

ارزیابی کارایی میراگر مایع هماهنگ شده (TLD) در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها

فیاض رحیم‌زاده روفویی* و آرش ملکان**

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۷۷/۱۲/۴ - دریافت نسخه نهایی: ۷۹/۱/۲۸)

چکیده - میراگر مایع هماهنگ شده یا TLD^۱ از جمله سیستم‌های کنترل فعال است که در سالهای اخیر برای کاهش ارتعاشات ناشی از باد در سازه‌هایی که به صورت یک سیستم یک درجه آزادی با زمان تناوب بلند قابل شبیه‌سازی‌اند، به کار گرفته شده است. این میراگر توسط تلاطم مایع کم عمق درون تعدادی مخزن که در قسمت بالای سازه نصب می‌شوند، انرژی ارتعاشی وارده به سازه را مستهلک می‌کند. مشخصات میراگر به گونه‌ای تنظیم و انتخاب می‌شوند که فرکانس تلاطم مایع درون میراگر با فرکانس ارتعاش سازه هماهنگ شود. عامل اندرکنش میراگر و سازه، نیروی برشی است که از اختلاف فشار مایع متلاطم بر جداره مخازن ناشی می‌شود. هدف از انجام این مطالعه تعمیم کاربرد این‌گونه میراگرها در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌های برشی است. برای این کار، ابتدا معادله‌های اساسی تلاطم مایع برای مخازن مستطیلی بر مبنای نظریه امواج غیرخطی ارائه شده‌اند. این معادله‌ها با اعمال ضرایبی برای به حساب آوردن انواع میرایی ناشی از حرکت مایع و نیز برای در برگرفتن شکست موج در حالت تحریک هارمونیک تعمیم یافته‌اند. در ادامه، مسئله اندرکنش میراگر و سازه برشی N درجه آزادی و معادله‌های مربوط به آن تبیین شده‌اند. با حل عددی معادله‌های اندرکنش میراگر و سازه، کارایی میراگر برای تحریک‌های پایه هارمونیک در دو حالت وقوع و عدم وقوع شکست موج و نیز برای تحریک زلزله مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت برای گسترش کاربرد TLD به سازه‌های متوسط و کوتاه با پیوند ارتعاشی غالب کم، استفاده ترکیبی از TLD و سیستم‌های ایزوله پایه در این‌گونه سازه‌ها پیشنهاد شده و کارایی آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

Evaluation of TLD Performance in Reducing the Seismic Response of Structures

F. Rahimzadeh Rofooei and A. Malakan

Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology

ABSTRACT- *Tuned Liquid Dampers (TLD) are among passive control devices that have been used to suppress the vibration of structures in recent years. These structures must be adequately presentable as an equivalent single degree of freedom system with long fundamental period. The TLD, located at the top floors of*

*** - دانشجوی کارشناسی ارشد

** - استادیار

the structure, can dissipate the external input energy into the system through the sloshing effect of the liquid inside the partially filled small containers. The proportions of the TLD are determined such that the liquid's sloshing frequency is tuned to the vibration frequency of the structure. That will result in optimal performance of the TLD. The interaction between the TLD and the structure takes place through a shear force produced by the difference in hydrodynamic pressure acted upon the TLD walls. In this paper, the application of the TLD in reducing the seismic-induced vibration of the shear buildings will be considered. In this regard, first the governing differential equations of the sloshing liquid are adapted using the nonlinear shallow water wave theory (two-dimensional Navier Stokes equations) for the rectangular tanks subjected to ground acceleration. Using some coefficients obtained for the case of harmonic base excitation, these equations are generalized to consider the different liquid dampings and the wave breaking issue. Then, the equations of the motion of a MDOF shear building is derived taking into account the interaction of the TLD. Numerical simulations were performed to investigate the performance of the TLD for the harmonic base excitations with and without wave breaking and for the earthquake input. Finally, to extend the application of the TLD for the short or intermediate building structures with short period of vibration, a combination of TLD and base isolation system (LRB) is proposed. The performance of the TLD for the base isolated structures under full-scale earthquake loading is studied.

۱- مقدمه

میراگرهای مایع هماهنگ شده یا TLD ها در ابتدا برای حذف و کاهش لرزشها و تکانهای ناخواسته در فضاییماها و شناورهای دریایی مورد استفاده قرار گرفتند [۱]. به دنبال آن، ضمن مطالعات گسترده‌ای که در خصوص بررسی کاربرد این سیستم برای کنترل پاسخ سیستمهای دینامیکی انجام شد، استفاده عملی از آنها برای کاهش پاسخ سازه‌ها تحت اثر ارتعاشات ناشی از باد آغاز شد [۲ و ۳]. از جمله این سازه‌ها می‌توان از برج فرودگاه ناگاساکی و برج دریایی یوکاهاما در ژاپن نام برد که بخش عمده‌ای از جرم آنها در یک قسمت متمرکز شده و در قالب یک سیستم یک درجه آزادی با زمان تناوب بلند قابل شبیه‌سازی‌اند [۴]. برای گسترش کاربرد TLD به منظور کنترل پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، لازم است که ابتدا عملکرد آن تحت تحریک لرزه‌ای از لحاظ نظری و تجربی به طور دقیق و همه جانبه بررسی شده و در صورت امکان با ارائه راهکارهای مناسب، مشکلات مربوط به کاربری آن مرتفع شدند. نیاز به این تحقیق به ویژه از آنجا آشکار می‌شود که در اکثریت قریب به اتفاق تحقیقاتی که تا به امروز صورت گرفته‌اند اندرکنش TLD و سازه‌های یک درجه آزادی تحت تحریک پایه هارمونیک مطالعه شده و تحریکهای دلخواه مانند زلزله در تحقیقات انگشت شماری و آن هم در مقیاسهای آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. هدف از انجام این پروژه، تعیین میزان کارایی TLD در ساختمانهای برشی N

درجه آزادی تحت اثر تحریک زلزله است. برای این منظور، در گام اول نسبت به ارائه معادله‌های اساسی تلاطم مایع کم عمق برای مخازن مستطیلی اقدام می‌شود. سپس روابط مربوط به اندرکنش TLD و سازه برشی N درجه آزادی تعیین شده و در حالت تحریک هارمونیک و بارگذاری زلزله عملکرد TLD بررسی خواهد شد.

۲- معادله‌های اساسی تلاطم مایع برای مخازن مستطیلی

در ساده‌ترین حالت، یک مخزن مستطیلی با تحریک افقی در امتداد طولی آن در نظر گرفته می‌شود. حرکت ذرات مایع در این مخزن به صورت دوبعدی و در صفحات عمودی طولی و به موازات یکدیگر صورت می‌گیرد. این حالت با توجه به شرایط مسئله اندرکنش مورد بررسی و برای احتراز از پیچیدگی نظری، فرایند استخراج معادله‌های اساسی تلاطم انتخاب شده است. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، طول مخزن مستطیلی $2R$ (در امتداد تحریک)، عرض آن B (عمود بر امتداد تحریک) و عمق مایع درون آن برابر با H (در حالت سکون) فرض می‌شود. مبدأ دستگاه مختصات متعامد Oxz در وسط سطح آزاد مایع در حال سکون در نظر گرفته می‌شود. تحریک مخزن به صورت انتقالی^۲ و در راستای محور X ها در نظر گرفته شده است و پارامتر η رقوم سطح آزاد مایع را نسبت به محور X ها تعیین می‌کند. فرضیات اساسی مورد استفاده در استخراج معادله‌های تلاطم

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \ddot{x}_s \quad [-H \leq z \leq -(H-H_b)] \quad (4)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \quad [-H \leq z \leq -(H-H_b)] \quad (5)$$

که در آنها H_b ضخامت لایه مرزی است که کمتر از چند درصد طول R بوده و ν بیانگر لزجت سینماتیک مایع است [۱]. شرایط مرزی مورد استفاده عبارت‌اند از:

$$u=0 \quad \text{روی جداره‌های انتهایی} \quad (6)$$

$$w=0 \quad \text{روی کف مخزن} \quad (7)$$

$$w = \frac{D\eta}{Dt} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{روی سطح آزاد مایع} \quad (8)$$

$$P = P_0 = \text{مقدار ثابت} \quad \text{روی سطح آزاد مایع} \quad (9)$$

برای بخش غیر چرخشی مایع، یک میدان پتانسیل سرعت Φ به صورت زیر فرض می‌شود [۱ و ۲]:

$$\Phi = F(x,t) \cosh[k(H+z)] \quad (10)$$

با استفاده از معادله بالا، ابتدا مؤلفه عمودی سرعت، w و مشتقاتش بر حسب مؤلفه افقی u بیان شده و پس از انتگرالگیری از معادله‌های حاکم بر مسئله (معادله‌های ۱ تا ۳) از کف مخزن ($z=-H$) تا سطح آزاد مایع ($z=\eta$) نسبت به z معادله‌های اساسی به صورت نهایی زیر استخراج می‌شوند:

