

بررسی اثرات میراگرهای مایع هماهنگ شده در کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای برشی

مهدی ترکی* و امیر مهدی حلبیان**
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۱۰/۲۴ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۸/۱۰/۲۶)

چکیده -
(TLD)
TLD
TLD
TMD
(TMD)
TLD
TLD
()
واژگان کلیدی :

Effects of Tuned Liquid Dampers (TLD) on Damping Shear-type Building Vibrations

M. Torki and A. M. Halabian

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: The Tuned Liquid Damper (TLD) is nowadays increasingly being used as an economical and effective passive vibration absorber. This research focuses on modeling tall buildings equipped with Tuned Liquid Dampers (TLDs) subjected to strong ground motions. Strong excitation can lead to the wave breaking phenomenon and make turbulence in shallow rectangular tanks which could, in turn, contribute to additional damping due to TLD's. Wire screens placed inside the liquid tank

** - استادیار

* - کارشناسی ارشد

can play an important role in reducing the structural response due to increased inherent damping of the structure. In this study, a simple method is introduced for modeling this type of Tuned Liquid Damper by using Equivalent Amplitude Dependent Tuned Mass Damper. The method is based on equalizing dissipated energies in both devices. Equations of motion for shear-type buildings equipped with nonlinear Amplitude Dependent Tuned Mass Dampers are developed. A complex modal analysis procedure is used to solve the governing equations. Coupling of TMD properties and structural response is solved with iteration on structural response and updating TMD's properties. Performing a set of parametric studies on a practical 10-storey building equipped with TLDs subjected to different ground excitations showed that the TLD significantly reduced the seismic response (displacement and base shear) of the structures when the Tuned Liquid Damper was tuned to the natural frequency of the structure considering the hardening behavior of TLD

Keywords: Tuned liquid damper, Equivalent tuned mass damper, Shear buildings, Seismic response.

۱- مقدمه

میراگر مایع هماهنگ شده (TLD)، مخزنی محتوی یک مایع (مثل آب) است که در اثر یک تحریک دینامیکی، شتاب ایجاد شده در مایع باعث ایجاد نیروی اینرسی در آن شده و این نیرو نیز سبب بالا و پایین رفتن سطح آب در دیواره‌های مخزن (نوسان آب) می‌شود. اختلاف نیروی هیدرواستاتیک بسیج شده پای دیواره‌های مخزن که ناشی از یکسان نبودن تراز سطح آب در دیواره‌هاست، در هر لحظه باعث ایجاد نیروی برشی در تکیه‌گاه مخزن می‌شود که به برش پایه TLD موسوم بوده و به دلیل ماهیت سیال بودن آب، نسبت به تحریک دارای اختلاف فاز است. زمانی که فرکانس ارتعاشات تحریک اعمال شده به مخزن برابر با فرکانس طبیعی ارتعاشات مایع درون مخزن باشد، اختلاف فاز موجود بین تحریک و برش پایه TLD سبب استهلاك انرژی می‌شود و به همین دلیل میراگرهای مایع هماهنگ شده (TLDs) می‌توانند در تحریکات مختلف، رفتار نامطلوب سازه را بهبود دهند. این میراگرها کاهش پاسخی ایجاد می‌کنند که شبیه کاهش پاسخ ناشی از افزایش میرایی سازه است [۱]. امواجی که در مخزن ایجاد می‌شوند به دو صورت خطی و غیر خطی بوده و میزان غیرخطی بودن امواج به شدت تحریک اعمال شده به مخزن بستگی دارد. بیشتر تحقیقات انجام شده سیستم کنترل TLD را در مواجهه با ارتعاشات با دامنه کم مورد تجزیه و تحلیل قرار داده‌اند لیکن یک سیستم TLD در خلال تحریکهای شدید به دلیل شکست امواج^۱ در برخورد با دیواره‌ها رفتار متفاوتی خواهد داشت که با توجه به پیچیدگی رفتار مایع هنگام وقوع شکست امواج، در بیشتر تحقیقات

صورت گرفته به نحوی با استفاده از ساده‌سازی و یا نتایج آزمایشگاهی از نوشتن معادلات حرکت سیال در این حالت صرف‌نظر کرده‌اند.

در حالتی که امواج خطی اند دامنه ارتعاشات مخزن و مایع درون آن با یکدیگر متناسب است و تنها تفاوت موجود بین ارتعاشات مخزن و مایع درون آن اختلاف فاز آنهاست. ولی در اکثر موارد امواج ایجاد شده در مخزن غیرخطی‌اند و فقط در صورتی که تحریک هارمونیک با فرکانس کاملاً متفاوت از فرکانس اصلی ارتعاشات مایع به مخزن اعمال شود، امواج ایجاد شده خطی خواهند بود. با توجه به اینکه میراگر مایع هماهنگ شده به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که فرکانس اصلی آن با فرکانس ارتعاشات سازه برابر باشد و تحریک آن در واقع همان تغییر مکانهای سازه است، در مخازن با عمق زیاد قسمت پایین آب نوسان نمی‌کند و تحرک نمی‌پذیرد؛ اما در مخازن کم‌عمق به دلیل اینکه تقریباً تمامی جرم مایع در نوسانات شرکت می‌کند، میرایی و استهلاك انرژی بیشتر است؛ به همین دلیل با اینکه پدیده شکست امواج در مخازن با عمق زیاد در تحریکهای شدیدتری اتفاق می‌افتد، برای دستیابی به استهلاك بیشتر، از مخازن کم‌عمق به عنوان میراگر مایع هماهنگ‌شده استفاده می‌شود [۱]. بنابراین مهمترین مسئله در خلال تحریکات دینامیکی شدید، نحوه مدل کردن امواج غیرخطی آب در مخزن است.

فوجینو و سان مدل غیرخطی دوبعدی حرکت مایع با عمق کم در مخازن چهارضلعی را بسط دادند؛ نتایج بارگذاری هارمونیک روی سازه دارای سیستم TLD سازگاری خوبی با مدل آنها نشان می‌داد [۲]. در سال ۱۹۹۹، کانکو و همکاران به

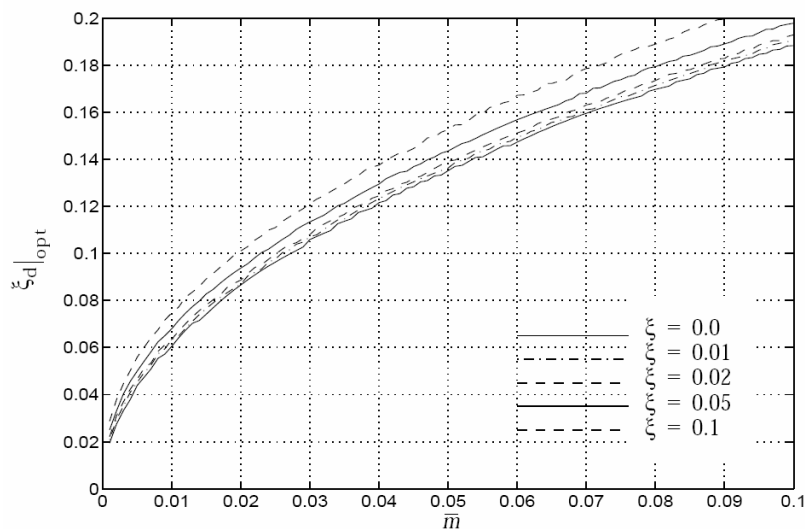
مدل کردن TLD در حالتی که عمق آب نسبت به بعد آن زیاد باشد، اقدام کردند؛ در مخزن مورد مطالعه آنها شبکه‌های سیمی میانی که باعث افزایش استهلاک انرژی می‌شود، غوطه‌ور شده بود. آنها تحقیق خود را برای سازه‌های بلند پریود انجام دادند و با در نظر گرفتن اثر مقاومت هیدرولیکی شبکه سیمی میانی، از نظریه امواج با دامنه محدود استفاده کرده و به کمک روش گالرکین معادلات حاکم بر سیستم را حل کردند. نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی کانکو و همکاران بر هم تطابق داشته و نشان می‌دهد با استفاده از شبکه سیمی میانی، میرایی تا اندازه‌ای افزایش می‌یابد [۳].

لی و همکاران در سالهای ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ استفاده از چند میراگر مایع هماهنگ شده (MTLD) را بدون استفاده از شبکه سیمی میانی را به منظور کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بلند در دستور کار خود قرار دادند؛ در مدلسازی آنها فشار دینامیکی مایع درون مخزن در حال نوسان با استفاده از روش حجم سیال^۳ و پاسخ سازه بر اساس حل معادلات حالت به دست می‌آمد. آنها از مدل نظری دار و مدل آزمایشگاهی TLD تحت تاثیر چند شتاب نگاشت زلزله متفاوت، کاهش پاسخ به میزان ۴۰٪ تغییر مکان سازه را به دست آوردند [۴].

گراهام و رودریگز با فرض خطی بودن جریان و استفاده از پتانسیل جریان، مدل ساده مکانیکی برای ارائه رفتار دینامیکی یک سیال به دست آوردند که می‌توانست به اندازه انرژی مستهلک شده در نوسانات آب، انرژی را مستهلک کند [۵]. لیکن مدل مذکور نمی‌توانست ارتباطی بین پارامترهای مدل ساده مکانیکی معادل و شدت تحریک ارائه دهد و همچنین نمی‌توانست اثرات استفاده از صفحات میرا کننده انرژی در سیال را لحاظ کند. در سالهای اخیر مدل‌های نیمه تجربی پیشنهاد شده‌اند که رفتارهای غیرخطی نوسانات آب را نیز در نظر می‌گیرند و در این مدل‌ها جرم TLD برابر با جرم همه آب درون مخزن فرض می‌شود که به شدت تحریک بستگی ندارد [۶-۹]. تیت و همکاران مدل سازه دارای TLD را روی میز لرزه و سپس در تونل باد مورد مطالعه قرار دادند [۱۰ و ۱۱]. آنها برای TLD دارای شبکه‌هایی از

تخته‌های نازک، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی میرایی معادل را به دست آورده و به بررسی اثرات شبکه‌های میانی اضافه شده، روی نوسانات سطح آب، برش پایه TLD و انرژی مستهلک شده پرداختند و در نهایت توانستند یک مدل مکانیکی TMD معادل که پارامترهای آن وابسته به شدت تحریک است، ارائه کنند. مشخصات جرم، سختی و میرایی این TMD بر اساس انرژی معادل به دست آمده و این پارامترها به صورت وابسته به شدت تحریک مطرح شده‌اند. این پارامترها با مقادیر مشابهی که برای حالت تحریک خفیف از نظریه امواج خطی به دست می‌آید، مقایسه شده‌اند که نتایج این مقایسه صحت این روش مدلسازی TLD را نشان می‌دهد [۱۰].

