(یادداشت فنی)
بررسی عملکرد میراگرهای مایع تنظیم شده در جهت کنترل ارتعاشات لرزه ای سازه ها

محمد حیدرزاده
دانشجوی دکتری مهندسی عمران – پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
سید مهدی زهرائی*
استادیار دانشکده مهندسی عمران – پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
(تاریخ دریافت ۸۲/۹/۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۱۲/۱۶، تاریخ تصویب ۸۵/۲/۱۶)

چکیده
در این مقاله کارآیی میراگرهای مایع تنظیم شده در کنترل و کاهش ارتعاشات سازه با استفاده از تحلیل مدل یک درجه آزادی تحت تحریک زلزله مورد بحث قرار گرفته است. در تحقیقات انجام گرفته قبلی در زمینه عملکرد میراگرهای مایع تنظیم شده در کنترل و کاهش ارتعاشات سازه، به طور عمده اندر کنش سازه و TLD تحت تحریک پایه هارمونیک بررسی شده است. حال آنکه تحریک زلزله کاملا نامنظم وبا محتوای فرکانسی وسیعتر می باشد. بنابراین با توجه به این حقیقت، ایده اصلی انجام این تحقیق جهت جواب دادن به این سوال شکل گرفت که عملکرد این میراگرها در صورت اعمال تحریک زلزله چگونه خواهد بود. برای این منظور، مدل ساده شده برج فرودگاهی ناگزاکی به عنوان یک سازه یک درجه آزادی جهت مثال های عددی مورد استفاده قرار گرفت. مدل مورد مطالعه، دو بار تحت ارتعاشات زلزله های طبس، ناغان و السنترو، یکبار بدون میراگر و بار دیگر با میراگر مایع تنظیم شده مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفت. نتایج به دست آمده در این مقاله نشان می دهد که میراگر های مایع تنظیم شده در حالت تحریک پایه زلزله نیز همانند تحریک پایه هارمونیک کارآیی قابل توجهی در کاهش دامنه ارتعاشات سازه دارند به طوریکه در حالت تحلیل خطی حدود ۳۰ درصد دامنه ارتعاشات سازه مورد بحث در این مقاله را کاهش می دهند.

واژه های کلیدی : کنترل غیر فعال سازه ها - میراگر مایع تنظیم شده (**TLD**) - تحریک زلزله

مقدمه
روش های زیادی برای کنترل ارتعاشات سازه های بلند مرتبه ای که تحت حرکت لرزه ای زمین و یا اثرتند بادها قرار دارند وجود دارد از جمله سیستم های جدا سازی پی[1]، میراگرهای ویسکو الاستیک، قطعات افزایش دهنده سختی و میرا یی، سیستم های مهاربندی، میراگر های جرمی تنظیم شده[2] و دیگر روش ها که هر یک محدودیت ها و مزایای خاص خود را دارند.

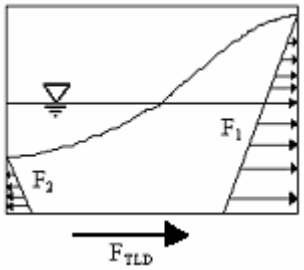
روش دیگری برای کنترل غیر فعال ارتعاشات سازه ها وجود دارد که در آن از نوسانات و تلاطم آب در یک تانک برای کنترل ارتعاشات سازه استفاده می شود و از این رو به آن سیستم میراگر مایع تنظیم شده (Tuned Liquid Damper) گویند. برای اولین بار در اوایل قرن بیستم از این سیستم برای کنترل ارتعاشات ناشی از امواج دریا در کشتی های اقیانوس پیما استفاده شد[1]. سپس در نیمه دوم قرن بیستم برای کنترل نوسانات و جنبش های[3] آزادِ با دوره تناوب بالا در ماهواره ها به کار رفت[1]. از اواسط دهه ۱۹۸۰ میراگر مایع تنظیم شده برای کنترل ارتعاشات سازه های مهندسی عمران به کار گرفته شد[2].

