کنترل لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از میراگرهای سیال تنظیمی (TLD)، تطبیق‌پذیر با ارتفاع آب

نکیسا آذری
دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران
فرشید فتحی*
عضو هیات علمی، دانشکده مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد ، ایران
f-fathi@iaun.ac.ir
تاریخ دریافت: ۹۹/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۹۹/۱۲/۲۴

چکیده
میراگرهای سیال تنظیمی (TLD)، که امروزه بصورت گسترده‌ای مورد استقبال و استفاده قرار گرفته‌اند، با داشتن ساختاری ساده، عدم نیاز به منبع انرژی خارجی و هزینه‌های ناچیز ساخت و اجرا توانسته‌اند بطور موثری برای کاهش پاسخ‌های سازه‌ها در برابر نیروهای زلزله مورد استفاده واقع شوند. با تنظیم ارتفاع آب درون مخزن میراگر سیال تنظیمی بگونه‌ای که فرکانس ارتعاش سیال با فرکانس اصلی سازه یکسان شود می‌توان بالاترین راندمان را از این سیستم کنترلی انفعالی (غیرفعال) در کاهش پاسخ سازه‌ها بدست آورد. تلاش‌های زیادی انجام شده است که این نوع میراگر درهنگام شرایط عادی نیز بتواند کاربرد داشته و بعنوان منبع ذخیره‌ی آب ساختمان مورد استفاده واقع شود. اما در چنین شرایطی به دلیل متغیر بودن سطح آب مصرفی درون مخزن میراگر، دیگر لزوماً راندمان آن درصورت وقوع زلزله بالا نخواهد بود. لذا هدف از ارائه این مقاله ارائه جزئیات کامل‌تری از یک مدل بهبود یافته‌ی پیشنهادی بجای TLDهای متداول است که بتواند در ارتفاع‌های مختلف آب درون مخزن نیز دارای بهترین راندمان در کاهش پاسخ‌های سازه‌ای داشته باشد و قبلاً برای نخستین‌بار توسط مولفین پیشنهاد شده است. بدین منظور با اعمال هفت گروه رکورد زلزله به مدل تحلیلی مورد مطالعه، راندمان این دو سیستم کنترلی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی انجام شده بیانگر آن است که پاسخ‌های حداکثر ساختمان در سیستم کنترلی پیشنهادی در مقایسه با سیستم TLD متداول، برای ارتفاع‌های مختلف آب مخزن، کاهش قابل توجهی داشته و موثرتر بوده است.

کلید واژگان: میراگر سیال تنظیمی، میراگر سیال تطبیق‌پذیر، کنترل انفعالی (غیرفعال)، کاهش پاسخ‌های سازه‌ها، تحلیل‌های تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی.

۱- مقدمه

اساس کار میراگر سیال تنظیم شونده یا تنظیمی[۳] (TLD)، تلاطم سیال درون یک یا چند مخزن بوده و از نظر کلی سازوکاری نظیر میراگر جرمی تنظیم شونده دارد. مشخصات هندسی مخزن و ارتفاع آب مورد استفاده در این میراگر به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که در هنگام زلزله حالت تشدید در نوسانات آب درون مخزن آن ایجاد شده و بیشترین استهلاک انرژی صورت پذیرد. کاربرد میراگرهای سیال تنظیمی به قرن نوزدهم میلادی و برای کاهش نوسانات کشتی‌ها بازمی‌گردد. استفاده از میراگرهای سیال تنظیمی برای کاهش پاسخ‌های سازه‌ها در برابر نیروهای باد یا زلزله مربوط به اواسط قرن بیستم بوده و ولت و مودی را می‌توان ازپیشگامان این رویکرد دانست [۱]. هاوزنر درسال ۱۹۶۳، مدل مکانیکی ساده‌ای را برای مدل‌سازی رفتار دینامیکی مخازن آب ارائه کرد. در این مدل پاسخ دینامیکی مخزن آب با استفاده از سیستم‌های جرم و فنر با مشخصات معین، تعیین شده است. این مدل تنها مود اول حرکت سیال را درنظر گرفته و برای مدل‌سازی مخازن با هندسه ساده شامل مخازن مستطیلی و دایروی کاربرد دارد [۲]. مطالعه بر روی پارامترهای موثر بر عملکرد میراگر سیال تنظیمی نظیر عمق سیال، نسبت جرم سیال به جرم ساختمان و فرکانس سیال درون مخزن بر روی تعدادی سازه تکدرجه آزادی همراه با TLD تحت اثر زلزله‌های مصنوعی در سال ۲۰۰۰ توسط بانرجی انجام شد. نتایج تحقیقات وی نشان‌داد که در مخازن مستطیلی TLD، برای تحریک‌های کوچک، افزایش عمق آب درون مخزن تاثیری بر حداکثر پاسخ سازه نداشته، اما برای تحریک‌های قوی عکس این قضیه صادق است. طبق نتایج بدست آمده، هرچه نسبت جرم موثر (سیال) بیشتر باشد، تاثیر بیشتری در کاهش پاسخ‌های سازه دارد با افزایش دروه تناوب طبیعی و نسبت میرایی سازه، میزان کارایی TLD در کاهش جابجایی نسبی و شتاب کل کاهش می‌یابد [۳].

در سال ۲۰۰۴ لی و همکاران به منظور کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بلند، تحقیقاتی در خصوص میراگرهای سیال چندگانه انجام دادند. در مدل‌سازی آنها، فشار دینامیکی مایع درون مخزن در حال نوسان، با استفاده از روش حجم سیال و پاسخ سازه براساس حل معادلات حالت به‌دست آمد. مدل عددی و همچنین آزمایشگاهی آن‌ها، کاهش پاسخ به میزان ۴۰ درصد حداکثر تغییرمکان سازه را نشان داد [۴]. لی و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از RTHS[۲] عملکرد میراگرمایع تنظیم شده را در کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها ارزیابی کردند. آنها با استفاده از نتایج آزمایش‌های میزلرزه نشان دادند RTHS می‌تواند به عنوان روشی دقیق و اقتصادی در این زمینه استفاده شود [۵].

در سال ۲۰۱۴، توسط موندال و همکارانش یک ساختمان چهارطبقه تحت تاثیر ارتعاش، با استفاده از میراگر سیال تنظیمی در آزمایشگاه تحت اثر زلزله‌های مصنوعی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که TLD زمانی بیشترین تاثیر را دارد که فرکانس رفت و برگشت سیال با فرکانس اصلی سازه برابر شود، که در اینصورت ارتعاشات سازه به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد [۶]. ارزیابی مقدار شیب کف میراگر TLD تحت حرکت هارمونیک توسط مورودی و بوهسیل در سال ۲۰۱۷ انجام شد، آزمایشات آن‌ها یکبار با مدل TLD با مخزن دارای کف صاف و بار دیگر با مخزن دارای کف شیب‌دار بررسی گردید. براساس آزمایشات انجام شده، کف شیبدار در میراگرهای سیال تنظیمی در کاهش پاسخ‌های سازه تاثیر بهتری نسبت به کف صاف خواهد داشت و بهترین شیب کف مخزن برابر با شیب ۳۰ درجه می‌باشد [۷].

