

# مدل‌سازی عددی کاربرد میراگر مایع تنظیم شده در برج‌های فرودگاهی با در نظر گرفتن اندرکنش بین سازه و میراگر

سجاد رضائی، دانشجوی دکتری، دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران  
سید مهدی زهرائی (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

E-mail: mzahrai@ut.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۵

دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۲۹

## چکیده

برای کاهش ارتعاشات سازه‌ها در سال‌های اخیر میراگرهای مایع تنظیم شده بطور وسیع استفاده گردیده است. هدف از این تحقیق بررسی عددی تاثیر میراگرهای مایع تنظیم شده در کاهش ارتعاش برج‌های فرودگاهی است. این سازه‌ها جزو اولین سازه‌هایی می‌باشند که میراگرهای مایع در آن‌ها استفاده شده است. برای مطالعه نحوه تاثیر میراگر بر روی سازه، برج فرودگاهی که خود با یک سازه‌ی یک درجه آزادی ساده معادل شده است، به تنهایی و با حضور پنج نوع میراگر مختلف تحت تحریک ناشی از هفت زلزله شاخص مورد بررسی قرار گرفت. تفاوت این میراگرها در اندازه مخزن و میزان آب درون آن بود. جریان آب درون میراگرها با استفاده از معادلات جریان کم‌عمق مدل گردید. نتایج حاصل نشان داد، تمام میراگرهای متصل شده باعث کاهش نوسانات برج فرودگاهی گردیده است، همچنین برای جرم مساوی آب برای میراگرهای مختلف، با افزایش ابعاد مخزن و در عوض کم کردن تعداد  $TLD$ ها میزان کاهش ارتعاش جانبی بیشتر می‌شود. کاهش تغییر مکان حداکثر با استفاده از این میراگرها با توجه به نوع میراگر مورد استفاده از ۵ تا ۵۴ درصد میزان اولیه است.

واژه‌های کلیدی: کنترل ارتعاشات، برج فرودگاهی، میراگر مایع تنظیم شده، TL

### ۱. مقدمه

روش های کنترل ارتعاشات یکی از روش های بهسازی سازه ها و طراحی ساختمان ها در برابر بارهای دینامیکی است. این روش باعث کنترل پاسخ سازه تحت بارهای دینامیکی شده و بدون اینکه نیاز به مقاوم سازی تک تک عناصر مقاوم سازه ای باشد، با تعبیه وسایل و تجهیزات مناسبی در ساختمان باعث کاهش تغییر مکان و بهبود پاسخ دینامیکی سازه می شوند. یکی از روش های کنترل ارتعاشات سازه تحت تاثیر بارهای لرزه ای، استفاده از وسایل اتلاف انرژی یا میراگرها است. کاربرد این وسایل هم در طراحی ساختمان های جدید و هم در مقاوم سازی ساختمان های موجود به سادگی امکان پذیر است. این سیستم ها با جذب و استهلاك درصد بالایی از انرژی ورودی به سازه، شرایط ایمن و پایداری را نسبت به ساختمان های مشابه فراهم می کنند. میراگرها بجای افزایش شکل پذیری عناصر سازه ای تکیه بر مستهلک نمودن انرژی لرزه ای دارند. امروزه استفاده از میراگرها به عنوان روشی اقتصادی و عملی برای افزایش مقاومت دینامیکی سازه ها قابل ذکر بوده، بنابراین استفاده از آن جهت مقاوم سازی ساختمان ها و بناهای متعارف نیز امکان پذیر است. ایده استفاده از میراگرهای مایع تنظیم شده برای کاهش نوسانات در سازه های مهندسی عمران از اواسط دهه ۱۹۸۰ میلادی شروع شد. سان و همکاران [Sun et al. 1991] اولین مدل های عددی برای مدلسازی جریان درون TLD را ارائه کردند. محققین زیادی در زمینه مدلسازی عددی و آزمایشگاهی اندرکنش میراگرهای مایع تنظیم شده و سازه، بررسی و ارائه بهینه ترین TLD، طراحی بهینه برای میراگرهای مایع تنظیم شده در زمانی که محدودیت فضایی وجود دارد و... مطالعاتی انجام داده اند [Kanok and Tam, 1999, Banerji et al. 2000, Love and Tait, 2012, رضائی، Rezaie, 2014]. مدلسازی اندرکنش بین سازه چند درجه آزادی با میراگر مایع تنظیم شده را بصورت عددی بررسی نمود. دی متئو و

همکاران [Di Matteo et al. 2015] یک طرح ابتکاری جدید برای طراحی میراگرهای مایع ستونی تنظیم شده ارائه نمودند.