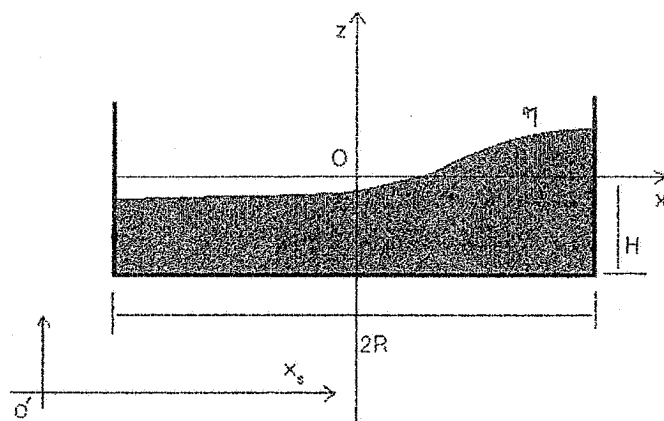
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + H \sigma \frac{\partial[\phi u(\eta)]}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} u(\eta) + (1-T_H^2) u(\eta) \frac{\partial}{\partial x} u(\eta) + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g H \sigma \phi \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\nu}{(\eta+H)} \int_{-H}^{-(H-H_b)} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dx - \ddot{x}_s \quad (12)$$

که در آن:

$$\phi = \frac{\tanh[k(H+\eta)]}{\tanh(kH)}, T_H = \tanh[k(H+\eta)], \sigma = \frac{\tanh(kH)}{kH}$$

همچنین، $u(\eta)$ مؤلفه افقی سرعت در سطح آزاد مایع و k عدد موج است که ضریب ثابتی بوده و از فرایند جداسازی متغیرها حاصل شده است. جمله دوم از طرف راست معادله (۱۲)، جمله استهلاک^۳ نامیده می‌شود. این جمله که معرف اصطکاک در لایه مرزی کف مخزن است و با توجه به نتایج بررسیهای سان و فوجینو [۵] ارائه



شکل ۱- مقطع طولی مخزن مورد بررسی و دستگاه مختصات سوار شده بر آن [۱]

شامل: تراکم‌ناپذیر و غیر چرخشی بودن مایع درون مخزن، ثابت بودن فشار روی سطح آزاد، پیوسته بودن سطح آزاد مایع به هنگام تلاطم و به عبارتی عدم وقوع پدیده شکست موج هستند. معادله‌های کلی حاکم بر مسئله عبارت‌اند از:

الف - معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

در این معادله u و w به ترتیب مؤلفه‌های سرعت ذرات مایع در راستای X و Z هستند.

ب - معادله‌های حرکت (معادله‌های ناویراستوکس دوبعدی):
برای مایعاتی که لزجت آنها به طور نسبی کوچک است، اثر اصطکاک داخلی تنها در لایه مرزی کف مخزن قابل ملاحظه است. با توجه به این مطلب، جریان ذرات مایع در خارج از لایه مرزی را می‌توان به صورت یک جریان پتانسیل در نظر گرفت و به این ترتیب معادله‌های حرکت به صورت زیر ساده می‌شوند [۱]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \ddot{x}_s \quad [-(H-H_b) \leq z \leq \eta] \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad [-(H-H_b) \leq z \leq \eta] \quad (3)$$

در این معادله‌ها، پارامتر t نشانگر زمان، \ddot{x}_s شتاب تحریک افقی مخزن، g شتاب ثقلی، ρ جرم جرمی مایع، P فشار و η رقوم سطح آزاد مایع می‌باشند. معادله‌های حرکت برای لایه مرزی کف مخزن به صورت زیر خواهند بود:

شده است، به قالب λu تبدیل می‌شود که ضریب λ برابر خواهد بود با:

$$\lambda = \frac{1}{(\eta + H)} \frac{1}{\sqrt{2}} (\omega \nu)^{1/2} \quad (13)$$

همچنین برای منظور کردن اثر عواملی چون اصطکاک لایه مرزی جدارهای مخزن و نیز آلودگی سطح مایع در استهلاك انرژی مخزن از ضریب $[1 + \frac{2H}{B} + S]$ در جمله استهلاك استفاده می‌شود. در این ضریب، اثر اصطکاک لایه مرزی جدارهای کناری مخزن را با مقدار معادل از اصطکاک لایه مرزی کف مخزن جایگزین کرده و S ضریب آلودگی سطح است که بین ۰ تا ۲ متغیر است [۵]. در بررسی حاضر مقدار ضریب S برابر با ۱ انتخاب شده است. لازم به یادآوری است که تعیین ضریب میرایی در معادله (۱۳) با فرض تحریک سینوسی تکیه‌گاه مخزن، صورت پذیرفته است. برای حالت تحریک دلخواه مخزن، استفاده از فرکانس زاویه‌ای طبیعی تلاطم مایع و یا فرکانس زاویه‌ای تحریک در معادله (۱۳) صحت معادله را مورد تردید قرار می‌دهد. گه، ماهاتما و ونگ معادله (۱۳) را به صورت زیر برای هرگونه تحریک دلخواه تکیه‌گاه مخزن اصلاح و پیشنهاد نمودند [۶]:

$$\lambda = \frac{1}{(\eta + H)} (\omega_L \nu)^{1/2} \left[1 + \frac{2H}{B} + S \right] \quad (14)$$

که در آن ω_L فرکانس زاویه‌ای لحظه‌ای تلاطم مایع است. برای تعیین فرکانس زاویه‌ای لحظه‌ای تلاطم مایع درون مخزن، روشی مبتنی بر محاسبه نرخ عبور قله^۴ امواج ایجاد شده در سطح آزاد مایع در نقطه وسط مخزن توسط محققان پیشنهاد شد؛ بدین ترتیب که اختلاف زمانی بین عبور هر دو قله متوالی همسو به عنوان زمان تناوب لحظه‌ای تلاطم مایع T_L شناخته می‌شود و نتیجتاً فرکانس زاویه‌ای لحظه‌ای تلاطم مایع به صورت $\omega_L = \frac{2\pi}{T_L}$ محاسبه می‌شود [۶]. برای دستیابی به حداکثر میرایی، مشخصات میراگر می‌باید به گونه‌ای تنظیم و انتخاب شود که فرکانس تلاطم مایع با فرکانس ارتعاش سازه هماهنگ شود. فرکانسهای طبیعی تلاطم مایع درون مخزن مستطیلی با مشخصات داده شده در شکل (۱) از معادله زیر تعیین می‌شوند:

$$f_{wn} = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{g\pi}{2R} (2n-1) \tanh \left[\frac{\pi H}{2R} (2n-1) \right] \right\}^{1/2} \quad (15)$$

که در آن n و f_{wn} به ترتیب شماره مود تلاطم و فرکانس طبیعی تلاطم مایع در مورد n ام هستند.

با افزایش عمق مخازن، به علت عدم تحرک بخشی از مایع که در عمقهای زیاد قرار دارد، میرایی کاهش می‌یابد، از این رو از مخازنی با عمق مایع کم استفاده می‌شود. ملاک کم عمق بودن مایع معادله زیر است:

$$\delta = \frac{H}{R} < 0.2034 \quad (16)$$

این معادله از نظریه امواج در آب کم عمق اقتباس شده است. اما از سوی دیگر استفاده از مایع کم عمق سبب می‌شود که امواج ایجاد شده در مایع، حتی تحت تحریکهای با دامنه نسبتاً کوچک دچار شکست شوند و در نتیجه معادله‌های به دست آمده قابل استفاده نخواهند بود. برای منظور کردن پدیده شکست موج و تعمیم کاربرد میراگر به دامنه‌های تحریک بزرگتر، معادله (۱۲) توسط سان و فوجینو و همکارانشان با معرفی دو ضریب به صورت زیر اصلاح شده است [۱]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (1 - T_{H^2})u \frac{\partial u}{\partial x} + C_{fr}^2 g \frac{\partial \eta}{\partial x} + gH\sigma\phi \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \frac{\partial \eta}{\partial x} = -C_{da}\lambda u - \ddot{x}_s \quad (17)$$

ضریب C_{fr} ، ضریب جابه‌جایی فرکانس^۵ نامیده شده و برای اصلاح الگوی سرعت موج در معادله اعمال می‌شود تا اثر تغییر الگوی سرعت موج ناشی از شکست موج در جابه‌جایی فرکانس طبیعی تلاطم ملحوظ شود. با توجه به آزمایشهای به عمل آمده در مرجع [۱] ضریب C_{fr} در این مطالعه مقداری ثابت و برابر ۱/۰۵ دارد. همچنین، ضریب C_{da} ، ضریب میرایی نامیده شده و برای تحریک هارمونیک با دامنه A از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{da} = 0.57 \left(\frac{\delta H \omega A}{\nu} \right)^{1/2} \quad (18)$$

این ضرایب در حالت عدم وقوع شکست موج برابر ۱ منظور می‌شوند. شرط وقوع شکست موج در مرجع [۱] بر اساس معیارهای مهندسی ساحل، منوط به بیشتر شدن ارتفاع موج از عمق مایع شده است. شرط دیگری که در مرجع [۶] برای وقوع شکست موج بیان شده عبارت است از:

$$\eta_{max} \geq 0.78H \quad (19)$$

۳- اندرکنش TLD و سازه برشی N درجه آزادی

اینرسی جرم مایع سبب می‌شود که اثرات ناشی از تحریک خارجی با یک فاصله زمانی به مایع منتقل شوند. تلاطم مایع موجب ایجاد تفاوت در رقوم سطح آزاد مایع در جدازه‌های انتهایی مخزن می‌شود. اختلاف فشار ناشی از تفاوت رقوم سطح آزاد مایع در جدازه‌های انتهایی، به صورت یک نیروی برشی در کف مخزن ظاهر می‌شود. توزیع فشار وارد بر جدازه‌های انتهایی مخزن با در نظر گرفتن فشار هیدروستاتیک و اثر شتاب افقی حرکت مایع، به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\frac{1}{\rho}(P-P_0) = g(\eta-z) - \frac{1}{k^2} \left[\frac{\partial^2 u(\eta)}{\partial x \partial t} - \frac{\partial^2 u(z)}{\partial x \partial t} \right] \quad (20)$$