وئو و همکاران در سال ۲۰۱۷ مخزن TLD را به صورت یک دیوار طراحی کردند. عملکرد TLWD با تعداد مختلف ستون‌های مایع، پاسخ‌های اولیه‌ی سازه را کاهش داد و اضافه کردن ستون‌های داخلی در هندسه ثابت توانست عملکرد میراگر را تقویت نماید [۸]. در سال ۲۰۱۹ فورت‌مولر و همکارانش به بررسی آزمایشگاهی بر روی سازه‌هایی با جداساز پایه، که مجهز به میراگر سیال ستونی بودند، پرداختند. نتایج این تحقیقات نشان‌داد ترکیب سیستم کنترلی میراگر سیال ستونی و جداسازپایه برای ساختمان، اگر به درستی برای سازه مورد نظر انجام پذیرد، پاسخ‌های شتاب و جابجایی را کاهش می‌دهد [۹].

کامگر و همکاران در سال ۲۰۲۰ اثرات اندرکنش سازه مجهز به میراگر سیال تنظیمی را با خاک بررسی کردند. آنها تاثیر شکل پذیری خاک را برخلاف مطالعات دیگر که سازه را بر روی یک فنداسیون صلب بررسی می‌کنند، مطالعه کردند. آنها یک سازه تکدرجه آزاد (برج فرودگاه- ناکاساکی را) به همراه سیستم کنترلی میراگر سیال تنظیمی را بررسی کرده‌اند. مطالعات آن‌ها در دو فاز تئوری کم عمق و ارتفاع آب تنظیم شده، انجام شد. نتایج نشان داد که سیستم کنترلی میراگر سیال نسبت به سیستم کنترل نشده پاسخ‌ها را بیشتر کاهش می‌دهد و همچنین در رکوردهای حوزه‌ی نزدیک به گسل، کاهش حداکثر پاسخ سازه در سازه کنترل شده با TLD موثرتر است [۱۰].

در سال ۲۰۲۰، پاندیت و بیسوال به بررسی سازه‌های کوتاه مرتبه مجهز به میراگر سیال تنظیمی تحت تحلیل‌های تاریخچه زمانی پرداختند. در تحقیق آنها ارتعاش سیال درون مخزن با روش المان حجم محدود، شبیه سازی گردیده است. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش نسبت جرم سیال درون مخزن به جرم سازه به طور قابل توجهی ارتعاشات سازه را کاهش می‌دهد، همچنین زمانی که سازه کوتاه مرتبه مجهز به میراگر با کف شیبدار در معرض زلزله‌هایی با فرکانس بالا و متوسط قرار می‌گیرد، عملکرد بهتری نسبت به زمانی که سازه در معرض زلزله-هایی با فرکانس پایین قرار گیرد، دارد [۱۱]. مطالعه برروی میراگرهای سیال تنظیمی همچنان مورد توجه و علاقه پژوهشگران است.

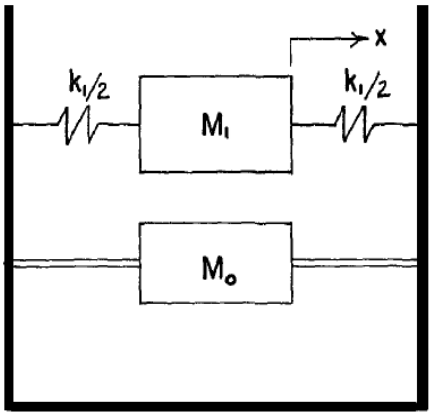
همان‌گونه که از مرور بر تاریخچه‌ی TLDها مشاهده شد، مشخصات هندسی مخزن و ارتفاع آب (عمق آب) تاثیر مستقیمی بر عملکرد و کارایی میراگرهای سیال تنظیمی دارد، بطوری‌که برای یک هندسه مشخص در یک TLD، وضعیت تشدید تنها برای یک ارتفاع مشخص آب حاصل می‌شود. بنابراین در صورتیکه مقدار آب موجود در مخزن از این ارتفاع بهینه کمتر شود، دیگر TLD راندمان کامل خود را در کاهش پاسخ سازه نخواهد داشت. از طرف دیگر، یکی از کاربردهای مهم میراگرهای سیال تنظیم‌شونده می‌تواند استفاده‌ی همزمان آنها بعنوان مخازن ذخیره آب مصرفی در ساختمان می‌باشد. بنابراین با توجه به متغیر بودن سطح آب درون مخزن، کارایی آن تغییر یافته و از حالت تنظیم شده‌ی اصلی خارج می‌گردد. در این پژوهش جزئیات بیشتری از یک سیستم کنترلی جدید تطبیق‌پذیر با ارتفاع آب، برای دستیابی به بیشترین کاهش در پاسخ‌های ساختمان‌های مجهز به سیستم میراگر سیال تنظیمی، که قبلاً برای نخستین‌بار توسط مولفین پیشنهاد شده‌است، ارائه می‌گردد [۱۲]. مدل ارائه شده، بگونه‌ای طراحی و تنظیم می‌شود که برای ارتفاع‌های مختلف آب درون مخزن بهترین کارایی ممکن را در کاهش پاسخ‌های سازه داشته باشد.

۲- طراحی بهینه میراگر سیال تنظیمی:

در این قسمت، در ابتدا مدل و روابط تحلیلی مخازن مستطیلی مورد استفاده برای میراگرهای سیال تنظیمی (متداول)، که در آنها اثرات ابعاد مخزن، ارتفاع آب درون آن و نسبت جرمی مورد استفاده در آنها وجود دارد، ارائه می‌شود. در ادامه مدل پیشنهادی در پژوهش انجام شده معرفی و تشریح می‌گردد. هدف از ارائه این مدل، کاهش ارتعاشات لرزه‌ای ساختمان‌ها به ازای مقادیر مختلف ارتفاع آب درون مخزن TLDو بهینه‌سازی عملکرد آن در شرایط متفاوت از نظر ارتفاع آب می‌باشد.

۲-۱- روابط میراگر سیال تنظیمی متداول (TLD)

در تحلیل میراگرهای سیال تنظیمی از مدل هاوزنر، برای مدل‌سازی مخزن میراگر، استفاده می‌شود [۲]. در مدل ارائه شده، پاسخ دینامیکی مخازن آب در یک ارتفاع مشخص، مطابق شکل ۱، با استفاده از سیستم‌های جرم و فنر با مشخصات معین تعیین می‌شود. ثابت‌های فیزیکی مدل، بر مبنای رفتار هیدرودینامیکی سیال به دو مؤلفه ثابت (با جرم ثابت M_0) و نوسانی (با جرم نوسانی M_1)، تقسیم‌بندی می‌شوند. مؤلفه ثابت، فشار صلب ناشی از شتاب بخشی از سیال درون مخزن را مدل می‌کند که شامل جرمی است که به همراه مخزن حرکت می‌کند. مؤلفه نوسانی، فشار ناشی از تلاطم بخش دیگری از سیال (در تراز بالاتر) را مدل می‌کند و شامل جرمی است که حرکت سطح آزاد را شامل می‌گردد.



