

مقایسه عملکرد میراگرهای ستونی مایع تنظیم شونده دارای دریچه و میراگرهای ستونی گوی دار

حمید توپچی نژاد^{۱*} و امیر پناهیان^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی کرمانشاه

h.toopchinezhad@razi.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۱۲/۲۳]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۲/۰۸]

چکیده

یکی از راه‌های مهار ارتعاشات باد در ساختمان‌های بلند خارج کردن ارتعاش از وضعیت تشدید با استفاده از میراگرهای جرمی که در بام ساختمان نصب می‌شوند است. میراگرهای ستونی مایع تنظیم شونده (TLCD) که شامل یک مخزن لوله‌ای U شکل محتوی آب هستند نوعی از میراگرهای جرمی محسوب می‌شوند. در گونه متداول میراگرهای مذکور دریچه‌ای در بخش افقی لوله میراگر تعبیه شده تا سبب استهلاک انرژی سیال درون لوله شود. در نمونه جدیدتر (میراگرهای TLCBD)^۲ به جای دریچه از گوی فلزی لغزانی برای استهلاک انرژی سیال استفاده می‌شود. در این مقاله تاثیرپذیری عملکرد میراگرهای TLCD و TLCBD به پارامترهای مختلف طراحی مانند مشخصات هندسی و جرمی میراگر، میرایی ذاتی سازه، و فرکانس تحریک ارزیابی شده است. نتایج این مطالعه موید آنست که اگرچه راندمان میراگرهای TLCBD در کاهش پاسخ سازه بیش از میراگرهای TLCD می‌باشد، اما حساسیت آنها به تغییرات فرکانس تحریک بیشتر است.

واژگان کلیدی: ساختمان‌های بلند، میراگرهای ستونی مایع دارای دریچه، میراگرهای ستونی مایع گوی‌دار، کنترل ارتعاش، بارگذاری باد.

۱. مقدمه

یکی از راه‌های کنترل ارتعاشات جانبی و تأمین شرایط بهره‌برداری لازم در ساختمان‌های بلند استفاده از میراگرهای ستونی مایع تنظیم شونده (TLCD) است. میراگرهای TLCD با خارج نمودن ارتعاشات سازه از حالت تشدید و محدود نمودن دامنه جابه‌جایی‌های آن سبب کاهش پاسخ دینامیکی ساختمان در اثر نیروهای جانبی بهره‌برداری به ویژه باد می‌شوند.

ایده‌ی اصلی استفاده از میراگرهای TLCD در ساختمان‌های مرتفع نخستین بار به وسیله Sakai [1] مطرح شد. میراگر TLCD از لوله U شکلی که تا ارتفاعی مناسب از آب پر شده تشکیل می‌شود. محل نصب میراگرهای مذکور معمولاً در طبقات فوقانی سازه است. در درون ناحیه افقی لوله U شکل میراگر دریچه‌ای (orifice) تعبیه می‌شود تا با ایجاد مانع در مقابل نوسانات مایع درون لوله سبب استهلاک انرژی جنبشی آن شده و دامنه نوسانات مایع را محدودتر نماید.

1 Tuned liquid column damper

2. Tuned liquid column ball damper

در ادبیات پژوهش مطالعات تجربی و تحلیلی قابل توجهی در خصوص عملکرد TLCDD ها یافت می‌شود. Felix [2] به بررسی رفتار یک قاب آزمایشگاهی تحت اثر ارتعاش‌های هارمونیک در دو حالت با و بدون میراگر TLCDD پرداخت و با بررسی نمودارهای تاریخچه زمانی پاسخ قاب آزمایش شده نتیجه گرفت که میراگر TLCDD می‌تواند پاسخ دینامیکی سیستم را تا حد قابل توجهی کاهش دهد. Chang [3]، Wu [4] و Yalla [5] به بررسی رفتار و تعیین پارامترهای طراحی میراگرهای TLCDD تحت بارهای تصادفی زمین‌لرزه پرداخته‌اند. میراگرهای TLCDD را می‌توان با هم موازی نموده و به صورت چندتایی (MTLDCD)¹ بکار گرفت [6]. استفاده از میراگرهای MTLDCD به ویژه در مواقعی که محدودیت‌های فیزیکی مانع از کاربرد یک میراگر TLCDD با ابعاد نسبتاً بزرگ در ساختمان شود، می‌تواند مفید باشد [6]. لوله U شکل میراگرها دارای دو ستون عمودی و یک ناحیه افقی بینابینی است. نسبت سطح مقطع ستون عمودی به سطح مقطع ناحیه افقی میراگر $\left(v = \frac{A_v}{A_h} \right)$ به عنوان یک پارامتر هندسی مهم در عملکرد میراگرهای TLCDD تاثیر گذار است. Wu و همکاران [7] مقادیر بهینه پارامترهای طراحی میراگرهای TLCDD با نسبت‌های مختلف v را با هدف کاهش دامنه ارتعاشات سازه اصلی تحت اثر بارگذاری هارمونیک باد با فرکانس‌های تحریک مختلف بررسی نموده‌اند.

Pires و Haroun [8] میراگرهای ستونی مایع ترکیبی (HLCD)² را ابداع کردند. این سیستم از ترکیب یک یا چند میراگر TLCDD که بطور موازی با میراگرهای جرمی TMD³ عمل می‌نمایند ساخته شده است. عملکرد میراگرهای اخیر تحت بارگذاری‌های مختلف متفاوت بوده و نسبت جرمی میراگرهای TLCDD و میراگرهای TMD پارامتر مهمی در میزان کارایی و عملکرد بهینه میراگرهای موازی ترکیبی قلمداد می‌شود. میراگرهای TLCDD و TMD که به صورت موازی نصب شده‌اند عملکرد مناسبی در کاهش تغییر مکان‌های جانبی سازه‌های بلند داشته و راندمان کاری آنها با کاهش

زمان تناوب اصلی سازه ارتقاء می‌یابد [8]. علاوه بر ساختمان‌های بلند از میراگرهای TLCDD می‌توان در کاهش ارتعاشات نامطلوب پایه‌های بلند توربین‌های بادی [9, 10]، کنترل ارتعاشات ناشی از باد در پل‌های کابلی معلق [11]، محدود کردن ارتعاشات ناشی از بار زنده در پل‌های عابر پیاده [12] و یا کنترل ارتعاشات سازه‌های دریایی در اثر برخورد امواج [13] استفاده به عمل آورد.