در معادله بالا P_0 فشار در سطح آزاد مایع، z متغیر عمق مایع، $u(\eta)$ مؤلفه افقی سرعت مایع در سطح مخزن و $u(z)$ مؤلفه افقی سرعت مایع در عمق z هستند. برای محاسبه فشار کلی وارد بر هر کدام از جدازه‌های انتهایی مخزن از معادله (۲۰) نسبت به z انتگرالگیری می‌شود. این انتگرالگیری از کف مخزن تا سطح آزاد مایع انجام گرفته و بدین ترتیب فشار کلی وارد بر جدازه‌های واقع در $x=-R$ و $x=R$ به ترتیب به صورت زیر قابل بیان خواهند بود:

$$P_0 = \frac{1}{4} m_w \frac{gH}{R} T_0 \quad (x = -R) \quad (21)$$

$$P_n = \frac{1}{4} m_w \frac{gH}{R} T_n \quad (x = R) \quad (22)$$

که در آنها:

$$T_0 = \frac{1}{H^2} \left[(\eta_0 + H)^2 + \frac{2}{k^2} \left(\frac{\partial^2 \eta_0}{\partial x^2} \right) (\eta_0 + H - H\phi\sigma) \right] \quad (23)$$

$$T_n = \frac{1}{H^2} \left[(\eta_n + H)^2 + \frac{2}{k^2} \left(\frac{\partial^2 \eta_n}{\partial x^2} \right) (\eta_n + H - H\phi\sigma) \right] \quad (24)$$

m_w جرم مایع درون مخزن (یا مخازن) و η_0 و η_n به ترتیب رقوم سطح آزاد مایع در $x=-R$ و $x=R$ هستند. برش پایه TLD از تفاضل فشار کلی وارد بر جدازه‌های انتهایی مخزن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_{TLD} = P_n - P_0 = \frac{1}{4} m_w \frac{gH}{R} (T_n - T_0) \quad (25)$$

حال، با مشخص شدن نیروی برش پایه TLD، اندرکنش میراگر و

سازه برشی قابل شبیه‌سازی خواهند بود. برای این منظور، یک سیستم N درجه آزادی با TLD مطابق شکل (۲) در نظر گرفته می‌شود. در مدل ریاضی مزبور، جرمها در طبقات متمرکز فرض شده و تنها در راستای محور X آزادی حرکت انتقالی (سازه برشی) خواهند داشت. معادله‌های حرکت این سیستم عبارت‌اند از:

$$[M_s] \{\ddot{x}_s\} + [C_s] \{\dot{x}_s\} + [k_s] \{x_s\} = \{F_{exc}\} + \{F_{TLD}\} \quad (26)$$

در معادله ماتریسی بالا، $[M_s]$ ، $[C_s]$ و $[K_s]$ به ترتیب ماتریسهای با ابعاد $(N \times N)$ برای جرم، میرایی و سختی سازه، $\{x_s\}$ ، $\{F_{exc}\}$ و $\{F_{TLD}\}$ بردارهای تغییر مکان نسبی طبقات سازه، تحریک افقی خارجی و برش پایه TLD بوده که بردارهایی با ابعاد $(N \times 1)$ هستند. بردار $\{F_{exc}\}$ برای مؤلفه افقی تحریکهای لرزه‌ای پایه به صورت $\{F_{exc}\} = [M_s] \{1\} \ddot{x}_g$ نوشته می‌شود که در آن \ddot{x}_g شتاب حرکت افقی پایه و $\{1\}$ برداری با مؤلفه‌های واحدند. در بردار $\{F_{TLD}\}$ ، نیروی برش پایه TLD تنها در سطر مربوط به بالاترین تراز سازه اعمال شده و مابقی مؤلفه‌ها صفر منظور می‌شوند. میرایی سازه به صورت میرایی ریلی و با فرض برابری نسبت میرایی مودهای اول و دوم تعیین می‌شود. با توجه به تعیین معادله‌های حرکت سازه برشی و نیز میراگر مایع متوازن TLD به صورتی مجزا و با منظور کردن نسبتهای میرایی مربوطه، نیازی به در نظر گرفتن میرایی نامتناسب در مجموعه معادله‌های حرکت نخواهد بود.

۴- حل عددی معادله‌های اندرکنش

معادله ماتریسی (۲۶) با معادله‌های اساسی تلاطم مایع درون TLD درگیر بوده و باید به صورت همزمان حل شوند. این درگیری ناشی از آن است که از یک سو برش پایه TLD وابسته به رقوم سطح آزاد مایع (η) در محل جدازه‌های انتهایی مخزن است و تعیین مقادیر η مستلزم حل معادله‌های اساسی تلاطم است. از سوی دیگر، برای حل معادله‌های اساسی تلاطم باید تاریخچه زمانی شتاب افقی تحریک پایه مخازن (جمله \ddot{x}_g) که همان شتاب طبقه‌ای است که TLD بر روی آن قرار دارد، مشخص باشد. برای حل عددی دستگاه معادله‌های حرکت سازه و معادله‌های تلاطم مایع، ابتدا معادله‌های اساسی تلاطم نسبت به متغیر x گسسته‌سازی می‌شوند. تعداد تقسیمات مخزن از معادله زیر محاسبه می‌شود:

TLD در کاهش ارتعاشات سازه از کمیت زیر استفاده خواهد شد:

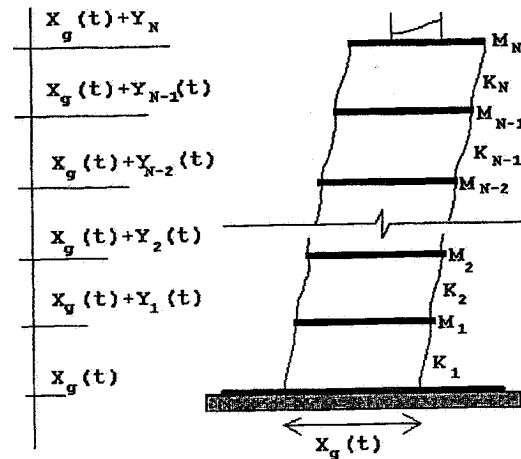
$$\psi = \frac{x_0 - x_{TLD}}{x_0} \times 100\% \quad (28)$$

که در آن x_0 و x_{TLD} به ترتیب تغییر مکان بیشینه سازه بدون TLD و با TLD بوده و ψ بیانگر میزان کارایی بر حسب درصد است [۶]. علت انتخاب این ضریب، فراهم کردن زمینه مقایسه نتایج حاصله از این مطالعه با نتایج ارائه شده در سایر مراجع مورد استفاده است.

۵- بررسی عملکرد TLD تحت تحریک هارمونیک

کارایی TLD در دو ساختمان برشی مختلف تحت اثر تحریک هارمونیک و در دو حالت وقوع و عدم وقوع شکست موج مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار، با توجه به زمان تناوب مود اول این مدل‌های سازه‌ای، مشخصات TLDهای مورد استفاده چند طبقه به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که فرکانس اصلی تلاطم مایع درون آنها با فرکانس مود اول ارتعاش این مدل‌های سازه‌ای هماهنگ شود. مشخصات مربوط به سازه‌ها و TLDهای متناظر با آنها، در جدول (۱) درج شده‌اند. میرایی مودهای اول و دوم ارتعاش هر دو سازه برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. شتاب پایه مورد استفاده در این بخش به صورت $\ddot{x}_g = a \sin \omega t$ در نظر گرفته شده است که مقدار دامنه a بزرگترین دامنه‌ای است که به ازای آن شکست موج رخ نمی‌دهد. برای بروز شکست موج دامنه‌ها ۶ برابر شده‌اند. با تغییر فرکانس شتاب پایه وارده به مدل‌های سازه‌ای در اطراف فرکانس مود اول آنها، پاسخ سازه برای هر فرکانس بارگذاری در دو حالت با TLD و بدون TLD تعیین شده است. نتایج حاصل در شکل‌های (۳) تا (۵) ارائه شده‌اند.

بررسی این شکل‌ها نشان می‌دهد که میزان کارایی TLD در فرکانس بارگذاری برابر با فرکانس مود اول سازه به مقدار بیشینه خود می‌رسد. در حالت عدم وقوع شکست موج، حداکثر کارایی درست در نقطه برابری فرکانسها واقع شده است؛ حال آنکه در حالت وقوع شکست موج، حداکثر کارایی با اندکی جابه جایی در ۰/۹۹ برابر پرورد مود اول سازه رخ داده است. این مطلب را می‌توان به جابه جایی فرکانس طبیعی تلاطم مایع در حالت وقوع شکست موج نسبت داد. همچنین در حالت عدم وقوع شکست موج، حداکثر میزان کارایی به ۶۸/۸ و ۶۷/۷ درصد رسیده که بیانگر عملکرد



شکل ۲- شبیه‌سازی اندرکنش TLD و سازه N درجه آزادی.