میزان توانایی و تاثیر TLD در کاهش پاسخ سازه (کارایی TLD) به عوامل متعددی از جمله اندازه TLD، نسبت جرم مخزن به جرم سازه (و یا جرم مودی که کنترل می‌شود)، عمق مخزن، لزجت سینماتیکی مایع استفاده شده، شدت تحریک ایجاد شده در مخزن و زبری کف مخزن بستگی دارد [۵]. با کاهش نسبت عمق مایع به طول مخزن، جرم مود اول نوسانات مایع درون مخزن به سمت جرم کل مایع درون مخزن میل می‌کند و استهلاک انرژی ناشی از به کارگیری TLD افزایش می‌یابد ولی از طرفی پدیده شکست امواج در مخازن با عمق کم حتی برای تحریک‌های کوچک نیز امکانپذیر است و این مسئله مهمترین محدودیت برای استفاده از مخازن کم عمق برای کنترل ارتعاشات سازه‌هاست. اصول حاکم بر حرکات نوسانی که باعث کاهش لرزشهای سازه می‌شود به خصوص برای لرزشهای شدید که با شکست امواج مایع درون مخزن همراه است، هنوز به صورت کامل شناخته نشده است [۱۲]؛ و استفاده از تکنیک TLD همواره با ساده‌سازیهایی در طراحی همراه بوده است که این مسئله باعث شده مهندسين طراح تا حد زیادی در استفاده کارآمدتر از TLD دچار محدودیت شوند. بررسی رفتار TLD ها به صورت آزمایشگاهی و عددی و به خصوص رفتار این سیستمها در لرزه‌های شدید و رفتار مایع در درون خود مخزن همواره مورد توجه محققان قرار داشته و



شکل ۱- میرایی بهینه مورد نیاز در میراگرهای جرمی هماهنگ شده [۷]

امواج است که به میزان قابل توجهی میرایی درون مخزن آب در حال نوسان را افزایش می‌دهد. در دو سیستم TLD و TMD به دلیل اختلاف فاز نوسانات سیستم کنترلی نسبت به تحریک اعمال شده، انرژی مستهلک می‌شود و میزان انرژی مستهلک شده به خصوصیات جرم و فرکانس سیستم کنترلی وابسته است، میزان میرایی بهینه مورد نیاز میراگر جرمی تنظیم شده (TMD) به صورت تابعی از نسبت جرم TMD به جرم سازه، به صورت شکل (۱) است که با توجه به شباهت‌های TMD و TLD می‌توان برای محاسبه میرایی مورد نیاز TLD نیز به صورت تقریبی از آن استفاده کرد [۷]. این مقدار برای سیستم‌های یک درجه آزادی نا میرا به صورت زیر به دست آمده است:

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{4(1+\mu)(1+\mu/2)}} \quad (1)$$

که در آن μ نسبت جرمی TMD به سیستم یک درجه آزاد است [۱۳]. در TLD ها قسمت عمده میرایی داخلی مخزن ناشی از لزجت در لایه‌های مرزی سیال و جداره‌ها و سطح آزاد سیال است که بر اساس نظریه امواج خطی برای مخزن مستطیلی بدون صفحات میراکننده، از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲].

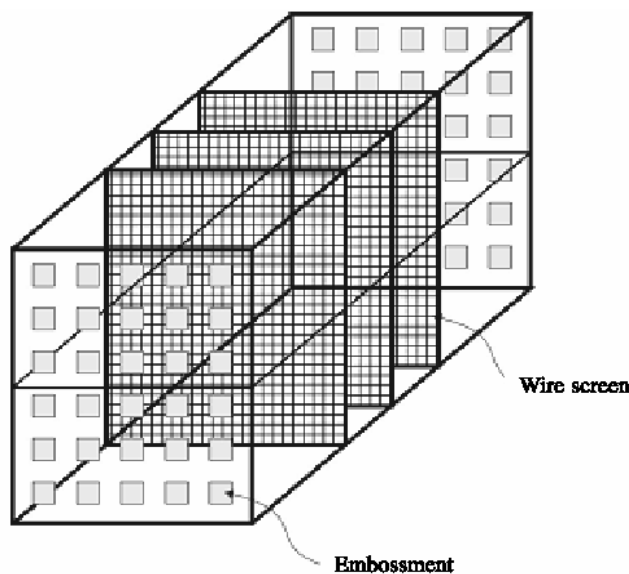
$$\xi_{TLD} = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{v_w}{\pi f_w}} \left(1 + \frac{h}{b} \right) \quad (2)$$

در محدوده وسیعی از فرکانس و شدت تحریک نقش آن در استهلاک انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است.

زمانی که امواج در دیواره‌های مخزن نوسان می‌کنند با افزایش شدت تحریک فرکانس پاسخ TLD نیز افزایش می‌یابد و مایع رفتاری شبیه فنر سخت شونده از خود نشان می‌دهد، بنابراین برای رسیدن به سیستم TLD کارآمدتر باید فرکانس طراحی مخزن در صورتی که از نظریه امواج خطی محاسبه می‌شود، تا اندازه‌ای کمتر از فرکانس محاسبه شده برای پاسخ سازه در نظر گرفته شود؛ لیکن در صورتی که فرکانس واقعی میراگر که با نظریه غیرخطی امواج محاسبه می‌شود با فرکانس پاسخ سازه برابر باشد و حتی اگر فرکانس TLD با فرکانس سازه ناهم‌هنگ باشد، در محدوده وسیعی از تغییر پارامترها، TLD اثر نامطلوبی بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه نخواهد داشت [۶].

۲- استهلاک انرژی در مخزن مرتعش

میرایی TLD (ξ_{TLD}) از جمله عوامل مؤثر بر کارایی TLD می‌باشد ولی متأسفانه میرایی داخلی مایع در حال نوسان از مقدار مورد نیاز برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها در تحریکات شدید خیلی کمتر است و استفاده از شبکه‌های میانی روش مناسبی برای جلوگیری از حرکات سریع آب درون مخزن و ایجاد شکست



شکل ۲- نحوه قرارگیری شبکه سیمی میانی در داخل مخزن [۲]

البته باید توجه کرد که مودهای دیگر نوسانات آب غیر از مود اصلی در مقادیر فرکانسی چند برابر کمتر از فرکانس محاسباتی خود، تحریک می‌شوند و ممکن است در محدوده‌ای نزدیک به فرکانس مود اول نیز این مودها به میزان قابل ملاحظه‌ای تحریک شده و بنابراین با افزایش شدت تحریک مودهای بالاتر نوسانات آب سهم بیشتری در امواج ایجاد شده خواهند داشت [۱۰]. افزایش میرایی ایجاد شده با صفحات میراکننده باعث کاهش شدت دامنه پاسخ نوسانی آب می‌شود و به عبارتی رفتار غیرخطی نوسانات آب و همچنین اثرات مودهای بالاتر نوسان نیز کمتر می‌شود.

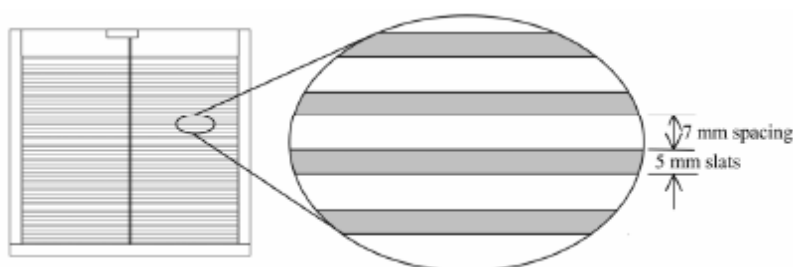
۳- مدل‌سازی TLD به صورت TMD معادل

همان‌گونه که اشاره شد با استفاده از ابزاری مانند شکل (۳) که در آن تخته‌های نازکی به صورت افقی درون مخزن آب قرار داده شده‌اند، می‌توان میرایی درونی مخزن (TLD ξ) را افزایش داده و در تحریکات شدید از اغتشاش و شکست امواج در مخزن جلوگیری کرد. این صفحات میراکننده را می‌توان به راحتی درون مخزن نصب کرده و با تغییر فاصله و ابعاد تخته‌های نازک نسبت استهلاک مورد نظر را به دست آورد.

در این رابطه فوق v_w لزجت سینماتیکی آب، h ارتفاع آب، b عرض مخزن و f_w فرکانس نوسانات آب است. با توجه به رابطه (۲) میرایی مخزن بدون صفحات میراکننده میانی برای مخزن مستطیلی معمولاً در حدود ۱۰٪ میرایی بهینه مورد نیاز است [۱۰]. تفاوت میرایی موجود و میرایی مورد نیاز را می‌توان با افزایش لزجت سیال و یا کاهش ارتفاع آب جبران کرد ولی در عمل چنین کاری امکانپذیر نیست چون کاهش بیش از حد عمق مخزن تنها با استفاده از تعداد زیادی مخزن برای تأمین جرم مورد نیاز TLD امکانپذیر است و فضای زیادی مورد نیاز خواهد بود ضمن اینکه خصوصیات غیرخطی نوسانات آب درون TLD با کاهش نسبت ارتفاع آب به طول مخزن ($\frac{h}{L}$) افزایش می‌یابد و باعث می‌شود شکست امواج در تحریکهای خفیفتری اتفاق بیفتد. مقدار لزجت آب نیز ثابت است و در صورت استفاده از سیال دیگری با لزجت بالا مخزن ذخیره آب ساختمان قابل استفاده نخواهد بود و علاوه بر تحمیل هزینه‌های اضافی جرم سازه نیز افزایش می‌یابد. وجود شبکه‌های سیمی میانی، شکل (۲)، در درون مخزن پاسخ دینامیکی آن را تغییر می‌دهد. آزمایشات نشان داده است که با وجود این شبکه‌ها رفتار سخت‌شدگی فنی در سیال همچنان وجود دارد [۲].



الف) مخزن مورد استفاده در آزمایشات



ب) جزئیات شبکه چوبی میراکننده انرژی

شکل ۳- مخزن مورد استفاده در آزمایشات تیت و همکاران [۱۰]

میراکننده به دست آمده است، محاسبه کرد [۱۰].

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{g\pi}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right) \right)} \quad (3)$$

علاوه بر فرکانس نوسانات، پارامتر دیگری که پاسخ سازه را تحت تاثیر قرار خواهد داد نسبت جرم مودی (μ) است که نسبت جرم TMD معادل (m_{TLD}) به جرم مود m سازه بوده و برای سازه چند درجه آزادی از رابطه زیر به دست می آید [۱۰].

$$\mu = \frac{\{\phi\}^T \{m_{TLD}\} \{\phi\}}{m^*} \quad (4)$$

در رابطه (۴) m^* جرم مودی تعمیم یافته بوده که از رابطه (۵-الف) به دست می آید و $\{\phi\}$ بردار نرمال مود مورد نظر است. m_{TLD} بخشی از جرم آب است که در نوسانات شرکت می کند و تقریباً برابر جرم مود اول نوسانات آب (m_1) است. جرم مودهای مختلف نوسانات آب برای مخزن مستطیلی از رابطه (۵-ب) به دست می آید که در آن m_w جرم کل آب، L طول مخزن و h

تیت و همکاران در سال ۲۰۰۴ مدلی پیشنهاد کرده اند که در آن مدل نیز مبنای به دست آوردن خصوصیات TMD معادل، انرژی مستهلک شده در TLD واقعی است. در مدل مذکور با استفاده از نتایج آزمایشات انجام شده بر روی سیستمهای TLD دارای شبکه های میراکننده میانی، شکل (۳)، و مساوی قرار دادن انرژی مستهلک شده در آن با انرژی قابل استهلاک در سیستم TMD، خصوصیات مکانیکی TMD معادل به صورت پارامترهای وابسته به شدت تحریک به دست می آید. صحت شبیه سازی صورت گرفته در آزمایشات بعدی تیت و همکاران مورد تایید قرار گرفت [۱۱].