میراگر مایع تنظیم شده یک سیستم کنترل غیر فعال است که از نیروی هیدرودینامیکی استفاده می کند. نحوه کار میراگر بدین ترتیب است که تعدادی مخزن در قسمت بالای سازه نصب شده و تلاطم[4] مایع درون این مخازن انرژی ارتعاشی وارده به سازه را در هنگام زلزله یا تند باد، مستهلک می کند. نیروی کنترلی که در این روش برای کاهش ارتعاشات سازه مورد استفاده قرار میگیرد از فشار دینامیکی ای که روی سطح جداره های انتهایی ظرف اثر می کند تولید می شود. تلاطم مایع موجب ایجاد تفاوت در رقوم سطح آزاد مایع در جداره های انتهایی مخزن می شود و اختلاف فشار ناشی از تفاوت رقوم سطح آزاد

* **Email:** mzahrai@ut.ac.ir
Tel: 61112226

مایع در جداره های انتهایی به صورت یک نیروی برشی در کف مخزن ظاهر می گردد(شکل ۱).

سیستم های TLD باید بر اساس فرکانس مد اول سازه تنظیم شوند یعنی فرکانس نوسانات آب در داخل ظرف باید نزدیک فرکانس طبیعی مد اول سازه باشد. بنابراین مشخصات میراگر نظیر ابعاد ظرف و عمق آب داخل آن باید به گونه ای تنظیم شوند که فرکانس تلاطم مایع درون میراگر با فرکا نس ارتعاش سازه هماهنگ شود.



شکل ۱: شکل گیری نیروی کنترل ناشی از میراگر های مایع تنظیم شده با در نظر گرفتن مقطع طولی مخزن.

به عنوان مثالی از عملکرد و میزان تاثیر این میراگر ها در کنترل و کاهش ارتعاشات سازه ای، حداکثر شتاب پاسخ برج دریایی یوکوهاما تحت اثر باد برابر $0/27\ m/s^2$ و ضریب میرایی آن ۰/۶٪ بود ولی پس از استفاده از TLD به عنوان یک روش کنترل ارتعاشات سازه، حداکثر شتاب پاسخ سازه به $0/1\ m/s^2$ یا کمتر رسید و ضریب میرایی سازه به ۴/۵٪ افزایش یافت[۳].

با توجه به اینکه عمده تحقیقات قبلی در زمینه میراگرهای مایع تنظیم شده با در نظر گرفتن تحریک پایه هارمونیک انجام شده است، هدف از انجام این تحقیق بررسی عملکرد سیستم های TLD در حالت تحریک پایه زلزله می باشد. برای این منظور برج فرودگاهی ناگازاکی برای مثال های عددی تحت تحریک زلزله های طبس، ناغان و السنترو قرار گرفته است. سازه مذکور دو بار، یکبار با حضور میراگر و بار دیگر، بدون حضور آن، مورد تحلیل قرار گرفته و در پایان نتایج این دو تحلیل با هم مقایسه شده است تا میزان تاثیر میراگر های مایع تنظیم شده در کنترل سازه مشخص شود.

مدل یکدرجه آزادی برج فرودگاهی ناگازاکی

یکی از سازه هایی که از روش TLD برای کنترل ارتعاشات لرزه ای آنها استفاده شده است، برج های فرودگاهی هستند. از طرفی دیگر، این سازه ها با تقریب بسیار خوبی می توانند به عنوان مدل یک درجه آزادی در نظر گرفته شوند. در این گونه سازه ها معمولا تمرکز اجرام و تجهیزات در قسمت بالای برج بوده و لذا می توان به خوبی آنها را با یک مدل یکدرجه آزادی تقریب زد.

از این رو در این تحقیق برج فرودگاهی ناگازاکی با توجه به در دسترس بودن مشخصات سازه ای، مورد استفاده قرار گرفت. این برج فلزی دارای ارتفاعی برابر۴۲ متر، وزن کل ۶۳/۳ تن، پریود نوسانات طبیعی برابر ۰/۹۳۵ ثانیه، فرکانس ارتعاشات طبیعی برابر۱/۰۷ هرتز و سختی جانبی برابر ۲/۹۱۵ تن بر سانتی متر می باشد[۴].

