

یادداشت پژوهشی

چکیده

کنترل نیمه فعال پاسخ سازه را با تغییر خواص میرایی و یا سختی سیستم کاهش می دهد. در این تحقیق برای بهبود مکانیسم استهلاک انرژی میراگر مایع تنظیم شده از پره های چرخان استفاده شده و با بررسی امکان چرخش این پره ها در کنترل نیمه فعال، رفتار میراگرهای مایع با پره های قابل تنظیم تحت تحریک زلزله حوزه نزدیک و دور مورد ارزیابی قرار می گیرد. نتایج تحقیق نشان می دهد که طراحی یک الگوریتم مناسب برای چرخش پره ها منجر به بهبود رفتار لرزه ای سازه و کاهش پاسخ جابه جایی بام می شود طوری که پاسخ سازه تحت اثر زلزله حوزه نزدیک نسبت به زلزله حوزه دور کاهش بیشتری می یابد. همچنین چرخاندن پره ها در حین تحریک لرزه ای باعث بهبود پاسخ سازه با کاهش حداکثر جابه جایی بام و کاهش جذر مجموع مربعات آن می شود. البته این درصد کاهش برای زاویه ۵۰ و ۷۰ درجه پره ها کمتر است که دلیل آن ایجاد انحنا در مسیر جریان سیال داخل میراگر و افزایش میرایی میراگر در این زوایا می باشد.

واژگان کلیدی: میراگر مایع با پره قابل تنظیم، کنترل غیرفعال، کنترل نیمه فعال، زاویه پره ها، زلزله حوزه نزدیک، زلزله حوزه دور.

میراگر مایع تنظیم شده با پره قابل چرخش در کنترل مدل سازه ۵ طبقه تحت زلزله حوزه دور و نزدیک

سید مهدی زهرائی (نویسنده مسئول)

استاد، دانشکده عمران دانشگاه تهران، تهران،

mzahrai@ut.ac.ir

حامد عنایتی

استادیار، گروه عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر

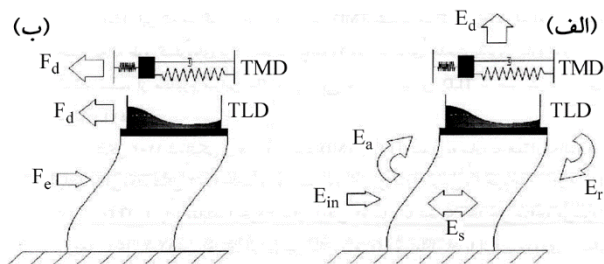
۱- مقدمه

پارامترهای مختلف میراگر TLD توسط فوجینو و همکاران [۴] صورت گرفت.

سان و همکاران [۵] در سال ۱۹۹۱ یک مدل عددی را توسعه دادند که اندرکنش بین سازه و میراگر TLD را در نظر می گرفت. ایشان دو ضریب برای شکست موج ارائه نمودند که هر دو ضریب توسط کارهای آزمایشگاهی کالیبره شدند. مدل سان بعدها توسط کوه و وانگ [۶] برای تحریکات دلخواه بسط داده شد. میراگرهای مایع بر حسب عمق سیال درون به دو دسته کلی تقسیم می شود: عمیق و کم عمق. اگر نسبت عمق سیال به طول مخزن کمتر از ۰/۱۵ باشد، TLD کم عمق طبقه بندی می گردد در غیر این صورت میراگر عمیق نامیده می شود [۷]. لاو و تایت [۸] در سال ۲۰۱۱ به منظور بررسی هندسه مخزن در میراگر مایع یک مدل غیرخطی برای مدل سازی تلاطم و رفتار سیال ارائه نمودند. آنها در مطالعه خود کف مخزن را مسطح و هموار در نظر گرفتند.

میراگر مایع تنظیم شونده یک میراگر مکانیکی غیرفعال است که به منظور کاهش ارتعاشات ناخواسته سازه از طریق تلاطم سیال در یک مخزن صلب طراحی می شود. این گونه میراگرها با هزینه ساخت و نگهداری پایین می تواند عملکرد دوگانه داشته باشد به نحوی که علاوه بر استفاده به عنوان میراگر، به عنوان یک مخزن ذخیره آب نیز به کار می رود که این خود یکی دیگر از برتری های این نوع میراگر می باشد. البته در مقایسه با میراگرهای جرمی که نیازمند یک آستانه تحریک برای فعال سازی می باشند، استفاده از میراگرهای مایع این محدودیت را ندارد. به بیانی دیگر این نوع میراگرها در هر محدوده تحریک سازه فعال شده و به کارایی خود ادامه می دهد [۱]. میراگرهای TLD برای حذف ارتعاشات ناشی از باد در چندین ساختمان بلند با موفقیت نصب شده اند [۲-۳]. تلاطم سیال به عنوان روشی برای استهلاک انرژی در TLD توسط محققین بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۱۹۸۸ مطالعات گسترده ای روی

به صورت انرژی مکانیکی جذب می‌کند که جریان انرژی از سازه به میراگر اصطلاحاً مکانیسم جذب انرژی نامیده می‌شود. به عبارت دیگر این همان عاملی است که باعث تغییر مشخصه‌های دینامیکی سازه می‌شود.



شکل (۱): مکانیسم سیستم‌های جرمی و سیال تنظیم شده TMD, TLD (الف) جریان مقاوم (سمت راست)، (ب) نیروی مقاوم (سمت چپ) [۱۱].

در شکل (۱)، F_e نیروی تحریک، F_d نیروی مقاوم تولید شده توسط میراگرها (نیروی اینرسی)، E_{in} انرژی ورودی، E_a انرژی جذب شده توسط میراگرها، E_d انرژی مستهلک شده در میراگرها، E_r انرژی بازگردانده شده به سازه و E_s انرژی ارتعاشی سازه می‌باشد.

