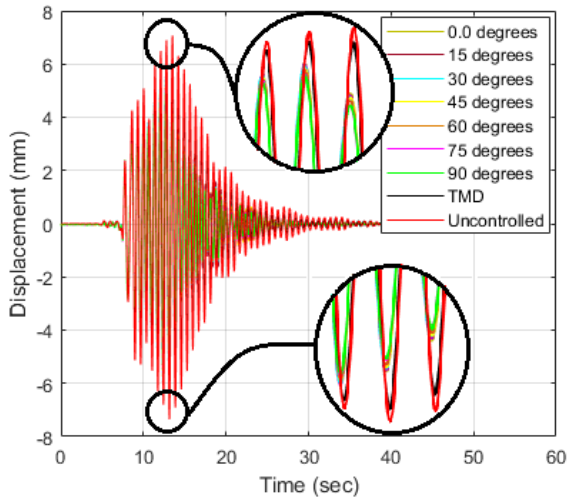
بهبینه میراگر جرمی تنظیم‌شونده می‌باشد [۲۶].

به منظور مدل‌سازی میرایی میراگر جرمی تنظیم‌شونده در نرم‌افزار OpenSEES، از المان میرایی ویسکوز و برای مدل‌سازی سختی آن از یک المان با سختی الاستیک استفاده شده است؛ که این مقادیر طی فرآیند تحلیل ثابت می‌باشند. در شکل (۱۱) شمایی از یک میراگر جرمی نشان داده شده است. در مدل‌سازی نیروی میرایی ویسکوز از رابطه (۵) بهره گرفته می‌شود:

$$F = CV^\alpha \quad (5)$$

که C ضریب میرایی و V سرعت نسبی دو سر میراگر ویسکوز می‌باشد همچنین مقدار α نیز یک انتخاب شده است. در نرم‌افزار OpenSEES از دستور uniaxialMaterial Viscous برای مدل‌سازی میرایی میراگر جرمی و از دستور uniaxialMaterial Elastic برای سختی میراگر جرمی استفاده شده است.

برای اختصاص دادن میرایی و سختی میراگر جرمی در بام سازه، از المان element zeroLength استفاده می‌شود؛ که به صورت موازی سختی و میرایی میراگر جرمی را بین بام سازه و جرم میراگر جرمی متصل کرده است. به منظور صحت‌سنجی رفتار میراگر جرمی در نرم‌افزار OpenSEES با رفتار دینامیکی واقعی آن، از روابط حاکم بر رفتار میراگرهای جرمی در نرم‌افزار MATLAB بهره گرفته شده است. برای یک سیستم یک درجه آزادی که میراگر جرمی تنظیم‌شونده به آن متصل شده است در شکل ۱۲ نشان داده شده



شکل ۱۴. جابجایی بام سازه برای بیشینه شتاب ۲ درصد شتاب اولیه زلزله کوبه با عمق آب ۴۲ میلی‌متر در میراگر

Fig. 14. Roof displacement response of structure for maximum acceleration 2% of the Kobe earthquake with 42 mm of water depth in the damper

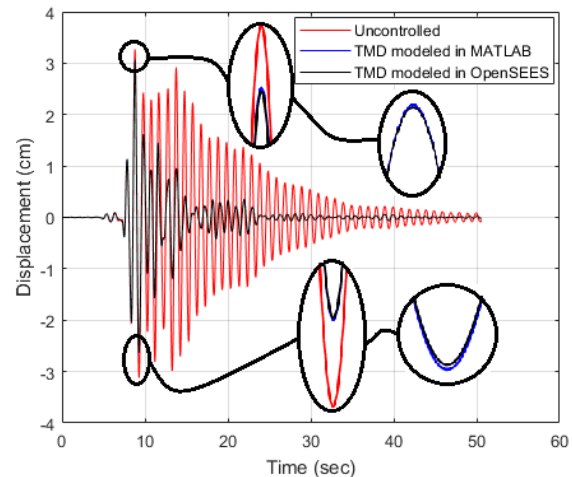
پره‌های قابل دوران با میراگر جرمی مورد بررسی قرار گرفت. میراگر مایع تنظیم‌شونده مورد بررسی دارای پره‌های قائمی است که در زوایای مورد نظر ثابت می‌شوند. تعداد پره‌هایی که در این میراگر استفاده شده است جمعاً ۸ پره می‌باشد؛ که در دو ردیف ۴ تایی قرار گرفته‌اند و همچنین این پره‌ها به صورت مسطح و صلب تعبیه شده‌اند. هدف از تعبیه این پره‌ها در داخل میراگر ایجاد توازن میراگر برای مقابله با ارتعاشات در فرکانس‌های مختلف می‌باشد. بررسی میراگر مایع با پره‌های ایستاده قابل تنظیم در زوایای مختلف قرارگیری پره‌ها در مخزن با میراگر جرمی انجام گرفته است.