۴- روابط حاکم بر نوسانات

نتایج تحقیقات انجام شده نشان می دهد که در صورت استفاده از شبکه های میراکننده در درون مخزن همچنان فرکانس طبیعی نوسانات مایع درون مخزن را می توان از رابطه (۳) که بر اساس نظریه امواج خطی در مخازن مستطیلی بدون صفحات

ارتفاع آب در حالت سکون است. همان گونه که ذکر شد بخش عمده جرم آب در مود اول نوسانات شرکت می کند که با قرار دادن $n=1$ در رابطه (۵-ب) قابل محاسبه است [۱۰].

$$m^* = \{\phi\}^T [m] \{\phi\} \quad (5-الف)$$

$$m_n = \frac{8 \tanh((2n-1)\pi h/l)}{\pi^3 (2n-1)^3 h/l} m_w \quad (5-ب)$$

در ساختمانهای معمولی که تغییرات زیاد جرم و سختی در طبقات مختلف اتفاق نمی افتد، (ساختمانهای منظم) جرم مود اول عمده جرم سازه را در بر می گیرد و بنابراین در مورد این ساختمانها به جای پارامتر μ می توان از رابطه (۶) برای نسبت جرم استفاده کرد که در آن M جرم کل سازه است.

$$\bar{m} = \frac{m_{TLD}}{M} \quad (6)$$

نوسانات آب درون مخزن عامل ایجاد نیروی برشی در کف مخزن (F_w) است که مقدار آن را می توان با استفاده از پتانسیل جریان و شرایط مرزی خطی به صورت زیر به دست آورد [۱۰]:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho g \times \frac{(k\eta_{x=0}^2 + 2 \tanh(kh)\eta_{x=0} - k\eta_{x=l}^2 + 2 \tanh(kh)\eta_{x=l})}{k} \quad (7)$$

در رابطه (۷) ρ چگالی آب، k عدد موج که از فرمول $k = \frac{\pi}{L}$ به دست می آید. η تراز سطح آب نسبت به حالت بدون نوسان و x مختصات در راستای طول مخزن است. در صورت استفاده از صفحات میراکننده هرچند خصوصیات سینماتیکی رفتار سیال تغییر می کند ولی در زمان وقوع تحریکات شدیدتر با کاهش دامنه پاسخ نوسانات آب، امکان استفاده از فرض خطی بودن نوسانات آب را در محدوده تحریکات شدیدتری برقرار می سازد، ضمن اینکه برای تحریکات خفیف با صرف نظر کردن از اثرات میراکننده صفحات، میزان برش پایه به دست آمده برابر نیروی برش محاسبه شده از رابطه فوق خواهد بود. از مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در مورد TLD های دارای صفحات میرا کننده نتیجه گرفته شده است که شکل عمومی نوسانات آب

در حالت مخزن بدون صفحات میراکننده و مخزن دارای این صفحات یکسان بوده و درصد مشارکت جرمی آب درون مخزن در نوسانات هر دو حالت تقریباً برابر است. ولی وجود صفحات میراکننده میانی نیروی برش پایه TLD و نیروی هیدرواستاتیکی بسیج شده در پای دیواره های مخزن را کاهش می دهد؛ زیرا با افزایش شدت تحریک، در مخزن دارای صفحات میراکننده به دلیل ممانعت صفحات از افزایش شیب سطح سیال، دامنه نوسانات آب نسبت به مخزن بدون صفحات میراکننده کاهش می یابد. این کاهش به معنی وجود ارتباط بین میرایی اضافه شده به مخزن و شدت تحریک اعمال شده به آن نیز هست. با انتگرال گیری از حاصلضرب مقدار برش پایه TLD، (F) در دامنه تحریک اعمال شده به مخزن (x)، می توان انرژی مستهلک شده در مخزن (E_w) را به دست آورد.

$$E_w = \int_T F dx \quad (8)$$

۵- تعیین مشخصات میراگر جرمی (TMD) معادل

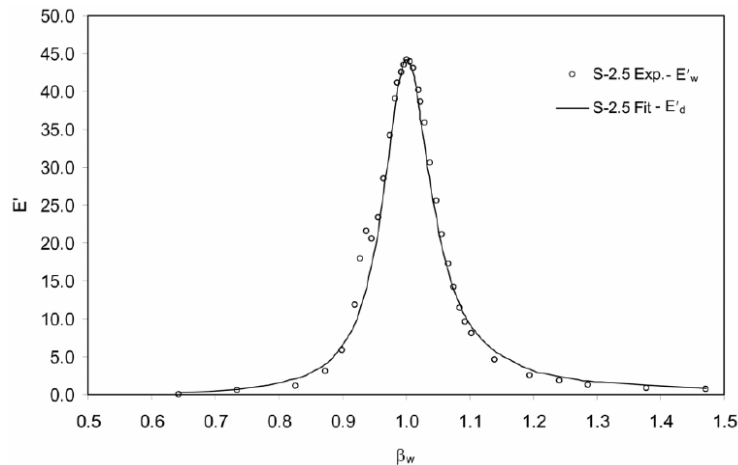
با یکسان سازی انرژی مستهلک شده در TLD دارای صفحات میراکننده و TMD تک درجه آزادی هم فرکانس با آن، مشخصات TMD معادل برای نسبت فرکانس و شدت تحریکهای مختلف به دست می آید. انرژی مستهلک شده توسط TMD معادل با TLD دارای فرکانس f_{TLD} ، از رابطه (۹) قابل محاسبه است [۱۱]:

$$E_d = m_{TLD} (2\pi f)^2 A^2 \pi H_{z/x}(f) \beta^2 \sin(\theta_{z/x}(f)) \quad (9)$$

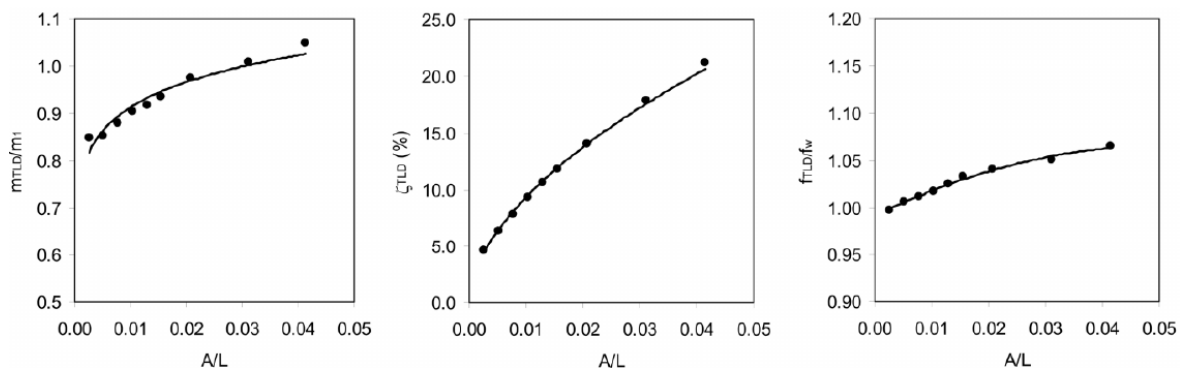
$$H_{z/x}(f) = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (10)$$

$$\tan(\theta_{z/x}(f)) = \frac{2\xi\beta}{1-\beta^2} \quad (11)$$

در روابط فوق A دامنه تحریک، f فرکانس تحریک و E_d انرژی مستهلک شده در TMD معادل است. اگر انرژی الاستیک سازه تک درجه آزادی هم جرم با TLD با E_0 نشان داده شود و E_d را به مقدار E_0 نرمال کنیم خواهیم داشت:



شکل ۴- مقایسه انرژی مستهلک شده در TLD و انرژی مستهلک شده در TMD معادل [۱۰]



شکل ۵- نمودارهای بدون بعد پارامترهای دینامیکی TMD معادل [۱۰]

قله موج و اغتشاش جریان، افزایش می‌یابد و آنچه باعث شده همواره محققان به دنبال راهی برای جلوگیری از آن باشند، پیچیدگی رفتار مایع در هنگام شکست امواج و تغییرات ناگهانی خصوصیات هیدرودینامیکی و افزایش فرکانس نوسانات است. بنابراین، اگر چه ممکن است حل معادلات ناپیراستوکس با روشهای عددی نیز امکان بررسی رفتار TLD را فراهم کند، ولی استفاده از TMD معادل و انجام تحلیل مودال بر روی سازه برشی دارای TLD می‌تواند رفتار TLD را به صورت ساده‌تری ارائه دهد.

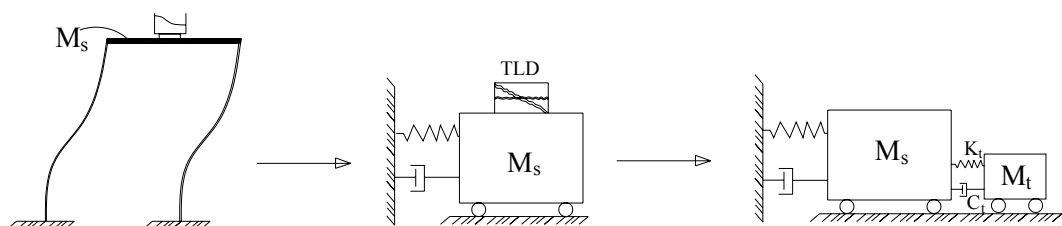
۶- معادلات حرکت سیستم سازه و TLD و روش حل

مجموعه معادلات دینامیکی حاکم بر دستگاه‌های چند درجه آزادی را در هر لحظه می‌توان به صورت ماتریسی زیر نوشت:

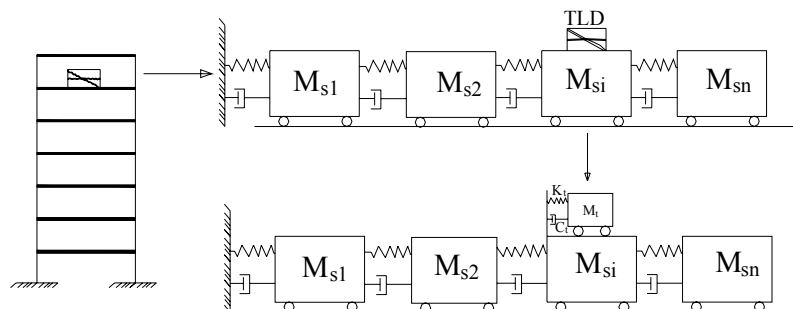
$$E_0 = \frac{1}{2} m_w (2\pi f)^2 A^2$$

$$E'_d = \frac{E_d}{E_0} = \frac{m_{TLD}}{m_w} H_{z/x}(f) \beta 2\pi \sin(\theta_{z/x}(f)) \quad (12)$$

که در روابط فوق $\beta = \frac{f}{f_{TLD}}$ است؛ با مساوی قرار دادن حداقل مربعات حداکثر مقادیر انرژی مستهلک شده در TLD و TMD معادل در محدوده فرکانسهای آزمایش شده، f_{TLD} و m_{TLD} که مشخصات فرکانس، جرم و نسبت میرایی در TMD معادل‌اند به صورت تابعی از شدت تحریک به دست می‌آیند. مقایسه میزان انرژی مستهلک شده در دو حالت TLD و TMD معادل در شکل (۴) آورده شده و در شکل (۵) مقادیر نرمال شده خصوصیات مکانیکی TMD معادل به صورت تابعی از شدت تحریک ارائه شده است. تحقیقات همواره نشان داده که پس از وقوع شکست امواج کارایی TLD با افزایش ارتفاع



شکل ۶- نحوه مدل کردن مجموعه سازه یک درجه آزادی و میراگر مایع هماهنگ شده



شکل ۷- نحوه مدل کردن مجموعه سازه چنددرجه آزادی دارای میراگر مایع هماهنگ شده

با توجه به تغییرات پارامترهای TMD معادل در طول زمان، حل معادله مذکور با استفاده از خطی معادل امکانپذیر است. در این روش با انجام عملیات تکرار روی پاسخ سازه و خصوصیات TMD معادل (وابسته به پاسخ سازه)، در نهایت پاسخ سازه دارای TLD به دست می آید.