اصول طراحی میراگرهای جرمی برای طراحی میراگرهای مایع نیز قابل استفاده است. پارامترهای طراحی میراگر جرمی را می‌توان بهینه‌سازی و فرمول‌بندی کرد، درحالی‌که به دلیل رفتار غیرخطی سیال در حال حرکت در داخل مخزن میراگر مایع انجام چنین کاری بسیار مشکل است. البته در این میراگرها پاسخ سیستم مخزن-سازه به دامنه ارتعاشات نیز وابسته است. در میراگر جرمی تنظیم شونده، TMD، یک جرم ثانویه، فنر و کمک‌فنر به سازه ملحق می‌شود. در میراگر مایع تنظیم شونده، سیال درون مخزن نقش فنر و کمک‌فنر را ایفا می‌کند. همانند جرم موجود در میراگر جرمی تنظیم شده سیال درون مخزن به‌عنوان جرم ثانویه عمل می‌کند. میرایی توسط اصطکاک سیال با جداره‌های مخزن، تلاطم سیال و شکست موج تأمین می‌شود. از آنجا که عملکرد نیروی ثقلی در ماهیت دارای یک مکانیسم بازگشتی است سیستم ثانویه دارای یک سری خواص فرکانسی است که می‌تواند با سازه هماهنگ شود و معیار رفتار سازه را بهینه کند. در میراگر مایع

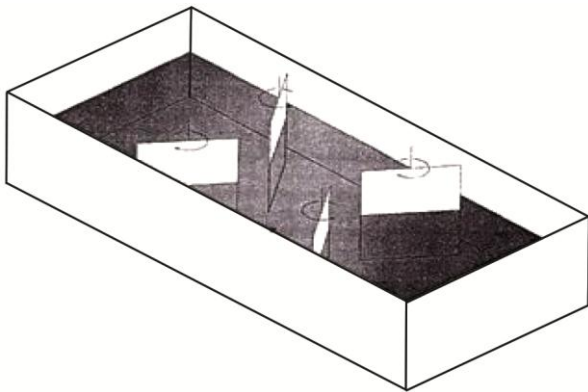
در کنترل سازه‌ای هدف کاستن از ارتعاشات سازه توسط نصب مکانیسم‌های کنترلی و اعمال نیروهای کنترلی به سازه می‌باشد. بر اساس نیاز به انرژی خارجی، کنترل سازه‌ای را می‌توان به کنترل غیرفعال، فعال، ترکیبی یا نیمه‌فعال تقسیم کرد [۹]. سیستم کنترل نیمه‌فعال از تغییر خواص میرایی یا سختی سازه استفاده می‌کند تا پاسخ سازه را کاهش دهد. این سیستم‌ها بر خلاف سیستم‌های فعال به منع انرژی به مراتب کوچک‌تری نسبت به سیستم‌های فعال نیاز دارند به طوری که انرژی لازم در این سیستم‌ها را می‌توان توسط یک باتری تغذیه تأمین نمود که این امر به دلیل احتمال قطعی برق در هنگام زلزله بسیار حائز اهمیت می‌باشد. سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال قابلیت اطمینان غیرفعال را دارند و در عین حال قابلیت سازگاری و تغییرپذیری سیستم‌های فعال را نیز دارند [۱۰].

در این مقاله رفتار میراگر مایع با پره قابل تنظیم مورد ارزیابی قرار گرفته و امکان استفاده از آن در کنترل نیمه‌فعال تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور بررسی می‌شود. در این پژوهش نمونه‌ای از این میراگر در کنترل غیرفعال بر روی قاب مورد مطالعه مدل شده است. رفتار میراگر با چهار زاویه مختلف بر روی یک سازه که به صورت دو بعدی مدل شده، بررسی و با نتایج کنترل نیمه‌فعال مقایسه شده است.

۲- میراگر مایع قابل تنظیم TLD

همان‌طور که گفته شد میراگر مایع یک میراگر با هزینه نصب و نگهداری پایین بوده و با کوچک‌ترین حرکتی در سازه فعال می‌شود. مطابق شکل (۱-ب) جرم صلب در میراگر جرمی و یا جرم سیال در میراگر سیال تنظیم شده (TLD) در برابر تحریک خارجی از خود مقاومت نشان می‌دهد که این عامل با نیروی اینرسی در شکل آورده شده است. شکل (۱-الف) جریان انرژی بین سازه و میراگر و تعادل آن با انرژی ورودی را نمایش داده است. این میراگرها قسمتی از انرژی ارتعاشی سازه را از طریق میرایی درونی میراگر و یا توسط سیستم میراگر

مساوی تقسیم شود. افزودن پره‌ها به میراگر قابلیت توازن بیشتری به میراگر مایع داده است. در این میراگرها به علت افزایش سطح تماس سیال با مخزن و انحنای اجباری خطوط جریان در حالت پره‌های نیمه‌بسته، سیستم دارای توانایی بالاتری در اتلاف انرژی می‌باشد. بدیهی است که در صورت کنترل این پره‌ها به صورت خودکار، صرفاً استفاده از نیروی تأمین شده توسط یک باتری ساده کفایت خواهد کرد.



شکل (۲): شماتیک TLD با پره‌های متحرک.

۴- مدل مورد مطالعه

در این تحقیق از سازه مرجع ۵ طبقه ساخته شده توسط محققین دانشگاه فناوری سیدنی استرالیا استفاده شده است که توسط مؤسسه بین‌المللی کنترل سازه‌ای به‌عنوان یک سازه مرجع ثبت گردیده است. زهرائی و همکاران [۱۵] مدل غیرفعال میراگر با دریچه را نیز بر روی همین سازه مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. این مدل به گونه‌ای طراحی شده است که می‌تواند حداکثر ۵ طبقه با ارتفاع‌های متفاوت داشته باشد. ارتفاع‌های کاملاً قابل تنظیم این سازه توسط یک سری متصل کننده صورت می‌گیرد. در تحقیق آنها یک قاب ۵ طبقه به ارتفاع کل ۱/۲۵ متر ساخته شد. ارتفاع هر طبقه ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده که البته این سازه دارای قابلیت تنظیم ارتفاع تا حداکثر ۳/۶ متر می‌باشد. مقطع ستون این قاب مستطیل توپر به ابعاد ۲۵ در ۲۵ میلی‌متر و تیرهای آن با قوطی به ابعاد ۷۵ در ۷۵ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر است [۱۵]. در این تحقیق از چهار رکورد زلزله حوزه نزدیک و چهار رکورد

تنظیم شونده، اگر طول مخزن، مستطیلی به طول $2a$ و حاوی سیالی به ویسکوزیته ν با عمق h باشد خواهیم داشت:

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

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

که در آن b عرض مخزن، ω_{TLD} فرکانس ارتعاش سیال و ξ_{TLD} نسبت میرایی میراگر را نشان می‌دهد.