نمودار مربوط به سیستم‌های کنترلی ذکر شده برای حداکثر شتاب ۲ درصد شتاب اولیه زلزله و با عمق آب ۴۲ میلی‌متر برای میراگر در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای این شکل و حالت بزرگنمایی شده پاسخ بیشینه تغییرمکان بام سازه می‌توان عملکرد مناسب میراگر مایع با پره‌های قابل دوران را دریافت. با توجه به شکل ۱۴ زاویه قرارگیری ۷۵ و ۹۰ درجه برای پره‌ها بیشترین بهبود را در کاهش پاسخ تغییرمکان سازه دارند. مقادیر بهبود برای زاویه قرارگیری ۷۵ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۲۴ و ۲۹/۵ درصد می‌باشد. برای این شدت زلزله، میراگر مایع با پره‌های قابل دوران برای تمامی زوایای قرارگیری پره‌ها در مخزن، بهتر از میراگر جرمی تنظیم‌شونده که در حالت بهینه تنظیم شده است، عمل نموده است. میراگرهای مایع تنظیم‌شونده علاوه بر حرکت لایه‌ای خود با بر

جدول ۲. مشخصات زلزله کوبه اعمال شده به سازه در آزمایشگاه

Table 2. Characteristics of the Kobe earthquake applied to structure in the laboratory

| نام زلزله | ایستگاه | بزرگای Mw | گام زمانی dt | تعداد گام زمانی N | بیشینه شتاب PGA(g) |
|-----------|---------|-----------|--------------|-------------------|--------------------|
| Kobe | Hanshin | ۶/۹ | ۰/۰۰۵ | ۱۰۰۰۰ | ۰/۸۴ |



شکل ۱۳. تغییرمکان سیستم یک درجه آزادی مجهز شده به میراگر جرمی در نرم‌افزار MATLAB و OpenSEES

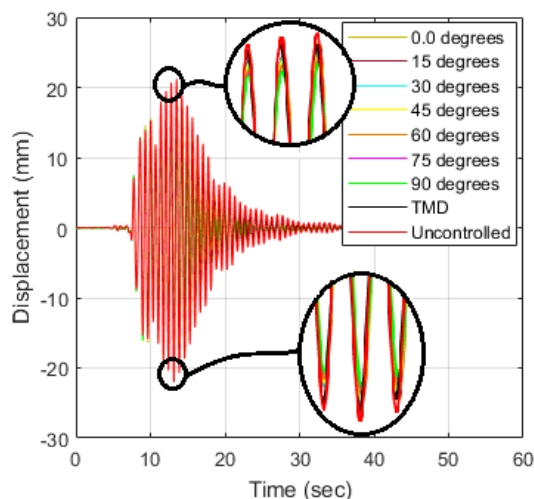
Fig. 13. Displacement of the single degree of freedom structure equipped with the TMD in MATLAB and OpenSEES software

۳- زلزله اعمال شده به مدل آزمایشگاهی و مدل نرم‌افزاری

به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای سازه موردنظر مجهز شده به میراگر مایع با پره‌های قابل دوران، مدل سازه در آزمایشگاه تحت تحریک زلزله کوبه، ایستگاه هانشین^۱، ۱۹۹۵ قرار گرفته است. مشخصات رکورد تاریخچه زمانی این زلزله در جدول ۲ نشان داده شده است. زلزله کوبه با بیشینه شتاب‌های مختلف ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد بیشینه شتاب اولیه زلزله، به سازه اعمال شده است؛ و برای این بیشینه شتاب‌ها رفتار میراگر مایع تنظیم‌شونده مجهز به پره‌های قابل دوران با میراگر جرمی تنظیم‌شونده که در حالت بهینه خود قرار دارد، مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

۴- ارائه و تفسیر نتایج تحلیل‌های انجام گرفته

در این مطالعه نوع جدید میراگر مایع تنظیم‌شونده مجهز به

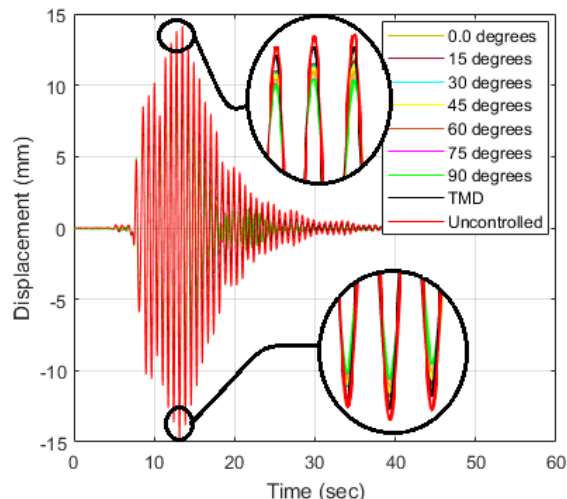


شکل ۱۶. جابجایی بام سازه برای بیشینه شتاب ۶ درصد شتاب اولیه زلزله کوبه با عمق آب ۴۲ میلی‌متر در میراگر
Fig. 16. Roof displacement response of structure for maximum acceleration 6% of the Kobe earthquake with 42 mm of water depth in the damper

می‌باشد؛ و برای این شدت زلزله میراگر مایع مجهز به پره‌های قابل دوران برای تمامی زوایای قرارگیری پره‌ها در مخزن بهتر از میراگر جرمی بهینه می‌باشد. نمودار پاسخ سازه برای بیشینه شتاب ۶ درصد شتاب اولیه زلزله در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