طراحی میراگر مایع تنظیم شده

همانطوریکه در بخش قبل اشاره شد سیستم های TLD جهت طراحی بهینه، باید بر اساس فرکانس مد اول سازه تنظیم شوند یعنی فرکانس نوسانات آب در داخل ظرف باید معادل فرکانس طبیعی مد اول سازه باشد. بنابراین مشخصات میراگر نظیر ابعاد ظرف و عمق آب داخل آن باید به گونه ای تنظیم شوند که فرکا نس تلاطم مایع درون میراگر با فرکا نس ارتعاش سازه هماهنگ شود. همانطور که در بخش های قبل اشاره شد، فرکانس طبیعی تلاطم آب در میراگرهای مایع با استفاده از تئوری امواج خطی از رابطه(۱) به دست می آید

$$f_w = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi g}{L}\tanh(\pi\varepsilon)} \qquad (۱)$$

که در آن ε نسبت عمق آب بوده و از رابطه $\varepsilon = \frac{h_0}{L}$ به دست می آید. هم چنین f_w فرکانس طبیعی تلاطم آب در میراگرمایع ، h_0 عمق ساکن آب در داخل تانک و L طول تانک در جهت تحریک می باشد. . با توجه به اینکه فرکانس طبیعی سازه برابر ۱/۰۷ هرتز می باشد بنابر این ابعاد میراگر و عمق آب داخل آن با کمک رابطه (۱) قابل محاسبه خواهد بود که نتایج آن در جدول شماره (۱) قابل مشاهده است. با توجه به جدول شماره ۱ در این مطالعه از میراگرهایی به طول ۵۰cm وبا عمق آب ۱۵ cm استفاده می شود. هم چنین عرض میراگر برابر۵۰ cm در نظر گرفته می شود. به عبارتی دیگر از ظروف مربعی استفاده می شود زیرا همانطور که در معادله (۱) مشاهده می شود، L عبارت از طول میراگر در جهت اعمال تحریک می باشد

و از آن جایی که زلزله از هر دو جهت می تواند به سازه اعمال شود لذا جهت دست یابی به عملکرد یکسان در هر دو جهت، بهتر است از ظروف مستطیلی استفاده گردد.

جدول۱ : طراحی TLD، محاسبه ابعاد تانک و عمق آب داخل آن.

شماره	l (طول ظرف) cm	h (ارتفاع آب داخل TLD) cm
۱	۲۰	۲
۲	۳۰	۴/۵
۳	۴۰	۸/۵
۴	۵۰	۱۵
۵	۶۰	۲۶

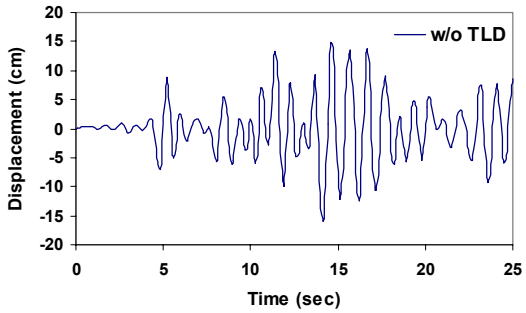
پاسخ ارتعاشی سازه بدون میراگر مایع تنظیم شده به تحریک زلزله

با توجه به تغییرات نامنظم و شدید شتاب زمین بر حسب زمان طی یک زلزله، استفاده از روش های عددی برای حل معادله حرکت اجتناب ناپذیر است[۵ و۶]. بنا بر این از روش عددی نیومارک با شتاب متوسط ($\beta = 0.25$, $\gamma = 0.5$) استفاده شد. تاریخچه زمانی پاسخ ارتعاشی سازه بدون میراگر، به تحریک زلزله های طبس، ناغان و السنترو در شکل(۲) دیده می شود.

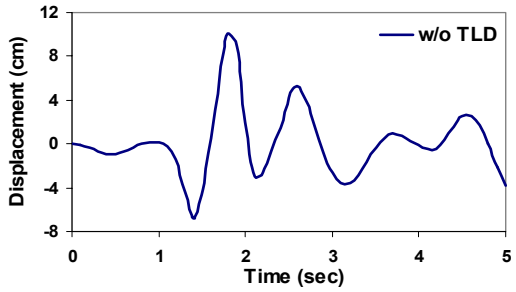
نیروی کنترل ناشی از میراگر های مایع تنظیم شده

نیروی کنترلی که در این روش برای کاهش ارتعاشات سازه مورد استفاده قرار میگیرد از فشار دینامیکی ای که روی سطح جداره های انتهایی ظرف اثر می کند تولید می شود. 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 ظاهر می گردد. برای محاسبه نیروی کنترل ناشی از میراگر نیاز است تا تغییرات سطح آب در دو جداره انتهایی ظرف میراگر(η_1, η_2) معلوم باشد. برای این منظور باید معادلات حاکم بر تلاطم مایع در میراگر را در طول زمان زلزله حل کرد (تحلیل زمان وابسته) تا در هر لحظه موقعیت η_1, η_2 بدست آید.