میراگرهای ستونی مایع تنظیم شونده گوی‌دار یا به اختصار میراگرهای TLCDD نوع جدیدتر میراگرهای ستونی مایع است [14]. میراگرهای مذکور مانند میراگرهای TLCDD از لوله‌ی U شکل محتوی آب تشکیل شده‌اند با این تفاوت که به جای تعبیه دریچه در قسمت افقی لوله از یک گوی فلزی غلطان در آب استفاده به عمل می‌آید. گوی فلزی در مقابل حرکات آب داخل لوله مقاومت نموده و موجب استهلاک انرژی سیال می‌شود. تعداد مقالات منتشره در ادبیات تحقیق که به مقایسه عملکرد و راندمان میراگرهای TLCDD و TLCBD می‌پردازند بسیار محدود است. AL-Saif و همکاران [14] با مطالعه و بررسی رفتار میراگرهای TLCBD نتیجه گرفتند که میراگرهای مذکور از عملکرد مناسبی برخوردار بوده و بالاخص چنانچه نسبت قطر گوی به قطر لوله برابر $0/8$ باشد میراگر از راندمان کاری بیشتری در کاهش پاسخ دینامیکی سازه برخوردار خواهد بود. بر اساس مطالعات تحلیلی انجام شده میراگرهای TLCBD دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به میراگرهای TLCDD در کاهش بازتاب دینامیکی سازه و نیز سیال درون لوله U شکل میراگر تحت اثر بارهای تصادفی [13, 15] و یا بارگذاری هارمونیک [14, 16] است.

عملکرد میراگرهای ستونی مایع تنظیم شونده وابسته به فرکانس تحریک سازه بوده و میراگرهای مذکور تنها قادر به خارج کردن یکی از مدهای ارتعاش سازه از وضعیت تشدید با بار دینامیکی وارد شده است. در واقع هدف اصلی از کاربرد میراگرهای مذکور کاهش پاسخ دینامیکی پایا (و نه گذرا) سازه‌های انعطاف پذیر (مانند ساختمان‌های بلند) در قبال بارهای بهره‌برداری (مانند باد) است. بنابراین، یکی از

1 Multiple tuned liquid column damper

2 Hybrid liquid column damper

3 Tuned mass damper

افقی جرم سازه در تراز بام آن (X_s) بوده و درجه آزادی دوم مربوط به حرکت‌های عمودی ستون آب در درون لوله (Y) است. با چشم‌پوشی کردن از جرم ظرف مایع در مقایسه با جرم کل مایع، جرم سیستم میراگر که همانا برابر با جرم آب داخل لوله m_f می باشد را می‌توان از رابطه (۱) محاسبه نمود.

$$m_f = \rho A L \quad (1)$$

در رابطه فوق A سطح مقطع لوله میراگر است که در تمام طول L آن ثابت فرض شده است. چنانچه جرم سازه اصلی را m_s بنامیم نسبت جرمی^۴ سیستم، μ را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد [7]:

$$\mu = \frac{m_f}{m_s + m_f} \quad (2)$$

نسبت طولی^۵ میراگر که برابر نسبت طول بخش افقی به طول کل ستون مایع بوده و با نماد α نشان داده می‌شود از رابطه ۳ قابل محاسبه است.

$$\alpha = \frac{L_h}{L} \quad (3)$$

یکی از پارامترهای مهم موثر بر عملکرد میراگر TLCD نسبت فرکانسی^۶ بوده که مبین نسبت فرکانس طبیعی سازه اصلی به فرکانس میراگر است (رابطه ۴).

$$\beta_1 = \frac{\omega_s}{\omega_D} \quad (1)$$

فرکانس طبیعی میراگر TLCD را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود [7]:

$$\omega_D = \sqrt{2g/L} \quad (5)$$

دغدغه‌های مهم طراح تعیین میزان حساسیت میراگر به تغییرات احتمالی در فرکانس تحریک سازه است.

هدف اصلی این مقاله مقایسه تحلیلی عملکرد میراگرهای TLCBD و TLCD با تاکید بر تعیین میزان حساسیت عملکرد آنها به پارامترهای مختلف طراحی مانند مشخصات هندسی و جرمی میراگر، و نیز فرکانس تحریک بار دینامیکی وارده است. در راستای هدف این پژوهش، اثر میراگرهای مذکور بر رفتار دینامیکی یک ساختمان بلند مرتبه (که توسط یک سیستم تک درجه آزادی مدل می‌شود) بطور جداگانه بررسی می‌شود. در ادامه مقاله ضمن بیان معادلات حاکم بر رفتار هریک از میراگرهای TLCD و TLCBD رفتار دینامیکی سازه‌ی مجهز به میراگرهای مذکور تحت اثر نیروهای جانبی با تابع هارمونیک دارای فرکانس‌های تحریک متفاوت تحلیل و تاریخچه پاسخ دینامیکی آن ارزیابی می‌شود.

۲. معادلات حاکم بر سازه مجهز به میراگر TLCD

شکل (۱) تصویر شماتیک یک سیستم مجهز به میراگر TLC_D را نشان می‌دهد که میراگر در بام سازه اصلی مستقر شده است. میراگر TLC_D متشکل از لوله‌ای U شکل بوده که بخش افقی آن به ترتیب دارای سطح مقطع A_h و طول L_h است. لوله مذکور توسط مایعی با چگالی ρ تا ارتفاع L_v از محور ناحیه افقی لوله پر می‌شود.