با مقایسه نتایج نشان داده شده می‌توان با قرار دادن پره‌ها در زوایای مناسب (همانند قرارگیری پره‌ها با زاویه ۷۵ درجه) می‌توان علاوه بر بهبود میزان کنترل ارتعاشات در سازه مرجع، از مقدار مایع کمتری نیز به منظور کنترل ارتعاشات بهره جست؛ چرا که با مقایسه نتایج می‌توان دریافت که در حالت برابری وزن سیال و جرم میراگر جرمی، میراگر سیال در زوایای مناسب عملکرد بهتری داشته است در نتیجه می‌توان از سیال کمتری در داخل مخزن استفاده کرد تا بار افزون در سازه نیز کاهش یابد در حالی که پاسخ با هر دو میراگر جرمی و مایع یکسان باشد.

با افزایش شدت زلزله به بیشینه شتابی برابر ۸ درصد، شکل ۱۷، بیشینه شتاب اولیه زلزله کوبه با عمق آب ۴۲ میلی‌متر، نسبت به میراگر جرمی تنظیم‌شونده از کارایی سیستم کنترلی، با میراگر مایع تنظیم‌شونده با پره‌های قابل دوران با زاویه‌های قرارگیری کمتر از ۴۵ درجه، به طور متوسط ۴/۶ درصد کاهش یافته است و این به دلیل برهم خوردن حرکت لایه‌ای سیال و افزایش تلاطم‌های سیال می‌باشد؛ که با افزایش زاویه قرارگیری پره‌های داخل مخزن عملکرد مناسب سیستم کنترلی با میراگر مایع افزایش یافته است؛ این مقدار افزایش

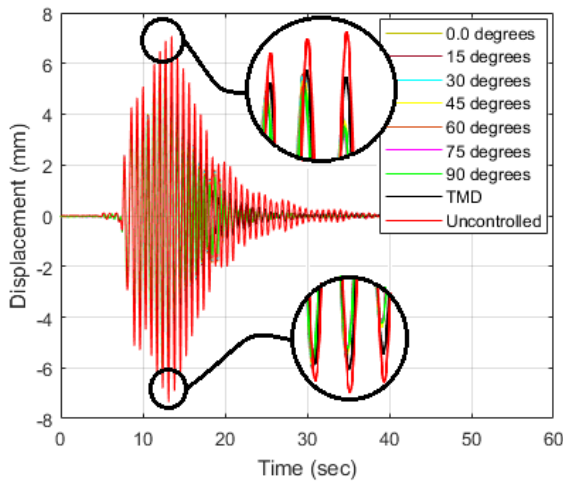


شکل ۱۵. جابجایی بام سازه برای بیشینه شتاب ۴ درصد شتاب اولیه زلزله کوبه با عمق آب ۴۲ میلی‌متر در میراگر

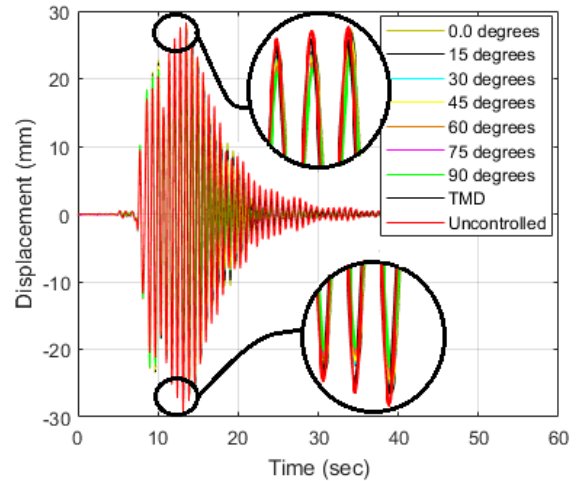
Fig. 15. Roof displacement response of structure for maximum acceleration 4% of the Kobe earthquake with 42 mm of water depth in the damper

خورد به دیواره‌های مخزن و ایجاد اختلاف فشار مایع باعث تولید یک نیروی برشی در کف مخزن میراگر می‌شوند؛ که این عامل با ایجاد شکست موج و اضافه شدن یک نیروی اضافی ناشی از شکست موج باعث می‌گردد علاوه بر نیروی برشی حاصله نیروی شکست موج نیز به دیواره اثر کرده و نهایتاً همانند نیرویی در خلاف جهت ارتعاش سازه به سازه وارد می‌کند. این در حالی است که در میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده تنها اینرسی جرم متصله به سازه عامل تولید نیروی بازدارنده حرکت سازه می‌باشد. با قرار دادن پره‌هایی در داخل مخزن میراگر مایع مدت زمان حرکت سیال از یک انتها به انتهای دیگر کاهش می‌یابد به این صورت که بعد از برخورد سیال به جداره‌های قائم مخزن و شکست موج در مدت زمان کمتری به پره‌ها و جداره‌های قائم و مرزی دیگری برخورد می‌کنند این عامل باعث می‌شود تا سیال داخل مخزن در مرزهای بیشتری به دیواره‌ها برخورد کرده و نیروی مازاد زیادتری تولید نماید؛ علاوه بر این لازم به ذکر است که با توجه به اینکه مخزن بدون پره برای سازه تنظیم می‌گردد لذا بایستی به منظور برهم نخوردن فرکانس ارتعاش سیال با سازه، سیال بتواند ارتعاش خود را در مخزن انجام دهد و بتواند با عبور از لایه‌های مرزی و پره‌ها به دیواره دیگر مخزن برخورد نماید که طی مطالعات آزمایشگاهی این زاویه مناسب ۷۵ درجه می‌باشد.