۳- میراگر مایع با قابلیت تغییر

در راستای استفاده از میراگر مایعی تنظیم شده به‌عنوان میراگری که قابلیت سازگاری با شرایط مختلف را داشته باشد تعدادی از محققین با تغییراتی در میراگر مایع از آن به‌عنوان میراگر با قابلیت تنظیم استفاده نموده‌اند. تایت و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۵ برای افزایش میرایی سیستم در درون مخزن میراگر مایعی تعدادی صفحه سوراخ‌دار قرار داده‌اند. لائو و تایت [۱۳] در سال ۲۰۱۰ نیز طی کارهای متعدد تحقیقاتی اثرات حالات مختلف این صفحات سوراخ‌دار را مورد بررسی قرار داده‌اند. کرولی و پورتر [۱۴] در سال ۲۰۱۲ در داخل میراگر مایع از شبکه‌های قائم باریکی برای افزایش میرایی استفاده نمودند. آنها تیغه با شکل و ابعاد متفاوت را مورد ارزیابی قرار دادند و در تحقیق خود تعداد، محل و تخلخل تیغه‌ها در میراگر را تغییر داده و در نهایت ضابطه‌ای برای بهینه‌سازی عملکرد میراگر با توجه به کاهش تغییر مکان ناشی از بارگذاری با فرکانس مختلف ارائه نمودند.

میراگر مایعی که قرار است در این تحقیق مورد مطالعه قرار گیرد توسط زهرائی و همکاران [۱۵] ارائه شده است. این میراگر یک مخزن مستطیلی ساده با چند پره قابل تنظیم است که تا حدی از آب پر گردیده است و شکل آن به صورت شماتیک در شکل (۲) آورده شده است. در این میراگر از دو ردیف پره استفاده شده تا در صورت بسته شدن آنها طول مخزن به سه سمت

۵- معادل سازی VBTLD با TMD

برای مدل سازی VBTLD بر روی سازه همان طور که بیان شد از روابط سان و همکاران [۵] به صورت زیر استفاده شده است. هدف این است که جرم معادل مؤثر m_v و میرایی مؤثر C_v و فرکانس معادل مؤثر ω_v برای TLD معلوم شود. طبق کار سان و همکاران برای معادل سازی جرم و میرایی می توان از روابط زیر استفاده نمود:

$$m_v = m_a \frac{(1-\beta^2) + (2\xi_a\beta)^2}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi_a\beta)^2} \quad (۳)$$

$$c_v = c_a \frac{\beta^4}{(1-\beta^2)^2 + (2\xi_a\beta)^2} \quad (۴)$$

که در این روابط $\omega_a = \sqrt{k_a/m_a} = 2\pi f_a$ و $\beta = \omega/\omega_a$ و $\xi_a = c_a/(2m_a\omega_a)$ اندیس a بیانگر TMD اندیس v بیانگر TLD است. با توجه به روابط بالا مقدار جرم معادل و میرایی معادل برای زوایای مختلف پره ها طبق جدول (۲) تعیین می شود. برای تعیین سختی معادل نیز از جرم معادل و فرکانس میراگر استفاده شده است. البته برای مقادیر فرکانس میراگر از نتایج آزمایش های زهرائی و همکاران [۱۵] استفاده شده است.

جدول (۲): پارامترهای معادل سازی VBTLD برای میراگر با عمق ۴۲ میلی متر.

۴۲ میلی متر				
زاویه پره	۰	۲۰	۵۰	۷۰
Mv	۱۱/۹۱	۱۱/۹۱	۱۱/۹۱	۱۱/۹۱
Cv	۲۰۷/۴	۱۱۹/۹۲	۱۳۲۹/۶۱	۷۷۴/۹۶
Kv	۱۱۱/۸۸	۱۰۸/۶۷	۱۰۴۷/۳۶	۱۰۱۶/۷۸

۶- مدل سازی در نرم افزار OpenSEES

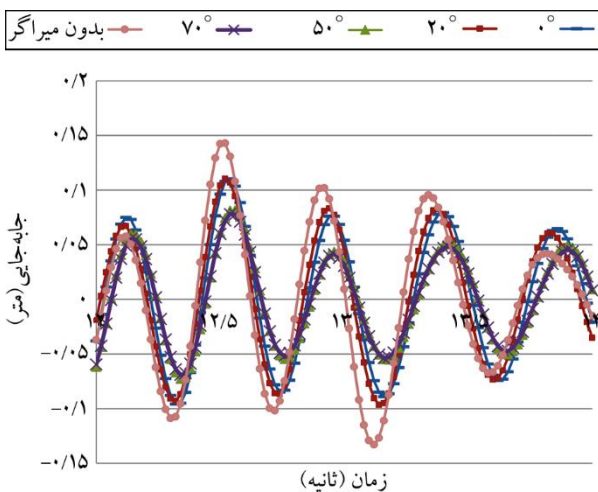
بعد از ساختن مدل قاب مد نظر در OpenSEES با استفاده از مقادیر جدول (۲) میراگر مایع با پره قابل تنظیم به صورت میراگر جرمی بر روی سازه مدل شد. البته برای مدل سازی از کار سان و همکاران [۵] استفاده شده است. برای این کار از یک جرم و یک فنر ویسکوز که