شکل ۱. مدل دو درجه آزادی سیستم مجهز به میراگر TLCD

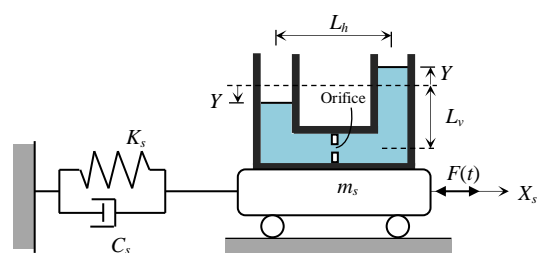


Fig. 1. 2DOF-Model of a system equipped with TLCD

طول کل ستون مایع در درون لوله برابر با $L = L_h + 2L_v$ است. سازه مجهز به TLCD را می‌توان به صورت یک سیستم دو درجه آزادی مدل نمود [7]. همان‌گونه که در شکل (۱) مشاهده می‌شود درجه آزادی اول مربوط به حرکت‌های

4 Mass ratio

5 Length ratio

6 Frequency ratio

میراگر در بام سازه نصب شده و متشکل از لوله‌ای U شکل محتوی سیال مایع است. در قسمت افقی لوله میراگر به جای دریچه یک گوی فلزی غلتان در سیال قرار می‌گیرد. وجود گوی فلزی غلتان در ناحیه افقی لوله میراگر مانعی در درون لوله و در برابر حرکت سیال ایجاد نموده و به همین لحاظ سبب استهلاک انرژی سیال می‌شود [14]. سازه مجهز به TLCBD را می‌توان به صورت یک سیستم سه درجه آزادی مدل نمود. درجات آزادی سیستم عبارتند از جابه‌جایی‌های افقی تراز بام سازه X_s ، جابه‌جایی‌های آب داخل ستون قائم میراگر Y و X_b که مبین جابه‌جایی‌های گوی در ناحیه افقی میراگر است.

شکل ۲. مدل سه درجه آزادی سیستم مجهز به میراگر TLCBD

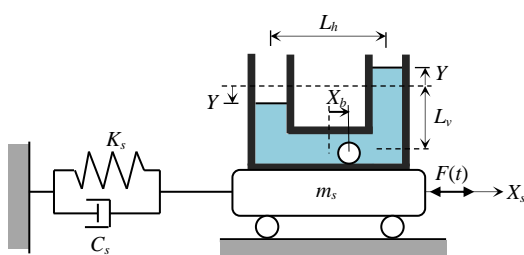


Fig. 2. 3DOF-Model of a system equipped with TLCBD

چنانچه مطابق شکل (۲) سیستم تحت اثر بار دینامیکی خارجی $F_{ext}(t)$ قرار گیرد معادلات حاکم بر رفتار آن برحسب سه درجه آزادی تعریف شده سیستم به قرار ذیل خواهند بود [14].

$$\left(m_s + m_F + \frac{J_c}{R_b^2} \right) \ddot{X}_s + C_s \dot{X}_s + K_s X_s + \alpha m_F \ddot{Y} - \frac{J_c}{R_b^2} \ddot{X}_b = F_{ext}(t) \quad (10)$$

$$m_F \ddot{Y} + C_t \dot{Y} + 2\rho g A_h Y + \alpha m_F \ddot{X}_s = 0 \quad (11)$$

$$\left(m_b + \frac{J_c}{R_b^2} \right) \ddot{X}_b + d_{eq} \dot{X}_b = \frac{J_c}{R_b^2} \ddot{X}_s + d_{eq} \dot{Y} + 2\rho g A_b Y \quad (12)$$

در رابطه فوق g شتاب جاذبه و L طول کل ستون مایع است. همچنین، فرکانس طبیعی ارتعاش ω_s و نسبت استهلاک بحرانی ξ سازه اصلی به جرم m_s و ضریب میرایی C_s را می‌توان از روابط زیر محاسبه نمود.

$$\omega_s = \sqrt{\frac{K_s}{m_s}} \quad (6)$$

$$\xi = \frac{C_s}{2m_s \omega_s} \quad (7)$$

چنانچه X_s و \dot{X}_s و \ddot{X}_s به ترتیب مبین جابه‌جایی، سرعت و شتاب سازه در هر لحظه زمانی t باشند، معادلات حرکت سازه مجهز به TLCD به صورت زیر نوشته می‌شوند [7]:

$$(m_s + m_F) \ddot{X}_s + \rho A_h L \ddot{X}_s + \rho A_h L_h \ddot{Y} + C_s \dot{X}_s + K_s X_s = F_{ext}(t) \quad (8)$$

$$\rho A_h L \ddot{Y} + \rho A_h L_h \ddot{X}_s + \frac{1}{2} \rho A_h \eta \left| \dot{Y} \right| \dot{Y} + 2\rho A_h g Y = 0 \quad (9)$$

در معادلات فوق Y و \dot{Y} و \ddot{Y} به ترتیب مبین جابه‌جایی، سرعت و شتاب حرکت مایع در ستون عمودی میراگر است. متغیر η ضریب افت تراز مایع^۷ نامیده می‌شود که از مطالعات آزمایشگاهی به دست می‌آید. $F_{ext}(t)$ نیروی تحریک خارجی بوده که در این مقاله بصورت یک تابع هارمونیک با فرکانس تحریک ω_{ext} و با معادله $F_{ext}(t) = F_0 \sin(\omega_{ext} t)$ در نظر گرفته می‌شود. در صورت استفاده از میراگرهای TLCD انتظار می‌رود تا دامنه تغییر مکان‌ها و شتاب‌های منتقل شده به سازه اصلی تحت اثر بارهای بهره‌برداری مانند باد بطور قابل توجهی محدود شود.

۳. معادلات حاکم بر سازه مجهز به میراگر TLCBD

شکل (۲) تصویر شماتیک یک میراگر ستونی مایع تنظیم شونده گوی‌دار (TLCBD) به عنوان نمونه جدیدتر میراگرهای ستونی مایع را نشان می‌دهد. مانند حالت قبل

7 Head loss coefficient

استهلاک بحرانی ساختمان مطالعه شده به ترتیب $\omega_s = 1.125 \frac{rad}{s}$ و $\xi = 1\%$ محاسبه می‌شوند. Wu و همکاران [7] پاسخ دینامیکی ساختمان مذکور تحت اثر ارتعاش‌های هارمونیک باد با دامنه $F_0 = 5 \times 10^5 N$ را بررسی کردند. در این مقاله به منظور کاهش پاسخ دینامیکی ساختمان در قبال بار باد مذکور از میراگرهای TLCD و TLCBD با نسبت‌های طولی α و جرمی μ متفاوت استفاده به عمل آمده است تا اثر پارامترهای مذکور در پاسخ دینامیکی سازه اصلی بررسی شود. در میراگرهای مورد بررسی نسبت‌های جرمی μ از ۱٪ تا ۵٪ متغیر بوده و نسبت‌های طولی α نیز از ۰/۵ تا ۰/۹ تغییر می‌نمایند. لازم به ذکر است که سطح مقطع نواحی افقی و قائم لوله در کلیه میراگرهای این پژوهش برابر فرض شده‌اند و در میراگرهای TLCBD نسبت قطر گوی به قطر لوله در کلیه موارد برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. بر اساس مطالعات AL-Saif و همکاران [14] نسبت مذکور منجر به عملکرد بهینه میراگر خواهد شد. در میراگر TLCD دریاچه موجود در ناحیه افقی میراگر به جای گوی فلزی شناور ایفای نقش می‌نماید. میزان این استهلاک انرژی در پارامتر η (ضریب افت تراز مایع) منعکس می‌شود. با توجه به آنکه تعیین مقادیر پارامترهای مذکور مبتنی بر مطالعات آزمایشگاهی روی میراگر TLCD است در این پژوهش مقادیر پیشنهاد شده به وسیله Wu و همکاران [7] در خصوص میراگرهای TLCD بررسی شده استفاده به عمل آمده است.