در زمینه حمل و نقل نیز استفاده هایی از روش کنترل سازه برای کاهش نوسانات پیشنهاد شده است که از بین آنها طرح هایی برای کاهش نوسانات پل های معلق با استفاده از میراگر جرمی [Casalotti et al. 2014]، کاهش نوسانات پل های راه آهن با یک میراگر نیمه فعال [Luu et al., 2014]، کاهش ارتعاشات پل های فولادی با یک میراگر جدید هیستریزس [Yamazaki et al. 2016] و استفاده از میراگرهای MR در کنترل پل های بتنی [Li et al. 2016] را اشاره نمود. تامورا و همکاران [Tamura et al. 1996] و [Tamura et al. 1992] کاهش نوسانات برج های فرودگاهی در اثر نیروی باد را با استفاده از میراگر مایع تنظیم شده مورد مطالعه قرار دادند.

سازه های برج فرودگاهی جزو سازه های مهم در فرودگاه ها بوده ولی با این وجود مطالعات اندکی در زمینه تاثیر زلزله بر این سازه ها انجام گرفته است. در این مطالعه اندرکنش بین میراگر مایع تنظیم شده و سازه برج فرودگاهی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر استفاده از این میراگرها بر عملکرد لرزه ای سازه مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

### ۲. معادله دینامیکی سازه برج فرودگاهی با

#### میراگر مایع تنظیم شده

در برج های فرودگاهی معمولاً تمرکز اجرام و تجهیزات در قسمت بالای برج بوده و لذا می توان به خوبی آنها را با یک مدل یکدرجه آزادی تقریب زد. (شکل ۱) حرکت سازه متصل به TLD را از رابطه زیر بدست آورد:

که در آن  $\omega_s$  فرکانس سازه یک درجه آزادی (که از فرمول

$$\omega_s = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

بدست می‌آید) و  $\zeta_s$  میرایی سازه است. برای حل معادله دینامیکی در این تحقیق از روش نیومارک که یکی از روش‌های انتگرال‌گیری مستقیم است، استفاده خواهد شد.

نحوه حرکت سیال درون TLD که از روابط جریان کم عمق تبعیت می‌کند. [Sun et al., 1991] اثر سازه بر روی TLD را با اضافه کردن دو جمله به سمت راست معادله جریان کم عمق بصورت زیر لحاظ می‌کنیم:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

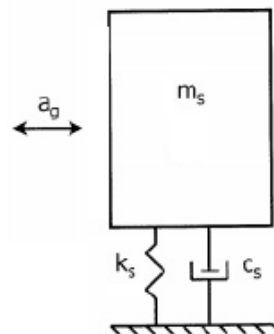
$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial(uP)}{\partial x} + g(h + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{gP|P|}{C^2(h + \eta)^2} = -\lambda u(h + \eta) - \ddot{X}(h + \eta)$$

در معادله بالا  $\eta$  مقدار بالا آمدگی آب نسبت به مقدار اولیه،  $h$  ارتفاع سطح اولیه آب،  $P$  میزان دبی در واحد عرض،  $u$  سرعت در واحد عرض،  $P = u(h + \eta)$ ،  $g$  شتاب گرانش،  $v_t$  ضریب پخش و  $C$  ضریب شزی است. در جملات اضافه شده به معادله جریان کم عمق،  $\ddot{X}$  شتاب در طبقه‌ی فوقانی سازه (یا طبقه‌ای که TLD در آن نصب شده است) است.  $\lambda$  پارامتری مرتبط با میرایی و برای تاثیرات مرزی در کف مخزن، دیواره‌های کناری و مشارکت سطح آزاد تعریف شده است و می‌توان از طریق تجربی بصورت زیر محاسبه کرد:

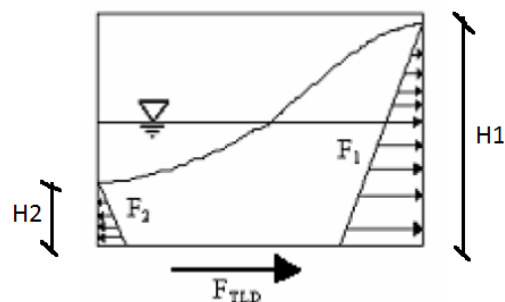
$$\lambda = \frac{1}{h + \eta} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega_s v} \left[ 1 + \frac{2h}{b} + s \right] \quad (5)$$