زلزله حوزه دور استفاده شده است که در ادامه در جدول (۱) مشخصات این رکوردها آورده شده است. رکوردهای ثبت شده از زمین لرزه ها نشان می دهد که زلزله های حوزه نزدیک دارای ویژگی های متفاوتی نسبت به زلزله های حوزه دور هستند. در مجموع بیشتر این ویژگی ها، در اثر پدیده مهم جهت پذیری پیش رونده در زلزله های حوزه نزدیک می باشد. این پدیده باعث می شود مؤلفه عمود بر گسل نگاشت های ثبت شده در نزدیک گسل، دارای پالس هایی با پیروند بلند در نگاشت سرعت باشند. همچنین در اکثر این نگاشت ها، تقریباً کل انرژی زلزله، در این پالس ها جمع می شود که ورود یک باره انرژی به سازه، تغییر شکل های بزرگی ایجاد می نماید. خصوصیات جنبش های حوزه نزدیک مستقیماً وابسته به مکانیسم چشمه لرزه ای، جهت گسیختگی گسل نسبت به ساختگاه و جهت لغزش گسل می باشد. مهم ترین خصوصیات متمایز کننده ی جنبش های حوزه نزدیک، تولید پالس هایی به علت اثر جهت پذیری و اثر تغییر مکان ماندگار می باشد. این نوع پالس های حرکت عموماً شامل یک یا چند پالس میززا در تاریخچه زمانی شتاب، سرعت و تغییر مکان و اغلب در تاریخچه زمانی سرعت می باشد. این خصوصیات در نگاشت های زلزله های حوزه نزدیک کاملاً متفاوت با خصوصیات و مشخصات نگاشت های حوزه دور می باشد.

جدول (۱): نام و مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده در این تحقیق.

سال	زلزله	بزرگا	PGA (g)	
زلزله حوزه دور				
۱	۱۹۵۲	کرن کانتی	۷/۳	۰/۱۵۶
۲	۱۹۸۹	لوماپریتا	۷	۰/۱
۳	۱۹۹۴	نورث ریج	۶/۷	۰/۲۵۶
۴	۱۹۹۹	قوجاییلی	۷/۴	۰/۱۸
زلزله حوزه نزدیک				
۱	۱۹۸۹	لوماپریتا	۷	۰/۵۶
۲	۱۹۷۹	ایمپریال ولی	۶/۵	۰/۲۷
۳	۱۹۹۴	نورث ریج	۶/۷	۰/۸۴
۴	۱۹۹۵	کوبه	۶/۹	۰/۸۲

گرفته شده است که معادل یک درصد جرمی می باشد. در ادامه برخی از نمودارهای تاریخچه زمانی جابه جایی بام آورده شده است. مطابق شکل (۳) در زمان ۱۲ تا ۱۴ ثانیه مشاهده می شود که در ابتدای این بازه زمانی زاویه صفر درجه عملکرد بهتری داشته تا در زمان نزدیک به ۱۲/۵ ثانیه زاویه ۷۰ درجه عملکرد مناسب تری از خود نشان می دهد. در حدود ۱۳ ثانیه مشاهده می شود که زاویه هفتاد درجه باعث کاهش بیشتر پاسخ سازه می شود تا در حدود زمان ۱۴ ثانیه زاویه صفر درجه پره عملکرد مناسب تری خواهد داشت. بنابراین می توان فهمید که اگر بتوان با روشی مناسب زاویه پره ها را در حین تحریک تغییر داد متناسب با آن رفتار بهتری در سازه شکل می گیرد. به عبارتی دیگر پاسخ جابه جایی سازه را می توان بیشتر کاهش داد. در این شکل به منظور مقایسه نتایج پاسخ سازه بدون میراگر آورده شده است.



شکل (۳): نمودار تاریخچه زمانی جابه جایی بام تحت اثر زلزله کوبه با زاویه جهت گیری پره های مختلف و سازه بدون میراگر.

در این مطالعه به دنبال بررسی امکان استفاده از این میراگر در کنترل نیمه فعال می باشیم. به همین منظور چهار زاویه جهت گیری پره ها انتخاب شد و چرخش آنها بر اساس بهینه (حداقل) نمودن پاسخ جابه جایی سازه می باشد. به بیانی دیگر در هر گام زمانی کم ترین پاسخ و زاویه نظیر آن به عنوان زاویه بهینه و پاسخ کنترل نیمه فعال تعیین می شود؛ بنابراین در این تحقیق مکانیسم چرخش پره ها بر اساس

در OpenSEES تعریف شده استفاده شده و متناسب با هر زاویه پره، مقدار جرم، سختی و میرایی طبق جدول (۲) تغییر داده شده است. روش فشرده سازی استاتیکی به خصوص در تحلیل زلزله ی یک ساختمان چند طبقه که تحت اثر حرکت واقعی زمین قرار گرفته، به خاطر سه مشخصه مهم این نوع سازه ها و تحریک ها مؤثر است.

۱. دیافراگم طبقات صلب فرض می شود.

۲. نیروی مؤثر زلزله مربوط به جابه جایی چرخشی و عمودی در گره ها برابر صفر است.

۳. اثرات اینرسی این درجات آزادی در موده های پایین تر ارتعاشی سهم ناچیزی از جواب سازه دارند.

با این سه فرض می توان برای هر طبقه سه درجه آزادی جسم صلب برای هر طبقه در نظر گرفت. در این مطالعه با استفاده از روش فوق و با فرض صلب بودن دیافراگم طبقات، قاب مورد مطالعه به صورت یک جسم ۵ درجه آزادی مدل شده است، اما در بررسی اثر میراگر فقط جابه جایی بام سازه لحاظ شده است.

برای صحت سنجی مطالعه انجام شده از نتایج کار آزمایشگاهی زهرائی و همکاران [۱۵] استفاده شده است که آزمایش های خود را بر روی یک مدل سه بعدی انجام داده اند. در این مطالعه قاب مورد مطالعه زهرائی و همکاران به صورت دو بعدی مدل شده است. از آنجا که مدل سه بعدی مقارن می باشد می توان از جابه جایی پیچشی (دوران) قاب تحت تحریک صرف نظر نمود تا جابه جایی سازه ها تحت اثر زلزله ال سنتر و با یکدیگر مقایسه شود. نتایج تحقیق نشان می دهد که همچون مدل سه بعدی در مدل عددی حاضر نیز زاویه ۷۰ درجه بهترین پاسخ را از خود نشان می دهد. همچنین مقایسه نتایج در زاویه صفر درجه نشان می دهد که در این حالت سازه در هر دو مدل بالاترین پاسخ را خواهد داشت.