پاسخ ساختمانهای برشی دارای چند درجه آزادی دارای TLD در درجه آزادی نام، شکل (۷)، با جایگزین کردن ماتریسهای جرم و سختی و میرایی سازه دارای TLD، روابط (۱۵) تا (۱۷)، در رابطه (۱۳) به دست می آید. در رابطه حاصل میرایی سازه از روش رایلی محاسبه می شود و برای تشکیل ماتریس میرایی کل، جدول اتصال مورد استفاده قرار می گیرد. همگذاری ماتریسهای جرم، سختی و میرایی کل با معرفی درجات آزادی دارای TLD و مشخصات آنها انجام شده و سپس در هر گام زمانی عملیات تکرار روی پاسخ سازه و تعیین مشخصات TMD معادل، تا رسیدن به همگرایی پاسخ سازه در دو تکرار متوالی، انجام می گیرد. خطای همگرایی ۰/۰۲ برای این روش در نظر گرفته شده است.

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = -[m]\{I\}\ddot{u}_g \quad (13)$$

در این رابطه $[m]$ ، $[c]$ و $[k]$ ماتریسهای جرم، میرایی و سختی بوده و $\{u\}$ ، $\{\dot{u}\}$ و $\{\ddot{u}\}$ بردار ستونی تغییر مکان نسبی سیستم نسبت به پایه، سرعت، و شتاب طبقات اند و $\{I\}$ بردار ستونی واحد است.

همان گونه که در شکل (۶) مشاهده می شود سیستم TMD معادل شامل جرم، فنر و مستهلک کننده بوده و معادلات دینامیکی حاکم بر آن به صورت دستگاه معادلات (۱۴) نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix} M_s + M_0 & 0 \\ 0 & M_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s + C_t & -C_t \\ -C_t & C_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s + K_t & -K_t \\ -K_t & K_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_s \\ x_t \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{es} \\ F_{et} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

در دستگاه فوق F_{es} و F_{et} نیروهای خارجی وارد بر TLD (TMD معادل) و سازه، x_s و x_t تغییر مکانهای TMD معادل و سازه تک درجه آزادی و M_0 جرم مخزن خالی است. اندیس s برای سازه و اندیس t برای TMD استفاده شده است.

۷- تحلیل مودال غیر کلاسیک

حل همگن معادلات دیفرانسیل حرکت، رابطه (۱۳)، با جای گذاری رابطه زیر به عنوان پاسخ معادلات به دست می آید.

$$\{u\} = \{\psi\} e^{rt} \quad (19)$$

که در این رابطه r و $\{\psi\}$ مقادیر و بردارهای مشخصه هستند. با جای گذاری رابطه (۱۹) در رابطه (۱۳) مسئله مقدار ویژه به دست می آید.

$$(r^2 [m] + r [c] + [k]) \{\psi\} = \{0\} \quad (20)$$

فوس نشان داد برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل حرکت می توان به جای n معادله دیفرانسیل مرتبه دوم، $2n$ معادله دیفرانسیل مرتبه اول (۲۱) را حل کرد [۱۴]:

$$[A] \{\dot{z}\} + [B] \{z\} = \{Y(t)\} \quad (21)$$

که در آن $[A]$ و $[B]$ ماتریسهای مربعی با ابعاد $2n$ بوده و به صورت روابط زیر تعریف می شوند.

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [m] \\ [m] & [c] \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (22)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -[m] & [0] \\ [0] & [k] \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (23)$$

همچنین $\{z\}$ و $\{Y(t)\}$ بردارهایی با $2n$ مولفه بوده و به صورت زیر تعیین می شوند:

$$\{z\} = \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{u\} \end{Bmatrix} \quad (24)$$

$$\{Y(t)\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -[m] \{\ddot{u}_g(t)\} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

حل همگن رابطه (۲۱) از رابطه (۲۶) به دست می آید که مانند رابطه (۱۹)، r و $\{Z\}$ نیز مقادیر و بردارهای مشخصه اند.

$$\{z\} = \{Z\} e^{rt} \quad (26)$$

بادقت در رابطه (۲۴)، دیده می شود که n مولفه پایینی بردار $\{Z\}$ معرف تغییر مکانهای مودی ($\{\psi\}$) و n مولفه بالایی بردار $\{Z\}$ معرف سرعتهای مودی ($r\{\psi\}$) هستند. بنابراین بردار $\{Z\}$ به شکل رابطه زیر با $\{\psi\}$ در ارتباط است:

$$\{Z\} = \begin{Bmatrix} r\{\psi\} \\ \{\psi\} \end{Bmatrix} \quad (27)$$

$$c_{(n+1)(n+1)} =$$

$$\begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \dots & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{j-1,j-1} & c_{j-1,j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{j,j} + C_t & -C_t & c_{j,j+1} & 0 & 0 \\ & & & & C_t & 0 & 0 & 0 \\ & \text{sym} & & & & c_{j+1,j+1} & c_{j+1,j+2} & 0 \\ & & & & & & \dots & \dots \\ & & & & & & & c_{n,n} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$k_{(n+1)(n+1)} =$$

$$\begin{bmatrix} k_{1,1} & k_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \dots & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & k_{j-1,j-1} & k_{j-1,j} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & k_{j,j} + K_t & -K_t & k_{j,j+1} & 0 & 0 \\ & & & & K_t & 0 & 0 & 0 \\ & \text{sym} & & & & k_{j+1,j+1} & k_{j+1,j+2} & 0 \\ & & & & & & \dots & \dots \\ & & & & & & & k_{n,n} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$m_{(n+1)(n+1)} =$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & m_{j-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & m_j + M_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & M_t & 0 & 0 & 0 \\ & \text{sym} & & & & m_{j+1} & 0 & 0 \\ & & & & & & \dots & 0 \\ & & & & & & & m_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

با توجه به اینکه ماتریس میرایی کل سازه $[c]$ ، رابطه (۱۵)، به دلیل وجود میرایی ناشی از سیستم کنترل ثانویه (TLD) شرط تعامد مودها و یا به عبارت دیگر شرط کلاسیک بودن میرایی، رابطه (۱۸)، را ارضا نمی کند، باید آن را در محاسبه شکل مودها در نظر گرفت و بنابراین لازم است از تحلیل مودال غیر کلاسیک (تعمیم یافته) که در آن مقادیر مشخصه و بردارهای مشخصه مختلط اند، در محاسبه پاسخ سازه استفاده شود.

$$[c][m]^{-1}[k] = [k][m]^{-1}[c] \quad (18)$$

جدول ۱- مشخصات دینامیکی سازه مورد مطالعه

DOF	M (Ton)	K (Ton/m)	Mode	ξ	Effective Mass (Ton)	F (Hz)	T (s)
۱	۱۷۹	۶۲۴۷	۱	۰/۰۲	۱۱۰۸/۹	۰/۵	۱/۹۹
۲	۱۷۰	۵۹۲۶	۲	۰	۱۶۳/۰۱	۱/۳۲	۰/۷۵
۳	۱۶۱	۵۶۱۴	۳	۰	۵۷/۱۴	۲/۱۵	۰/۴۶
۴	۱۵۲	۵۳۰۲	۴	۰	۲۶/۷۰	۲/۹۳	۰/۳۴
۵	۱۴۳	۴۹۹۱	۵	۰	۱۴/۰۸	۳/۶۵	۰/۲۷
۶	۱۳۴	۴۶۷۹					
۷	۱۲۵	۴۳۶۷					
۸	۱۱۶	۴۰۵۵					
۹	۱۰۷	۳۷۴۳					
۱۰	۹۸	۳۴۳۴۱					
جمع	۱۳۸۵						

به این ترتیب r_j و $\bar{r}_j$ را می توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$\begin{Bmatrix} r_j \\ \bar{r}_j \end{Bmatrix} = -\zeta_j p_j \pm i \bar{p}_j \quad (33)$$

با توجه به روابط (۳۱) و (۳۲)، رابطه (۳۳) برقرار خواهد بود:

$$\bar{p}_j = p_j \sqrt{1 - \zeta_j^2} \quad (34)$$

روابط به دست آمده شبیه روابط مربوط به پاسخ سازه یک درجه آزادی میرا هستند. از مقایسه این روابط با روابط حاکم بر سازه تک درجه آزادی میرا می توان به این نتیجه رسید که p_j فرکانس طبیعی، $\bar{p}_j$ فرکانس طبیعی میرا و $\{\varphi_j\}$ مود شکل مربوطه (سیستم تک درجه آزادی معادل با مود i ام) است [۱۴]. با استفاده از روابط فوق می توان مشابه با روش تحلیل مودال متعارف، به تحلیل سازه دارای مودهای غیرکلاسیک پرداخت.

۸- نتایج عددی

سازه انتخاب شده برای انجام تحلیل پارامتریک ساختمانی ده طبقه با زمان تناوب اصلی حدود ۲ ثانیه، دارای تغییرات جرم و سختی در طبقات مطابق با جدول (۱) است که فقط میرایی مود اول نوسانات آن ۲٪ فرض شده است [۱۲]. با توجه به اینکه این مقاله TLD های دارای شبکه مفتول را به صورت TMD

با جای گذاری رابطه (۲۶) در رابطه (۲۱) یک مسئله مقادیر ویژه

به شکل زیر حاصل می شود:

$$(r[A] + [B])\{Z\} = \{0\} \quad (28)$$

از رابطه (۲۸) مقادیر ویژه ای به دست می آید که به صورت جفت های مزدوج مختلط (با قسمت حقیقی صفر یا منفی) اند. بنابراین برای یک سیستم n درجه آزادی، n جفت مقدار مشخصه و n جفت بردار مشخصه مختلط مزدوج وجود دارد. حال اگر r_j و $\bar{r}_j$ یک جفت مقادیر مشخصه و $\{\psi_j\}$ و $\{\bar{\psi}_j\}$ بردارهای مشخصه متناظر باشند، روابط (۲۹) و (۳۰) را می توان تعریف کرد.

$$\begin{Bmatrix} r_j \\ \bar{r}_j \end{Bmatrix} = -q_j \pm i \bar{p}_j \begin{Bmatrix} r_j \\ \bar{r}_j \end{Bmatrix} \quad (29)$$

$$\begin{Bmatrix} \{\psi_j\} \\ \{\bar{\psi}_j\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\varphi_j\} \\ \{\chi_j\} \end{Bmatrix} \pm i \begin{Bmatrix} \{\varphi_j\} \\ \{\chi_j\} \end{Bmatrix} \quad (30)$$

در روابط فوق $i = \sqrt{-1}$ بوده و q_j و $\bar{p}_j$ اعداد حقیقی مثبت اند. همچنین بردارهای $\{\varphi_j\}$ و $\{\chi_j\}$ نیز بردارهای حقیقی با n مولفه اند. p_j و $\bar{q}_j$ را نیز می توان به صورت زیر تعریف کرد.

$$p_j = \sqrt{(q_j^2 + \bar{p}_j^2)} \quad (31)$$

$$\zeta_j = \frac{q_j}{p_j} \quad (32)$$

جدول ۲- مشخصات شتاب‌نگاشتهای اعمال شده به سازه

Record Name	Station- Direction	PGA (g)	PGV (Cm/s)	PGD (Cm)	Used PGA (g)
(۱۹۹۴) نورتریج	آرلتا ۹۰-	۰/۳۴۴	۴۰/۶	۱۵/۰۴	۰/۴
(۱۹۹۴) نورتریج	سانتامونیکا ۹۰-	۰/۸۸۳	۴۱/۷	۱۵/۰۹	۰/۴
(۱۹۸۹) لوماپریتا	کرالیتوس ۹۰-	۰/۴۷۹	۴۵/۲	۱۱/۳۷	۰/۴
(۱۹۹۵) کوبه	تاکاتوری ۹۰-	۰/۶۱۵	۱۲۰/۷	۳۲/۷۲	۰/۴