در رابطه بالا  $v$  ویسکوزیته سینماتیک آب،  $s$  پارامتری دلالت‌کننده بر مشارکت سطح آزاد که می‌توان برابر یک در نظر گرفت و  $\omega_s$  فرکانس پایه‌ای خطی تلاطم آب در مخزن است که می‌توان از رابطه زیر بدست محاسبه نمود:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} \quad (6)$$



شکل ۱. سازه یک درجه ساده مدلسازی شده



شکل ۲. توزیع نیروهای وارد بر جداره مخزن از طرف سیال

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R + F \quad (1)$$

که در آن  $M$ ،  $C$  و  $K$  به ترتیب جرم، میرایی و سختی؛  $R$  بار اعمالی خارجی و  $\dot{U}$  و  $\ddot{U}$  به ترتیب شتاب، سرعت و جابجایی هستند.  $F$  در رابطه بالا برابر با نیروی کنترلی است که در هر لحظه از طرف TLD بر سازه وارد می‌شود و می‌توان از فرمول زیر محاسبه نمود (شکل ۲):

$$F_{TLD} = F_1 - F_2 = \frac{\rho g b}{2} (H_1^2 - H_2^2) \quad (2)$$

در سازه‌های یک درجه آزادی معادله (۱) می‌تواند بصورت زیر ارائه گردد:

$$\ddot{U} + 2\omega_s \zeta_s \dot{U} + \omega_s^2 U = \frac{R + F}{M} \quad (3)$$

## مدلسازی عددی کاربرد میراگر مایع تنظیم شده در برج های فرودگاهی

(۷-ج)

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gP|P|}{C^2(h+\eta)^2} = 0 \rightarrow \frac{P^3 - P^2}{\Delta t} + \frac{gP|P|}{C^2(h+\eta)^2} = 0$$

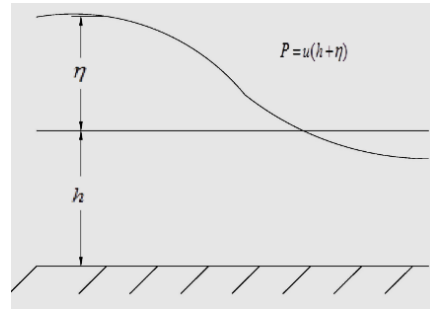
بعد از حل سه معادله بالا بصورت جداگانه معادله (۴) در نهایت به معادله زیر تبدیل می شود که این دو معادله باید بصورت همزمان حل شوند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} &= 0 & (۸) \\ \frac{\partial P}{\partial t} + g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} &= 0 \end{aligned}$$

### ۳. مدلسازی عددی

#### ۳-۱ برج فودگاهی ناگازاکی

این برج فرودگاهی دارای فرکانس 1.07Hz در دو جهت جانبی است که نسبت میرایی بحرانی این دو مد 0.9% است. یک مجموعه ۲۵ عددی از میراگرهای مخزن استوانه‌ای چند طبقه نصب گردید که دوازده تای آن در اتاق کنترل و بقیه در راه‌پله‌های قسمت فوقانی برج نصب گردیدند. هر میراگر شامل هفت لایه منفرد با قطر 0.38m، ارتفاع 0.07 متر و عمق آب 0.048m می شود. جرم هر TLD، 38kg است که باعث ایجاد یک نسبت جرمی  $\mu=0.015$  در مد اصلی می شود. میراگرها تقریباً با سازه تنظیم شده و دارای اولین تشدید ویسکوز در 1.02Hz می باشند. نتایج بدست آمده برای حالت قبل از نصب میراگر در شکل ۵-الف نشان داده شده است. این نتایج جهت تعیین نسبت‌های میرایی بحرانی استفاده شدند. شکل‌های ۴-ب و ۴-پ به ترتیب پاسخ هفت و ۲۵ میراگر را بعد از نصب نشان می دهند