۷- نتایج کنترل غیر فعال

بعد از مدل سازی قاب دو بعدی و میراگر مایع با پره قابل تنظیم در OpenSEES، قاب تحت کنترل غیر فعال قرار گرفت. در این مطالعه عمق سیال داخل مخزن ۴/۲ سانتی متر در نظر

در ادامه نتایج تحلیل سازه تحت رکورد زلزله حوزه دور نورتریج آورده شده است. در شکل (۶) مشاهده می‌شود که در بازه زمانی مختلف زاویه‌های متفاوت عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند، به عبارتی دیگر می‌توان با طراحی یک الگوریتم مناسب پاسخ سازه را با تغییر زاویه پره‌ها کاست. در شکل (۶) پاسخ کنترل نیمه فعال رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در زمان‌های مختلف در صورت چرخاندن پره‌ها با استفاده از یک الگوریتم کنترلی مناسب می‌توان پاسخ سازه را کاهش داد که این نتیجه در جدول‌های (۳) تا (۶) نیز مشاهده می‌شود.

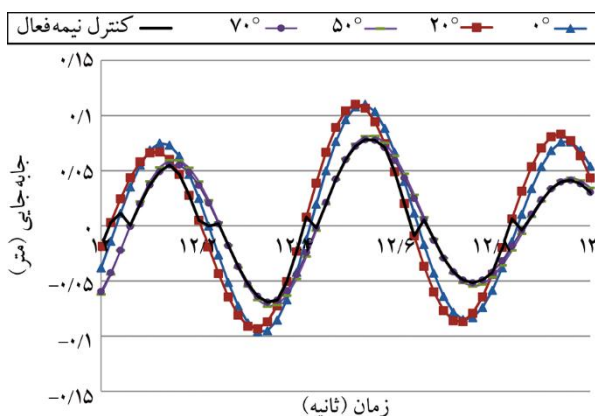
برای بررسی چگونگی عملکرد میراگر در طول زمان باید معیاری غیر از بیشینه پاسخ سازه مورد مطالعه قرار گیرد. از آنجایی که بیشینه پاسخ تنها در یک لحظه اتفاق می‌افتد بنابراین بررسی اثر میراگر مایع مورد بررسی از منظر میزان کاهش بیشینه پاسخ برای نتیجه‌گیری در مورد عملکرد آن کافی نیست. برای این منظور معیار «جذر میانگین مربعات» RMS پاسخ سازه در طول مدت زمان تحلیل، مورد بررسی قرار گرفته است. رابطه (۵) نحوه محاسبه RMS را نشان می‌دهد.

$$Y_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}} \quad (5)$$

لازم به ذکر است که y_i نمایانگر پاسخ سازه اعم از تغییر مکان، شتاب و یا برش پایه طبقات در زمان t_i می‌باشند و n بیانگر تعداد گام‌های زمانی است که پاسخ سازه در آن محدوده سنجیده می‌شود.

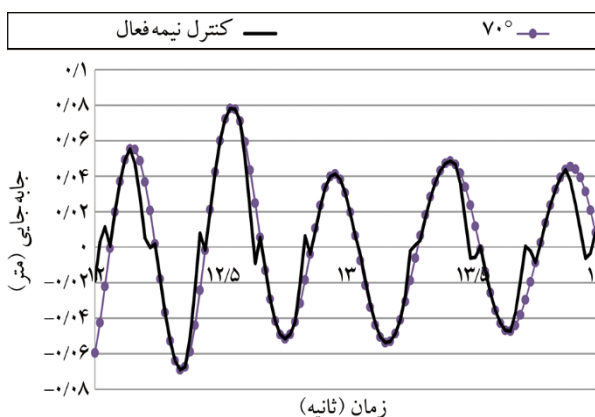
همان‌طور که مشاهده می‌شود در جدول‌های (۳) تا (۶) ماکزیمم جابه‌جایی بام و جذر میانگین مربعات جابه‌جایی بام مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از این میراگر در کنترل نیمه فعال نسبت به کنترل غیرفعال، در هر دو مورد یعنی جابه‌جایی ماکزیمم و جذر مجموع مربعات جابه‌جایی کاهش نشان می‌دهد. در جدول‌های (۳) و (۴) نتایج رکورد زلزله حوزه نزدیک و در جدول‌های (۵) و (۶) نتایج رکورد زلزله حوزه دور آورده شده است.

دستیابی به بهینه‌ترین پاسخ جابه‌جایی در هر گام استوار می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود نمودار معرف کنترل نیمه فعال نیز رسم شده است که کمترین پاسخ‌ها را نشان می‌دهد. به بیانی دیگر اگر بتوان با مکانیسمی مناسب پره‌های این میراگر را در حین تحریک چرخاند می‌توان از جابه‌جایی سازه کاست و نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی به سمت نمودار کنترل نیمه فعال میل خواهد نمود.



شکل (۴): نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام تحت اثر زلزله کوبه و کنترل نیمه فعال.