شکل ۱- مدل‌سازی سیال درون مخزن به روش هاوزنر [۲]

مقادیر M_0 و M_1 به مشخصاتی چون جرم کل سیال درون مخزن (M)، طول مخزن مستطیلی (2L) و ارتفاع کلی آب درون مخزن (h)، مطابق روابط (۱) و (۲)، بستگی دارند.

$$M_0 = M \frac{\tanh 1.7L/h}{1.7L/h} \qquad (۱)$$

$$M_1 = M \frac{(0.83)\tanh 1.6h/L}{1.6h/L} \qquad (۲)$$

3 Tuned Liquid Damper
2 Real-time Hybrid Shaking

در شکل ۱، جرم نوسانی M_1 توسط فنرهایی با مجموع سختی K_1 به دیواره‌های مخزن متصل شده است. مقدار K_1 به M_1، جرم کل سیال M، طول مخزن مستطیلی (2L) و ارتفاع کلی آب درون مخزن h، مطابق رابطه (۳) بستگی دارد.

$$K_1 = 3\frac{M_1}{M}^2 \frac{gh}{L^2} \qquad (۳)$$

در طراحی میراگرهای سیال تنظیمی (متداول)، جرم کل آب درون مخزن (M)، به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که زمان تناوب اصلی رفت و برگشت مایع درون مخزن تا حد ممکن به مقدار زمان تناوب اصلی سازه نزدیک شود و حالت تشدید ایجاد گردد. برای مخازن مکعب مستطیلی در روش هاوزنر، زمان تناوب اصلی رفت و برگشت آب (T_w) را به‌سادگی می‌توان از رابطه (۴) محاسبه نمود [۲].

$$T_w = 2\pi\sqrt{\frac{M_1}{K_1}} \qquad (۴)$$

با جایگذاری مقادیر M_1 و K_1، از روابط (۲) و (۳) در رابطه‌ی (۴) می‌توان فرکانس ارتعاش آب را مطابق رابطه‌ی (۵) بدست آورد. در رابطه (۵) ارتفاع و طول مخزن به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که فرکانس حاصل از این معادله برابر با فرکانس اصلی ساختمان شده و حالت تشدید در آب ایجاد گردد. بنابراین برای ساختمانی مشخص، با طول و عرض مفروض برای مخزن مستطیلی TLD، تنها یک ارتفاع بهینه برای آب، پاسخ حالت تشدید را ایجاد نموده و کارایی TLD تنها با آن ارتفاع آب، حداکثر خواهد شد.

$$f_w = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\pi g}{2L}\tanh\frac{\pi h}{2L}} \qquad (۵)$$

علاوه بر ارتفاع بهینه آب در حالت تشدید، پارامتر اساسی دیگر که تاثیر مهمی بر عملکرد میراگر سیال تنظیمی دارد، نسبت جرم (μ) در آن می‌باشد. نسبت جرم μ، نسبت جرم آب درون مخزن میراگر سیال تنظیمی M ، به جرم کل سازه M_{St}، مطابق با رابطه (۶) است. در حالت کلی با افزایش مقدار نسبت جرم μ (تا حد مشخصی)، کاهش پاسخ بیشتری در سازه بوجود می‌آید و با افزایش حجم آب، انرژی بیشتری جذب و مستهلک شده و پاسخ سازه کاهش بیشتری می‌یابد. مطالعات نشان دهنده نسبت جرم بین حدود ۰/۰۱ الی ۰/۰۵ برای بهترین کارایی می‌باشد [۳].

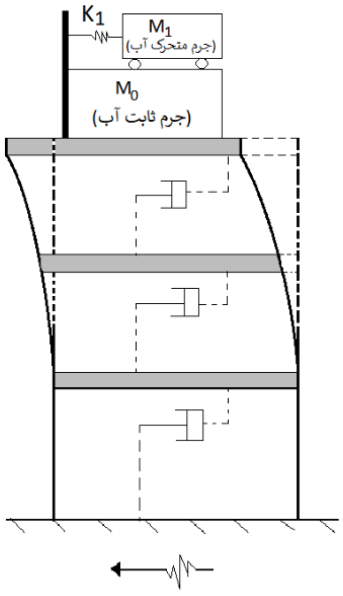
$$\mu = \frac{M}{M_{St}} \qquad (۶)$$

جرم کل آب درون مخزن M از رابطه (۷) قابل محاسبه است. در این رابطه ρ چگالی آب، h ارتفاع آب درون مخزن، (2L) طول مخزن و b عرض مخزن می‌باشد.

$$M = \rho.h.(2L).b \qquad (۷)$$

۲-۲- نحوه‌ی تحلیل میراگر سیال تنظیمی (متداول)

در شکل ۲، نمایی از یک میراگر سیال تنظیمی (متداول) که براساس روش هاوزنر مدل‌سازی شده و بر روی یک ساختمان قرارگرفته، نمایش داده شده است. برای ارزیابی کارایی میراگر سیال تنظیمی باید سیستم ارائه شده را در یک نرم‌افزار معتبر مدل‌سازی نمود و با کمک انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی مقدار کاهش پاسخ‌های سازه را مورد بررسی قرار داد.



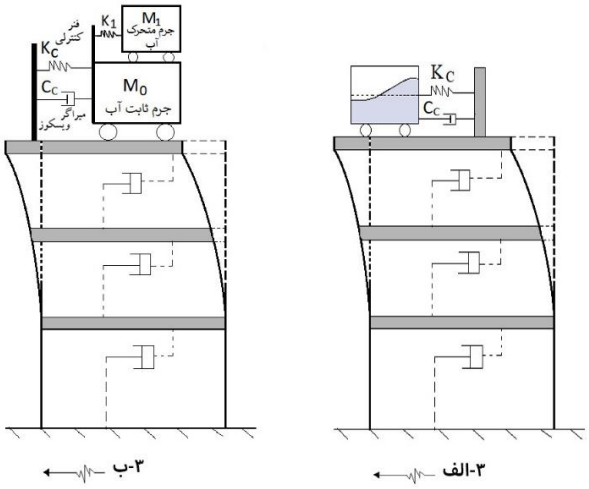
شکل ۲- مدل تحلیلی میراگر سیال تنظیمی (متداول)

در این پژوهش تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی به کمک نرم افزار OpenSEES انجام شده است [۱۳]. دراین نرم‌افزار جرم های M_0 و M_1 معرفی شده در مدل هاوزنر را می‌توان بصورت جرم های نقطه‌ای درنظر گرفت و توسط المان‌هایی بطول صفر (Zero Length Element) به نقطه‌ای دلخواه از بام سازه متصل نمود. مشخصاتی نظیر سختی فنر K_1 نیز برای المان‌های تعریف شده، قابل تخصیص است. در عمل بجای استفاده از یک میراگر سیال تنظیمی با ابعاد و جرم قابل ملاحظه، از مجموعه‌ای از میراگرهای سیال با ابعاد کوچکتر که در سطح بام ساختمان پخش شده‌اند استفاده می‌گردد، که البته تاثیری در شیوه‌ی تحلیل و طراحی آن ایجاد نمی‌کند. در چنین شرایطی علاوه برآنکه فضای زیادی از بام اشغال می‌شود، مایع مورد استفاده در درون مخازن میراگرها نیز عملاً کاربرد دیگری ندارد.