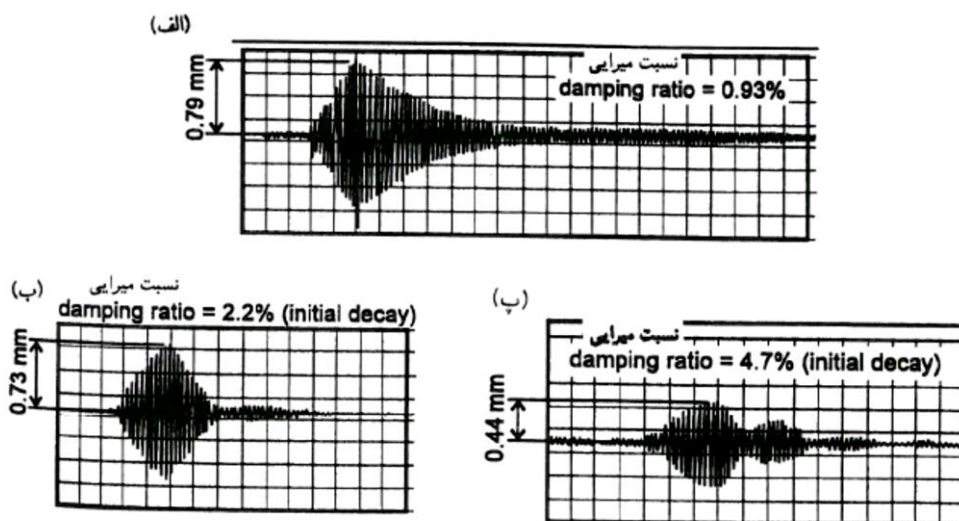
شکل ۳. شکل افقی جریان کم عمق در جهت حرکت آب

برای حل این معادله از روش تفکیک زمانی استفاده شده است، این روش یکی از روش‌های کسری می باشد. روش تفکیک زمانی از روش‌های مرسوم در حل معادلات جریان کم عمق بوده و علاوه بر این که حل کلی معادلات را به میزان زیادی راحت تر می نماید از دقت بسیار بالایی برخوردار می باشد. در این روش به جای حل معادله کلی سعی می شود معادله را به صورت معادلات کوچکتر درآورده و این معادلات کوچک شده را به ترتیب و با استفاده از نتایج نهایی همدیگر حل نماید. این روش حتی این امکان را به کاربر می دهد که برای حل هر قسمتی براساس نیاز از روش صریح یا ضمنی استفاده نماید. با استفاده از این روش معادله (۴) بصورت سه معادله ۷ تبدیل می شود که بطور جداگانه حل می گردند [Leveque,2004]:

(۷-الف)

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial(uP)}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{P^1 - P^n}{\Delta t} + \frac{\partial(uP)}{\partial x} = 0 \quad (۷-ب)$$

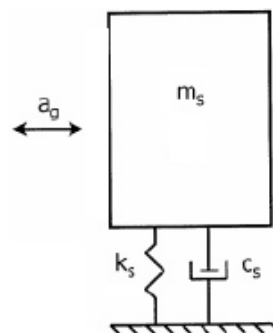
$$\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0 \rightarrow \frac{P^2 - P^1}{\Delta t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0$$



شکل ۴: نوسانات ارتعاش آزاد میرای بدست آمده از برج فرودگاهی ناگازاکی [Constantinou and Soong]

شده در فرتن و همچنین در برنامه SAP مدل سازی گردید و تحت تاثیر زلزله السترو قرار گرفت. شکل ۶ نتایج صحت سنجی را نشان می دهد.

برای برج مورد نظر، سازه یک درجه آزادی ساده شده را می توان بصورت زیر در نظر گرفت:



شکل ۵: برج فرودگاهی ناگازاکی معادل شده با یک سازه یک درجه آزادی

### ۳-۲ طراحی TLD

در این بخش به طور مختصر نحوه طراحی یک TLD بهینه توضیح داده خواهد شد. برای این منظور پنج گام بصورت زیر پیشنهاد می شود: [Banerji et al., 2000]

۱. تعیین فرکانس سازه،  $\omega_s$ ، و تعیین فرکانس پایه ای

$$(\omega_s = \omega_l), \omega_l$$

۲. محاسبه طول مورد نیاز برای مخزن تانک،  $2a$ ، از

معادله (۶)

$$\omega_l = \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} = \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh(\pi \Delta)}$$

میرایی در مدل سازی ثابت و برابر مقدار اولیه در نظر گرفته شده است.