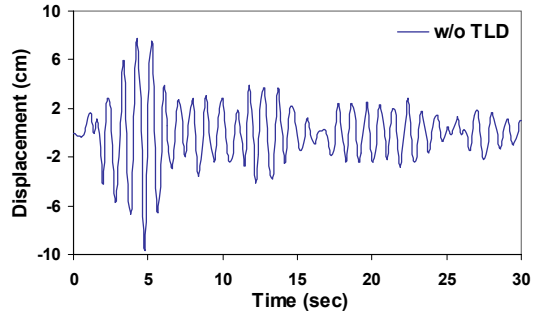
a)



b)



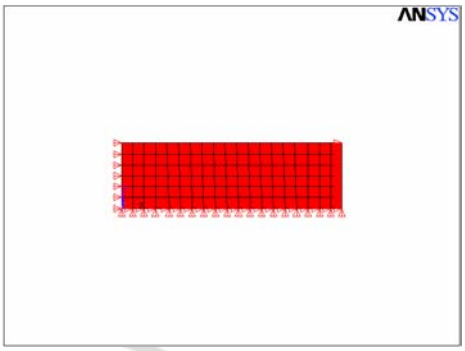
c)



شکل۲: پاسخ ارتعاشی برج بدون میراگر به تحریک زلزله های مختلف. (a) **تحریک زلزله طبس،** (b) **تحریک زلزله ناغان،** (c) **تحریک زلزله السنترو.**

محاسبه

معادلات حاکم بر تلاطم مایع در میراگر عبارتند از معادله پیوستگی مایع و معادلات حرکت (ناویر–استوکس). برای تحلیل تلاطم مایع در میراگرهای مایع تنظیم شده یا به عبارتی دیگر جهت حل معادلات حاکم بر تلاطم مایع، از مدل ANSYS که یکی از پرکاربردترین و تواناترین مدل های المان محدود می باشد، استفاده شده است. میراگر مایع تنظیم شده تحت شتابنگاشت زلزله های طبس، ناغان والسنترو مورد تحلیل قرار گرفت و وضعیت سطح آزاد آب در دو انتهای ظرف یعنی η_1, η_2 در طول زمان هر زلزله به دست آمده است. نتایج این تحلیل برای حالت زلزله ناغان در اشکال(۴)و (۵) آمده است.

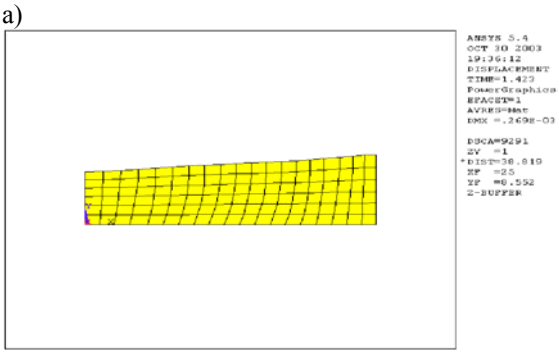


شکل ۳ : میراگر مایع در حالت مش بندی شده.