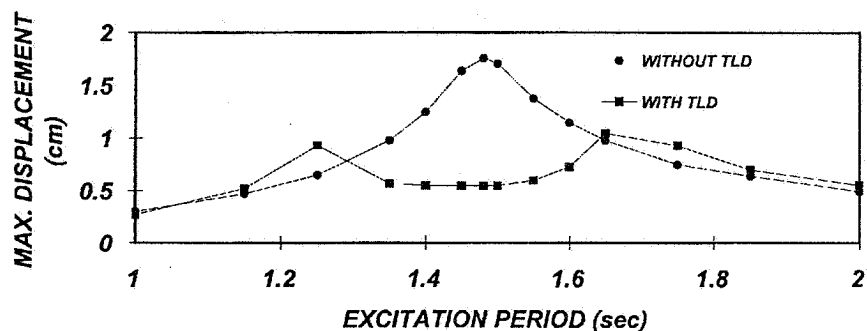
$$n = \frac{\pi}{2 \text{Arc cos} \left[\frac{\tanh(\pi\delta)}{2 \tanh(\pi\delta/2)} \right]^{1/2}} \quad (29)$$

این معادله از مساوی قرار دادن نسبت فرکانس طبیعی مود اول به مود دوم تلاطم، به دست آمده از رابطه پراکندگی عددی با مقدار نظیر از رابطه پراکندگی واقعی حاصل شده است [۷ و ۱۰]. به این ترتیب معادله (۱۱) به $n+1$ معادله (برای رقوم طرفین هر یک از تقسیمات) و معادله (۱۲) به n معادله (برای سرعت مایع در وسط هر یک از تقسیمات) تبدیل می‌شوند. هر سطر از معادله ماتریسی (۲۶) یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم است که با تغییر متغیر به دو معادله مرتبه اول تبدیل می‌شود. به این ترتیب $2n+1$ معادله تلاطم مایع به همراه $2N$ معادله سازه تشکیل یک دستگاه معادله‌های دیفرانسیل معمولی گسسته با $2N + 2n+1$ معادله می‌دهند که برای حل عددی آن بر اساس روش رانگ - کوتا - گیل [۸ و ۹] یک برنامه رایانه‌ای تهیه شده است.

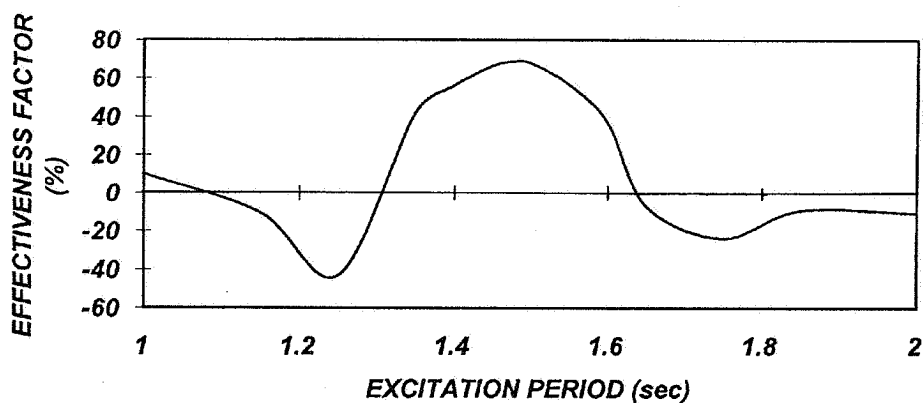
نتایج حاصل از برنامه در دو حالت سازه تنها و TLD تنها، با نتایج مراجع دیگر مقایسه شده‌اند. در حالت سازه تنها، مقایسه نتایج حاصل از این برنامه با نتایج به دست آمده از برنامه SAP90 بیانگر دقت بسیار مطلوب شبیه‌سازی رایانه‌ای و انطباق کمی و کیفی نتایج است. در حالت TLD تنها، تعدادی از آزمایش‌های مندرج در مرجع [۷] عیناً توسط برنامه رایانه‌ای تهیه شده شبیه‌سازی شدند. در این حالت نیز مقایسه نتایج، مؤید دقت و صحت عملکرد برنامه تهیه شده است [۱۰]. همچنین به منظور بررسی میزان کارایی

جدول ۱- مشخصات مدل‌های سازه‌ای مورد بررسی و TLD های متناظر

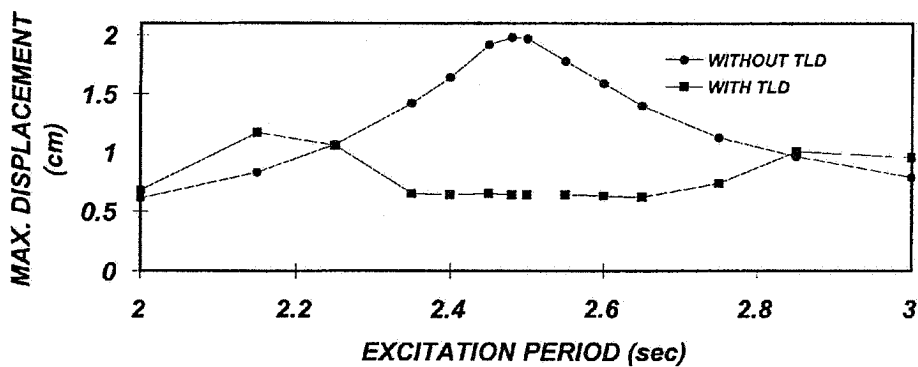
شماره مدل	جرم طبقات (Ton)	سختی طبقات (Ton/cm)	زمان تناوب مود اول (sec)	طول مخزن TLD (cm)	عرض مخزن TLD (cm)	عمق مایع درون TLD (cm)	نسبت جرم	جرم حجمی آب (kg/cm^2)	لرزه سینماتیکی آب (cm^2/sec)	دامنه شتاب برای وقوع شکست (cm/sec)	دامنه شتاب برای وقوع شکست (cm^2/sec)
۱	۱۰۰	۳۰۸/۴	۱/۶۸	۵۰	۲۵	۵	۰/۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۲/۵	۱۵
۲	۱۰۰	۱۰۹/۳۳	۲/۴۸	۱۰۰	۲۵	۶/۵	۰/۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۱	۶



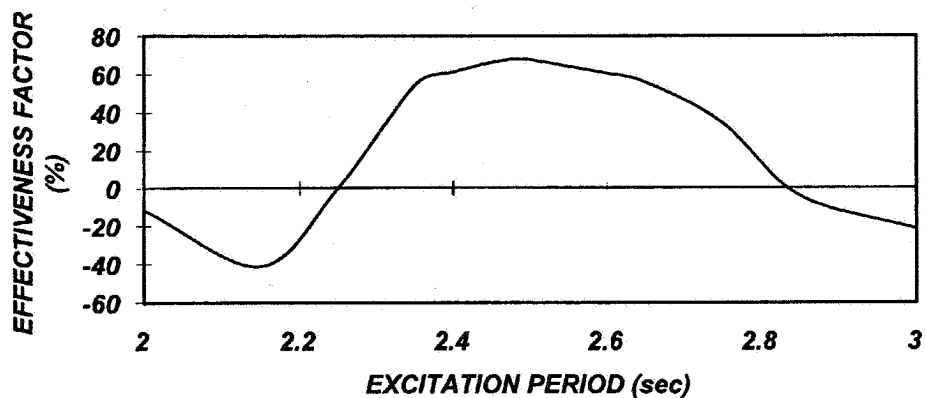
شکل ۳- پاسخ پیشینه مدل سازه‌ای اول در حالت عدم وقوع شکست موج



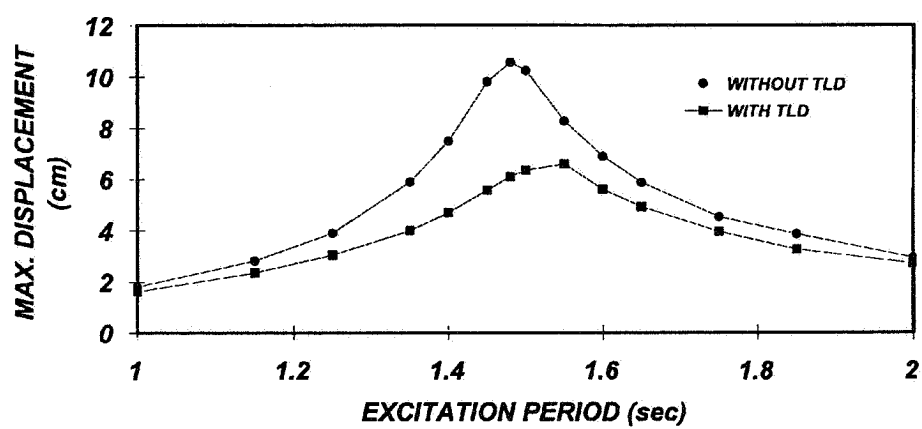
شکل ۴- تغییرات میزان کارایی متناظر با شکل (۳)



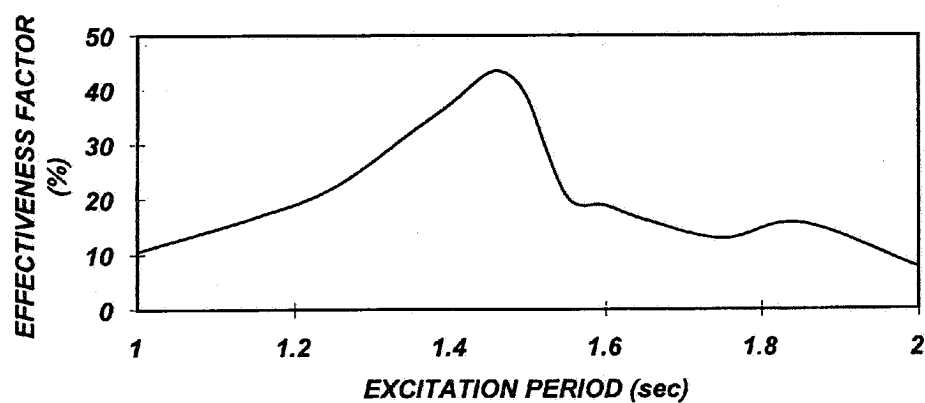
شکل ۵- پاسخ پیشینه مدل سازه‌ای دوم در حالت عدم وقوع شکست موج