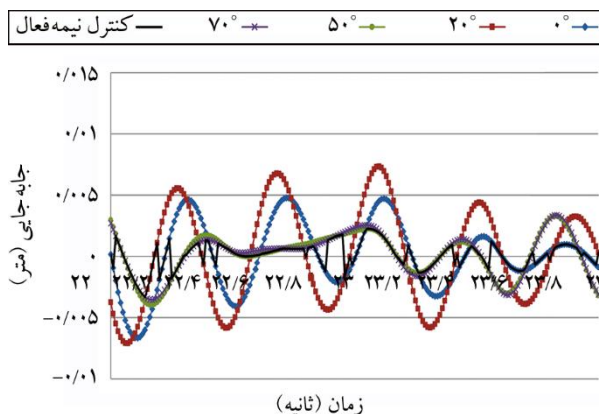
همان‌طور که از شکل‌های (۳) و (۴) مشخص می‌شود، زاویه ۷۰ درجه بهترین پاسخ‌ها را نشان می‌دهد. در شکل (۵) پاسخ سازه در حالتی که زاویه پره ۷۰ درجه می‌باشد با کنترل نیمه فعال مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود طراحی الگوریتم مناسب و چرخش پره باعث بهبود پاسخ‌ها می‌گردد.



شکل (۵): نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام تحت اثر زلزله کوبه تحت کنترل نیمه فعال و پره با زاویه ۷۰ درجه.

جدول (۵): نتایج تحریک سازه و درصد کاهش پاسخ سازه در کنترل نیمه فعال تحت زلزله حوزه دور کرن کانتی.

کنترل نیمه فعال	هفتاد درجه	پنجاه درجه	بیست درجه	صفر درجه	
۰/۰۱۷	۰/۰۱۷۱	۰/۰۱۷	۰/۰۱۹۲	۰/۰۱۸۷	ماکزیمم جابه‌جایی بام
۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۳۸۸	۰/۰۰۳۹۴	۰/۰۰۴۵۸	۰/۰۰۴۴۲	جذر مجموع مربعات جابه‌جایی
-	۰/۴۰	۰	۱۲/۷۹	۹/۷۱	درصد کاهش جابه‌جایی در کنترل نیمه فعال
-	۴/۹۹	۶/۵۳	۲۳/۹۱	۱۹/۴۶	درصد کاهش جذر مجموع مربعات جابه‌جایی در کنترل نیمه فعال



شکل (۶): نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی بام تحت اثر زلزله حوزه دور نورث‌تریج با زاویه جهت‌گیری پره‌های مختلف و کنترل نیمه فعال.

جدول (۶): نتایج تحریک سازه و درصد کاهش پاسخ سازه در کنترل نیمه فعال تحت زلزله حوزه دور نورث‌تریج.

کنترل نیمه فعال	هفتاد درجه	پنجاه درجه	بیست درجه	صفر درجه	
۰/۰۲۵۷	۰/۰۲۵۷	۰/۰۲۶۱	۰/۰۲۹۵	۰/۰۲۹۳	ماکزیمم جابه‌جایی بام
۰/۰۰۵۷۷	۰/۰۰۶۰۶	۰/۰۰۶۱۸	۰/۰۰۷۵۱	۰/۰۰۷۳۱	جذر مجموع مربعات جابه‌جایی
-	۰	۱/۴۶	۱۴/۸۶	۱۳/۷۴	درصد کاهش در کنترل نیمه فعال جابه‌جایی
-	۵/۰۷	۷/۰۶	۳۰/۰۷	۲۶/۷۴	درصد کاهش در کنترل نیمه فعال جذر مجموع مربعات جابه‌جایی

جدول (۳): نتایج تحریک سازه و درصد کاهش پاسخ سازه در کنترل نیمه فعال تحت زلزله حوزه نزدیک کوبه.

کنترل نیمه فعال	هفتاد درجه	پنجاه درجه	بیست درجه	صفر درجه	
۰/۱۵۲	۰/۱۵۴	۰/۱۵۷	۰/۱۵۸	۰/۱۶۸	ماکزیمم جابه‌جایی بام
۰/۰۲۵۳	۰/۰۲۷۹	۰/۰۲۸۹	۰/۰۳۲۱	۰/۰۳۳۶	جذر مجموع مربعات جابه‌جایی
-	۱/۰۳	۳/۵۳	۳/۷۴	۹/۲۹	درصد کاهش جابه‌جایی در کنترل نیمه فعال
-	۱۰/۳۶	۱۴/۰۶	۲۶/۸۹	۳۲/۹۶	درصد کاهش جذر مجموع مربعات جابه‌جایی در کنترل نیمه فعال

بررسی نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که چرخاندن پره‌ها باعث بهبود رفتار سازه مجهز به میراگر مایع می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در زاویه ۷۰ درجه نتایج کنترل غیرفعال به نتایج کنترل نیمه فعال نزدیک‌تر می‌باشد که دلیل این امر افزایش انحنا خطوط جریان و افزایش سطح تماس سیال و جداره پره‌ها می‌باشد. همان‌طور که زهرائی و همکاران [۱۵] در کار خود نشان دادند در این محدوده به علت تماس بیشتر سیال و مرز آن و انحنا بیشتر خطوط جریان میرایی و در نتیجه کاهش پاسخ سازه بیشتر می‌شود که این امر منجر به نزدیک‌تر بودن نتایج این زاویه و کنترل نیمه فعال می‌شود.

جدول (۴): نتایج تحریک سازه و درصد کاهش پاسخ سازه در کنترل نیمه فعال تحت زلزله حوزه نزدیک لوماپریتا.

کنترل نیمه فعال	هفتاد درجه	پنجاه درجه	بیست درجه	صفر درجه	
۰/۰۶۴۶	۰/۰۶۴۶	۰/۰۶۵۹	۰/۰۷۰۲	۰/۰۷۰۷	ماکزیمم جابه‌جایی بام
۰/۰۰۹۳۶	۰/۰۰۹۹۸	۰/۰۱۰۲	۰/۰۱۱۴	۰/۰۱۱۴	جذر مجموع مربعات جابه‌جایی
-	۰	۱/۴۷	۸/۵۴	۹/۴۴	درصد کاهش جابه‌جایی در کنترل نیمه فعال
-	۶/۶۹	۹/۱۷	۲۱/۷۷	۲۱/۸۴	درصد کاهش جذر مجموع مربعات جابه‌جایی در کنترل نیمه فعال

نتایج نشان می‌دهد که میراگر مایع با پره قابل تنظیم علاوه بر نقاط بیشینه پاسخ، در سایر بازه تحریک نیز می‌تواند از پاسخ‌ها بکاهد. همان‌طور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود علاوه بر نقاط بیشینه پاسخ در سایر نقاط در اثر استهلاک انرژی ناشی از

جدول (۷): درصد کاهش بیشینه و RMS پاسخ جابه‌جایی بام در کنترل نیمه‌فعال نسبت به زوایای مختلف پره‌ها.