شکل‌های (۳ تا ۵) به ترتیب تاریخچه جابه‌جایی‌های حاصل در سازه اصلی و سازه مجهز به میراگرهای TLCD و TLCBD با $\mu = 1\%$ و $\alpha = 0$ تحت اثر بارگذاری هارمونیک باد را نشان می‌دهند. در هر دو میراگر طول ناحیه افقی لوله میراگر $L_h = 11.045 m$ و طول کلی آن $L = 15.779 m$ است. بنابراین، طول هریک از ستون‌های عمودی میراگر $L_v = 2.376 m$ است.

نکته قابل ذکر اینکه جابه‌جایی‌های نشان داده شده

در شکل‌های (۳ تا ۵) برحسب مقدار بیشینه جابه‌جایی‌های سازه اصلی فاقد میراگر ($X_{s,max}$) نرمالایز شده‌اند. ضمناً

در معادلات فوق m_s جرم سازه اصلی و m_F جرم میراگر می‌باشد که با چشم‌پوشی کردن از جرم لوله، همان جرم سیال درون لوله با چگالی ρ بوده و از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. پارامتر J_c مبین ممان اینرسی جرمی گوی است که برحسب جرم گوی، m_b و شعاع آن R_b از رابطه ذیل محاسبه می‌شود.

$$J_c = \frac{2}{5} m_b R_b^2 \quad (13)$$

در رابطه (۱۱) ضریب α بیانگر نسبت طول بخش افقی، لوله، L_h ، به طول کل ستون مایع درون لوله یعنی L است و از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. پارامتر A_h مبین سطح مقطع ناحیه افقی لوله C_f ضریب میرایی میراگر TLCBD، و d_{eq} ضریب میرایی موثر سیال^۹ بوده که مقدار آن برحسب قطر گوی d_b و ضریب ویسکوزیته مطلق^{۱۰} سیال ν از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$d_{eq} = 3\pi d_b \nu \quad (14)$$

ضریب ویسکوزیته مطلق آب را می‌توان

$\nu = 10^{-3} \frac{Ns}{m}$ در نظر گرفت [14]. در معادله (۱۲) پارامتر A_b مبین سطح مقطع گوی است.

۴. تحلیل عملکرد میراگرهای TLCD و TLCBD

در این پژوهش عملکرد میراگرهای TLCD و TLCBD در کاهش پاسخ دینامیکی یک ساختمان بلند مرتبه (۷۵ طبقه) بررسی و مقایسه شده است. جرم کل ساختمان $m_s = 4/61 \times 10^6 \text{ NS}^2/m$ و سختی آن $5/83 \times 10^7 \text{ N/m}$ است. ضریب میرایی ساختمان به ازاء ارتعاش‌های ارتجاعی ناشی از باد برابر با $C_s = 1/0.4 \times 10^6 \text{ NS/m}$ در نظر گرفته شده است. بنابراین، فرکانس طبیعی ارتعاش و نسبت

9 Equivalent damping coefficient
10 Coefficient of absolute viscosity

در ادامه مقاله تاثیر نسبت طولی، α ، روی عملکرد میراگر بررسی می‌شود. شکل (۶) تغییرات دامنه جابه‌جایی‌های سیستم مجهز به میراگر TLCD را با ضریب طولی α به ازای نسبت‌های جرمی μ متفاوت نشان می‌دهد. در این شکل دامنه جابه‌جایی‌های سیستم بر حسب بیشینه جابه‌جایی سازه اصلی (بدون حضور میراگر) نرمالایز شده است. ضمناً نسبت استهلاک بحرانی سازه اصلی $\xi = 1\%$ در نظر گرفته شده است.

از بررسی شکل (۶) مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت طولی α کارایی میراگر TLCD ارتقاء یافته و پاسخ سیستم مجهز به میراگر نسبت به سازه اصلی از کاهش بیشتری برخوردار می‌شود. همچنین با افزایش نسبت جرمی μ میراگر TLCD پاسخ سیستم کاهش بیشتری می‌یابد. با توجه به شکل (۶) میزان کاهش پاسخ با توجه به نسبت‌های جرمی و طولی میراگر بین 52% (نظیر $\alpha = 0.5$ و $\mu = 1\%$) و 86% (نظیر $\mu = 5\%$ و $\alpha = 0.9$) متغیر خواهد بود.

شکل (۷) میزان کاهش در دامنه جابه‌جایی‌های سیستم مجهز به میراگر TLCD نسبت به سازه اصلی با میرایی ذاتی 1% را نشان می‌دهد میراگرهای مورد استفاده دارای نسبت‌های طولی و جرمی متفاوتی است.

شکل ۶. تأثیر نسبت طولی α در کاهش بازتاب سیستم مجهز به میراگرهای TLCD با نسبت‌های جرمی، μ ، مختلف

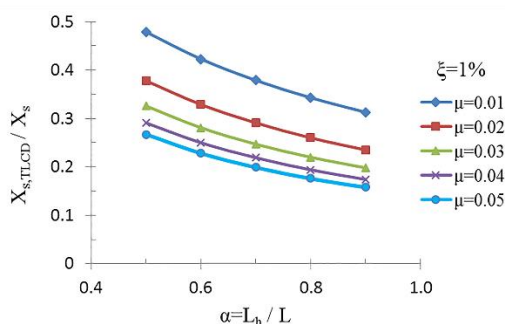


Fig. 6. The influence of the length ratio, α , on the response attenuation of the system equipped with TLCDs of different mass ratios, μ

با توجه به شکل (۷) مشاهده می‌شود که مشابه با میراگرهای TLCD با افزایش نسبت طول افقی میراگر کارایی آن ارتقاء

حل عددی معادلات حرکت در کلیه سیستم‌های بررسی شده توسط روش رانگ کوتا مرتبه ۴ [17] با در نظر گرفتن گام‌های زمانی $t = 0.01s$ انجام پذیرفته است.