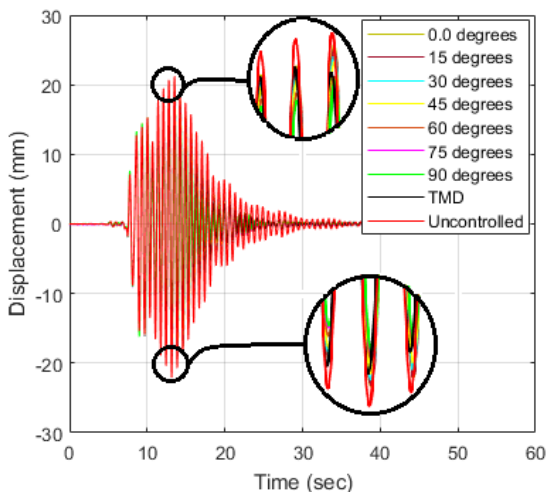
نمودار مربوط به پاسخ سازه برای بیشینه شتاب ۴ درصد شتاب اولیه زلزله و عمق آب ۴۲ میلی‌متر برای میراگر نیز همانند شکل ۱۴



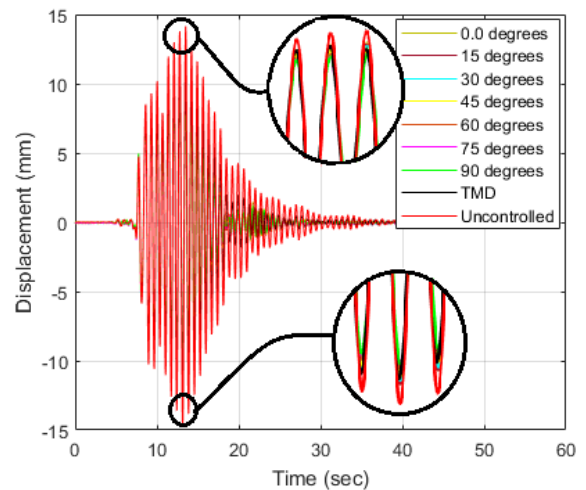
شکل ۱۸. جابجایی بام سازه تحت بیشینه شتاب ۲ درصد برابر زلزله کوبه با عمق آب ۶۳ میلی‌متر در میراگر
Fig. 18. Roof displacement response of structure for maximum acceleration 2% of the Kobe earthquake with 63 mm of water depth in the damper



شکل ۱۷. جابجایی بام سازه برای بیشینه شتاب ۸ درصد شتاب اولیه زلزله کوبه با عمق آب ۴۲ میلی‌متر در میراگر
Fig. 17. Roof displacement response of structure for maximum acceleration 8% of the Kobe earthquake with 42 mm of water depth in the damper



شکل ۲۰. جابجایی بام سازه تحت بیشینه شتاب ۲ درصد برابر زلزله کوبه با عمق آب ۶۳ میلی‌متر در میراگر
Fig. 20. Roof displacement response of structure for maximum acceleration 2% of the Kobe earthquake with 63 mm of water depth in the damper



شکل ۱۹. جابجایی بام سازه تحت بیشینه شتاب ۲ درصد برابر زلزله کوبه با عمق آب ۶۳ میلی‌متر در میراگر
Fig. 19. Roof displacement response of structure for maximum acceleration 2% of the Kobe earthquake with 63 mm of water depth in the damper

می‌باشد. اما با افزایش زاویه قرارگیری پره‌ها در مخزن رفتار میراگر مایع بهبود یافته است و برای این شدت زلزله نیز زاویه قرارگیری ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به سایر زاویه‌های قرارگیری پره‌ها بهتر عمل نموده است. نمودار مربوط به سیستم‌های کنترلی ذکر شده برای حداکثر شتاب ۲ درصد شتاب اولیه زلزله و با عمق آب ۶۳ میلی‌متر در شکل ۱۸ نشان داده شده است. زاویه‌های قرارگیری ۷۵ و ۹۰ درجه برای پره‌ها بیشترین بهبود را در کاهش پاسخ سازه دارند. تغییرمکان بام سازه برای حداکثر شتاب ۴ درصد، ۶ درصد و ۸