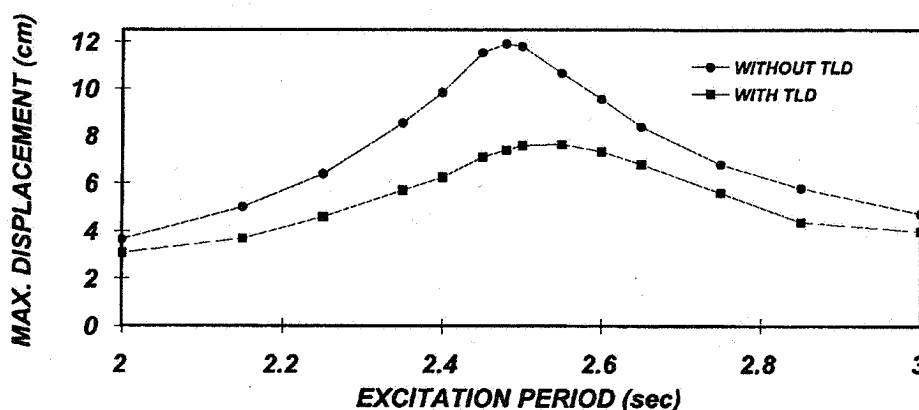
شکل ۶- تغییرات میزان کارایی متناظر شکل (۵)



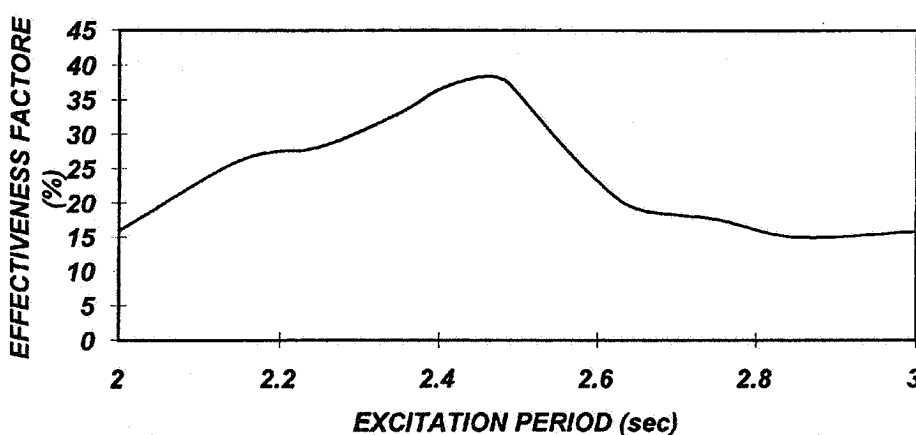
شکل ۷- پاسخ بیشینه مدل سازه‌ای اول در حالت وقوع شکست موج



شکل ۸- تغییرات میزان کارایی متناظر با شکل (۷)



شکل ۹- پاسخ بیشینه مدل سازه‌ای دوم در حالت وقوع شکست موج

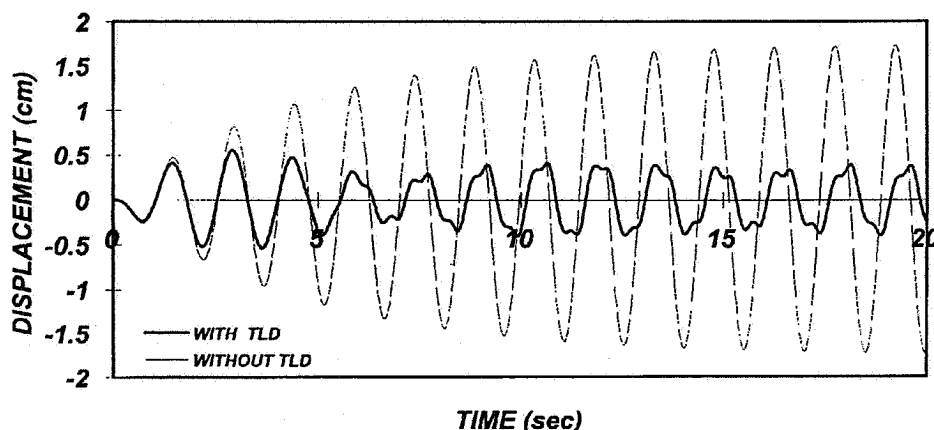


شکل ۱۰- تغییرات کارایی متناظر با شکل (۹)

یک درجه آزادی مطابقت کامل دارد. در شکل‌های مربوط به حالت وقوع شکست موج، پیکهای موضعی مشابهی مشاهده می‌شوند. اما در این حالت کارایی در تمام محدوده تغییرات مثبت است و شکل کلی نمودارها یکنواخت‌تر و ملایم‌ترند. الگوی کلی این نمودارها نیز کماکان با نتایج حاصل از آزمایشهای سان و فوجینو مطابقت دارد [۱]. بین نتایج مربوط به هر دو نمونه، در هر دو حالت وقوع و عدم وقوع شکست موج هماهنگی کاملی وجود دارد. برای درک بهتر عملکرد اندرکنشی میراگر و سازه، قسمتی از تاریخچه زمانی پاسخ مدل سازه‌ای اول با TLD در حالت عدم وقوع شکست موج برای فرکانس تحریک تشدید در شکل (۱۱) ارائه شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، منحنی تاریخچه زمانی پاسخ حداکثر سازه با TLD علاوه بر الگوی هارمونیک دارای تعدادی پیکهای موضعی است. این پیکها مربوط به اثر مشارکت موده‌های

بسیار مطلوب و موفقیت‌آمیز TLD در کنترل ارتعاشات با دامنه کوچک است. در حالت وقوع شکست موج میزان کارایی به $43/2$ و $38/3$ درصد کاهش یافته که علی‌رغم این کاهش میزان کارایی هنوز قابل توجه است. همچنین نتایج اخیر امکان کنترل ارتعاشات با دامنه‌های بزرگ توسط TLD را تأیید می‌کند.

شکل‌های مربوط به حالت عدم وقوع شکست موج نشان دهنده آن هستند که با دور شدن فرکانس تحریک از فرکانس ارتعاشی مود اول سازه، کارایی TLD کاهش می‌یابد. این کاهش حتی در محل پیکهای موضعی (مربوط به پاسخ سازه با TLD)، عملکرد TLD را معکوس می‌سازد. کاهش مزبور در مورد فرکانسهای تحریک کوچکتر از فرکانس تشدید، کمتر است. در نواحی دورتر، کارایی TLD به همراه پاسخهای سازه به سمت صفر میل می‌کند. شکل کلی این نمودارها با آزمایشهای سان و فوجینو در مورد سازه‌های



شکل ۱۱- قسمتی از تاریخچه زمانی پاسخ مدل سازه‌ای اول در حالت عدم وقوع شکست موج

حالت بدون TLD و با TLD محاسبه شده‌اند. پس از تعیین مقادیر حداکثر پاسخ، میزان کارایی TLD در هر مورد و برای هر کدام از سازه‌ها محاسبه می‌شود. نتایج مربوط به تحریکهای زلزله نامبرده در شکل‌های (۱۲) الی (۲۰) ارائه شده‌اند.

از بررسی شکل‌های مربوط به این قسمت ملاحظه می‌شود که در حالت تحریک زلزله، میزان کارایی به دست آمده برای مقیاسهای $\frac{1}{10}$ و $\frac{1}{40}$ تقریباً یکسان است، بنابراین به نظر می‌رسد که برای مقیاسهای کوچک از یک زلزله خاص، میزان کارایی مقداری ثابت است و به اندازه شتاب پیشین زمین بستگی ندارد. حداکثر میزان کارایی برای زلزله ال سنترو در حدود ۳۰ درصد و برای زلزله ناغان در حدود ۲۰ درصد به دست آمده است. با توجه به نزدیک بودن نوع خاک مربوط به هر دو مؤلفه زلزله (از نوع خاک سخت)، اختلاف کارایی به دست آمده در این دو حالت را باید در متفاوت بودن محتوای فرکانسی این‌گونه خاکها دانست. به نظر می‌رسد که قرارگرفتن فرکانس مودهای مهم ارتعاشی سازه با TLD، در محدوده فرکانسی پرنرژ زلزله سبب جذب انرژی بیشتر در سازه و عملکرد مؤثرتر TLD است. استفاده از تعداد بیشتری از رکوردهای زلزله و نیز مدل‌های سازه‌ای متنوع‌تر می‌تواند به شناخت بهتر عملکرد TLD در این خصوص کمک کند.