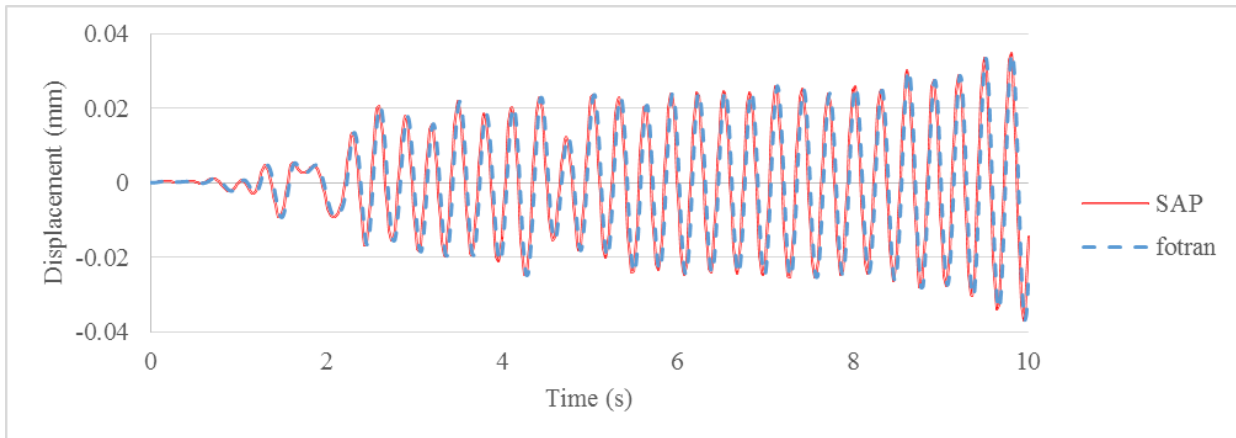
$$f = 1.07 \text{ Hz} \Rightarrow \omega_s = 2\pi f = 6.723 \left(\frac{\text{Rad}}{\text{s}}\right)$$

$$m_s = 63.3(\text{ton})$$

$$k_s = m_s \omega_s^2 = 2861 \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}}\right)$$

$$\zeta_s = 0.93\% \Rightarrow c_s = 2\zeta_s \omega_s m_s = 7.91$$

برای صحت سنجی سازه از برنامه SAP استفاده گردید بدین صورت که یک سازه یک درجه آزادی در برنامه نوشته



شکل ۶. نتایج صحت سنجی مدلسازی صورت گرفته

از نظر عملی TLD شماره ۱، یک TLD نشدنی است، برای همین کلا در مدلسازی در نظر گرفته نشده است. نسبت

در رابطه بالا  $\Delta$  نسبت عمق TLD،  $\Delta = \frac{h}{2a}$ ، و برابر با مقدار بهینه (حدود ۰/۰۵ تا ۰/۳۰) در نظر گرفته می شود.

#### ۴. تحلیل لرزه ای برج فرودگاهی

برای این مدلسازی از هفت طیف شتاب زلزله استفاده شده است. مشخصات این زمین لرزه ها در جدول ۲ آورده شده است. طیف شتاب های استفاده شده در این تحقیق مربوط به زلزله های با شتاب و قدرت بالایی می باشد که در نقاط مختلف دنیا به وقوع پیوسته است. به علت شدت شتاب زلزله های اعمالی و هم چنین عمق کم آب در بعضی از میراگرها امکان اینکه در قسمتی از کف میراگر بدون آب باشد و یا به علت شدت تشدیدهای اعمالی در سطح مایع پدیده شکست موج اتفاق بیافتد، که در مدل های هیدرولیکی مورد استفاده قابل آنالیز نمی باشند، شتاب تمام زلزله ها به میزان ۱۰٪ مقدار اصلی کاهش پیدا کرده است. مقایسه عملکرد TLD های مختلف بر روی سازه در اشکال ۷ تا ۱۳ آورده شده است.

قابل ذکر است در چنین مطالعاتی فقط بررسی حداکثر تغییر مکان سازه کافی نیست، به همین منظور برای بررسی دقیق تر نرم پاسخ سازه نیز چک می گردد. لذا جذر مجموع مربعات دامنه ها یا RMS سازه محاسبه گردید. فرمول محاسبه RMS برای توابع گسسته و پیوسته به صورت زیر است:

$$RMS = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (9)$$

جداول نرم پاسخ سازه در جداول ۳ تا ۹ آورده شده است.

۳. عرض TLD،  $b$ ، آن را برابر با طول TLD،  $2a$ ، در نظر بگیرید. ( $b = 2a$ ).