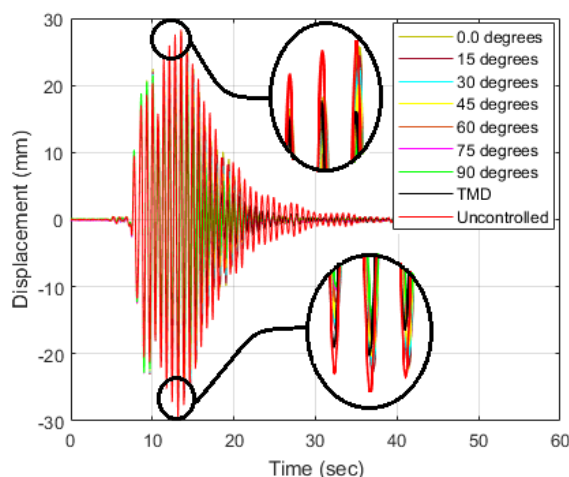
نسبت به میراگر جرمی تنظیم‌شونده برابر ۷/۶۴ درصد می‌باشد. برای نمودار جابجایی سازه برای ۶ درصد بیشینه شتاب اولیه و عمق آب ۴۲ میلی‌متر، با افزایش شدت زلزله نسبت به حالت ۲ و ۴ درصد بیشینه شتاب زلزله اولیه، رفتار میراگر مایع با پره‌های قابل دوران با زاویه قرارگیری ۱۵ درجه تقریباً با حالت میراگر جرمی تنظیم‌شونده یکسان شده است؛ چرا که پاسخ سازه برای این شدت زلزله برای میراگر مایع با زاویه قرارگیری ۱۵ درجه برابر ۱۹/۶۲ میلی‌متر و برای میراگر جرمی تنظیم‌شونده برابر ۱۹/۴ میلی‌متر

قابل دوران با زاویه قرارگیری ۴۵ درجه تقریباً با حالت میراگر جرمی تنظیم‌شونده یکسان شده است چرا که پاسخ سازه برای این شدت زلزله برای میراگر مایع با زاویه قرارگیری ۴۵ درجه برابر ۱۹/۶۶ میلی‌متر و برای میراگر جرمی تنظیم‌شونده برابر ۱۸ میلی‌متر می‌باشد. با افزایش شدت زلزله به بیشینه شتابی برابر ۸ درصد بیشینه شتاب اولیه زلزله کوبه با عمق آب ۶۳ میلی‌متر از کارایی سیستم کنترلی با میراگر مایع تنظیم‌شونده با پره‌های قابل دوران با زاویه‌های قرارگیری کمتر ۶۰ درجه کاهش یافته است؛ که با افزایش زاویه قرارگیری پره‌های داخل مخزن عملکرد مناسب سیستم کنترلی با میراگر مایع افزایش یافته است. برای این بیشینه شتاب و عمق آب، میراگر جرمی تنظیم‌شونده با میراگر مایع با زاویه قرارگیری ۶۰ درجه پره‌ها تقریباً یکسان شده است و تغییر مکان بام سازه برای میراگر مایع با پره‌های قابل دوران برابر ۲۳/۵۵ و برای میراگر جرمی برابر ۲۴/۱ میلی‌متر می‌باشد.

همانگونه که برای میراگر مایع پرده‌دار با عمق ۴۲ میلی‌متر نتایج بهبود برای زوایای ۷۵ و ۹۰ درجه برای بیشینه شتاب‌های مختلف ارائه گردید در اینجا نیز مقادیر بهبود برای بیشینه شتاب‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد شتاب اولیه زلزله کوبه به ترتیب برابر ۲۰/۷، ۲۲/۳ و ۲۲/۵، ۲۳ و ۲۰/۲، ۲۰/۶ و ۲۰/۳، ۲۰/۶ می‌باشد.

مقادیر حداکثر تغییر مکان بام سازه برای سیستم‌های کنترلی مورد بررسی در جداول ۳ تا ۶ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ برای هر دو سطح ارتفاع آب داخل مخزن، ۴۲ و ۶۳ میلی‌متر، و نسبت بیشینه شتاب ۲ درصد زلزله اولیه، رفتار میراگر مایع پرده‌دار آزمایش شده توسط زهرایی و همکاران بهتر از میراگر جرمی تنظیم‌شونده با پارامترهای بهینه است. با افزایش بیشینه شتاب زلزله به ۴ درصد بیشینه شتاب اولیه زلزله کوبه، طبق جدول ۴، میراگر مایع پرده‌دار با عمق آب ۴۲ میلی‌متر برای تمامی زوایای قرارگیری پره‌ها بهتر از میراگر جرمی در بهبود رفتار سازه نقش داشته است؛ اما برای عمق آب ۶۳ میلی‌متر میراگر جرمی نسبت به میراگر مایع با زاویه پره‌های کمتر از ۳۰ درجه رفتار مناسبی نشان داده است.

برای بیشینه شتاب ۶ درصد زلزله اولیه، طبق جدول ۵، میراگر جرمی بهتر از میراگر مایع با زوایای کمتر از ۱۵ درجه برای عمق ۴۲ میلی‌متر و زوایای کمتر از ۴۵ درجه برای عمق آب ۶۳ میلی‌متر رفتار



شکل ۲۱. جابجایی بام سازه تحت بیشینه شتاب ۸ درصد برابر زلزله کوبه با عمق آب ۶۳ میلی‌متر در میراگر
Fig. 21. Roof displacement response of structure for maximum acceleration 2% of the Kobe earthquake with 63 mm of water depth in the damper

درصد شتاب اولیه با عمق آب ۶۳ میلی‌متر به ترتیب در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ ارائه شده است. پاسخ سازه با میراگر جرمی برای بیشینه شتاب اعمالی معادل ۴ درصد شتاب اولیه زلزله کوبه، تقریباً با حالت میراگر مایع با زاویه پره‌های ۴۵ درجه یکسان است و با افزایش زاویه پره‌ها عملکرد میراگر مایع بهبود یافته است. در این حالت نیز رفتار میراگر مایع با پره‌های قابل دوران با زاویه‌های قرارگیری ۷۵ و ۹۰ درجه بیشترین کاهش تغییر مکان بام سازه را داشته‌اند.