صفر درجه	بیست درجه	پنجاه درجه	هفتاد درجه		
۲/۰۷	۳/۵۶	۴/۲۶	۸/۸۹	درصد کاهش بیشینه پاسخ	قوجایی
۱۵/۴۹	۲۰/۸۵	۷/۴۷	۱۳/۷۱	درصد کاهش RMS پاسخ	
۸/۸۵	۱۱/۳۴	۰	۰/۳۹	درصد کاهش بیشینه پاسخ	کرن کانتی
۱۶/۲۹	۱۹/۳۰	۶/۱۳	۴/۷۶	درصد کاهش RMS پاسخ	
۱۲/۰۸	۱۲/۹۴	۱/۴۴	۰	درصد کاهش بیشینه پاسخ	نورثریج
۲۱/۱۰	۲۳/۱۲	۶/۵۹	۴/۸۲	درصد کاهش RMS پاسخ	
۱۱/۶۸	۱۰/۸۸	۱/۷۸	۰	درصد کاهش بیشینه پاسخ	لوماپریتا
۲۵/۳۲	۲۱/۷۸	۱۳/۵۹	۱۰/۵۲	درصد کاهش RMS پاسخ	
۷/۳۹	۶/۱۹	۱/۳۸	۰	درصد کاهش بیشینه پاسخ	نورثریج
۲۳/۶۳	۲۲/۸۹	۸/۶۵	۵/۷۶	درصد کاهش RMS پاسخ	
۸/۶۳	۷/۸۷	۱/۴۵	۰	درصد کاهش بیشینه پاسخ	لوماپریتا
۱۷/۹۳	۱۷/۸۸	۸/۴۰	۶/۲۷	درصد کاهش RMS پاسخ	
۹/۲۹	۳/۷۴	۳/۵۳	۱/۰۳	درصد کاهش بیشینه پاسخ	کوبه
۲۴/۷۹	۲۱/۱۹	۱۲/۳۲	۹/۳۹	درصد کاهش RMS پاسخ	
۳/۴۳	۲/۲۶	۰/۷۰	۰	درصد کاهش بیشینه پاسخ	ایمپریال‌ولی
۲۳/۰۴	۲۲/۵۱	۸/۴۲	۵/۷۱	درصد کاهش RMS پاسخ	

می‌شود به همین دلیل پاسخ‌ها در حین تحریک حوزه نزدیک کاهش بیشتری نسبت به حوزه دور از خود نشان می‌دهد.

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار میراگر مایع با پره‌های قابل تنظیم در کنترل غیرفعال قاب مد نظر مورد بررسی قرار گرفته است. برای این مطالعه از چهار رکورد زلزله حوزه نزدیک و چهار رکورد زلزله حوزه دور برای تحریک قاب استفاده شده است. عمق مایع درون میراگر ۴۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده که معادل درصد جرمی ۱ درصد می‌باشد.

نتایج این مقاله نشان می‌دهد که با طراحی الگوریتمی مناسب برای چرخاندن پره‌ها می‌توان رفتار دینامیکی سازه را ارتقا داد و پاسخ جابه‌جایی را کاهش داد که این امر در کنترل نیمه‌فعال این میراگر ممکن خواهد بود. لذا در صورت طراحی الگوریتمی

اصطکاک لایه مرزی، تلاطم سیال و شکست موج پاسخ سازه کاسته می‌شود. همچنین چرخش پره‌ها منجر به افزایش میزان استهلاک انرژی شده و این به معنی فراهم شدن شرایط استفاده از حداکثر ظرفیت میراگر مایع با پره قابل تنظیم در اثر چرخش پره‌ها است.

جدول (۷) مقایسه نتایج مربوط به زلزله حوزه نزدیک و زلزله حوزه دور را نشان می‌دهد. میراگر مایع با پره قابل تنظیم در حین زلزله حوزه نزدیک عملکرد بهتری نسبت به زلزله حوزه دور دارد که دلیل این امر آزاد شدن یک‌باره انرژی در زلزله حوزه نزدیک می‌باشد. همان‌طور که بیان شد در این میراگرها دو مکانیسم استهلاک انرژی وجود دارد یکی اصطکاک لایه مرزی و دیگری تلاطم سیال شکست موج که میزان تأثیر مکانیسم دوم بیشتر از مکانیسم اول است. تحریک‌های حوزه نزدیک به دلیل آزادسازی یک‌باره انرژی باعث افزایش تلاطم و شکست موج و در نتیجه کاهش بیشتر پاسخ‌ها

Proceedings of the 8th International Conference on Wind Engineering, Elsevier, **43**(1-3), 1883-1894.

6. Koh, S. and Wang, C. (1994) Theoretical and experimental studies on rectangular liquid dampers under arbitrary excitations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23**(1), 17-31.
7. Kareem, A. (1993) Tuned liquid dampers: past, present and future. *Proceeding of the 7th U.S. National Conference on Wind Engineering*, Los Angeles, CA, USA, 343-352.
8. Love, J.S. and Tait, M.J. (2011) Nonlinear multimodal model for tuned liquid dampers of arbitrary tank geometry. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **46**(8), 1065-1075.
9. Tondl, A. Runjigork, M., and Verhulst, F. (2000) *Autoparametric Resonance in Mechanical Systems*. Cambridge University, United Kingdom, 31-40.
10. Housner, G.W., 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.P. (1997) Structural control: past, present and future. *Journal of Engineering Mechanics*, **123**(3), 897-971.
11. Yalla, S. (2001) *Liquid Damper for Mitigation of Structural Response: Theoretical Development and Experimental Validation*. Ph.D. Dissertation, Development of civil Engineering and Geological Sciences, Notre Dame, India.
12. Tait, M.J., El Damatty, A.A., Isyumov, N.I., Siddique, M.R. (2005) Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens. *Journal of Fluids and Structures*, **20**(8), 1007-1023.
13. Love, J.S. and Tait M.J. (2010) Nonlinear simulation of a tuned liquid damper with damping screens using a modal expansion technique. *Journal of Fluids and Structures*, **26**(7-8), 1058-1077.
14. Crowley, S. and Porter, R. (2012) An analysis of screen arrangements for a tuned liquid damper. *Journal of Fluids and Structures*, **34**, 291-309.
15. Zahrai, S.M., Abbasi, S., Samali, B. and Vercelj, Z. (2012) Experimental investigation of utilizing TLD with baffles in a scaled down 5-story benchmark building. *Journal of Fluids and Structures*, **28**, 194-210.