۲-۳- سیستم کنترلی تطبیق‌پذیر پیشنهادی

مطابق موارد ذکر شده در بخش قبل، معمولاً بجای استفاده از یک میراگر سیال تنظیمی واحد با ابعاد و حجم قابل‌توجه از مجموعه‌ای از میراگرهای کوچکتر در بام ساختمان استفاده می‌گردد. اما مدت‌هاست که این ایده مطرح شده که مخزن (تکی یا چندتایی) میراگر سیال تنظیمی بصورت همزمان بعنوان مخزن ذخیره آب مصرفی در ساختمان نیز بکار گرفته شود. تنها چالش موجود، در چنین کاربرد دوگانه‌ای، متغیر بودن سطح آب درون مخزن است. با توجه به استفاده متغیر از آب درون مخزن، کارایی آن بعنوان میراگر سیال تنظیمی کاهش یافته و مرتباً از حالت تنظیم شده‌ی اصلی برای حالت تشدید خارج می‌شود. در این پژوهش یک سیستم کنترلی تطبیق‌پذیر برای دستیابی به بیشترین کاهش در پاسخ‌های ساختمان‌های مجهز به سیستم میراگر سیال تنظیمی پیشنهاد شده‌است که برای ارتفاع‌های مختلف آب درون مخزن میراگر (مخزن ذخیره آب ساختمان) بهترین کارایی ممکن را داشته باشد. مدل ایده‌آل شده‌ی سیستم کنترلی پیشنهادی در شکل ۳-الف ارائه شده است. مطابق شکل، سیستم کنترلی پیشنهادی از یک میراگر سیال تنظیمی (متداول) تشکیل شده که بر روی بام ساختمان قرار گرفته و شرایط تکیه‌گاهی آن بصورت غلتکی فرض شده است. مدل پیشنهادی به یک فنرکنترلی تطبیق‌پذیر (با سختی قابل‌تغییر K_C)، همراه با یک میراگر ویسکوز (با میرایی C_C)، مجهز شده، تا امکان بهبود بخشیدن به کارایی آن در شرایط مختلف فراهم شود.

فنرکنترلی مورد استفاده با سختی متغیر K_C درحقیقت برای کنترل اندرکنش بین مخزن و سازه بکار برده می‌شود. مدل تحلیلی میراگر سیال تنظیمی (تطبیق‌پذیر) پیشنهادی در شکل ۳-ب ارائه شده است. درطی انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی متعدد بر روی این مدل، مقادیر بهینه‌ی سختی K_C برای ارتفاع‌های مختلف آب درون مخزن (h) چنان تعیین شده، تا در هر ارتفاع از آب مخزن، تحت اثر زلزله‌های مورد بررسی، بالاترین راندمان برای کاهش پاسخ‌های سازه‌ای توسط میراگر سیال تنظیمی حاصل شود. بنابراین سیستم کنترلی پیشنهادی تنها متکی به یک ارتفاع ثابت و مشخص آب (ارتفاع بهینه‌ی تشدید در میراگرهای متداول) نبوده و می‌تواند برای شرایط ارتفاعی مختلف آب مخزن بهترین پاسخ‌ها را ارائه دهد، در حقیقت این سیستم خود را بر اساس شرایط موجود سازگار می‌نماید. باتوجه به آنکه شاید فرض تکیه‌گاه غلتکی ایده‌آل برای سیستم کنترلی پیشنهادی بطور کامل اجرایی نباشد، از این‌رو درصد ناچیزی از مقدار سختی کنترلی K_C و همچنین مقدار میرایی C_C را می‌توان براساس مشخصات تکیه‌گاه متحرک مورد استفاده در این مدل تعیین نمود.

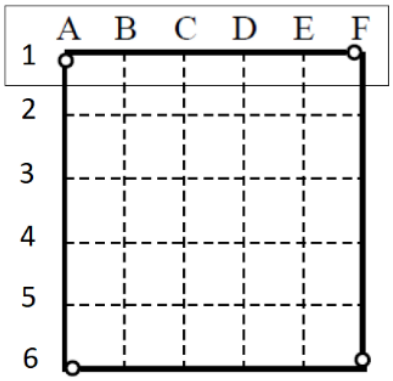


شکل ۳- سیستم کنترلی پیشنهادی
۳-الف- نمایش کلی، ۳-ب- مدل تحلیلی

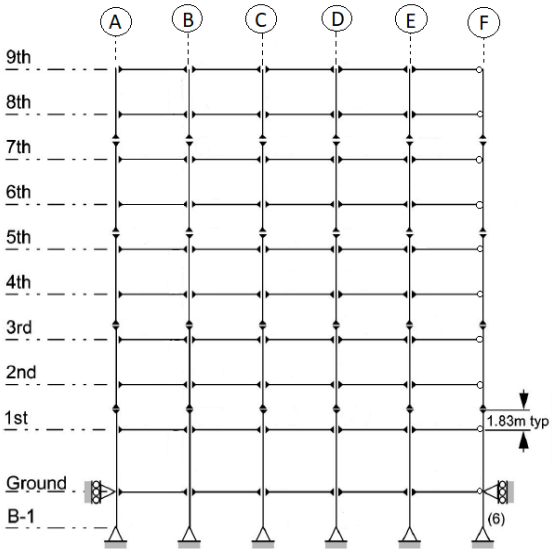
۳- معرفی مثال تحلیلی مورد بررسی

مدل ساختمانی مورد استفاده در این مقاله، ساختمان ۹ طبقه فولادی SAC در لس‌آنجلس است، که بعنوان ساختمان مبنا در بسیاری از پژوهش‌های قبلی از آن استفاده شده [۱۴] و بر اساس آیین‌نامه UBC1994 طراحی گردیده است [۱۵]. پلان و نمای مدل تحلیلی مورد استفاده، به‌ترتیب در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب نمایش داده شده است. چهار قاب محیطی نشان‌داده شده، سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی را تشکیل داده و قاب‌های داخلی تنها برای تحمل بارهای ثقلی استفاده می‌شوند. در نمای مدل نمایش داده شده (شکل ۴-ب)، اتصالات گیردار با مثلث‌های توپر مشکی و اتصالات مفصلی با دایره‌های توخالی ترسیم شده‌اند. ارتفاع طبقه اول برابر ۵/۴۹ و ارتفاع سایر طبقات برابر ۳/۹۶

متر و طول تمامی دهانه‌ها برابر ۹/۱۵ متر می‌باشد. جرم لرزه‌ای در طبقه اول برابر با ۱۰۱۰ تن، در طبقات دوم تا هشتم برابر ۹۸۹ تن و در طبقه نهم برابر ۱۰۷۰ تن می‌باشد. زلزله‌های افقی اعمالی در جهت X–ها توسط دوقاب موجود در محورهای ۱ و ۶ تحمل می‌شوند، که مطابق شکل قاب محور ۱ انتخاب و بصورت دوبعدی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۴–الف– پلان مدل ساختمانی ۹ طبقه



شکل ۴–ب– نمای مدل ساختمانی ۹ طبقه [۱۳]

در جدول ۱، مقاطع انتخابی برای تیرها و ستون‌ها برای این مدل تحلیلی ارائه شده است. براساس نتایج تحلیل مودال انجام شده، زمان تناوب مودهای اول الی سوم این ساختمان به ترتیب برابر ۲/۲۵، ۰/۸۴ و ۰/۴۸ ثانیه به‌دست آمده که منطبق بر مقادیر گزارش شده در پژوهش های قبلی است.