همچنین به منظور بررسی کارایی TLD در حالتی که اثر مودهای بالاتر در پاسخ سازه قابل توجه باشند، یک سازه ۲۰ طبقه در سه حالت مورد بررسی قرار گرفته است. در هر سه حالت توزیع جرم و سختی طبقات به گونه‌ای انتخاب شده که علی‌رغم داشتن

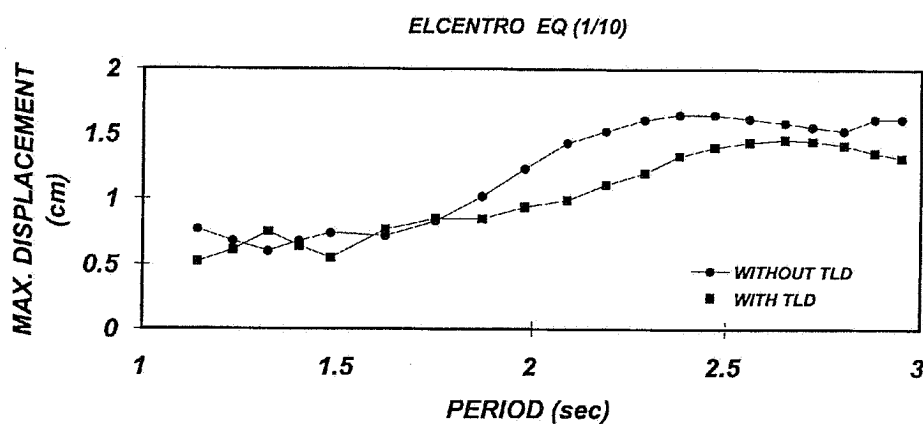
بالاتر تلاطم و بویژه مود دوم ارتعاش مایع هستند که در حالت شدید بوقوع می‌پیوندند [۷].

۶- بررسی کارایی TLD تحت تحریک زلزله

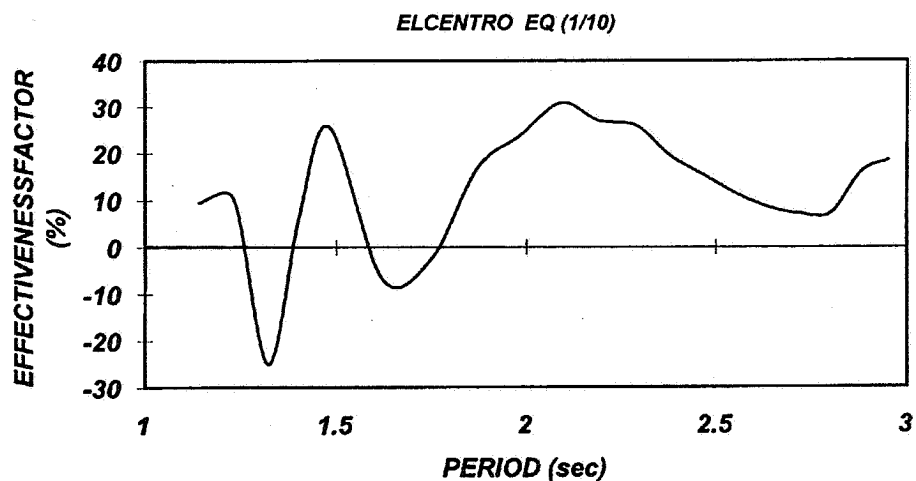
بیست و یک مدل سازه‌ای ۲۰ طبقه با TLDهای خاص خود در نظر گرفته شده‌اند. در همه سازه‌ها، جرم و سختی همه طبقات یکسان بوده و لذا درصد جرم مؤثر مودی مدل‌های سازه‌ای مزبور در مود اول ارتعاش برابر با ۸۳ درصد است که این خود نشان‌دهنده حاکم بودن مود اول بر پاسخ سازه‌ها است. در همه سازه‌ها، جرم هر طبقه 100 (ton) و نسبت میرایی مودهای اول و دوم ارتعاش سازه ۰/۰۵ است. مشخصات TLDها و سازه‌های مورد بررسی در جدول (۲) درج شده‌اند. TLDها و سازه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که محدوده زمان تناوب مدل‌ها بین ۱ الی ۳ ثانیه قرار گیرند. مشخصات مربوط به آب درون TLDها، مشابه جدول (۱) است. برای مطالعه عملکرد TLD تحت اثر تحریک زلزله از رکورد زلزله S00E ال سنترو مربوط به سال ۱۹۴۰ با شتاب اوج 0.34g و رکورد زلزله ناغان مربوط به سال ۱۳۵۶، با شتاب اوج حدوداً 0.72g استفاده شده است. برای احتراز از وقوع پدیده شکست موج، رکوردهای زلزله با دامنه‌هایی برابر با $\frac{1}{10}$ و $\frac{1}{40}$ دامنه واقعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال در موارد معدودی شکست موج به وقوع پیوسته که از اطلاعات مربوط به این موارد صرف نظر شده است. مدل‌های سازه‌ای جدول (۲) تحت اثر این دو مقیاس مختلف از زلزله‌ها قرار گرفته و تاریخچه زمانی پاسخ تغییر مکان آنها در دو

جدول ۲- مشخصات مدل‌های سازه‌ای مورد بررسی و TLD های متناظر

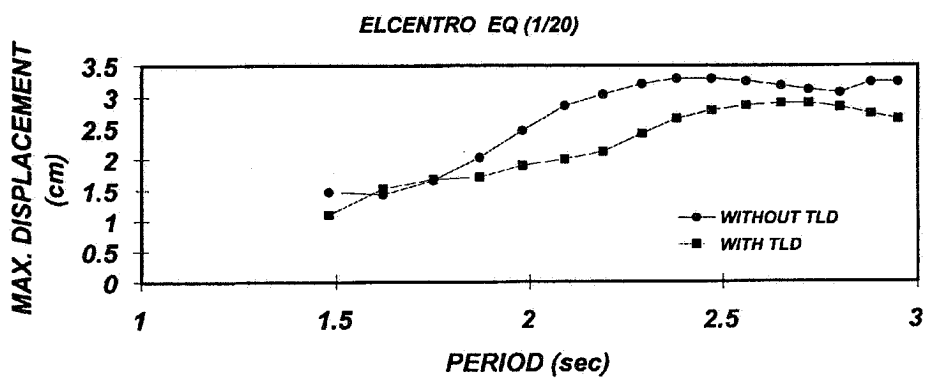
شماره مدل	TLD زمان تناوب		عمق مایع		ابعاد TLD	
	اصلاح شده	مقدار	H/R	اندازه	عرض	طول
۱	۱/۰۴	۱/۰۳	۰/۱	۲/۵	۲۵	۲۵
۲	۱/۱۴	۱/۱۲	۰/۱	۳	۲۵	۳۰
۳	۱/۲۳	۱/۲۱	۰/۱	۳/۵	۲۵	۲۵
۴	۱/۳۲	۱/۳	۰/۱	۴	۲۵	۴۰
۵	۱/۴	۱/۳۸	۰/۱	۴/۵	۲۵	۴۵
۶	۱/۴۸	۱/۴۵	۰/۱	۵	۲۵	۵۰
۷	۱/۶۲	۱/۵۹	۰/۱	۶	۳۵	۶۰
۸	۱/۷۵	۱/۷۲	۰/۱	۷	۳۵	۷۰
۹	۱/۸۷	۱/۸۴	۰/۱	۸	۳۵	۸۰
۱۰	۱/۹۸	۱/۹۵	۰/۱	۹	۳۵	۹۰
۱۱	۲/۰۹	۲/۰۵	۰/۱	۱۰	۳۵	۱۰۰
۱۲	۲/۱۹	۲/۱۵	۰/۱	۱۱	۴۵	۱۱۰
۱۳	۲/۲۹	۲/۲۵	۰/۱	۱۲	۴۵	۱۲۰
۱۴	۲/۳۸	۲/۳۴	۰/۱	۱۳	۴۵	۱۳۰
۱۵	۲/۴۷	۲/۴۳	۰/۱	۱۴	۴۵	۱۴۰
۱۶	۲/۵۶	۲/۵۱	۰/۱	۱۵	۴۵	۱۵۰
۱۷	۲/۶۵	۲/۶	۰/۱	۱۶	۵۵	۱۶۰
۱۸	۲/۷۲	۲/۶۸	۰/۱	۱۷	۵۵	۱۷۰
۱۹	۲/۸	۲/۷۵	۰/۱	۱۸	۵۵	۱۸۰
۲۰	۲/۸۸	۲/۸۳	۰/۱	۱۹	۵۵	۱۹۰
۲۱	۲/۹۵	۲/۹	۰/۱	۲۰	۵۵	۲۰۰