شکل ۳. تاریخچه زمانی جابه‌جایی‌های نرمالایز شده ساختمان ۷۵ طبقه

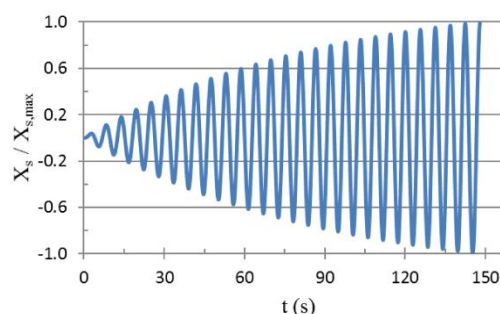


Fig. 3. Time history of normalized displacements in the 75-storey building

شکل ۴. تاریخچه زمانی جابه‌جایی‌های نرمالایز شده ساختمان مجهز به TLCD ($\mu = 1\%$ و $\alpha = 0.5$)

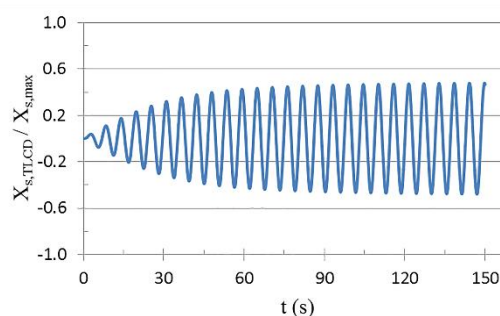


Fig. 4. Time history of normalized displacements in the building equipped with TLCD ($\mu=1\%$, $\alpha=0.5$)

شکل ۵. تاریخچه زمانی جابه‌جایی‌های نرمالایز شده ساختمان مجهز به TLCD ($\mu = 1\%$ و $\alpha = 0.5$)

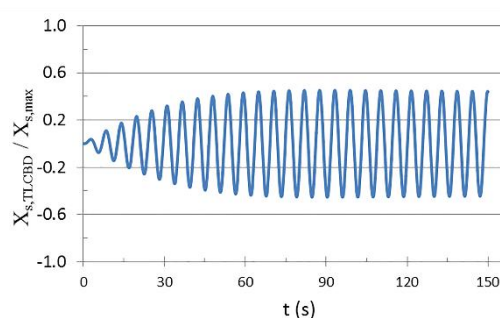


Fig. 5. Time history of normalized displacements in the building equipped with TLCD ($\mu=1\%$, $\alpha=0.5$)

است. با صرف نظر از مقدار ضریب طولی α ، کاهش دامنه جابه‌جایی‌های سیستم مجهز به میراگر TLCBD حدود ۵ تا ۲۵ درصد بیشتر از سیستم مجهز به میراگر TLCD است.

شکل ۸ مقایسه عملکرد میراگرهای TLCD و TLCBD با نسبت‌های طولی α مختلف و نسبت‌های جرمی ۱٪ و ۵٪ در کاهش بازتاب سازه

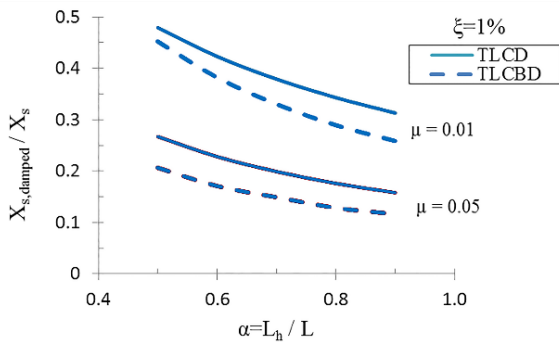


Fig. 8. A comparison between the response mitigations achieved by the TLCD and TLCBD dampers of various length ratios, α , with mass ratios of 1% and 5%

به منظور بررسی حساسیت میراگرهای TLCD و TLCBD به فرکانس تحریک ω_{ext} سازه، اثر مقادیر مختلف پارامتر $k = \omega_{ext} / \omega_D$ روی رفتار دینامیکی سیستم مجهز به میراگرهای مذکور بررسی شده است. منظور از ω_D فرکانس ارتعاش میراگر است که از رابطه (۵) بدست می‌آید. شکل (۹) حساسیت میراگر TLCD با نسبت طولی $\alpha = 0.5$ و نسبت‌های جرمی مختلف را به فرکانس تحریک نشان داده و شکل (۱۰) حساسیت میراگرهای دارای نسبت‌های طولی مختلف و نسبت جرم ۱٪ را نسبت به پارامتر k نشان می‌دهد. در شکل‌های (۹ و ۱۰) نقطه میانی روی نمودار مربوط به حالت تشدید یا رزونانس بوده و نقاط سمت راست و چپ مربوط به حالاتی است که فرکانس بار وارد شده قدری از فرکانس طبیعی سیستم فاصله گرفته و ارتعاش از حالت تشدید قدری خارج می‌شود. لازم به ذکر است که در لحظه تشدید k الزاماً برابر یک نخواهد بود زیرا پارامتر k نسبت فرکانس بار وارد شده به فرکانس طبیعی میراگر است در صورتی که لحظه تشدید زمانی است که فرکانس بار وارد شده با فرکانس طبیعی سیستم مجهز به میراگر برابر شود.

یافته و پاسخ سیستم دچار کاهش بیشتری می‌شود. همچنین با افزایش نسبت جرمی میراگر TLCBD پاسخ سیستم از کاهش بیشتری برخوردار می‌شود. براساس نتایج بدست آمده در این پژوهش نسبت دامنه جابه‌جایی‌ها در سیستم مجهز به میراگر TLCBD در قیاس با سازه اصلی بسته به نسبت‌های طولی و جرمی میراگر بین ۵۵٪ (نظیر $\mu = 1\%$ و $\alpha = 0.5$) و ۸۸٪ ($\mu = 5\%$ و $\alpha = 0.9$) متغیر است. از مقایسه شکل‌های (۶ و ۷) می‌توان نتیجه گرفت که در مجموع میراگرهای TLCBD از راندمان نسبتاً بهتری نسبت به میراگرهای TLCD در کاهش پاسخ دینامیکی سیستم برخوردار است.