جدول ۱ – مشخصات تیرها و ستون‌ها [۱۴].

طبقات	ستون‌ها	تیرها
اول	W14x500	W36x160
دوم	W14x500	W36x160
سوم	W14x455	W36x135
چهارم	W14x455	W36x135
پنجم	W14x370	W36x135
ششم	W14x370	W36x135
هفتم	W14x283	W30x99
هشتم	W14x283	W27x84
بام	W14x257	W24x68

۴- رکوردهای زلزله‌های انتخابی

بمنظور انجام تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی تعداد هفت شتابنگاشت، از رکوردهای حوزه دور FEMA-P695 انتخاب شده است [۱۶]. این رکوردها مشخصات مشابهی دارند و در جدول A-4A در FEMA-P695 گروه‌بندی شده‌اند. مشخصات این شتابنگاشت‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. درطی تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده، شتاب زلزله‌ها در حوزه زمان و بصورت افقی در تراز پایه ساختمان اعمال شده‌اند. هفت شتابنگاشت حوزه دور انتخابی، همپایه شده و ضریب مقیاس (Scale Factor) بدست آمده برابر g ۱/۲ بوده است.

جدول ۲– مشخصات شتابنگاشت‌ها [۱۶].

نام شتابنگاشت	ایستگاه	سال وقوع	بزرگا
Northridge	Beverly Hills - Mulhol	۱۹۹۴	۶/۷
Loma prieta	Capitola	۱۹۸۹	۶/۹
Landers	Coolwater	۱۹۹۲	۷/۳
Hector	Hector Mine	۱۹۹۹	۷/۱
Imperial Valley	El Centro Array #11	۱۹۷۹	۶/۵
Manjil, Iran	Abbar	۱۹۹۰	۷/۴
Superstition Hills	El Centro Imp. Co.	۱۹۸۷	۶/۵

۵- ارائه نتایج تحلیل‌ها

هفت گروه شتابنگاشت‌های معرفی شده در قسمت قبل، به مدل سازه‌ای ۹-طبقه مورد بررسی اعمال شده و با انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی پاسخ‌های سازه‌ای حداکثر محاسبه گردیده است. در ادامه‌ی این بخش، این پاسخ‌ها برای سه گروه از مدل‌های معرفی شده‌ی زیر محاسبه و مورد مقایسه واقع شده‌اند:

الف) ساختمان پایه، شامل قاب خمشی فولادی تنها و فاقد میراگر، با نمایش اختصاری StFr،

ب) ساختمان متشکل از قاب خمشی فولادی مجهز به TLD متداول، با نمایش اختصاری TLDc،

ج) ساختمان متشکل از قاب خمشی فولادی مجهز به میراگر سیال تطبیق پذیر پیشنهادی، با نمایش اختصاری TLDa.

در ارائه نتایج برای جداول و نمودارهای بخش‌های بعدی، به این مدل‌ها (الف، ب وج) و اختصارات آنها اشاره شده است. تحلیل ساختمان متشکل از قاب خمشی فولادی مجهز به TLD متداول (مدل ب) براساس روال ارائه شده در بخش‌های ۲-۱ و ۲-۲ انجام شده و TLD طرح شده برای حالت تشدید دارای ارتفاع آب بهینه‌ی ۳/۰ متر و طول کلی ۳/۳ متر با نسبت جرمی برابر با ۲ درصد است.

در گروه‌های ب) و ج) تعریف شده در بالا، تحلیل‌ها برای ارتفاع‌های مختلف آب درون مخزن نیز انجام و مورد مقایسه قرار گرفته‌است. درطی انجام تحلیل‌های قاب خمشی فولادی مجهز به میراگر سیال تنظیمی تطبیق پذیر پیشنهادی (مدل ج)، سختی بهینه (Kc) متناظر با هر ارتفاع آب (h)، جهت حصول بیشترین کاهش پاسخ در سازه نیز محاسبه شده است.

برای بدست آوردن سختی بهینه‌ی فنرکنترلی (Kc)، در هر ارتفاع دلخواه آب (h) درون مخزن، مقادیر سختی فنرکنترلی در بازه‌ای از اعداد بتدریج تغییر داده شده و از بین نتایج حاصل، آن مقدار سختی که منجر به کمترین پاسخ گردیده، بعنوان سختی بهینه‌ی متناظر با آن ارتفاع آب انتخاب شده است. این‌کار برای تمامی رکوردهای زلزله انجام گرفته و با میانگین گیری سختی‌های حاصل، سختی بهینه‌ی آن ارتفاع مشخص آب، حاصل شده است. همچنین سختی بهینه محاسبه شده برای هر ارتفاع آب، برمبنای بیشترین کاهش در پاسخ‌های ماکزیمم دریفت طبقات بدست آمده است و با لحاظ نمودن سختی بهینه بدست آمده پاسخ‌های جابجایی و شتاب بام متناظر با آن نیز محاسبه شده است. در محاسبات انجام شده ضریب میرایی برای میراگر ویسکوز متصل به مخزن در تمامی ارتفاع‌های آب، برابر ۲۴۰۰۰ N.s/m در نظر گرفته شده است. اثرات تغییر مقدار ضریب میرایی درمقابل اثرات تغییر سختی فنر کنترلی ناچیز بوده و مقدار انتخابی، میانگین بهترین حالت برای مقادیر مختلف ضرایب میرایی در ارتفاع‌های مختلف آب در تحلیل‌ها بوده است.