با افزایش عمق آب از ۴۲ میلی‌متر به ۶۳ میلی‌متر برای بیشینه شتاب ۴ درصد شتاب اولیه زلزله کوبه، می‌توان دریافت که عملکرد میراگر مایع نسبت به عمق آب ۴۲ میلی‌متر کاهش یافته است؛ چرا که برای عمق آب ۴۲ میلی‌متر با بیشینه شتاب ۴ درصد زلزله اولیه، میراگر مایع برای تمامی زوایای قرارگیری بهتر از حالت کنترل با میراگر جرمی تنظیم‌شونده عمل نموده است؛ اما برای عمق آب ۶۳ میلی‌متر با همان بیشینه شتاب، میراگر مایع با پره‌های قابل دوران برای زوایای کمتر از ۴۵ درجه عملکرد ضعیفتری نسبت به میراگر جرمی دارد؛ این عامل به دلیل ارتفاع آب و اغتشاش در حرکت سیال داخل مخزن می‌باشد و حرکت سیال از حالت حرکت لایه‌ای به صورت حرکت اغتشاشی تغییر رفتار می‌دهد.

پاسخ سازه تحت ۶ درصد بیشینه شتاب اولیه و عمق آب ۶۳ میلی‌متر برای میراگر طبق شکل ۲۰، با افزایش شدت زلزله نسبت به حالت ۲ و ۴ درصد بیشینه شتاب اولیه، رفتار میراگر مایع با پره‌های

جدول ۵. حداکثر تغییر مکان بام سازه تحت بیشینه شتاب ۶ درصد زلزله کوبه

Table 5. Maximum displacement of the roof of the structure subjected to maximum acceleration of 6% of the Kobe earthquake.

| Angle | H = 42 mm | H = 63 mm |
|--------------|-----------|-----------|
| ۰ | ۱۹/۷۴ | ۲۰/۰۹ |
| ۱۵ | ۱۹/۶۲ | ۱۹/۸۶ |
| ۳۰ | ۱۹/۰۸ | ۱۹/۳۱ |
| ۴۵ | ۱۸/۹۶ | ۱۸/۶۶ |
| ۶۰ | ۱۸ | ۱۷/۳۲ |
| ۷۵ | ۱۷ | ۱۶/۹۱ |
| ۹۰ | ۱۶/۵۷ | ۱۶/۸۲ |
| TMD | ۱۹/۴ | ۱۸ |
| Uncontrolled | ۲۱/۲ | ۲۱/۲ |

جدول ۶. حداکثر تغییر مکان بام سازه تحت بیشینه شتاب ۸ درصد زلزله کوبه

Table 6. Maximum displacement of the roof of the structure subjected to maximum acceleration of 8% of the Kobe earthquake.

| Angle | H = 42 mm | H = 63 mm |
|--------------|-----------|-----------|
| ۰ | ۲۷/۷۲ | ۲۷/۷۷ |
| ۱۵ | ۲۷/۴۹ | ۲۷/۴۳ |
| ۳۰ | ۲۶/۷۴ | ۲۶/۵۵ |
| ۴۵ | ۲۶/۴۲ | ۲۵/۴۳ |
| ۶۰ | ۲۴/۸۹ | ۲۳/۵۵ |
| ۷۵ | ۲۳/۶۹ | ۲۲/۵۶ |
| ۹۰ | ۲۳/۱۸ | ۲۲/۴۷ |
| TMD | ۲۵/۹ | ۲۴/۱ |
| Uncontrolled | ۲۸/۳ | ۲۸/۳ |

سازه پنج طبقه مورد بررسی برای بیشینه شتاب ۲ درصد زلزله اولیه برای تمامی زوایای قرار گیری پره‌ها برای عمق آب ۴۲ میلی‌متر کمتر از ۶۳ میلی‌متر می‌باشد و این به دلیل رفتار کاملاً لایه‌ای لامینار و غیرآشفته آب در شتاب‌های پایین زلزله اعمالی است. با افزایش شدت زلزله رفتار لایه‌ای حرکت آب داخل مخزن بهم ریخته و تاثیر اینرسی و شکست موج داخل آن موثرتر می‌گردد؛ که این عامل برای بیشینه شتاب‌های ۴، ۶ و ۸ درصد قابل بیان می‌باشد.