۴. جرم آب درون TLD،  $m_1$ ، را از فرمول  $m_1 = 2\rho hab$  محاسبه کنید ( $\rho$  برابر با جرم حجمی سیال درون TLD است). سپس نسبت جرم،  $\mu$ ، را برابر با ۴٪ قرار داده و تعداد TLD ها،  $N$ ، را از رابطه  $N = \mu \frac{m_s}{m_1}$  محاسبه نمایید ( $m_s$  برابر است با جرم سازه).

اگر فضای در دسترس برای نصب TLD ها در اختیار نباشد از تعداد TLD ها کم کنید، ولی این کم کردن تعداد TLD ها نباید به گونه ای باشد که نسبت جرم از ۱٪ کم تر شود.

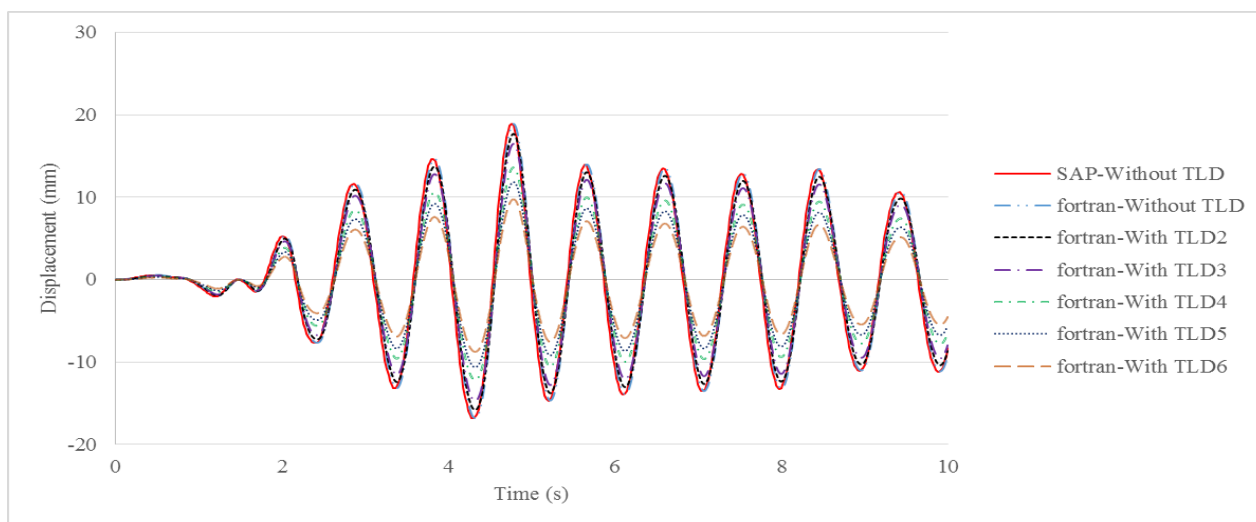
برای طراحی بهینه TLD برای این سازه، با توجه به مشخصات ذکر شده برای سازه مورد مطالعه در قسمت قبل، نسبت جرم برابر ۱/۵ درصد نظر گرفته شد و با تغییر نسبت عمق از ۵٪ تا ۳۰٪ شش نوع TLD برای این سازه طراحی شد. مشخصات این میراگرها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. TLD های طراحی شده

شماره TLD	نسبت عمق	طول تانک (cm)	ارتفاع آب درون تانک (cm)	وزن آب هر TLD (kg)	تعداد TLD مورد نیاز
1	0.05	11	0.5	0.06	15852
2	0.1	21	2.1	0.89	1065
3	0.15	30	4.5	4.03	236
4	0.2	38	7.6	10.95	87
5	0.25	45	11.2	22.35	43
6	0.3	50	15.1	37.96	25