جدول ۳- تغییر مکان سازه تحت اثر شتاب‌نگاشت آرلتا

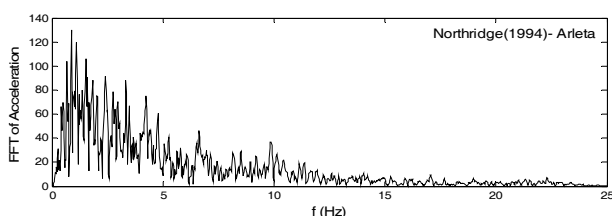
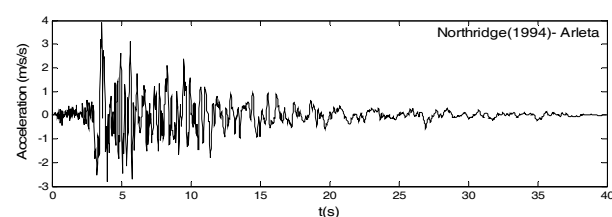
Northridge –Arleta –۰/۴g			
	No Control	With TLD	With TLCD
DOF	X _{۱۰} (m)	X _{۱۰} (m)	X _{۱۰} (m)
۱	۰/۰۸۱۴	۰/۰۵۳۴	۰/۰۵۸
۲	۰/۱۵۳۳	۰/۰۹۷۹	۰/۱۰۲
۳	۰/۲۱۷۹	۰/۱۳۱۵	۰/۱۴۴
۴	۰/۲۷۴۵	۰/۱۵۲۵	۰/۱۶۶
۵	۰/۳۱۱۲	۰/۱۶۶۸	۰/۱۷۴
۶	۰/۳۳۷۳	۰/۱۷۶۹	۰/۱۶۸
۷	۰/۳۵۵۱	۰/۲۰۷۵	۰/۱۸۴
۸	۰/۴۱۳۵	۰/۲۴۵۴	۰/۲۱۴
۹	۰/۴۴۴۸	۰/۲۷۱۲	۰/۲۵۲
۱۰	۰/۴۶۲۶	۰/۲۸۵۳	۰/۲۷۹

کنترل محدوده صحت روش استفاده شده است. به این منظور ابتدا پاسخ سازه مفروض، جدول (۱) تحت اثر رکورد آرلتا، جدول (۲) به دست آمده و با نتایج مرجع [۱۲] مقایسه شد؛ سپس با تحلیل سازه دارای TLD با نسبت جرم ۴٪ پاسخ سازه دارای TLD نیز تعیین شد. نتایج حاصل از دو تحلیل فوق و نتایج مرجع در جدول (۳) آورده شده است.

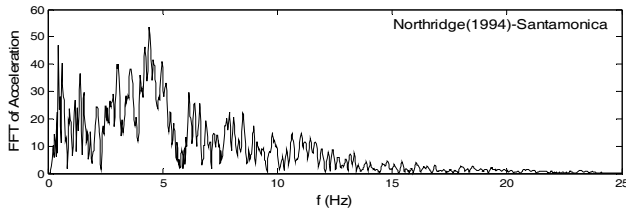
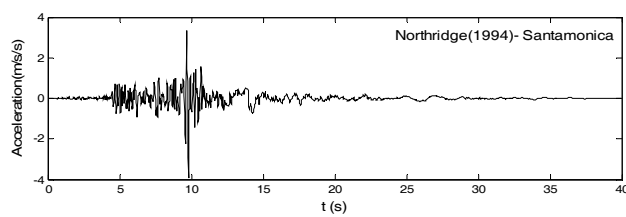
۹- مطالعه پارامتریک

سازه مورد مطالعه این تحقیق تحت اثر مولفه ۹۰ درجه شتاب نگاشت زلزله لوماپریتا (۱۹۸۹) ثبت شده در ایستگاه کرالیتوس، مولفه ۹۰ درجه از شتاب نگاشت زلزله نورتریج (۱۹۹۴) ثبت شده در آرلتا و نگاشت زلزله کوبه (۱۹۹۵)

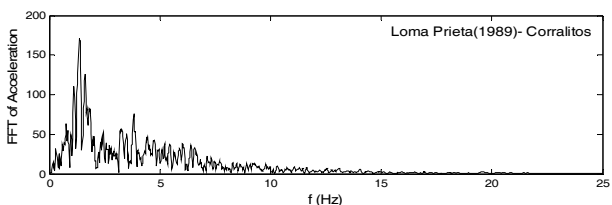
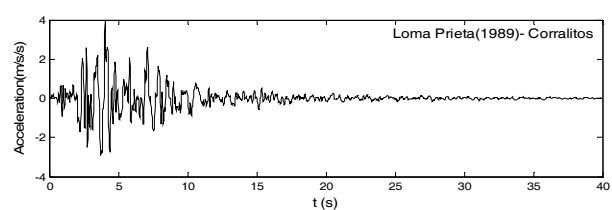
غیرخطی مدل می‌کند و این نوع TLD به تازگی مورد توجه قرار گرفته است، تحلیل انجام شده مشابهی در دست نیست تا نتایج به دست آمده از تحلیلهای انجام شده با روش ارائه شده در این مقاله با آن مقایسه شود. یکی از انواع سیستمهای غیرفعال کنترل ارتعاشات سازه‌ها میراگرهای ستونی مایع هماهنگ شده (TLCD) است که اساس کار آن حرکات سیال در محفظه U شکل و ایجاد اختلاف فشار دو ستون مایع است. رفتار میراگرهای ستونی مایع هماهنگ شده (TLCD) نیز شباهت بسیار زیادی به TMDها دارد؛ به علاوه اینکه در هر دو سیستم TLD و TLCD به دلیل اختلاف فشار هیدرواستاتیکی ایجاد شده در دیواره‌ها نیروی کنترلی ایجاد می‌شود، بنابراین از نتایج یکی از تحقیقات صورت گرفته در زمینه TLCD برای



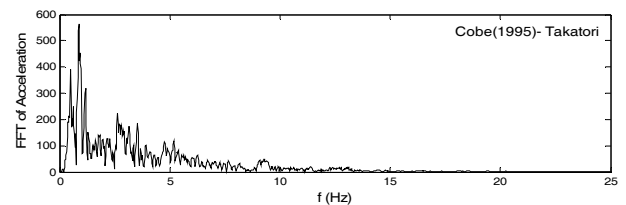
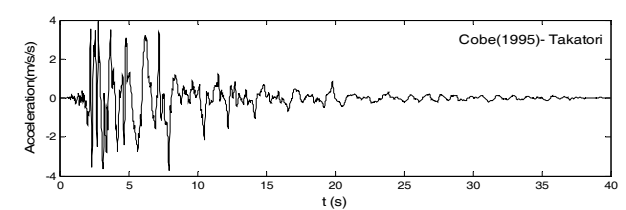
Arleta (ب)



Santamonica (الف)



Corralitos (د)



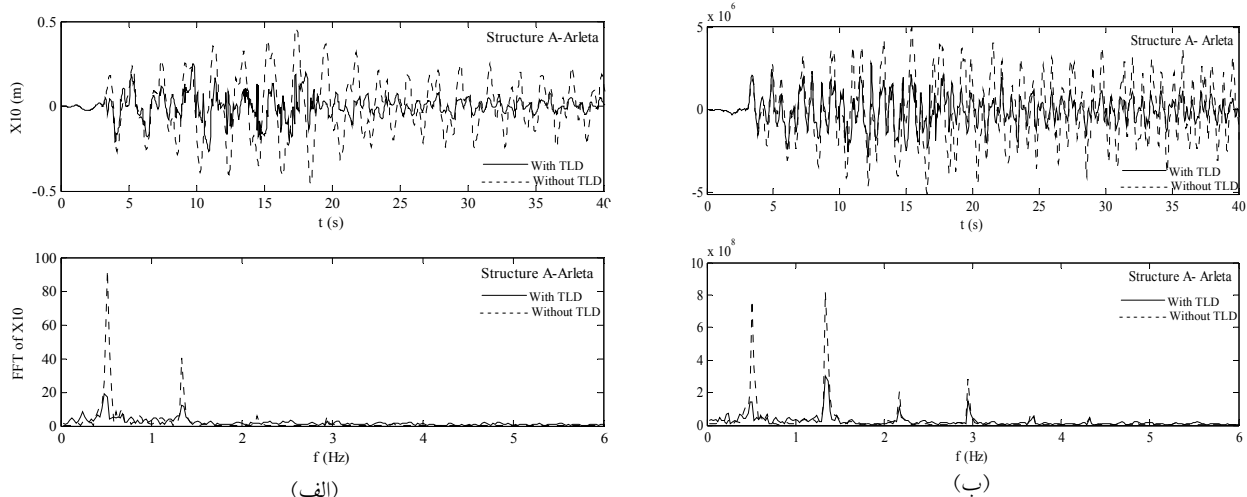
Kobe (ج)

شکل ۸- تاریخچه زمانی شتاب نگاشت و طیف دامنه فوریه شتاب نگاشت زلزله

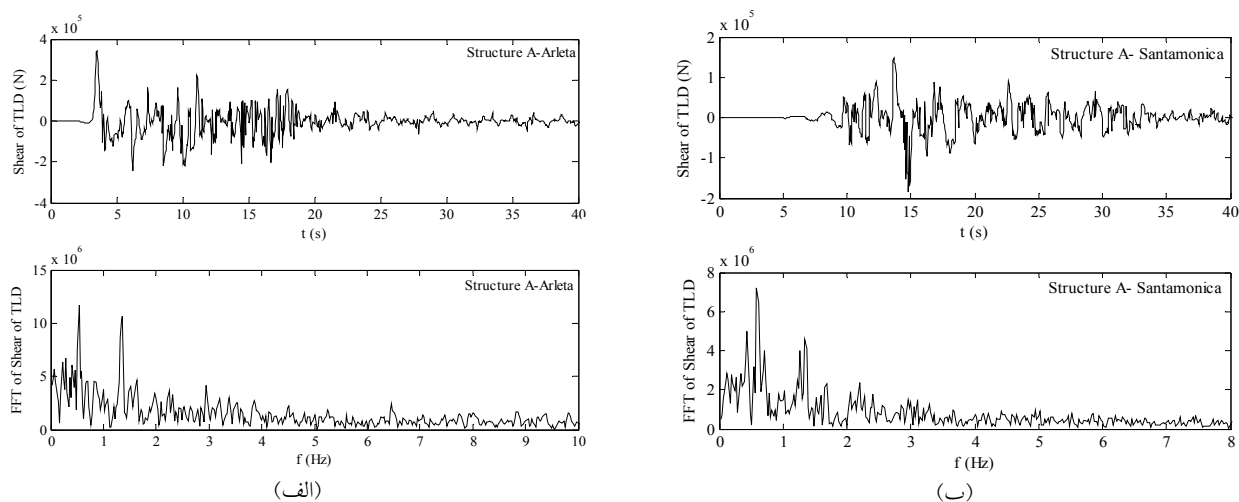
الف) Santamonica (ب) Arleta (ج) Corralitos (د) Kobe

می‌باشد. بنابراین مدت زمان هر یک از زلزله‌های استفاده شده طبق روش چنگ (۱۹۷۷) محاسبه شده‌اند [۱۲]. برای چهار شتاب‌نگاشت مورد نظر اثرات سه پارامتر جرم، فرکانس و تراز قرارگیری TLD، بر روی پاسخ دینامیکی سازه دارای TLD مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق نسبت فرکانس TLD به فرکانس سازه (همانگی فرکانسی) با Ω و نسبت جرم TLD به جرم کل سازه (نسبت جرم) با $\bar{m}$ نشان داده می‌شود. در نمودارهای ارائه شده ξ تغییرمکان نسبی درجه آزادی نام، V_b برش پایه سازه و V_{TLD} برش پایه TLD است. جذر میانگین مربعات (RMS) متغیرها، رابطه (۳۵)، نیز برای نشان دادن اثرات TLD روی تمام تاریخچه پاسخ سازه ارائه شده‌اند.