شکل ۷. تأثیر نسبت طولی α در کاهش بازتاب سیستم مجهز به میراگرهای TLCBD با نسبت‌های جرمی، μ ، مختلف

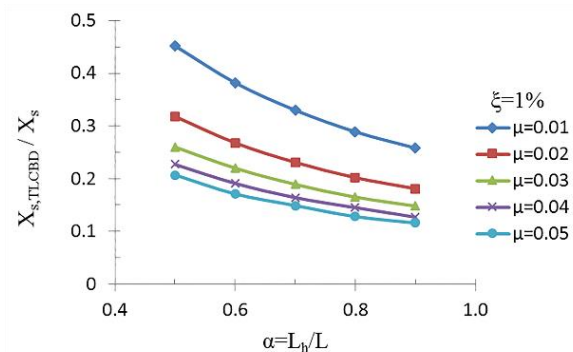


Fig. 7. The influence of the length ratio, α , on the response attenuation of the system equipped with TLCBDs of different mass ratios, μ

به منظور مقایسه بهتر عملکرد میراگرهای مذکور دامنه جابه‌جایی‌های سیستم مجهز به میراگر ($X_{s,damped}$) نسبت به سازه اصلی فاقد میراگر (X_s) به ازای مقادیر مختلف ضرایب طولی α و برای نسبت‌های جرمی ۱٪ تا ۵٪ روی یک دستگاه مختصات رسم شده است (شکل ۸). لازم به ذکر است که به ازای هر μ و α ثابت هردو میراگر TLCD و TLCBD مقایسه شده دارای هندسه کاملاً یکسان است. همان‌گونه که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود در مجموع میراگرهای TLCBD از راندمان بالاتری در کاهش پاسخ دینامیکی سیستم در قیاس با میراگرهای TLCD برخوردار

شکل ۹. تأثیر فرکانس تحریک بر دامنه جابه‌جایی‌های سیستم مجهز به میراگرهای TLCD دارای نسبت‌های جرمی μ مختلف

شکل ۱۱. تأثیر فرکانس تحریک بر دامنه جابه‌جایی‌های سیستم مجهز به

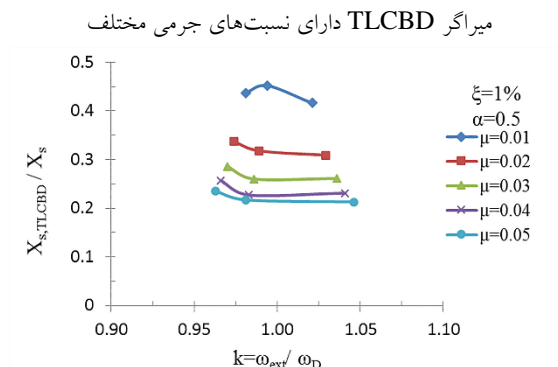


Fig. 11. The influence of excitation frequency on the response of TLCBDs of different mass ratios

شکل ۱۲. تأثیر فرکانس تحریک بر دامنه جابه‌جایی‌های سیستم مجهز به میراگر TLCD دارای نسبت‌های طولی α مختلف

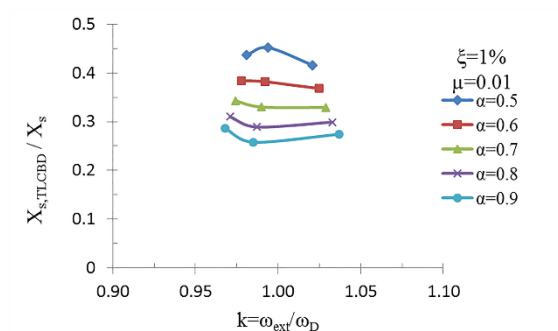


Fig. 12. The influence of excitation frequency on the response of TLCBDs of different mass ratios

همان‌گونه که در شکل (۱۲) ملاحظه می‌شود صرفنظر از میزان نسبت طولی α میراگر، پاسخ سیستم مجهز به میراگر از حساسیت نسبتاً محسوسی نسبت به تغییرات در فرکانس تحریک (بارگذاری) برخوردار است.

به منظور مقایسه بهتر میزان حساسیت سیستم‌های TLCD و TLCBD به فرکانس تحریک، نتایج بدست آمده از تحلیل میراگرهای مذکور در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ارائه شده‌اند. شکل (۱۳) عملکرد میراگرهای مورد مطالعه در دو حد نسبت جرمی ۱٪ و ۵٪ را نشان می‌دهد. در نسبت جرمی ۱٪ هنگامی که نسبت فرکانسی $k=0.981$ می‌شود دامنه جابه‌جایی‌ها در سیستم‌های TLCD و TLCBD به ترتیب ۴٪ و ۳٪ نسبت

شکل ۱۰. تأثیر فرکانس تحریک بر دامنه جابه‌جایی‌های سیستم مجهز به میراگر TLCD دارای نسبت‌های طولی مختلف

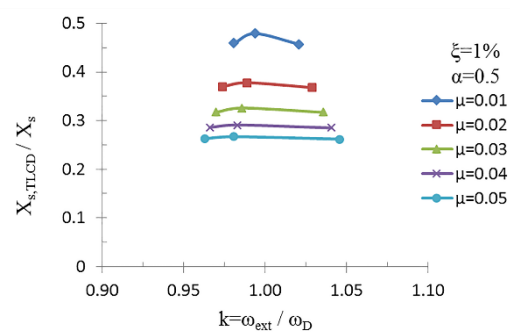


Fig. 9. The influence of excitation frequency on the response of TLCDs of different mass ratios

با توجه به شکل (۹) با کاهش نسبت جرمی μ حساسیت سیستم‌های TLCD به تغییرات به دست آمده در فرکانس تحریک سازه بیشتر می‌شود. همچنین بر اساس شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت طولی α حساسیت میراگر به تغییرات اعمالی در فرکانس بارگذاری دارای کاهش محسوسی خواهد شد.