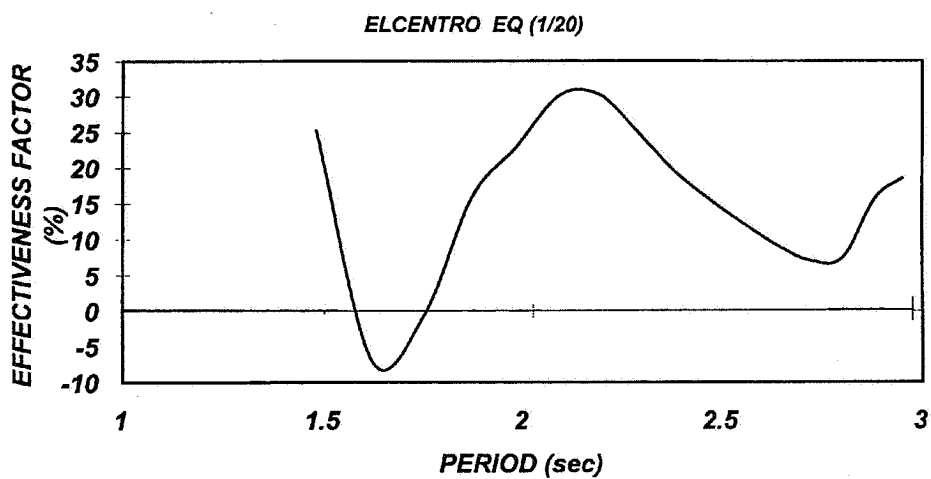
شکل ۱۲- تغییرات پاسخ بیشینه سازه‌ها



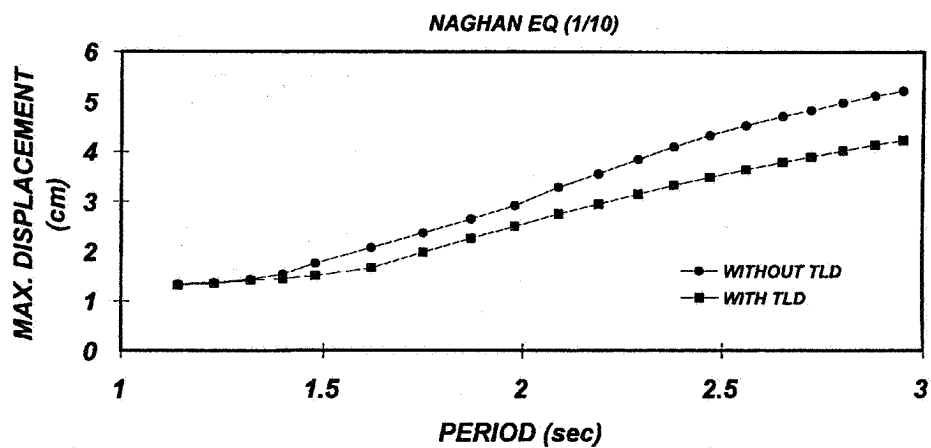
شکل ۱۳- تغییرات میزان کارایی متناظر با شکل (۱۲)



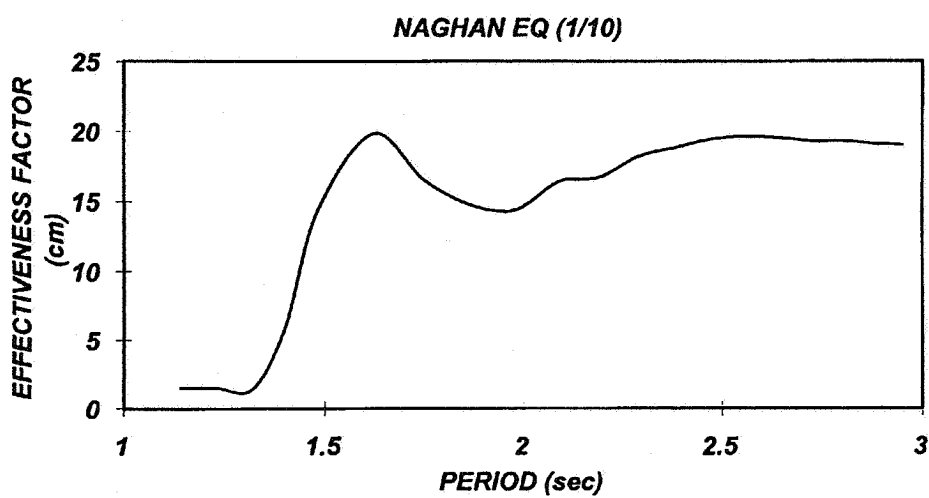
شکل ۱۴- تغییرات پاسخ حداکثر سازه‌ها



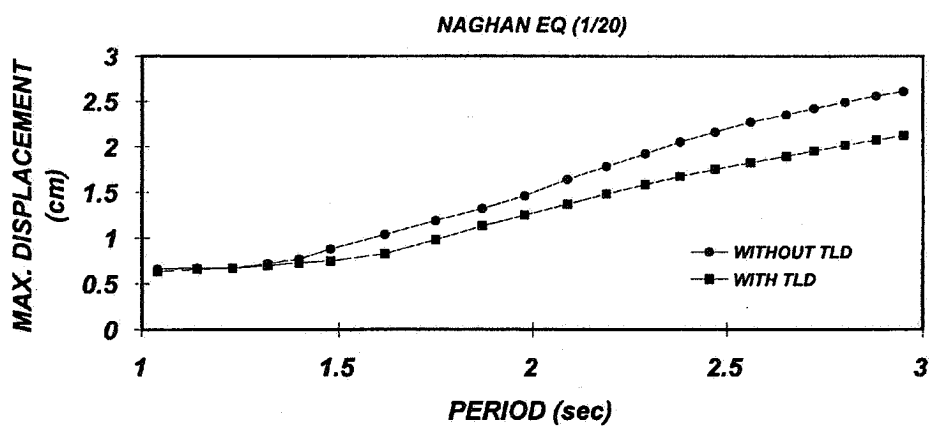
شکل ۱۵- تغییرات میزان کارایی متناظر با شکل (۱۴)



شکل ۱۶- تغییرات پاسخ بیشینه سازه‌ها



شکل ۱۷- تغییرات میزان کارایی متناظر با شکل (۱۶)



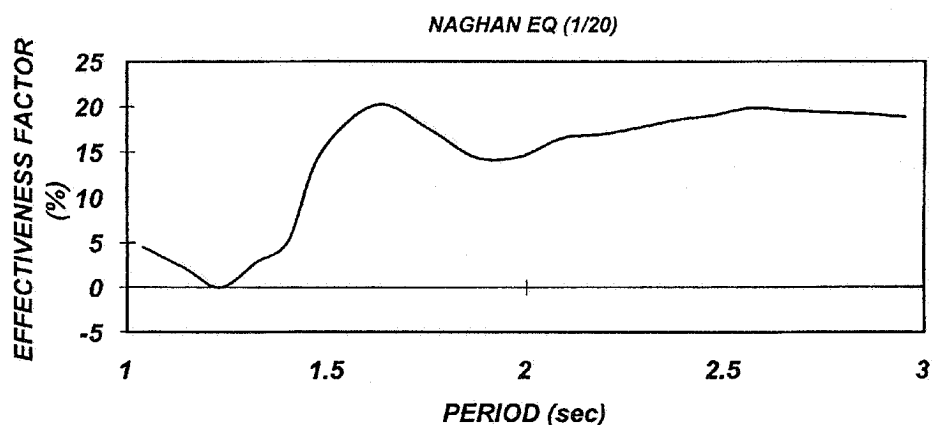
شکل ۱۸- تغییرات پاسخ بیشینه سازه‌ها

جدول ۳- مشخصات مدل‌های سازه‌ای مورد بررسی

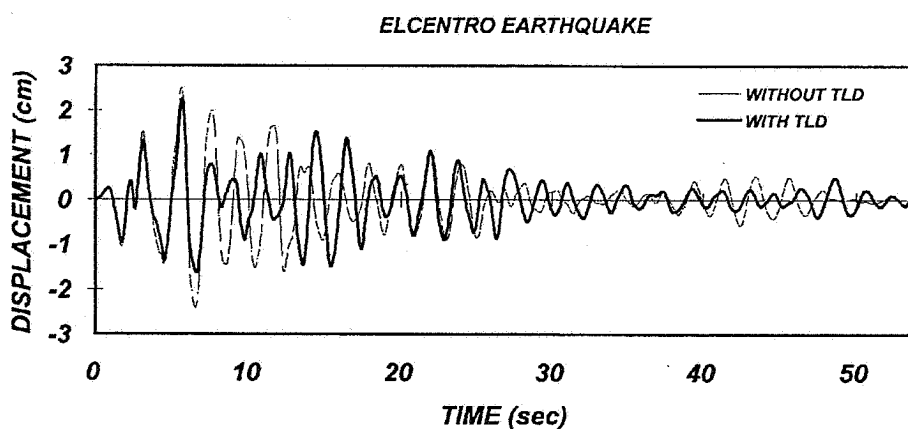
شماره	سختی طبقات	سختی طبقات	سختی طبقات	سختی طبقات	درصد مشارکت	درصد مشارکت
	۴ تا ۱	۸ تا ۵	۱۲ تا ۹	۱۶ تا ۱۳	۲۰ تا ۱۷	جرم مود اول
۱	۱۰۲/۵	۱۰۲/۵	۱۰۲/۵	۱۰۲/۵	۱۰۲/۵	۸۳
۲	۱۶۰	۱۲۴/۴۴	۸۸/۸۹	۵۳/۶۷	۲۶/۶۷	۷۱/۴
۳	۲۶۶/۶۷	۱۷۷/۷۸	۱۲۴/۴۴	۷۱/۱۱	۸/۹	۵۲/۸

جدول ۴- نتایج حاصل از بررسی سازه‌های جدول (۳)

شماره مدل	تغییر مکان بیشینه بدون TLD (cm)	TLD برای نسبت جرم ۰.۴٪	میزان کارایی (%)	نسبت جرم حالت دوم	تغییر مکان بیشینه با TLD (cm)	میزان کارایی (%)
۱	۳/۲۵	۲/۸۶	۱۲	-	-	-
۲	۴/۳۹	۳/۱۴	۲۸/۵	۰/۰۴۷	۲/۹۸	۳۲/۱
۳	۴/۹۹	۳/۳۱	۳۳/۷	۰/۰۶۳	۳/۰۲	۳۹/۵