ثبت شده در تاکاتوری که همگی به حداکثر PGA برابر با $0.4g$ نرمال شدند، جدول (۲) و شکل (۸)، قرار گرفته و تحلیل شد. هدف از انتخاب دو شتاب‌نگاشت از زلزله نورتریج امکان مشاهده اثرات زلزله ثبت شده در مکانهای متفاوت روی پاسخ سازه دارای TLD است که بیان کننده اثرات خاک روی محتوای فرکانسی تحریک لرزه‌ای اعمال شده به سازه است و انتخاب شتاب‌نگاشت کوبه مشاهده اثرات این زلزله نزدیک گسل بر روی سازه دارای TLD را امکانپذیر می‌سازد. باید توجه کرد که بیشینه شتاب، زمانی می‌تواند برای مقایسه چند نگاشت مورد استفاده قرار گیرد که مدت زمان نگاشتها با هم برابر باشد؛ مدت زمان زلزله تا حدودی نشان‌دهنده قابلیت ایجاد خرابی در یک نگاشت



شکل ۹- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ سازه دارای TLD و سازه بدون TLD (الف) تغییر مکان تراز فوقانی (ب) برش پایه



شکل ۱۰- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ برش پایه TLD (الف) شتاب‌نگاشت Arleta (ب) شتاب‌نگاشت Santamonica

(شکل ۱۴). تابع Ψ برای بیان نسبت پاسخ سازه دارای TLD به پاسخ سازه بدون TLD مورد استفاده قرار می‌گیرد که از رابطه (۳۶) به دست می‌آید و تابع Ψ' نیز همان نسبت را برای مقادیر RMS طیف دامنه فوریه پاسخ سازه محاسبه می‌کند، رابطه (۳۷).

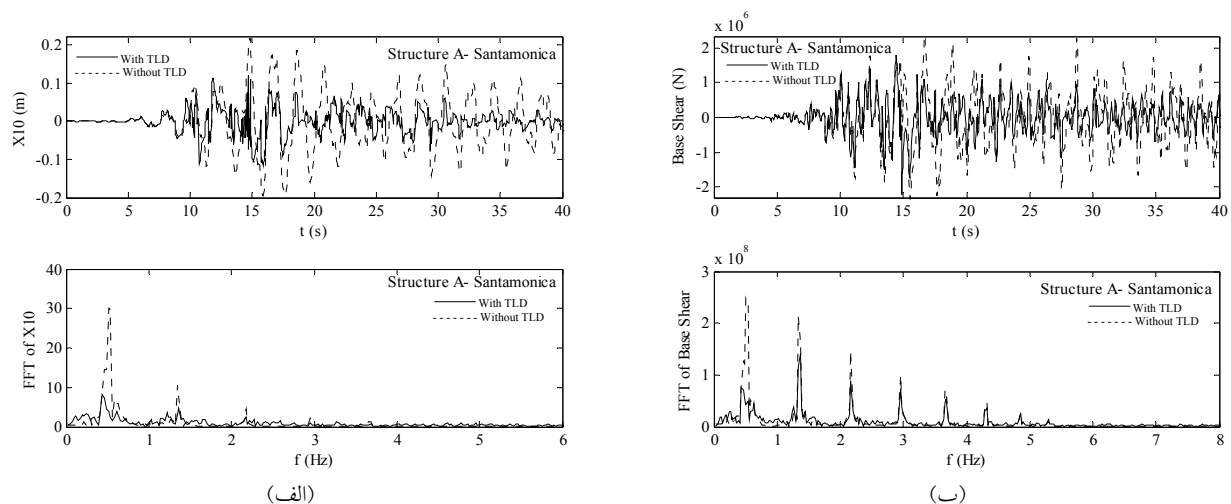
$$\Psi(X) = \frac{X_{\text{WithTLD}}}{X_{\text{WithoutTLD}}} \times 100\% \quad (36)$$

$$\Psi'(X) = \frac{\text{RMS of FFT}(X_{\text{WithTLD}})}{\text{RMS of FFT}(X_{\text{WithoutTLD}})} \times 100\% \quad (37)$$

برای سازه مورد مطالعه ابتدا TLD با نسبت جرم های صفر تا

$$\text{RMS}(X_i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}^2}{n}} \quad (35)$$

تعدادی از نمودارهای تاریخچه زمانی جابه‌جایی طبقه دهم و برش پایه و نیز طیف های دامنه فوریه (FFT) تاریخچه‌زمانیهای به دست آمده حاصل از تحلیلها که نشان دهنده محتوای فرکانسی پاسخ سازه در حالات مختلف است در شکلهای (۹) تا (۱۱) ارائه شده و به منظور مشاهده اثرات TLD در کاهش مقادیر دامنه مجموعه فرکانسهای پاسخ سازه در حوزه فرکانس، مقادیر RMS طیف دامنه فوریه پاسخ در ادامه محاسبه شده‌اند



شکل ۱۱- تاریخچه زمانی و طیف پاسخ سازه دارای TLD و سازه بدون TLD (الف) تغییر مکان تراز فوقانی (ب) برش پایه

جدول ۴- مشخصات TLD های به کار رفته برای کنترل سازه مورد مطالعه

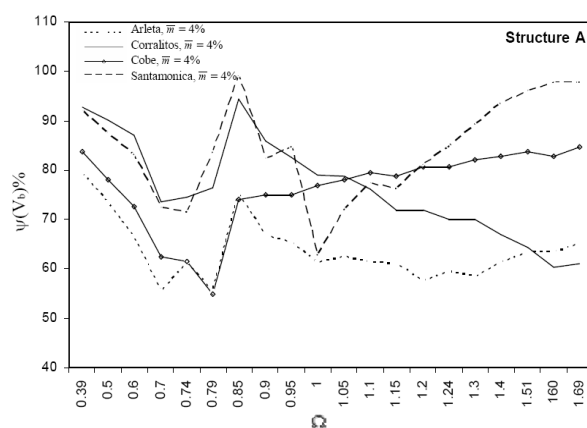
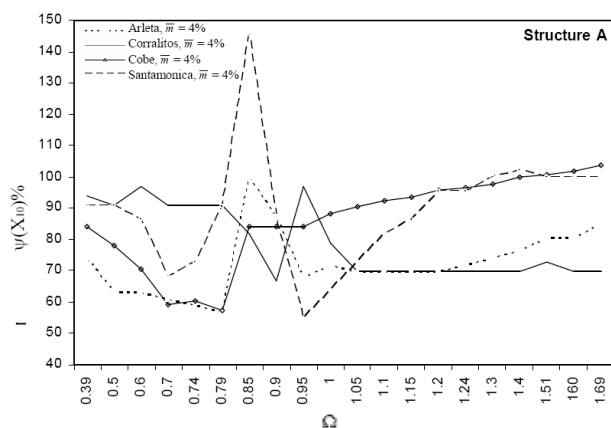
Ω	۰/۳۹	۰/۴۹	۰/۶	۰/۷	۰/۷۴	۰/۷۹	۰/۸۵	۰/۹	۰/۹۵	۱	۱/۰۵	۱/۱	۱/۱۴	۱/۱۵	۱/۲	۱/۲۴	۱/۳۰	۱/۴۰	۱/۵۱	۱/۶۰	۱/۶۹
L	۲/۵	۲	۲	۱/۴	۱/۴۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۴	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۲	۱/۱۵	۱/۰	۱/۰
h	۰/۱	۰/۱	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۳	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۳۵	۰/۴	۰/۳۸	۰/۴۵	۰/۳۷	۰/۵
Tw	۲/۰۶	۴/۰۵	۳/۳۲	۲/۸	۲/۷	۲/۵	۲/۳۴	۲/۲	۲/۰۹	۲	۱/۹	۱/۸۱	۱/۷۴	۱/۷۳	۱/۶۴	۱/۶	۱/۵	۱/۴۲	۱/۳۲	۱/۲۴	۱/۱۸
h/L	۰/۰۴	۰/۵۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۱۴	۰/۲	۰/۲۳	۰/۲۶	۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۵

برای نگاشت کرایتوس هماهنگی فرکانسی $\Omega = ۰/۹$ برای نیل به حداقل تغییر مکان تراز فوقانی، پیشنهاد می‌شود، شکل‌های (۱۲) تا (۱۴). کاهش پاسخهای به‌دست آمده تغییر مکان تراز فوقانی سازه در فرکانسهای مذکور برای نگاشتهای مورد مطالعه به ترتیب آرتا ۰/۴۰، کوبه ۰/۴۲، سانتامونیکا ۰/۴۴ و کرایتوس ۰/۳۵ است. کاهش پاسخ مربوط به برش پایه در همین حالت به ترتیب آرتا ۰/۳۵، کوبه ۰/۳۳، سانتامونیکا ۰/۱۶ و کرایتوس ۰/۱۵ است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود برای دو نگاشت سانتامونیکا و کرایتوس، فرکانس بهینه برای بیشینه کاهش پاسخ برش پایه و تغییر مکان متفاوت است. این مسئله ممکن است به دلیل توزیع نایک‌نواخت جرم در ترازهای مختلف سازه و سهم موده‌های بالاتر با فرکانس بیشتر در برش پایه باشد؛ در حالی که شکل مود اول تحریک کننده اصلی تغییر مکان تراز فوقانی سازه است. فرکانس غالب نگاشت کرایتوس و فرکانس مود دوم سازه تقریباً بر هم منطبق شده و این مسئله سبب افزایش پاسخ سازه در فرکانس مود دوم شده و موجب شده که با افزایش

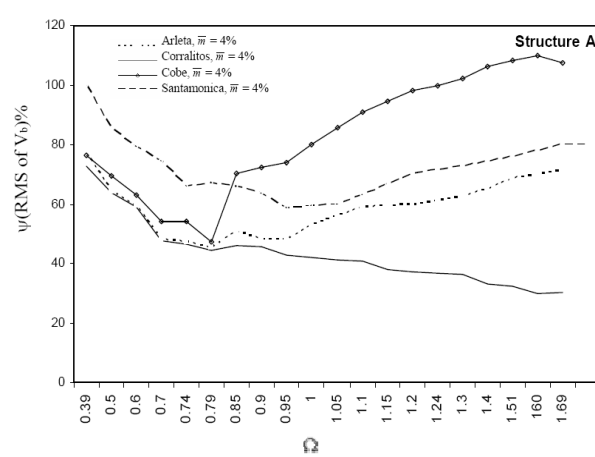
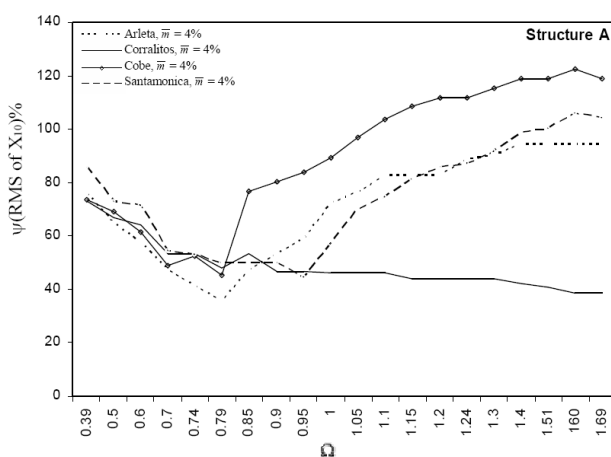
۰/۲۰ و هماهنگی فرکانسی ۱/۰ تحت اثر نگاشتهای مختلف تحلیل شده و از نتایج حاصله، جرمی از TLD که در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه بیشترین اثر را دارا بود، تعیین شد؛ سپس اثر فرکانسهای مختلف TLD، جدول (۴) برای نسبت جرم به‌دست آمده بررسی شده و در نهایت با تعیین مناسبترین فرکانس برای TLD مجدداً به تحلیل سازه دارای TLD برای نسبت جرمهای مختلف TLD و ترازهای متفاوت قرارگیری TLD، پرداخته شده است. ذیلاً اثر هر یک از نسبتهای هماهنگی فرکانسی، جرم و اثر تراز قرارگیری TLD به‌صورت مجزا بر روی پاسخ سازه بررسی شده است.