مناسب می توان از این میراگر در کنترل نیمه فعال استفاده نمود و پاسخ جابه جایی سازه را متناسب با تغییر زاویه پره ها کاهش داد. چرخاندن پره ها در حین تحریک باعث بهبود پاسخ سازه یعنی کاهش حداکثر جابه جایی بام و کاهش جذر مجموع مربعات آن می شود. البته این درصد کاهش برای زاویه ۵۰ و ۷۰ درجه پره ها کمتر می باشد که دلیل آن ایجاد انحنا در مسیر جریان سیال داخل میراگر و افزایش میرایی میراگر در این زوایا می باشد. ضمناً بیشترین کاهش ناشی از چرخش پره ها در بیشینه جابه جایی بام در زلزله حوزه دور نورث ریج در کنترل نیمه فعال نسبت به زاویه ۲۰ درجه رخ می دهد که این مقدار در زلزله حوزه نزدیک در زلزله کوبه و در زاویه صفر درجه رخ می دهد. بررسی نتایج این مطالعه نشان می دهد که در زلزله حوزه نزدیک کاهش بیشتری نسبت به زلزله حوزه دور مشاهده می گردد که این امر نشان دهنده عملکرد بهتر این میراگر در زلزله حوزه نزدیک می باشد.

مراجع

1. Soliman, I. (2012) Passive and semi-active structure-multiple tuned liquid damper systems. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, 1047, 40-45.
2. Tamura, Y., Kousaka, R., and Modi, V. (1992) Practical application of notation damper for suppressing wind-induced vibrations of airport towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **43**(1-3), 1919-1930.
3. Ueda, T., Nakagaki, R. and Koshida, K. (1992) Suppression of wind-induced vibration by dynamic dampers in tower-like structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **43**(1-3), 1907-1918.
4. Fujino, Y., Pacheco, B.N., Chaiseri, P., and Sun, L.M. (1988) Parametric studies on tuned liquid damper (TLD) using circular containers by free oscillation experiments. *Journal of Structural Engineering*, **5**(2), 381-391.
5. Sun, L.M., Fujinio, Y., Pacheno, B. and Chaiseri, P. (1991) Modeling tuned Liquid Damper.

Tuned Liquid Damper with Rotatable Baffles to Control a 5-Story Structure Model under Near and Far-Field Earthquakes

Seyed Mehdi Zahrai^{1*} and Hamed Enayati²

1. Professor, School of Civil Engineering, the University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding Author, email: mzahrai@ut.ac.ir

2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran

Structural control is considered as an efficient method to improve seismic behavior of buildings. Control methods are divided into passive, active, hybrid and semi-active due to adaptability and need to external energy. Semi-active control methods have the reliability of passive systems, and at the same time maintain the consistency and variability of active systems. In this method, structural responses decrease based on the change in damping properties or stiffness of the system. Tuned Liquid Damper, TLD, has a dual operation: it can be used as a damper and water tank. It has low manufacturing, installation and maintenance costs. In this damper, water sloshing reduces the vibration of the structure. In the recent years, researchers have tried to use the baffles and perforated plates in the damper tank to increase the energy dissipation.

In this study, the variable baffles previously presented by Zahrai et al. are used. The objective is to examine the behavior of TLD with variable baffles and feasibility of its usage in semi-active control of structural responses due to near and far field earthquakes. Therefore, in this research, an experimental model of the proposed damper is used to passively control responses of a 2D frame. In this study, a benchmark 5-story building structure utilized in the Sydney Technological University, Australia and adopted by the International Association for Structural Control is used. The structure can have a maximum of five stories with different heights. According to the study by Zahrai et al. to tune the TLD, it is enough to adjust the structural frequency between the frequencies of the damper when the TLD baffles are fully open and fully closed concluding that the damper in this situation has the best performance. It should also be mentioned about the re-adjustment of the damper after rotation of baffles that since the period of the structure is between the damper periods in fully open and closed baffle situations, significant changes will not happen in initial tuning. In fact, if the TLD is tuned properly at first, the baffle rotation does not make too much change in its initial tuning. The study by Sun et al. is used to model the fluid damper in OpenSees. For each orientation, equivalent stiffness, mass and damping are determined. The mass and the viscous spring defined in OpenSees are utilized according to each baffle angle. The stiffness and damping of viscous spring are equal to the equivalent stiffness and damping values.

In this paper, the behavior of TLDs with variable baffles under four near-field and four far-field earthquakes is evaluated. The liquid depth inside the damper was considered to be 42 mm, which is equivalent to mass percentage of 1%. Damping of structural models can be changed using an efficient semi-active control algorithm, which acts by changing the angles of baffles. The investigation of the numerical results shows that the rotation of the baffles during the excitation improves seismic behavior of the structural models and reduces the roof displacement. The results show that higher reduction is observed under the near-field earthquakes than the case under far-field earthquakes. However, this reduction is lower for the baffle angles of 50 and 70 degrees due to the curving of the streamlines inside the damper and increase of the damping coefficient in these angles.

Keywords: Tune Liquid Damper, Rotatable Baffles, Passive Control, Semi-Active Control, Baffle Angle, Near-Field Earthquakes, Far-Field Earthquakes.