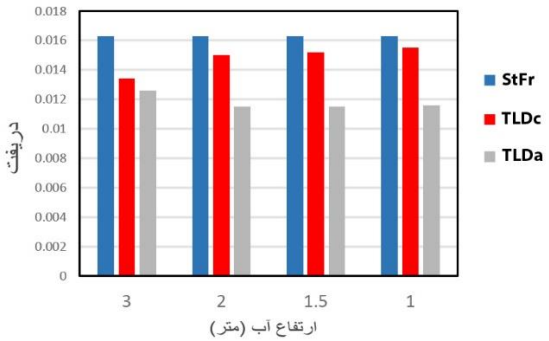
۵-۱- ارزیابی نتایج پاسخ دریفت در مدل‌های مورد بررسی

میانگین حداکثر پاسخ‌های دریفت ساختمان ۹-طبقه، تحت اثر زلزله‌های انتخابی، برای مدل‌های: الف) StFr، ب) TLDc و ج) TLDa، برای ارتفاع‌های مختلف آب ۳، ۲، ۱/۵ و ۱ متر به تفکیک در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- حداکثر پاسخ‌های دریفت در مدل‌های مورد بررسی

h (m)	Kc (KN/m)	حداکثر دریفت (٪)، در مدل‌های: StFr	TLDc	TLDa	درصد کاهش پاسخ مدل TLDa نسبت به مدل TLDc
۳/۰	۳۴۲/۳	۰/۰۱۶۳	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۲۶	۶٪/۰
۲/۰	۲۷۶/۰	۰/۰۱۶۳	۰/۰۱۴۹	۰/۰۱۱۵	۲۲٪/۸
۱/۵	۱۶۳/۴	۰/۰۱۶۳	۰/۰۱۵۳	۰/۰۱۱۶	۲۴٪/۱
۱/۰	۸۴/۰	۰/۰۱۶۳	۰/۰۱۵۵	۰/۰۱۱۹	۲۳٪/۲

ارتفاع آب متناظر با حالت تشدید برای سازه مجهز به میراگر سیال تنظیمی متداول (TLDc) برابر ۳ متر است، که در این ارتفاع کمترین مقدار دریفت در این مدل حاصل شده و با کاهش ارتفاع آب مقدار دریفت افزایش می‌یابد. اما با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۳، حداکثر پاسخ‌های دریفت در ساختمان مجهز به میراگر سیال تطبیق پذیر پیشنهادی (TLDa)، علیرغم کاهش یافتن ارتفاع آب درون مخزن و برخلاف مدل متداول TLDc، همچنان کاهش داشته است. همچنین درهمه موارد، حداکثر مقدار دریفت برای تمامی ارتفاع‌های مختلف آب در مدل TLDa، نسبت به مدل متداول TLDc کمتر است. با کاهش آب مخزن، میانگین کاهش پاسخ‌های دریفت در مدل پیشنهادی TLDa نسبت به سیستم متداول TLDc برابر ۲۳/۴ درصد بوده است. نتایج ارائه شده در جدول ۳، جهت امکان مقایسه بهتر مجدداً در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵- حداکثر پاسخ‌های دریفت در مدل‌های مورد بررسی

درصد کاهش حداکثر پاسخ دریفت در میراگر سیال تطبیق پذیر پیشنهادی (TLDa)، در ارتفاع‌های مختلف آب برابر ۳، ۲، ۱/۵ و ۱ متر نسبت به ساختمان پایه (StFr)، به ترتیب برابر ۲۲/۷، ۲۹/۴، ۲۸/۸ و ۲۶/۹ درصد بوده است. این درحالی است که سیستم متداول (TLDc)، در ایده‌آل‌ترین حالت (حالت تشدید) تنها قادر به کاهش دریفت‌ها به مقدار ۱۷/۸ درصد نسبت به ساختمان پایه بوده است. بنابراین سیستم پیشنهادی علاوه بر کاهش موثر پاسخ‌های دریفت برای تمامی ارتفاعات آب و همچنین کارایی بالاتر در مقایسه با سیستم متداول، برای مخازن آب با ارتفاع متغیر کاملاً موثرتر و موفق‌تر است. اگرچه پاسخ دریفت اصلی‌ترین عامل برای طراحی سازه‌ها است، اما در ادامه پاسخ‌های جابجایی و شتاب نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۵-۲- ارزیابی نتایج پاسخ جابجایی درمدل‌های مورد بررسی

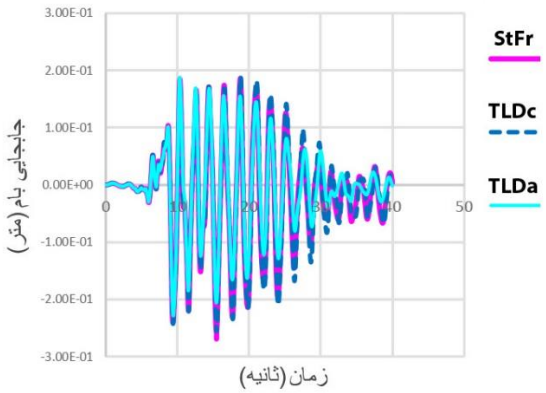
میانگین حداکثر پاسخ‌های جابجایی بام ساختمان ۹-طبقه مورد بررسی، تحت اثر زلزله‌های انتخابی، برای مدل‌های: الف) StFr، ب) TLDc و ج) TLDa، برای ارتفاع‌های مختلف آب ۳، ۲، ۱/۵ و ۱ متر به تفکیک در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- حداکثر پاسخ‌های جابجایی درمدل‌های مورد بررسی

h (m)	Kc (KN/m)	حداکثر جابجایی بام در مدل‌های: (m)			درصد کاهش پاسخ مدل TLDa نسبت به مدل TLDc
		StFr	TLDc	TLDa	
۳/۰	۳۴۲/۳	۰/۲۹۰	۰/۲۵۶	۰/۲۴۷	۳٪/۵
۲/۰	۲۷۶/۰	۰/۲۹۰	۰/۲۸۰	۰/۲۴۸	۱۱٪/۴
۱/۵	۱۶۳/۴	۰/۲۹۰	۰/۲۷۸	۰/۲۵۰	۱۰٪/۱
۱/۰	۸۴/۰	۰/۲۹۰	۰/۲۷۷	۰/۲۵۶	۷٪/۹

با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۴، حداکثر مقدار جابجایی بام درتمامی موارد و برای ارتفاع‌های مختلف آب، در مدل مجهز به میراگر سیال تطبیق پذیر پیشنهادی TLDa نسبت به مدل متداول TLDc کمتر است. با کاهش آب مخزن نسبت به حالت تشدید (۳ متر)، میانگین کاهش پاسخ‌های جابجایی بام در مدل پیشنهادی TLDa، نسبت به سیستم متداول TLDc برابر ۹/۸ درصد بوده است. بنابراین سیستم پیشنهادی برای تمامی ارتفاع‌های آب کارایی بالاتری در مقایسه با سیستم متداول، در کاهش حداکثر جابجایی بام ساختمان داشته است. درصد کاهش حداکثر پاسخ جابجایی بام در میراگر سیال تطبیق پذیر پیشنهادی (TLDa)، در ارتفاع‌های مختلف آب برابر ۳، ۲، ۱/۵ و ۱ متر نسبت به ساختمان پایه (StFr)، به ترتیب برابر ۱۴/۸، ۱۴/۵، ۱۳/۸ و ۱۱/۷ درصد بوده است. این مقادیر کاهش برای سیستم متداول (TLDc) در مقابل سیستم پایه (StFr) به ترتیب برابر ۱۱/۷، ۴/۵، ۴/۱ و ۳/۴ درصد بوده است. بنابر این می‌توان نتیجه گرفت که سیستم متداول برای ارتفاع های آب زیر حالت تشدید کارایی موثری در کاهش پاسخ جابجایی حداکثر بام ندارد. باید توجه داشت که مبنای طراحی میراگر پیشنهادی براساس کاهش دریفت‌ها بوده است، اما همانگونه که مشاهده می‌گردد در کاهش پاسخ‌های حداکثر جابجایی نیز کاملاً موفق بوده است.