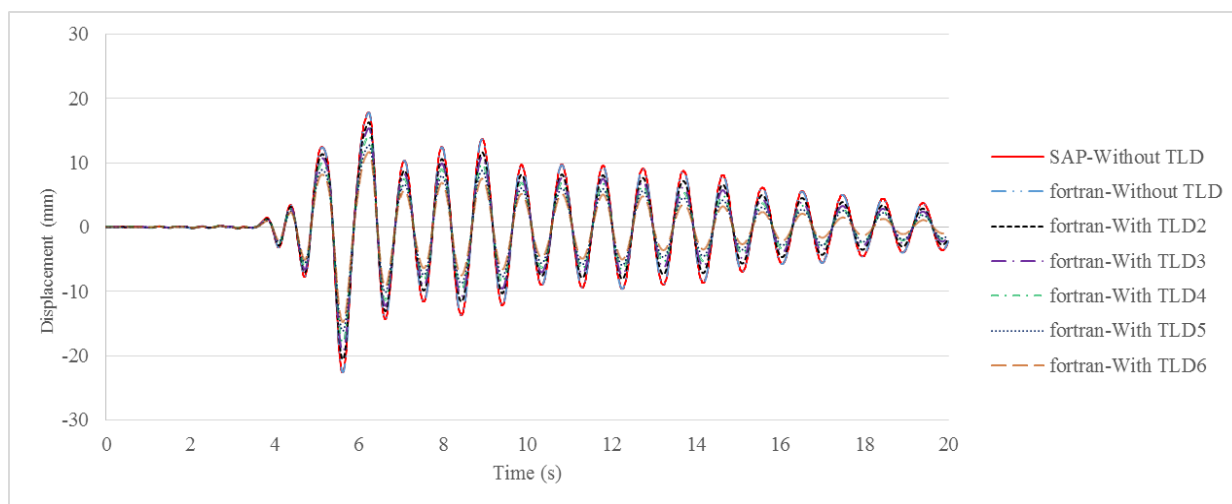
جدول ۲. مشخصات زلزله های اعمالی به مدل

PGA	سال وقوع	محل وقوع	زلزله مورد بررسی
0.34g	1940	دره امپریال - آمریکا	السترو
0.68g	1995	کوبه - ژاپن	کوبه
0.81g	1978	طیس - ایران	طیس
0.36g	1989	لوما پرایتا - آمریکا	لوما پرایتا
0.34g	1969	کالیفرنیا - آمریکا	پارک فیلد
0.45g	1992	اریزکان - ترکیه	اریزکان
0.26g	1994	دره سن فرناندو - آمریکا	نرتریج