شکل ۱۰. تأثیر فرکانس تحریک بر دامنه جابه‌جایی‌های سیستم مجهز به میراگر TLCD دارای نسبت‌های طولی مختلف

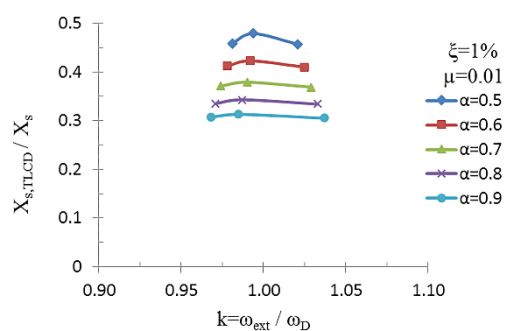


Fig. 10. The influence of excitation frequency on the response of TLCDs of different length ratios

شکل (۱۱) میزان حساسیت سیستم‌های TLCBD با نسبت‌های جرمی مختلف را به تغییرات فرکانس تحریک سیستم نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۱) ملاحظه می‌شود که تقریباً به ازای کلیه نسبت‌های جرمی، تغییر در فرکانس بارگذاری تأثیر محسوسی روی عملکرد TLCBD می‌گذارد. تأثیر فرکانس تحریک بر دامنه‌های سیستم مجهز به میراگر

۵. نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد میراگرهای ستونی مایع تنظیم شونده دارای درپچه (TLCD) و میراگرهای ستونی مایع تنظیم شونده گوی دار (TLCBD) بررسی و مقایسه شد. برای این منظور معادلات حرکت یک ساختمان بلند مرتبه مجهز به میراگرهای مذکور، تحت اثر بارگذاری هارمونیک باد حل شدند و پاسخ دینامیکی سیستم‌های مورد بررسی شامل جابه‌جایی‌های جانبی آن محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند. اهم نتایج بدست آمده در این پژوهش با توجه به تحلیل‌های انجام شده عبارتند از:

۱- دامنه جابه‌جایی‌های جانبی سازه‌ای که در حالت تشدید ویا نزدیک به تشدید در حال ارتعاش است در صورت استفاده از هریک از میراگرهای TLCD و یا TLCBD کاهش قابل توجهی (از ۵۰٪ تا ۸۸٪) خواهند یافت. با فرض یکسان بودن جرم و مشخصات هندسی میراگرها راندمان میراگرهای TLCBD در تقلیل پاسخ دینامیکی ارتعاشات وضعیت تشدید سازه بیشتر از میراگرهای TLCD است. بر اساس تحلیل‌های انجام شده در این مقاله میراگرهای TLCBD بین ۵ تا ۲۵ درصد بیشتر از میراگرهای TLCD موفق به کاهش جابه‌جایی‌های سازه شده‌اند.

۲- در هر دو سیستم TLCD و TLCBD با افزایش جرم میراگر (جرم سیال درون میراگر) کارایی میراگر در تقلیل پاسخ دینامیکی سازه افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه چنانچه نسبت جرمی میراگر از ۱٪ به ۵٪ افزایش یابد، با توجه به نوع و هندسه‌ی میراگر دامنه جابه‌جایی‌های سازه بین ۳۰ تا ۵۰ درصد بیشتر کاهش خواهند یافت.

۳- افزایش طول ناحیه افقی لوله U شکل میراگر، با فرض ثابت ماندن طول کلی لوله، موجب افزایش کارایی میراگرهای TLCD و TLCBD و تقلیل بیشتر جابه‌جایی‌های جانبی سازه در ارتعاشات وضعیت تشدید می‌شود. بر اساس نتایج بدست آمده در این پژوهش افزایش نسبت طول ناحیه افقی از ۰/۵ به ۰/۹ در هر دو سیستم میراگر سبب حصول ۳۰ تا ۴۰ درصد کاهش بیشتر در دامنه جابه‌جایی‌های سازه می‌شود.

به حالت تشدید دچار کاهش می‌شود. در نسبت جرمی ۵٪ هنگامی که نسبت فرکانسی $k=1/0.46$ می‌شود تغییرات در جابه‌جایی‌های سیستم مجهز به TLCD برابر ۲٪ و در سیستم TLCBD نیز برابر ۲٪ می‌شود.

شکل ۱۳. مقایسه‌ی اثر فرکانس تحریک بر دامنه جابه‌جایی‌های سازه در سیستم‌های مجهز به میراگرهای TLCD و TLCBD با نسبت‌های

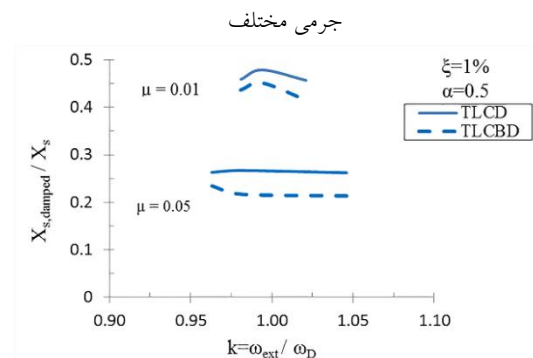


Fig. 13. The influence of excitation frequency on the response of TLCD and TLCBD dampers of different mass ratios

شکل (۱۴) اثر فرکانس تحریک بر دامنه جابه‌جایی‌های سیستم مجهز به میراگرهای بررسی شده را به ازای مقادیر متفاوت نسبت طولی نشان می‌دهد. باتوجه به این شکل مشاهده می‌شود که در قیاس با سیستم TLCD، میراگر TLCBD با چشم‌پوشی از نسبت طولی آن دارای حساسیت قابل توجهی به فرکانس بار وارد شده است. با توجه به شکل‌های (۱۳ و ۱۴) در حالت کلی تغییرات به دست آمده در پاسخ سیستم با تغییرات فرکانس تحریک در میراگرهای TLCBD بیشتر از میراگرهای TLCD است.

شکل ۱۴. مقایسه‌ی اثر فرکانس تحریک بر دامنه جابه‌جایی‌های سازه در سیستم‌های مجهز به میراگر TLCD و TLCBD با نسبت‌های طولی

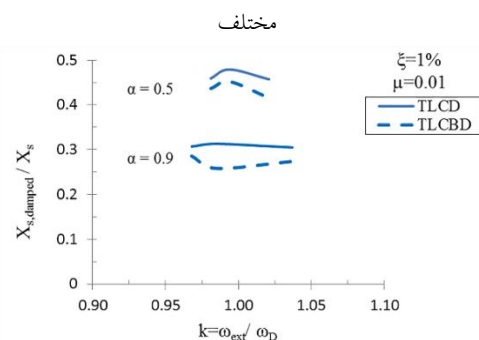


Fig. 14. The influence of excitation frequency on the response of TLCD and TLCBD dampers of different length ratios

Angeles, Lewis FL, Syrmos VL, editors. Optimal Control. New York: Wiley.