بمنظور مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های مختلف ساختمان مورد بررسی و بعنوان نمونه، نمودار تاریخچه‌ی زمانی جابجایی بام ساختمان برای سه حالت: الف) StFr، ب) TLDc و ج) TLDa، در زلزله السنترو برای ارتفاع آب درون مخزن برابر ۱/۵ متر، در شکل ۶ نمایش داده شده است.



شکل ۶- نمودار تاریخچه‌ی زمانی جابجایی طبقه بام، زلزله ال‌سنترو، برای مدل‌های مختلف و ارتفاع آب ۱/۵ متر

همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد، با کاهش ارتفاع آب درون مخزن میراگر سیال تنظیمی متداول (TLDc)، به ۱/۵ متر دیگر این میراگر عملاً قادر به کاهش پاسخ‌های جابجای بام ساختمان نخواهد بود. این درحالی است که در همین ارتفاع آب، میراگر سیال تطبیق پذیر پیشنهادی (TLDa)، بنحو موثری پاسخ های جابجایی بام و خصوصاً مقدار حداکثر آنرا کاهش می‌دهد. مقادیر عددی این نتایج، قبلاً در جدول ۴ و در توضیحات مرتبط با آن ارائه شده‌اند.

۵-۳- ارزیابی نتایج پاسخ شتاب در مدل‌های مورد بررسی

میانگین حداکثر پاسخ‌های شتاب بام ساختمان ۹-طبقه مورد بررسی، تحت اثر زلزله‌های انتخابی، برای مدل‌های: الف) StFr، ب) TLDc و ج) TLDa، برای ارتفاع‌های مختلف آب ۳، ۲، ۱/۵ و ۱ متر به تفکیک در جدول ۵ ارائه شده است.

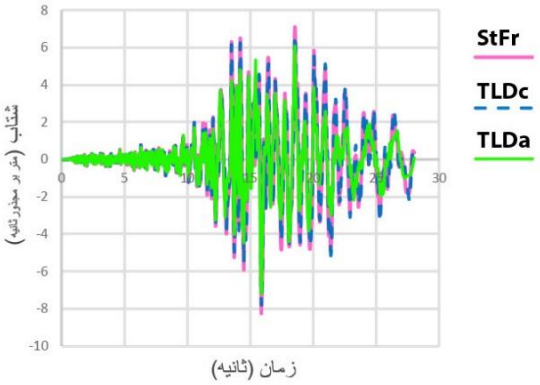
جدول ۵- حداکثر پاسخ‌های شتاب درمدل‌های مورد بررسی

h (m)	Kc (KN/m)	حداکثر شتاب بام در مدل‌های: (m/s^2)			درصد کاهش پاسخ مدل TLDa نسبت به مدل TLDc
		StFr	TLDc	TLDa	
۳/۰	۳۴۲/۳	۷/۹۳	۶/۸۵	۶/۷۷	۱٪/۲
۲/۰	۲۷۶/۰	۷/۹۳	۷/۶	۶/۵۳	۱۴٪/۱
۱/۵	۱۶۳/۴	۷/۹۳	۷/۵۸	۶/۹۶	۸٪/۲
۱/۰	۸۴/۰	۷/۹۳	۷/۶۶	۶/۹۵	۹٪/۳

با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۵، حداکثر مقدار شتاب بام درتمامی موارد و برای ارتفاع‌های مختلف آب، در مدل مجهز به میراگر سیال تطبیق پذیر پیشنهادی TLDa نسبت به مدل متداول TLDc کمتر است (فقط درحالت تشدید و برای ارتفاع آب ۳ متر، شتاب‌ها بسیار نزدیک هستند). با کاهش آب مخزن نسبت به حالت تشدید، میانگین کاهش پاسخ‌های شتاب بام در مدل پیشنهادی TLDa، نسبت به سیستم متداول TLDc برابر ۱۰/۵ درصد بوده است. بنابراین سیستم پیشنهادی برای تمامی ارتفاع‌های آب کارایی بالاتری در مقایسه با سیستم متداول، در کاهش حداکثر شتاب بام ساختمان داشته است.

درصد کاهش حداکثر پاسخ شتاب بام در میراگر سیال تطبیق پذیر پیشنهادی (TLDa)، در ارتفاع‌های مختلف آب برابر ۳، ۲، ۱/۵ و ۱ متر نسبت به ساختمان پایه (StFr)، به ترتیب برابر ۱۴/۶، ۱۷/۷، ۱۲/۲ و ۱۲/۴ درصد بوده است. این مقادیر کاهش برای سیستم متداول (TLDc) در مقابل سیستم پایه (StFr) به ترتیب برابر ۱۳/۶، ۴/۲، ۴/۴ و ۳/۴ درصد بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که سیستم متداول برای ارتفاع‌های آب زیر حالت تشدید کارایی موثری در کاهش پاسخ شتاب حداکثر بام ندارد.

بمنظور مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های مختلف ساختمان مورد بررسی و بعنوان نمونه، نمودار تاریخچه‌ی زمانی شتاب بام ساختمان برای سه حالت: الف) StFr، ب) TLDc و ج) TLDa، در زلزله لندرز برای ارتفاع آب درون مخزن برابر ۱/۵ متر، در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷- نمودار تاریخچه‌ی زمانی شتاب طبقه بام، زلزله لندرز، برای مدل‌های مختلف و ارتفاع آب ۱/۵ متر

همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد، با کاهش ارتفاع آب درون مخزن میراگر سیال تنظیمی متداول (TLDc)، به ۱/۵ متر دیگر این میراگر چندان قادر به کاهش پاسخ‌های شتاب بام ساختمان نخواهد بود. این درحالی است که در همین ارتفاع آب، میراگر سیال تطبیق پذیر پیشنهادی (TLDa)، بنحو موثری پاسخ‌های شتاب بام و خصوصاً مقدار حداکثر آنرا کاهش می‌دهد. مقادیر عددی این نتایج، قبلاً در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق مدلی نوآورانه از یک میراگر سیال تنظیمی تطبیق پذیر (TLDa)، برای کنترل موثرتر پاسخ‌های لرزه‌ای یک ساختمان متشکل از قاب خمشی فولادی ارائه شد، که برای ارتفاع‌های مختلف آب درون مخزن میراگر (مخزن ذخیره آب ساختمان) بهترین کارایی ممکن را داشته باشد. درطی تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده براساس هفت سری رکورد شتاب زلزله‌های انتخابی، که برای ارتفاع‌های مختلف آب درون مخزن انجام پذیرفت، پاسخ های مختلف سازه‌ای در مدل پیشنهادی و در مدل میراگر سیال تنظیمی متداول (TLDc) با یکدیگر مقایسه و نتایج زیر حاصل گردید:

۱. درطی تحلیل‌های انجام شده و به ازای تمامی سطوح آب درون مخزن میراگرها، میراگر سیال تطبیق پذیرپیشنهادی توانست بطور موثرتری پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان پایه، شامل دریفت‌ها، جابجایی‌ها و شتاب‌ها را در مقایسه با میراگر سیال تنظیمی متداول کاهش دهد.