جدول ۳. حداکثر تغییر مکان بام سازه تحت بیشینه شتاب ۲ درصد زلزله کوبه

Table 3. Maximum displacement of the roof of the structure subjected to maximum acceleration of 2% of the Kobe earthquake.

| Angle | H = 42 mm | H = 63 mm |
|--------------|-----------|-----------|
| ۰ | ۵/۵۱ | ۵/۹۳ |
| ۱۵ | ۵/۶۱ | ۵/۹۳ |
| ۳۰ | ۵/۵۵ | ۵/۸۹ |
| ۴۵ | ۵/۵۱ | ۵/۸۱ |
| ۶۰ | ۵/۵۱ | ۵/۷۵ |
| ۷۵ | ۵/۳۹ | ۵/۶۳ |
| ۹۰ | ۵ | ۵/۵۱ |
| TMD | ۶/۵ | ۶ |
| Uncontrolled | ۷/۱ | ۷/۱ |

جدول ۴. حداکثر تغییر مکان بام سازه تحت بیشینه شتاب ۴ درصد زلزله کوبه

Table 4. Maximum displacement of the roof of the structure subjected to maximum acceleration of 4% of the Kobe earthquake.

| Angle | H = 42 mm | H = 63 mm |
|--------------|-----------|-----------|
| ۰ | ۱۱/۹۳ | ۱۲/۳۶ |
| ۱۵ | ۱۱/۸۵ | ۱۲/۲۹ |
| ۳۰ | ۱۱/۵۷ | ۱۲/۰۶ |
| ۴۵ | ۱۱/۶۱ | ۱۱/۷۴ |
| ۶۰ | ۱۱/۰۹ | ۱۱/۰۹ |
| ۷۵ | ۱۰/۵۳ | ۱۰/۹۲ |
| ۹۰ | ۱۰/۱۴ | ۱۰/۸۶ |
| TMD | ۱۳ | ۱۲ |
| Uncontrolled | ۱۴/۱ | ۱۴/۱ |

نموده است. برای بیشینه شتاب ۸ درصد زلزله اولیه، طبق جدول ۶، میراگر جرمی عملکرد بهتری در کاهش تغییر مکان بام سازه نسبت به میراگر مایع با زوایای کمتر از ۴۵ درجه برای عمق ۴۲ و ۶۳ میلی‌متر داشته است.

با مقادیر ارائه شده در جداول ۳ تا ۶ رفتار سازه برای حالت کنترل شده با سطوح آب ۴۲ و ۶۳ میلی‌متر و همچنین میراگر جرمی تنظیم‌شونده بخوبی کاهش یافته است. سیر کاهش تغییر مکان بام

۵- نتیجه گیری

به منظور بررسی عملکرد سیستم‌های کنترلی، میراگر مایع تنظیم‌شونده مجهز به پره‌های قابل دوران و میراگر جرمی تنظیم‌شونده، نتایج آزمایشگاهی میراگر مایع تنظیم‌شونده با پره‌های قابل دوران برای زوایای مختلف قرارگیری این پره‌ها در مخزن با میراگر جرمی تنظیم‌شونده که در حالت بهینه میرایی و سختی قرار دارد، بررسی و مقایسه گردید که زلزله اعمالی کوبه برای حداکثر شتاب‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد شدت اولیه زلزله به سازه اعمال شده و نتایج تغییرمکان بام سازه پنج طبقه مرجع برای هر دو حالت سیستم کنترلی ارزیابی گردید. بررسی عددی سازه و سیستم‌های کنترلی در نرم‌افزار OpenSEES مدل‌سازی شده و به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، دوره تناوب اصلی سازه و رفتار لرزه‌ای آن تحت اثر زلزله کوبه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.

برای بیشینه شتاب ۲ درصد زلزله کوبه اعمال شده به سازه می‌توان عملکرد مناسب میراگر مایع را نسبت به میراگر جرمی بهینه مشاهده نمود. برای لرزش‌های کم میراگر مایع به خوبی پاسخ سازه را کاهش داده است و با افزایش بیشینه شتاب زلزله میراگر مایع پره‌دار با زوایای کم عملکردی همانند میراگر جرمی دارد؛ اما برای زوایای بیشتر از ۶۰ درجه برای هر دو عمق بهتر از میراگر جرمی بوده است.

برای شدت زلزله ۲ درصد، میراگر مایع پره‌دار با عمق سیال ۴۲ میلی‌متر، مقادیر تغییرمکان بام سازه را ۱۳/۷ تا ۲۳/۰۸ درصد برای زوایای مختلف نسبت میراگر جرمی بهبود بخشیده ولی این درصد بهبود برای همین شدت زلزله و عمق سیال ۶۳ میلی‌متر برابر ۱/۱۷ تا ۸/۱۷ درصد می‌باشد. برای شدت‌های زلزله ۴، ۶ و ۸ درصد، میراگر مایع پره‌دار با عمق سیال ۴۲ میلی‌متر، تغییرمکان بام سازه را به ترتیب ۸/۲۳ تا ۲۲، ۱/۶۵ تا ۱۴/۶ و ۳/۹ تا ۱۰/۵ درصد بهبود داد. منتها برای شدت‌های زلزله ۴، ۶ و ۸ درصد، میراگر مایع پره‌دار با عمق سیال ۶۳ میلی‌متر، تغییرمکان بام سازه را به ترتیب ۲/۱۷ تا ۹/۵، ۳/۷۸ تا ۶/۵۶ و ۲/۲۸ تا ۶/۷۶ درصد بهبود بخشید.