[9] Mensah A. F., Akwasi F., and Dueñas-Osorio L. 2014. Improved reliability of wind turbine towers with tuned liquid column dampers (TLCDs). *Structural Safety*, 47, 78-86.

[10] Mahmudur R., Ong Z. C., Chong W. T., Julai S., and Khoo S. Y. 2015. Performance enhancement of wind turbine systems with vibration control: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 51, 43-54.

[11] Gkoumas K., Petrini F., and Bontempi F. 2015. Design of Cable-Supported Bridges: Control Strategies. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, 1-16.

[12] Reiterer M., and Hochrainer M. 2004. Damping of Pedestrian-Induced Bridge Vibrations by Tuned Liquid Column Dampers. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics (PAMM)*; 4(1), 109-110.

[13] Chatterjee T., and Chakraborty S. 2014. Vibration mitigation of structures subjected to random wave forces by liquid column dampers. *Ocean Engineering*, 87, 151-161.

[14] Al-Saif K. A., Aldakkan K. A., Foda M. A. 2011. Modified liquid column damper for vibration control of structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 53, 505-512.

[15] Gur S., Roy K., and Mishra S. K. 2015. Tuned liquid column ball damper for seismic vibration control. *Structural Control and Health Monitoring*, DOI: 10.1002/stc.1740

[16] Meghana K., and Chaudhuri S. R. 2015. Comparison of Performance of Different Tuned Liquid Column Dampers (TLCDs). *Advances in Structural Engineering*. Springer India, 1257-1269.

[17] Chapra S. C., Canale R. P. 2010. *Numerical Methods for Engineers*. 6th Edition, McGraw-Hill, New York.

۴- حساسیت سیستم مجهز به TLCBD به تغییرات فرکانس تحریک سیستم (فرکانس بارگذاری) بیشتر از سیستم TLCD است.

References

مراجع

[1] Sakai F, Takaeda S, and Tamaki T. 1989. Tuned liquid column damper—new type device for suppression of building vibration. *Proceedings of International Conference on High-rise Buildings*, Nanjing, China, 926–931.

[2] Felix J. L. P., Balthazar J. M., and Brasil R. M. 2005. On tuned liquid column dampers mounted on a structural frame under a non-ideal excitation. *Journal of Sound and Vibration* **282** (3–5), 1285–1292.

[3] Chang C. C., Hsu C. T. 1998. Control performance of liquid column vibration absorbers. *Engineering Structures* **20** (7), 580–586.

[4] Wu J. C., Shih M. H., Lin Y. Y., and Shen Y. C. 2005. Design guidelines for tuned liquid column damper for structures responding to wind. *Engineering Structures* **27** (13), 1893–1905.

[5] Yalla S., Kareem A. 2000. Optimum absorber parameters for tuned liquid column dampers. *ASCE Journal of Structural Engineering* **126** (8), 906–915.

[6] Gao H., Kwok K. S. C., and Samali B. 1999. Characteristics of multiple tuned liquid column dampers in suppressing structural vibration. *Engineering Structures* **21**, 316–331.

[7] Wu J. C., Chang C. H., and Lin Y. Y. 2009. Optimal designs for non-uniform tuned liquid column dampers in horizontal motion. *Journal of Sound and Vibration*, 1-2, 104-122.

[8] Haroun M. A., Pires J. A. 1995. Active orifice control in hybrid liquid column dampers. *Proceedings of 1st World Conf. on Structural Control*, Vol. I, Los

Comparative Study on Performance of Tuned Liquid Column Dampers (TLCDs) and Tuned Liquid Column Ball Dampers (TLCBDs)

Hamid Toopchi-Nezhad^{1*} and Amir Panahian²

¹Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Razi Univ., Kermanshah, Iran h.toopchinezhad@razi.ac.ir

²M.Sc. Student, Dept. of Civil Eng., Islamic Azad Univ., Kermanshah, Iran

amir_pannahian@yahoo.com

Abstract

Tall buildings, due to their significant flexibility in horizontal direction, exhibit very limited inherent damping. As such, their resonance or near-resonance excitations induced by wind loads may result in lateral structural response values that exceed the serviceability limit states of the structure. A mass damper when attached on a tall building can significantly mitigate the near-resonance lateral response of the structure. Tuned liquid column dampers (TLCDs) which consist of one or more U-shaped vessels with partially-filled water are known as a common type of mass dampers. In the conventional type of these dampers, an orifice is located at the horizontal portion of the vessel to dissipate the energy of the oscillating liquid within the damper. In the new type of these dampers, the orifice is replaced by a coated steel ball that is immersed in water at the horizontal portion of the vessel to dissipate the oscillating energy of the liquid within the damper. The latter damper is termed as tuned liquid column ball damper (TLCBD). In this paper the performance of a set of different TLCDs and TLCBDs in response mitigation of a tall building (of 75-stories) under harmonic wind loads have been investigated. A large set of time history analysis runs have been performed to study the role of different damper design parameters on the lateral response of the tall building. The design parameters investigated in this paper include geometrical and mass properties of the liquid dampers, inherent damping of structure, and the frequency of input excitation. The outcome of analysis runs has been compared to highlight the cons and pros of TLCDs and TLCBDs, in wind-response mitigation of the building. Results of this study indicate that both damper types are effective in response mitigation of the original structure. The peak roof displacement is decreased by 50% to 88% as a result of using the liquid dampers in the structure. Given the mass and geometrical properties of dampers, the performance of TLCBDs will be superior to that of TLCDs in response mitigation of tall buildings. Based on the analyses conducted in this paper, the attenuation of building deformations in a system equipped by a TLCBD is 5% to 25% larger than in the case where the same system is equipped by a TLCD. However, the performance of TLCBDs is more sensitive to the frequency of input excitations. An increase in the mass of the damper, in both TLCD and TLCBD systems, results in an increased response mitigation. For instance, when the mass ratio of damper is increased from 1% to 5%, the peak lateral displacement of structure, depending on the type and geometry of damper, is further decreased by 30% to 50%. The length of the horizontal portion of the U-shaped vessel of the damper was found also to be significantly influencing the response mitigation efficiency of damper in both TLCD and TLCBD systems. When the length of the horizontal portion of the damper is increased from 0.5 to 0.9, the roof displacements experience approximately 30% to 40% of further reduction.

Keywords: tall buildings, tuned liquid column dampers, tuned liquid ball dampers, vibration control, wind load.