۹-۱- اثر نسبت هماهنگی فرکانسی

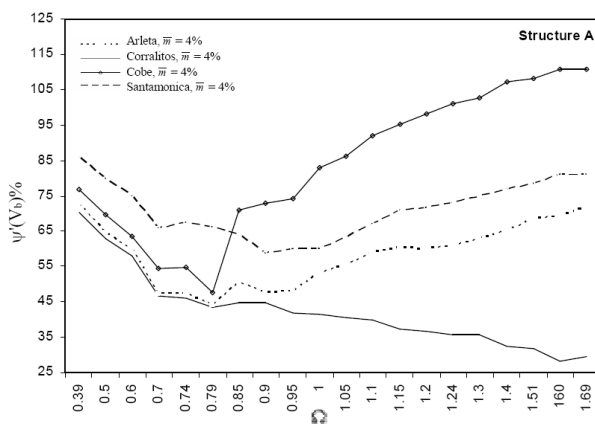
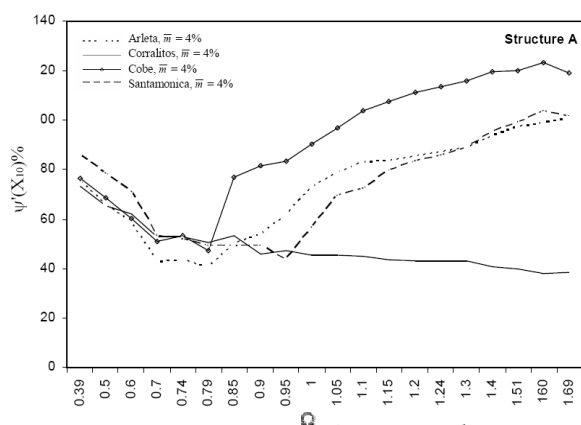
هماهنگی فرکانسی مناسب که در آن برای نگاشتهای مورد نظر بیشترین کاهش پاسخ تغییر مکان به‌دست می‌آید، متفاوت است. با توجه به نتایج تحلیلهای انجام شده برای نگاشت آرتا و کوبه مقدار نزدیک به $\Omega = ۰/۸۰$ ، برای نگاشت سانتامونیکا عدد $\Omega = ۰/۹۵$ و



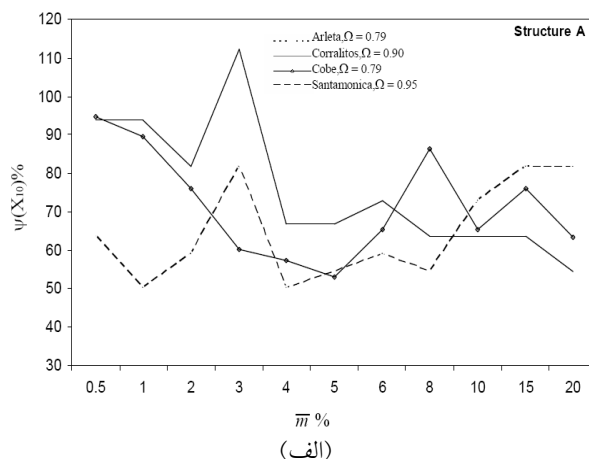
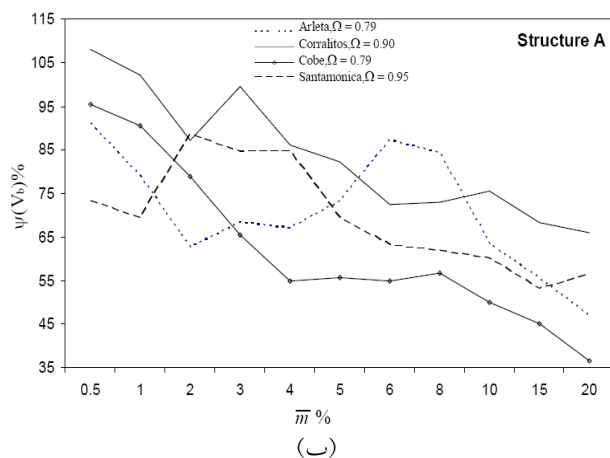
شکل ۱۲- تغییرات بیشینه تغییرمکان تراز فوقانی و بیشینه برش پایه سازه
نسبت به سازه بدون TLD



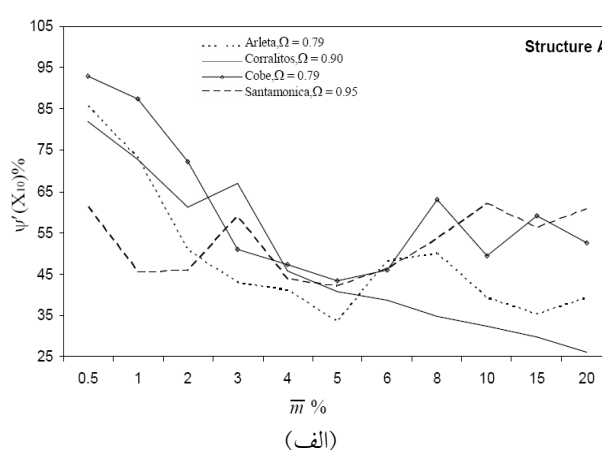
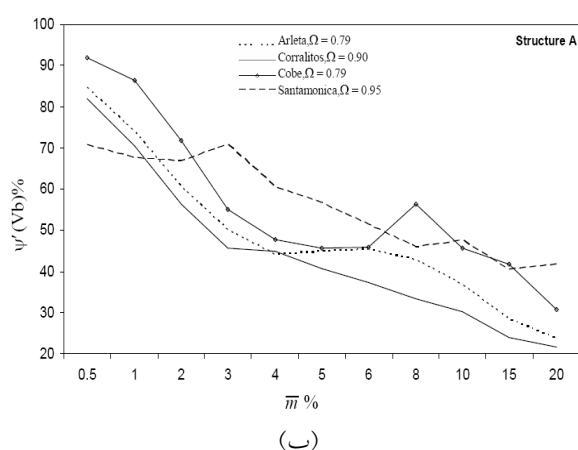
شکل ۱۳- تغییرات جذر میانگین مربعات تغییرمکان تراز فوقانی و برش پایه سازه
نسبت به سازه بدون TLD



شکل ۱۴- تغییرات جذر میانگین مربعات دامنه تغییرمکان تراز فوقانی و
برش پایه سازه در حوزه فرکانس نسبت به سازه بدون TLD



شکل ۱۵- تغییرات پاسخ سازه نسبت به سازه بدون TLD (الف) پیشینه تغییر مکان تراز فوقانی (ب) برش پایه سازه



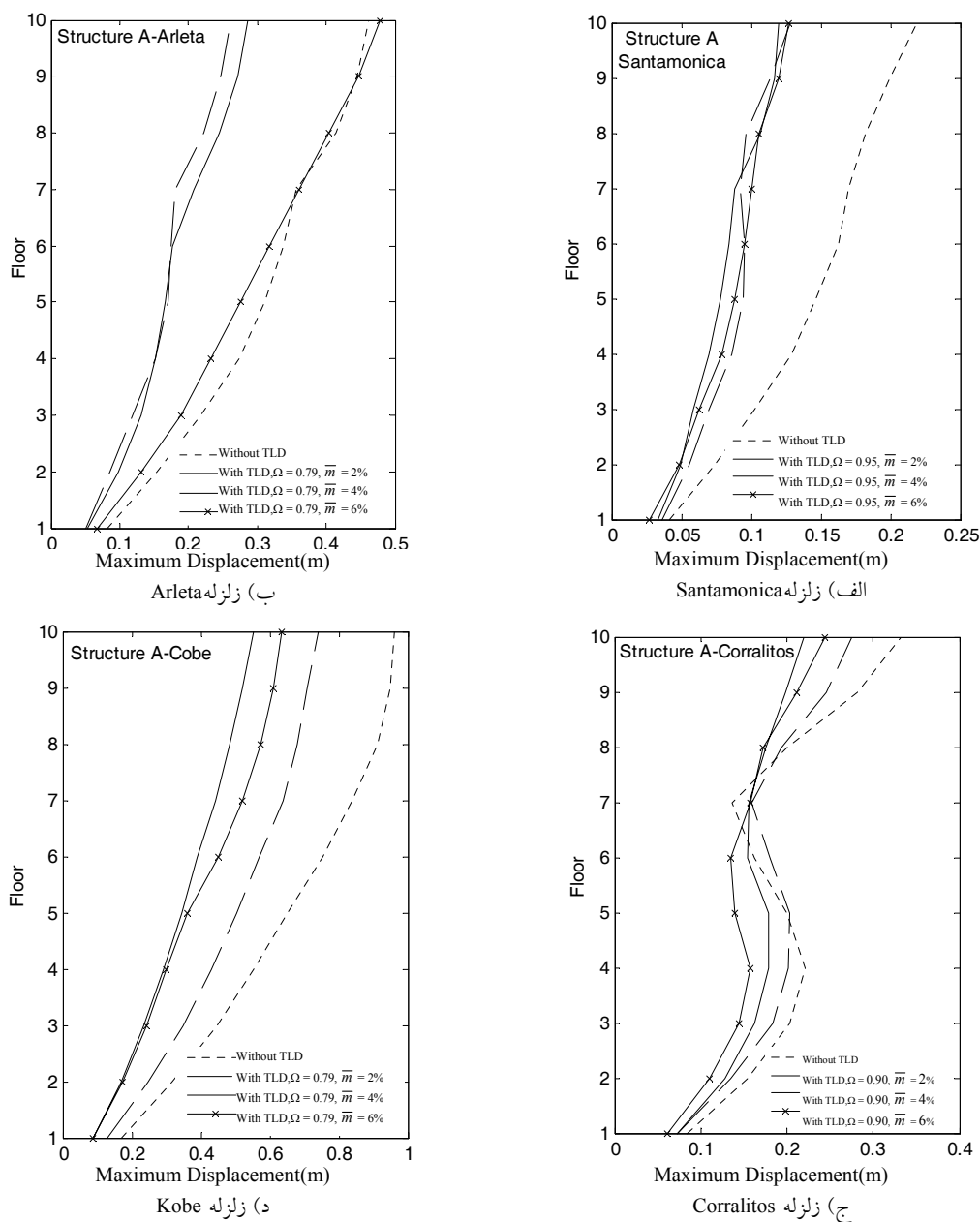
شکل ۱۶- تغییرات جذر میانگین مربعات دامنه پاسخ سازه در حوزه فرکانس، نسبت به سازه بدون TLD (الف) تغییر مکان تراز فوقانی (ب) برش پایه

چون TLD نیز برای کنترل مود اول پاسخ سازه طراحی شده است، همان گونه که در نمودارها هم مشاهده می شود، کاهش پاسخ به دست آمده برای فرکانس مود اول سازه قابل توجه است و اگر چه نظم خاصی در مقادیر پیشینه پاسخهای به دست آمده در تحلیلها وجود ندارد، ولی می توان از میزان کاهش پاسخ ایجاد شده در مقادیر RMS هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس، به نتایج عملکرد TLD برای نگاشت های مختلف دست یافت.