۲. مدل TLDa پیشنهادی، توانست بطور متوسط حداکثر پاسخ‌های دریفت سازه مورد بررسی را تا حدود ۲۷ درصد کاهش دهد. این درحالی است که سیستم TLDc متداول، در ایده‌آل‌ترین حالت (حالت تشدید) تنها قادر به کاهش دریفت‌ها درحدود ۱۸ درصد نسبت به ساختمان پایه بوده است.

۳. مدل TLDa پیشنهادی، توانست بطور متوسط پاسخ‌های حداکثر جابجایی بام سازه مورد بررسی را تا حدود ۱۴ درصد کاهش دهد. این درحالی است که سیستم TLDc متداول، در ایده‌آل‌ترین حالت (حالت تشدید) تنها قادر به کاهش جابجایی بام در حدود ۱۲ درصد نسبت به ساختمان پایه بوده است و در ارتفاع‌های زیر حالت تشدید عملاً کارایی نداشت.

۴. مدل TLDa پیشنهادی، توانست بطور متوسط پاسخ‌های حداکثر شتاب بام سازه مورد بررسی را تا حدود ۱۵ درصد کاهش دهد. این درحالی است که سیستم TLDc متداول، در ایده‌آل‌ترین حالت (حالت تشدید) تنها قادر به کاهش شتاب بام در حدود ۱۴ درصد نسبت به ساختمان پایه بوده است و در ارتفاع‌های زیر حالت تشدید عملاً کارایی نداشت.

بنابراین با توجه به نتایج حاصل، سیستم پیشنهادی ارائه شده، علاوه بر کاهش موثر پاسخ‌های سازه‌ای مختلف، برای تمامی ارتفاعات آب و همچنین کارایی بالاتر در مقایسه با سیستم میراگرهای سیال تنظیمی متداول، برای مخازن آب با ارتفاع متغیر بطور کامل موثر و قابل کاربرد است.

مراجع

[1] Welt F, Modi VJ. Damping of wind induced oscillations through liquid sloshing. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1988; 30 (1): 85-94.

[2] Housner GW. The dynamic behavior of water tanks. Bulletin of the Seismological Society of America. 1963; 53 (2): 381–387.

[3] Banerji P, Murudi M, Shah A, Popplewell N. Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2000; 29 (5): 587-602.

[4] Li HN, Jia Y, Wang SY. Theoretical and Experimental Studies on Reduction of Multi-Modal Seismic Response of High-Rise Structures by Tuned Liquid Dampers. Journal of Vibration and Control. 2004; 10: 1041-1056.

[5] Lee SK, Park EC, Min KW, Lee SH, Chung L, Park JH. Real-time hybrid shaking table testing method for the performance evaluation of a tuned liquid damper controlling seismic response of building structures. Journal of Sound and Vibration. 2007; 302 (3): 596–612.

[6] Mondal J, Nimmala H, Abdulla S, Tafreshi R. Tuned Liquid Damper. Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics; 2014; Prague, Czech Republic.

[7] Murudi MM, Bhosale A. Experimental Investigation of Effectiveness of Slope Bottom Tuned Liquid Damper. International Journal of Engineering & Technology Science and Research. 2017; 4 (5): 2394 – 3386.

[8] Wu H, Cao L, Chen A, Laflamme S. A novel tuned liquid wall damper for multi-hazard mitigation. Proceedings of Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring Conference; 2017; USA, Iowa State University.

[9] Furtmuller T, DiMatteo A, Adam C, Pirrotta A. Base-isolated structure equipped with tuned liquid column damper: An experimental study. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019; 116: 816-831.

[10] Kamgar R, Gholami F, ZarifSanayei HR, Heidarzadeh H. Modified Tuned Liquid Dampers for Seismic Protection of Buildings Considering Soil–Structure Interaction Effects. Iranian Journal of Science and Technology. 2020; 44: 339-354.

[11] Pandit AR, Biswal KC. Seismic control of multi degree of freedom structure outfitted with sloped bottom tuned liquid damper. Structures. 2020; 25: 229-240.

[12] Azari N, Fathi F. Mitigation of Structural Responses by Introducing a Modified Self-Regulating Model for Tuned Liquid Dampers (TLDs). Proceedings of The 8th International Conferences of Seismology and Earthquake Engineering (SEE8); 2019; Tehran, Iran.

[13] OpenSees (V2.5.0). National Science Foundation-sponsored Pacific Earthquake Engineering Center (PEER). 2015; USA, California.
https://opensees.berkeley.edu/index.php

[14] Ohtori Y, Christenson RE, Spencer BF, Dyke SJ. Benchmark Control Problems for Seismically Excited Nonlinear Buildings. Journal of Engineering Mechanics. 2004; 130 (4): 366-385.

[15] Uniform Building Code (UBC-1994). Structural Engineering Design Previsions. 1994; USA, California.

[16] FEMA-P695. Quantification of Building Seismic Performance Factors, Federal Emergency Management Agency (FEMA). ATC-Applied Technology Council. 2009; Document No 2009 FEMA.

Seismic Control of Structures Using Tuned Liquid Dampers (TLD) Adaptable with Water Level

Farshid Fathi
Faculty Member, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
Nakisa Azari
Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Abstract

Tuned Liquid Dampers (TLD) are widely utilized today because of their simple structure, no need for external energy sources and low construction and implementation costs. They have also been used effectively to reduce the responses of structures against the earthquake excitation. By adjusting the water level, inside the TLD tank, so that the vibration frequency of the fluid is equal to the main frequency of the structure, the best efficiency is obtained for this passive control system in reducing the response of the structures. Many efforts have been undertaken to make this type of damper usable even under normal conditions, so that to be used as a water storage tank for the buildings. However, in such case, due to the variable level of water consumption in the damper tank, its efficiency will not necessarily be high at the time of an earthquake. Therefore, the purpose of this paper is to introduce an improved model, instead of conventional TLD, that perform the best efficiency in reducing structural responses at the different water levels in the reservoir. For this purpose, by applying seven earthquake records to the studied analytical model, the efficiency of two control systems has been compared with each other. The results of nonlinear time history analyses indicate that the maximum building responses in the proposed control system have been effectively reduced, for the different reservoir water levels, compared to the conventional TLD system.

Keywords: Tuned Liquid Damper, Adaptable Tuned Liquid Damper, Passive Control, Structural Response, Earthquake, Nonlinear Time History Analyses