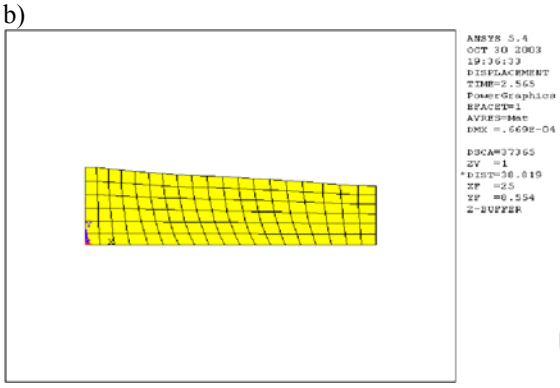
توصیف مدل کامپیوتری المان محدود

در این تحلیل از ۱۱۴ المان و ۱۴۰ گره استفاده شده است(شکل۳). المان به کار رفته از نوع Fluid ۷۹ از مجموعه المان های ANSYS Fluid است که یک المان ۴ نقطه ای در فضای دو بعدی می باشد. معمولا از این المان برای تحلیل سیالات داخل ظرف که هیچ جریانی به آنها وارد یا خارج نمی شود، استفاده می شود. این المان توسط ۴ نقطه تعریف می شود که در هر نقطه دو درجه آزادی در نظر گرفته شده است که عبارتند از انتقال در دو جهت x و z . مهم ترین ویژگی این المان که موجب استفاده از آن در این مطالعه شد، قابلیت در نظر گرفتن تلاطم سیال در این المان می باشد. با داشتن نمودارهای η_1, η_2 می توان نیروی کنترل ناشی از میراگر را در هر لحظه از زمان به دست آورد. در این مطالعه از ۲۵۰ عدد میراگر استفاده می شود. برای صرفه جویی در فضای ساختمان می توان از ۵۰ عدد میراگر ۵ طبقه استفاده نمود.

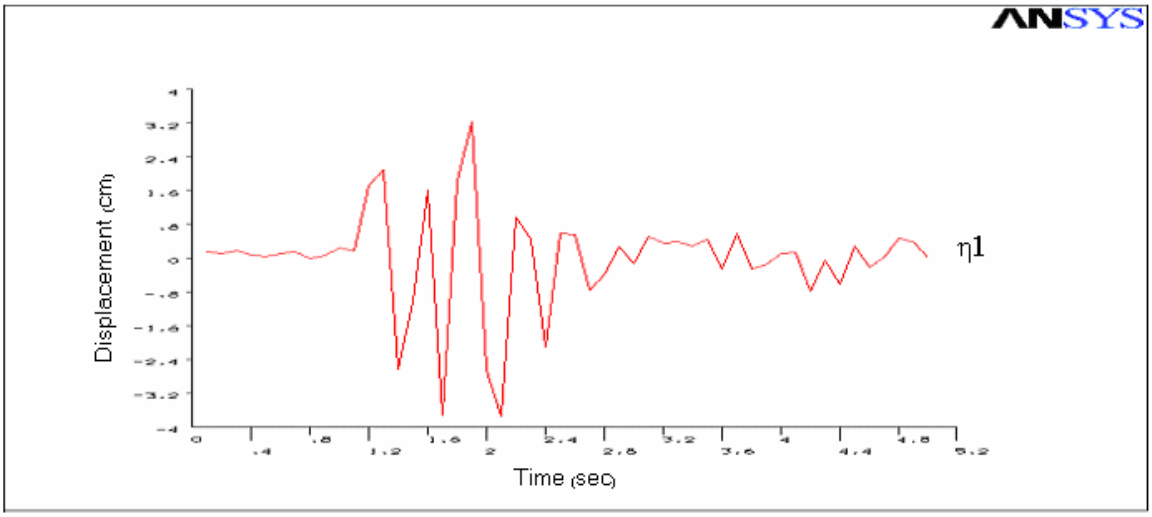
a)



b)



شکل۴ : وضعیت سطح آزاد مایع درون میراگر مایع تحت تحریک زلزله ناغان در زمان های مختلف. (a) **در زمان** t= ۱/۴s (b) **در زمان** t= ۲/۶s.

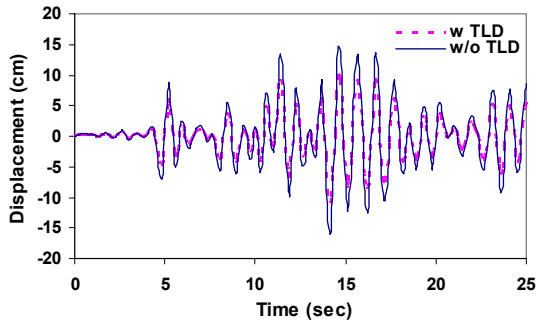


شکل۵ : تاریخچه زمانی تغییر مکان سطح آزاد آب در جداره های انتهایی ظرف در طول زلزله ناغان. در جداره انتهایی سمت راست (η_1).