۹-۲- اثر نسبت جرم

شکلهای (۱۵) و (۱۶) نشان می دهند که با افزایش نسبت جرم TLD به سازه برای همه نگاشت ها ابتدا کاهش پاسخ قابل

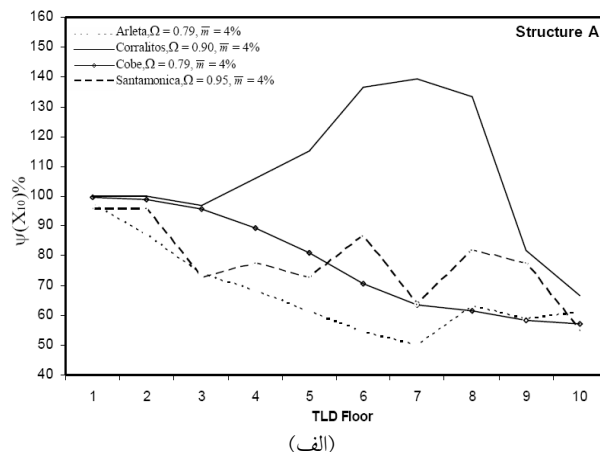
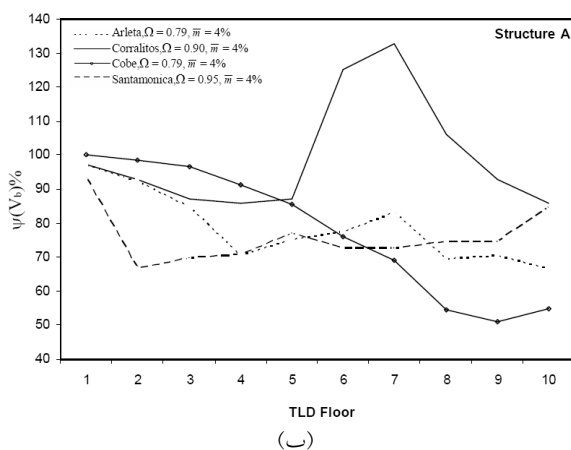
نسبت فرکانس هماهنگی (Ω)، روند کاهش پاسخ سازه همچنان در فرکانسهای بزرگتر نیز ادامه یابد، شکل (۱۳). پیشینه کاهش پاسخ برش پایه برای دو نگاشت مذکور ۳۷٪ در $\Omega = 1/1$ برای نگاشت سانتامونیکا و ۳۹٪ در $\Omega = 1/6$ برای نگاشت کرالیتوس است. به جز نگاشت کرالیتوس برای سه نگاشت دیگر مقادیر RMS پاسخها نیز نشان دهنده وجود یک فرکانس بهینه کاهش پاسخ در حوالی فرکانس تشدید مود اول و کمی کمتر از آن است. یکی از علل ایجاد کاهش پاسخ پیشینه در فرکانسی کوچکتر از فرکانس تشدید، رفتار سخت شوندگی TLD است. مقادیر پاسخ به دست آمده برای سازه در فرکانس مود اول آن دارای مقادیر پیشینه پاسخ در حوزه فرکانس می باشند و



شکل ۱۷- بیشینه تغییر مکان طبقات مختلف سازه دارای TLD

زیادی دارد ولی مقادیر RMS پاسخها که بیانگر اثر TLD بر مجموعه پاسخ سازه در مودهای مختلف است به خوبی روند کاهش پاسخ برش پایه را با افزایش نسبت جرم نشان می دهند شکل (۱۶-ب). نتایج تحلیلهای انجام شده نشان می دهد که مناسب ترین نسبت جرم بین ۳٪ تا ۴٪ است. در شکل (۱۷) اثر استفاده از TLD با نسبت جرمهای ۲٪، ۴٪ و ۶٪ و هماهنگی

ملاحظه ای ایجاد می شود ولی با رسیدن به نسبت جرم نزدیک ۴٪ و افزایش بیشتر نسبت جرم TLD به جرم سازه، از میزان کاهش پاسخ کاسته شده و در مواردی افزایش پاسخ اتفاق می افتد که این مسئله نشان دهنده وجود محدودیتهای نظری در کنار محدودیتهای عملی افزایش نسبت جرم TLD است. میزان کاهش پاسخ به دست آمده در نسبت جرمهای مختلف نوسانات



شکل ۱۸- تغییرات جذر میانگین مربعات دامنه پاسخ سازه در حوزه فرکانس، نسبت به سازه بدون TLD

(الف) تغییر مکان تراز فوقانی (ب) برش پایه

۱۰- نتیجه گیری

با انجام تحلیلهای متعدد اثرات TLD بر پاسخ سازه معرفی شده (تحت اثر تحریکهای مشخص) به دست آمده که نشان می دهد استفاده از TLD دارای شبکه های میانی و تنظیم شده با مودی از ارتعاشات سازه که رفتار کلی سازه از آن تبعیت می کند، باعث کاهش پاسخ سازه در تحریکات لرزه ای می شود و این کاهش پاسخ به فرکانس طبیعی سازه و فرکانس غالب تحریک، هماهنگی فرکانسی مناسب بین سازه و TLD، نسبت جرم TLD به جرم سازه و تراز قرارگیری TLD بستگی دارد. نتایج حاصل از انجام تحقیق حاضر را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- فرکانس مناسب برای طراحی TLD در سازه های چند درجه آزادی لزوماً برابر فرکانس سازه و یا فرکانس مودی که کنترل می شود، نیست بلکه در محدوده ای اطراف این فرکانس است که در سازه های برشی معمولی کمتر از فرکانس سازه بوده و به نگاشت مورد استفاده بستگی دارد؛ به نحوی که برای تحلیلهای انجام شده این نسبت بین ۰/۸ تا ۰/۹۵ بسته به شتاب نگاشت در نظر گرفته شده، متغیر بوده و حداکثر کاهش پاسخ به دست آمده نیز ۴۴٪ است.
- ۲- بیشترین تأثیر TLD کاهش دامنه پاسخ سازه در فرکانس کنترل شده است و در کاهش دامنه پاسخ سایر فرکانسها این

فرکانسی بهینه بر کاهش پاسخ تغییر مکان ترازهای مختلف سازه قابل ملاحظه است. این نمودارها نیز بیانگر این مطلب اند که کاهش پاسخ حاصل از TLD مربوط به تمام ترازهای سازه بوده، محدود به تراز فوقانی نیستند و لذا در شکل (۱۵) و (۱۶) اثر کاهش پاسخ حاصل از TLD روی برش پایه که به پاسخهای کلیه طبقات مرتبط است، یکنواخت تراند.

۹-۳- اثر تراز قرارگیری

اگرچه به نظر می رسد بهترین محل قرارگیری TLD تراز فوقانی سازه است، اما همان گونه که در شکل (۱۸) مشاهده می شود ممکن است در ترازهای فوقانی دیگر به جز تراز بام نیز به کاهش پاسخ قابل توجهی دست یافت؛ لکن با کاهش ارتفاع قرارگیری TLD از میزان اثر کاهشی آن کم می شود. موثر بودن قرارگیری TLD در ترازهای فوقانی برای کاهش پاسخ سازه نیز، به دلیل سهم قابل توجه مود اول در ارتعاشات این سازه است. لکن در مجموع همان گونه که در شکل (۱۸) نیز قابل مشاهده است قرارگیری TLD در ترازهای پایینتر به دلیل هماهنگی آن با مود اول سبب شده است سایر مودهای سازه که بیشینه دامنه آنها در ترازهای پایین است تحریک شده و در مجموع پاسخ تغییر مکان و برش پایه افزایش یابد.

اثرات کاهش می‌یابد و در مواردی دامنه پاسخ برخی از فرکانسها نیز افزایش می‌یابد.

۳- زمانی که TLD برای کنترل مود اول سازه‌ای طرح می‌شود محل مناسب برای آن تراز فوقانی سازه است اما ممکن است با قرار دادن TLD در ترازهای فوقانی به‌جز بام نیز کاهش پاسخ قابل‌توجهی ایجاد شود. با کاهش ارتفاع قرارگیری TLD، همان‌گونه که انتظار می‌رود از میزان اثر کاهشی آن کم می‌شود.

۴- نسبت جرم مناسب برای TLD مستقل از زلزله اعمال شده بوده و برای سازه مورد مطالعه حدود ۴٪ است. با افزایش

نسبت جرم برای مقادیر بزرگتر از نسبت بهینه به‌دست آمده در تحقیق، از اثر نسبت جرم در کاهش پاسخ سازه کاسته می‌شود.

۵- هر چند مقادیر بیشینه پاسخ به‌دست آمده از نظم خاصی پیروی نمی‌کند ولی دارای روند کلی مشابه نظم نسبی حاکم بر مقادیر RMS پاسخهاست.

۶- میزان کاهش پاسخ لرزه‌ای برای سازه‌های دارای TLD به پهنای باند فرکانسی تحریک غیرحساس است ولی به رابطه فرکانس طبیعی سازه و فرکانس غالب تحریک وابسته است، شکل (۸).

واژه‌نامه

1. wave breaking
2. multiple tuned liquid damper
3. volume of fluid (VOF)

مراجع

1. Li, S.J., Tang, j., and Li, Q.S., "Shallow Rectangular TLD for Structural Control Implementation," *Applied Acoustics*, Vol. 63, Issue 10, pp. 1125-1135, 2002.
2. Fujino, Y., Sun, L., and Chaiseri, P., "Tuned Liquid Damper (TLD) for Suppressing Horizontal Motion of Structures," *Engineering Mechanics*, Vol. 118, No. 10, pp. 2017-2030, 1992.
3. Kaneko, S., and Ishikawa, M., "Modeling of Tuned Liquid Damper with Submerged Nets," *J. Pressure Vessel Technology, ASME*, Vol. 121, pp. 334-343, 1999.
4. Li, H.N., Jia, Y., and Wang, S.Y., "Theoretical and Experimental Studies on Reduction of Multi-Modal Seismic Response of High-Rise Structures by Tuned Liquid Dampers," *Journal of Vibration and Control*, Vol. 10, pp. 1041-1056, 2004.
5. Sun, L. M., and Fujino, Y., "A Semi-Analytical Model for Tuned Liquid Damper (TLD) with Wave Breaking," *Fluids and Structures*, Vol. 8, No. 5, pp. 471-488, 1994.
6. Wakahara, T., "Practical Application of Tuned Liquid Damper for Tall Buildings," *Proc. Struct. Congr.*, pp. 851-856, 1994.
7. Conner, J. J., *Introduction to Structural Motion Control*, Prentice Hall Pearson Education, 2003.
8. Kaneko, S., and Ishikawa, M., "Modeling of Tuned Liquid Damper with Submerged Nets," *J. Pressure Vessel Technology, ASME*, 121, 334-343, 1999.
9. Graham, E. W., and Rodriguez, A. M., "The Characteristics of Fuel Motion Which Affect Airplane Dynamics," *J. Appl. Mech.*, Vol. 19, No. 3, pp. 381-388, 1952.
10. Tait, M. J. and El Damatty, A. A., and Isyumov, N., "Testing of Tuned Liquid Damper with Screens and Development of Equivalent TMD Model," *Wind and Structures*, Vol. 7, No. 4, pp. 215-234, 2004.
11. Tait, M. J., Isyumov, N., and El Damatty, A. A., "The Efficiency and Robustness of a Uni-directional Tuned Liquid Damper and Modelling with an Equivalent TMD," *Wind and Structures*, Vol. 7, No. 4, pp. 235-250, 2004.
12. Sadek, F., and Mohraz, B., "Single and Multiple Tuned Liquid Column Dampers for Seismic Applications," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 439-463, 1998.
13. Warburton, G. B. "Optimum Absorbers for Simple Systems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 8, pp. 197-217, 1980.
14. Veletsos, A. S., and Ventura, C.E., "Modal Analysis of Non-Classical Damped Linear Systems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 14, pp. 217-243, 1986.