عمق‌های مختلفی که برای سیال در خلال آزمایش در نظر گرفته شده است، نشان می‌دهد که می‌توان از پره‌های این میراگر جدید در شرایط تنظیم ناصحیح میراگر مایع تنظیم‌شونده به منظور تنظیم دقیق میراگر و غلبه بر ناهماهنگی‌های احتمالی بهره جست.

مراجع

- [1] T. Sato, Tuned sloshing damper, Japan Journal of Wind Engineering, 32 (1987) 67-68.
- [2] V. Modi, F. Welt, Damping of wind induced oscillations through liquid sloshing, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 30(1-3) (1988) 85-94.
- [3] M. Tait, Modelling and preliminary design of a structure-TLD system, Engineering Structures, 30(10) (2008) 2644-2655.
- [4] A. Marsh, M. Prakash, S. Semercigil, Ö. Turan, A shallow-depth sloshing absorber for structural control, Journal of Fluids and Structures, 26(5) (2010) 780-792.
- [5] A.S. Zahrai. S.M, Numerical Study of Using Diamond Metallic Damper for Seismic Retrofit of Medium-rise Steel Frames, Journal of Modeling in Engineering, 15 (2007) 9-19.
- [6] S.H. Mohebbi. M, Optimal Design of Active Multiple Tuned Mass Dampers (AMTMDs) For Nonlinear Hysteretic Structures, Journal of Modeling in Engineering, 48 (2017) 151-163.
- [7] A.J. Kordi. F, The TMD design based on complex stiffness theory, Journal of Modeling in Engineering, 51 (2017) 10-10.
- [8] J.Y. Lou, L.D. Lutes, J.J. Li, Active tuned liquid damper for structural control, in: Proc. 1st World Conf. on Struct. Control, 1994, pp. 70-79.
- [9] Y. Xin, Seismic performance of mass-variable tuned liquid dampers with particles fluidization in building applications, University of Missouri-Rolla, 2006.
- [10] S.M. Gardarson, Shallow-water sloshing, Ph.D. thesis, University of Washington, Serttle, (1997).
- [11] D. Reed, J. Yu, H. Yeh, S. Gardarsson, Investigation of tuned liquid dampers under large amplitude excitation, Journal of engineering mechanics, 124(4) (1998) 405-413.
- [12] Y.-K. Ju, Structural behaviour of water sloshing damper with embossments subject to random excitation, Canadian Journal of Civil Engineering, 31(1) (2004) 120-132.
- [13] M. Tait, A. El Damatty, N. Isyumov, M. Siddique,

- liquid damper to reduce seismic response of a five-storey building, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 171(4) (2018) 306-315.
- [21] S. Das, S. Choudhury, Seismic response control by tuned liquid dampers for low-rise RC frame buildings, *Australian journal of structural engineering*, 18(2) (2017) 135-145.
- [22] S. Ali, M.A. Kamran, S. Khan, Effect of baffle size and orientation on lateral sloshing of partially filled containers: a numerical study, *European Journal of Computational Mechanics*, 26(5-6) (2017) 584-608.
- [23] N. Cavalagli, C. Biscarini, A.L. Facci, F. Ubertini, S. Ubertini, Experimental and numerical analysis of energy dissipation in a sloshing absorber, *Journal of Fluids and Structures*, 68 (2017) 466-481.
- [24] S. Mazzoni, F. McKenna, M.H. Scott, G.L. Fenves, *OpenSees command language manual*, Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264 (2006).
- [25] F. Sétra, *Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*, Technical guide SETRA, Paris, France, (2006).
- [26] C. Chang, Mass dampers and their optimal designs for building vibration control, *Engineering Structures*, 21(5) (1999) 454-463.
- Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens, *Journal of Fluids and Structures*, 20(8) (2005) 1007-1023.
- [14] K.P. You, Y.M. Kim, C.M. Yang, D.P. Hong, Increasing damping ratios in a tuned liquid damper using damping bars, in: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, 2007, pp. 2652-2655.
- [15] J. Love, M. Tait, Nonlinear simulation of a tuned liquid damper with damping screens using a modal expansion technique, *Journal of Fluids and Structures*, 26(7-8) (2010) 1058-1077.
- [16] S.M. Zahrai, S. Abbasi, B. Samali, Z. Vrcelj, Experimental investigation of utilizing TLD with baffles in
- [17] Z. Zhang, B. Basu, S.R. Nielsen, Tuned liquid column dampers for mitigation of edgewise vibrations in rotating wind turbine blades, *Structural Control and Health Monitoring*, 22(3) (2015) 500-517.
- [18] M.A. Goudarzi, P.N. Danesh, Numerical investigation of a vertically baffled rectangular tank under seismic excitation, *Journal of Fluids and Structures*, 61 (2016) 450-460.
- [19] R.O. Ruiz, D. Lopez-Garcia, A.A. Taflanidis, Modeling and experimental validation of a new type of tuned liquid damper, *Acta Mechanica*, 227(11) (2016) 3275-3294.
- [20] H. Enayati, S.M. Zahrai, A variably baffled tuned

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Abbasi, A. Bathaei, S.M. Zahrai, *Comparison of seismic performance of variably baffled TLD and the optimal TMD*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(5) (2020) 1047-1060.

DOI: [10.22060/ceej.2018.15167.5842](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.15167.5842)