شکل ۱۹- تغییرات میزان کارایی متناظر با شکل (۱۸)



شکل ۲۰- قسمتی از تاریخچه زمانی تغییر مکان سازه شماره (۱۲) با TLD و بدون TLD

جدول ۵- نتایج مربوط به ترکیب TLD و سیستم جداسازی

پایه LRB

تغییر مکان	سازه تنها	۹/۹۲
پیشینه (cm)	سازه جداسازی شده	۲/۳۲
	سازه در حالت جداسازی به همراه TLD	۲/۱۱

TLD و سیستم جداسازی LRB در کاهش ارتعاشات ناشی از زلزله، برای یک سازه ده طبقه بررسی شده است. جرم و سختی طبقات این سازه بترتیب 100Ton و $400 \frac{\text{Ton}}{\text{cm}}$ هستند و نسبت میرایی مودهای اول و دوم سازه ۰/۰۵ است. زمان تناوب مود اول ارتعاش این سازه 2.56 sec افزایش یافته است. حداکثر تغییر مکان سازه تحت اثر زلزله «کامل و کاهش» نیافته ال سسترو و در حالتی مختلف محاسبه و در جدول (۵) درج شده است. از مقایسه این مقادیر می توان نتیجه گرفت که استفاده از TLD به همراه جداسازی پایه دارای عملکردی در حدود ۱۰ درصد نسبت به سازه ایزوله شده تنها بوده است. علت پایین بودن میزان عملکرد TLD در این حالت احتمالاً مرتبط با میزان جرم مؤثر مودی مربوط به مود اول ارتعاشی است که برابر با ۹۹ درصد جرم کل سیستم است. طبقاً برای بررسی امکان افزایش عملکرد TLD در این گونه سازه ها، نیاز به انجام مطالعات پارامتریک بیشتری خواهد بود. در هر صورت نتایج حاصله نشان دهنده آن است که سیستم ترکیبی پیشنهادی امکان استفاده از TLD را برای سازه های متعارف با ارتفاع متوسط و یا کوتاه فراهم می سازد.

۸- نتیجه گیری

کارایی سیستم TLD در کنترل پاسخ لرزه ای سازه ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار ضمن استخراج معادله های تلاطم مایع کم عمق درون مخزن مستطیلی (TLD) و نیز معادله های اندرکنش TLD و سازه، نسبت به حل عددی آنها در حالات مختلف اقدام شد. در حالت تحریک هارمونیک، نتایج نشان دهنده حداکثر کارایی در فرکانسهای تحریک برابر و یا نزدیک به فرکانس مود اول ارتعاشی سازه در حالات به ترتیب بدون و با شکست موج بوده

زمان تناوب مود اول یکسان و برابر 2.56 sec، زمان تناوب و درصد مشارکت مودهای بالاتر آنها، متفاوت باشند. در هر سه حالت، جرم هر طبقه 100ton، نسبت میرایی مودهای اول و دوم ۰/۰۵ و رکورد زمین لرزه مورد استفاده مؤلفه S00E زلزله ال سسترو سال ۱۹۴۰ است که به میزان $\frac{1}{10}$ رکورد واقعی مقیاس شده است. مشخصات سه حالت مورد بررسی در جدول (۳) درج شده اند. برای حالتی دوم و سوم تغییر مکان پیشینه سازه با دو نسبت جرم مایع مختلف محاسبه شده است. نخست مشابه حالت اول، ۰/۰۴ جرم مودی تعمیم یافته سازه برای مایع TLD در نظر گرفته شده و در حالت دوم نسبت به گونه ای انتخاب شده که مقدار جرم مایع با حالت قبل برابر باشد. نتایج حاصل در جدول (۴) خلاصه شده است.

ملاحظه می شود که با افزایش درصد مشارکت مودهای بالاتر، میزان کارایی TLD افزایش می یابد. این افزایش تا بدان حد است که افزایش تغییر مکان سازه را جبران می کند. همچنین همان طور که پیش بینی می شد، افزایش نسبت جرم و به تبع آن مقدار مایع درون TLD ها به افزایش میزان کارایی انجامیده است. از طرفی در افزایش حجم مایع درون TLD ها، می بایست به اثرات ناشی از $P-\Delta$ که می تواند پایداری سیستم سازه ای را به مخاطره اندازد، توجه کرد. طی بررسی جداگانه ای که برای سازه های ۲۰ و ۳۰ طبقه مورد نظر در این مطالعه، با جرم متمرکزی برابر با ۴ درصد جرم مؤثر مودی، مود اول، در بالاترین تراز سازه و با استفاده از برنامه ETABS90 انجام شد، اثر $P-\Delta$ در پاسخ سازه قابل اغماض بوده است.

۷- ترکیب توأم TLD و سیستم جداسازی پایه LRB

استفاده از TLD برای سازه های متوسط و یا کوتاه (با زمان تناوب غالب کمتر از یک ثانیه) با توجه به ابعاد مورد نیاز برای مخازن TLD میسر نیست. ترکیب توأم TLD و سیستم جداسازی پایه از نوع LRB^۶ با توجه به اثری که این گونه سیستمهای جداسازی پایه در افزایش زمان تناوب سازه ها دارند، می تواند به عنوان یک روش برای فراهم کردن زمینه استفاده از TLD برای کاهش پاسخ لرزه ای این گونه سازه ها مطرح شود. سیستم جداسازی LRB مجموعه ای از لایه های لاستیکی با ورقه های فولادی در بین آنهاست که توسط یک فنر و یک میراگر (دمپر) قابل مدل کردن است. به عنوان یک «مطالعه مقدماتی»، اثر استفاده از ترکیب توأم

رکوردهای زلزله «کاهش نیافته»، TLD عملکرد مثبتی در کاهش پاسخ لرزه‌ای سیستم سازه‌ای داشته است. این امر نشان دهنده آن است که سیستم ترکیبی پیشنهادی، امکان استفاده از TLD را برای سازه‌های متعارف تحت اثر زلزله‌های واقعی امکانپذیر می‌سازد. طبقاً بررسی امکان افزایش عملکرد TLD در کاهش پاسخ لرزه‌ای این‌گونه سازه‌ها نیازمند انجام مطالعات بیشتری خواهد بود.

است. در حالت تحریک زلزله با شتاب کاهش یافته (به میزان $\frac{1}{40}$ و $\frac{1}{10}$)، مطالعات انجام شده نشان دهنده میزان کارایی TLD تا حدود ۳۰ درصد پاسخ لرزه‌ای، بسته به نوع خاک ساختگاه و نیز فرکانس ارتعاشی سازه است. با افزایش سهم مشارکت مودهای بالاتر در ارتعاش سازه، کارایی TLD تا میزان قابل ملاحظه‌ای (به حدود ۴۰ درصد) افزایش می‌یابد. در صورت استفاده از ترکیب TLD با سیستم ایزوله پایه از نوع LRB مشاهده شد که ضمن استفاده از

واژه نامه

1. TLD (tuned liquid damper)
2. translational
3. dissipation term

4. crest
5. frequency shift coefficient
6. LRB (laminated rubber bearing)

مراجع

1. Sun, L. M., Fujino, Y., Pacheco, B. M., and Chaiseri, P., "Modeling of Tuned Liquid Damper (TLD)," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 41-44, pp. 1883-1894, 1992.
2. Fujii, k., Tamura, Y., Sato, T., and Wakahara, T., "Wind-Induced Vibration of Tower and Practical Applications of Tuned Sloshing Damper," In Sato (editor), *Bluff Body Aerodynamics*, pp. 263-282, 1990.
3. Wakahara, T., Ohyama, T., and Fujii, K., "Suppression of Wind-Induced Vibration of a Tall Building Using Tuned Liquid Damper," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 41-44, pp. 1895-1906, 1992.
4. Tamura, Y., Fujii, K., and Ohtsuki, "Effectiveness of Tuned Liquid Dampers," *Engineering Structures*, Vol. 17, No. 9, pp. 609-621, 1995.
5. Sun, L. M., Fujino, Y., Pacheco, B. M., and Isobe, M., "Nonlinear Waves and Dynamic Pressures in Rectangular Tuned Liquid Damper (TLD) -Simulation and Experimental Verification," *Structural Eng./ Earthquake Eng.*, Vol. 6, No. 2, pp. 251s-262s, (Proc. of JSCE No. 410/1-12), 1989.
6. Koh, C. G., Mahatma, S., and Wang, C. M., "Theoretical and Experimental Studies on Rectangular Liquid Dampers Under Arbitrary Excitations," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, pp. 17-31, 1994.
7. Shimizu, T., and Hayama, S., "Nonlinear Response of Sloshing Based on The Shallow Water Wave Theory," *JSME International Journal*, Vol. 30, No. 236, pp. 806-813, 1987.
8. Gill, F., "A Process For The Step by Step Integration of Differential Equations in an Automatic Digital Computing Machine," *Proc., CANMB., PHIL.*, Sec., 47, pp. 96-108, 1951.
9. Celia, M. A., and Gray, W. G., *Numerical Methods for Differential Equations* (Fundamental Concepts for Scientific and Engineering Application), Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
۱۰. ملکان، آ. "بررسی کارایی میراگر مایع هماهنگ شده (Tuned Liquid Damper) یا (TLD) در کنترل پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای برشی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی دکتر فیاض رحیم‌زاده‌روفوی، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۷.