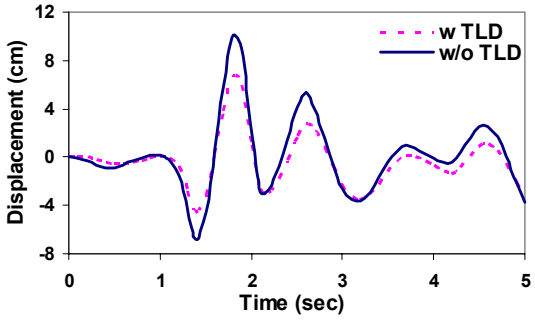
پاسخ مدل با میراگر مایع تنظیم شده به تحریک زلزله

پس از نصب میراگر های مایع تنظیم شده بر روی سازه مجددا پاسخ سازه به تحریک زلزله با روش عددی نیومارک با شتاب ثابت $(\beta = 0.25, \gamma = 0.5)$ بدست می آید[۵ و۶]. همانطوریکه در بخش های قبل اشاره شد نیروی کنترل ناشی از میراگر های مایع تنظیم شده به صورت یک نیروی برشی در کف مخزن ظاهر شده و باعث کاهش ارتعاشات سازه می شود.

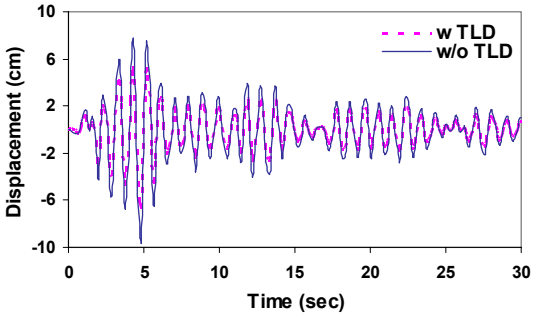
a)



b)



c)



شکل ۶: مقایسه پاسخ ارتعاشی برج باTLD و بدون آن به تحریک زلزله های مختلف. (a) **تحریک زلزله طبس،** (b) **تحریک زلزله ناغان،** (c) **تحریک زلزله السنترو.**

مقایسه پاسخ مدل بـه تحریـک زلزلـه دردو حالت با میراگر مایع و بدون آن

جهت بررسی تاثیر میراگر مایع تنظیم شده در کنترل و کاهش ارتعاشات سازه ای ناشی از زلزله، نمودارهای تغییر مکان برج قبل و بعد از استفاده از TLD در یک نمودار ارائه می شود(شکل۶). همانطور که از شکل (۶) بر می آید، میراگر های مایع نصب شده بر روی سازه به مقدار قابل توجهی دامنه ارتعاشات سازه تحت اثر زلزله را کاهش می دهند. با بررسی نتایج حاصل از تحلیل های انجام گرفته، مشخص شد که در حالت تحریک زلزله طبس، به طور میانگین ارتعاشات سازه ۳۰٪ کاهش یافته است. این رقم در حالت تحریک زلزله ناغان، ۳۷٪ و در حالت تحریک زلزله السنترو، ۳۱٪ می باشد. البته باید توجه داشت که برای دست یابی به چنین نتیجه ای از ۲۵۰ عدد میراگر مایع که شامل ۵۰ میراگر ۵ طبقه بودند، استفاده شده است. این تاثیر، بویژه زمانی اهمیت می یابد که این مقدار کاهش دامنه ارتعاشات، باعث می شود تا سازه از گرفتار شدن درچرخه تغییر شکل های خمیری که موجب تحمیل تغییر شکل های بسیار زیاد به سازه می گردد، مصون بماند. لذا از تحمیل تغییر شکل های فوق العاده زیاد به سازه جلو گیری می شود.

مقایسه نتایج تحلیلی به دست آمـده از ایـن تحقیق با نتایج عملی نصب میراگر های مایع بر روی برج فرودگاهی ناگازاکی

همان گونه که ذکر شد، برج فرودگاهی ناگازاکی یکی از سازه هایی است که بوسیله سیستم های TLD کنترل شده است. در سال ۱۹۸۷ این برج به تعداد ۲۵ عدد میراگر مایع ۷ طبقه مجهز شد که در ارتفاع های مختلف نصب شده بودند. جهت مشخص شدن میزان کارآیی میراگرهای مایع نصب شده بر روی این برج در کنترل و کاهش ارتعاشات آن، مطالعاتی توسط تامورا و همکاران (۱۹۹۵) [۲] انجام شد. آنها نتایج اندازه گیری سرعت باد، شتاب سازه، جابه جایی سازه و جهت وزش باد را برای یک ماه قبل و بعد از نصب TLD مورد بررسی و کنکاش قرار دادند. نتایج کار آنها نشان داد که میرایی سازه از ۰/۹۳٪ قبل از نصب میراگر مایع به ۴/۷٪ بعد از نصب آن افزایش یافت. هم چنین حداکثر نوسانات سازه

در نقطه اوج، ۴۴٪ کاهش یافت[۲].

تفاوت هایی بین مطالعات انجام شده توسط تامورا و همکارانش با مطالعات این مقاله وجود دارد که اهم آنها عبارتند از: تفاوت در تعداد و نحوه توزیع میراگرهای مایع نصب شده بر روی برج و نیز تفاوت در نوع بار اعمالی به برج که در این تحقیق اثر تحریک زلزله بررسی شد در حالی که تامورا و همکاران اثر باد را مورد بررسی قرار دادند. بدیهی است تاثیر میراگر در حالت بارگذاری باد بیشتر خواهد بود چراکه محتوای فرکانسی بار باد به نسبت باند نازک تر[۶] از تحریک زلزله می باشد.

نتیجه گیری

برای بررسی میزان تاثیر میراگرهای مایع تنظیم شده در کنترل غیر فعال سازه ها در حالت اعمال تحریک زلزله، مدل ساده شده یک درجه آزادی برج فرودگاهی ناگازاکی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که سیستم TLD کارآیی خوبی درکاهش دامنه ارتعاشات ناشی از زلزله دارد و دامنه ارتعاشات سازه تحت اثر زلزله را به مقدار قابل توجهی کاهش می دهد. دراین تحقیق نشان داده شد که با بکارگیری ۲۵۰ عدد میراگرمایع تنظیم شده که شامل ۵۰ عددمیراگر ۵ طبقه بودند، ارتعاشات لرزه ای برج فرودگاهی ناگازاکی به مقدار ۳۰٪ تحت زلزله طبس، ۳۷٪ تحت زلزله ناغان و ۳۱٪ تحت زلزله السنترو کاهش می یابد.

با توجه به موارد بالا، میراگر های مایع تنظیم شده عملی تر و اقتصادی تر از سایر روش های کنترل ارتعاشات سازه، برای کنترل ارتعاشات لرزه ای سازه های برج مانند، به نظر می رسند. از آن جایی که اکثر ساختمانهای بلند یک یا چند تانک ذخیره آب در قسمت بام خود برای ایجاد فشار آب کافی در ساختمان، دارند، کاربرد این میراگر ها در سازه های بلند کشوراز طریق سامان دهی این مخازن، توصیه می شود.

مراجع

1 - Chen, Y. H., Hwang, W. S., Chiu, L. T. and Sheu, S. M. (1995). “Flexibility of TLD to high-rise building simple experiment and comparison.” *J. of Computer and Structures,* Vol. 57, No. 5, PP.885-861.

2 - Soong, T. T. and Dargush, G. F. (1997). *Passive energy dissipation systems in structural engineering.* John wiley & sons, London.

3 - Li, S. J., Li, G. Q., Tang, J. and Li, Q. S. (2002). “Shallow rectangular TLD for structural control implementation.” *J. of Applied Acoustics,* Vol. 63, PP.1125-1135.

4 - Yamamoto, K. and Kawahara, M. (1999). “Structural oscillation control using Tuned Liquid Damper.” *J. of Computer & Structures,* Vol. 71, PP.435-446.

۵ - طاحونی، ش. "دینامیک سازه ها و تعیین نیرو های زلزله(نظریه و کاربرد)." انتشارات علم و ادب، چاپ دوم، تهران، (۱۳۷۹).

۶ - برگی، خ. "دینامیک سازه ها." انتشارات دانشگاه تهران، تهران، (۱۳۷۷).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Base Isolation Systems
2 - Tuned Mass Damper
3 - Wobbling
4 - Sloshing
5 - Shin Yokohama Prince Hotel
6 - Narrow Banded