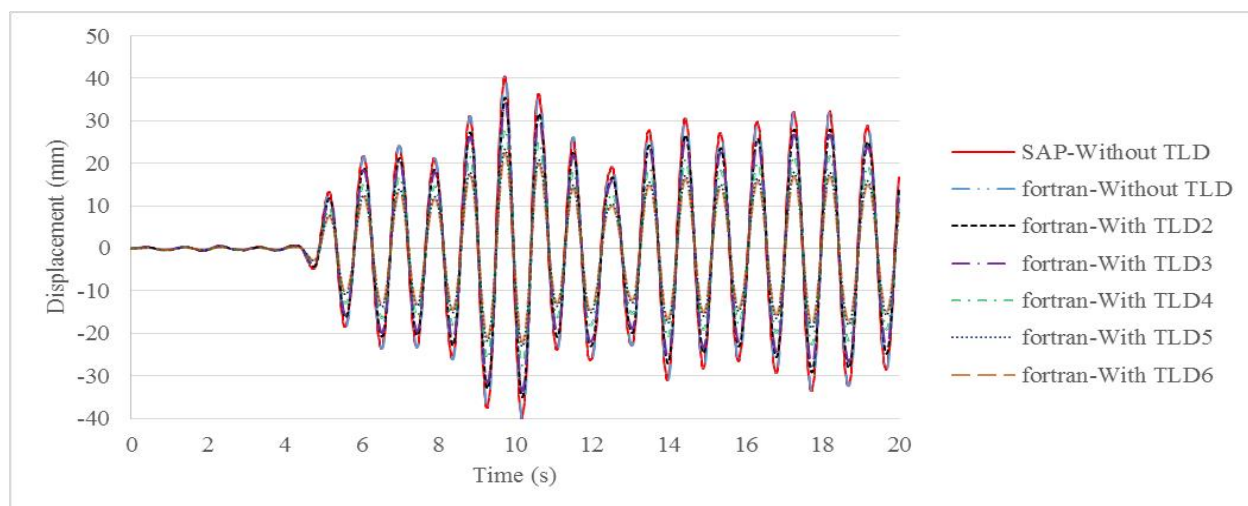


شکل ۷. نمودار تغییر مکان برج فرودگاهی در اثر ۱۰٪ زلزله الاسترو

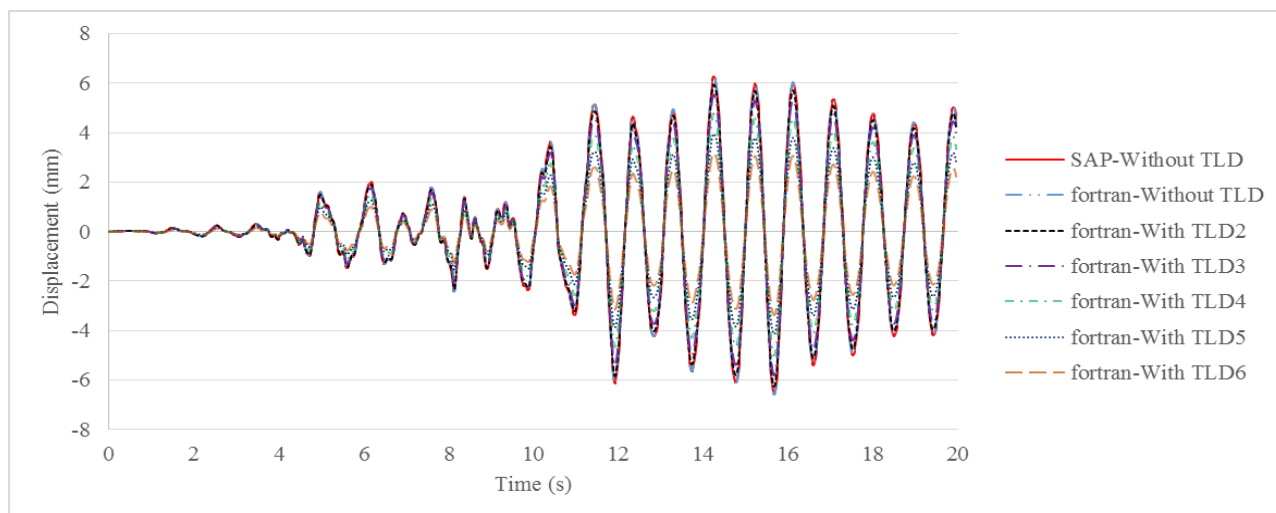
## مدلسازی عددی کاربرد میراگر مایع تنظیم شده در برج های فرودگاهی



شکل ۸. نمودار تغییر مکان برج فرودگاهی در اثر ۱۰٪ زلزله کویه

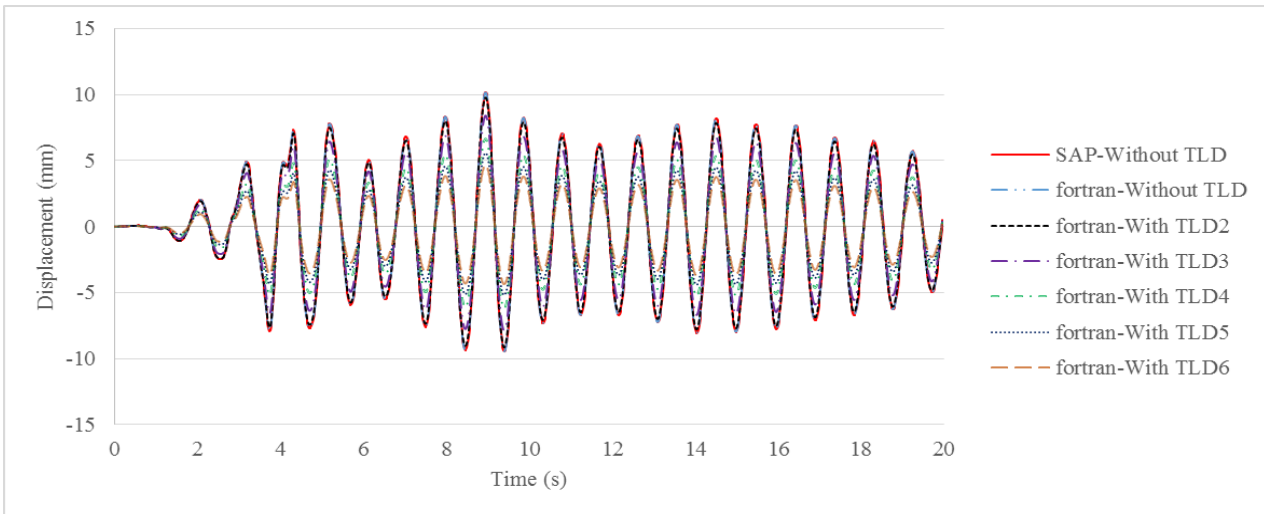


شکل ۹. نمودار تغییر مکان برج فرودگاهی در اثر ۱۰٪ زلزله طبس

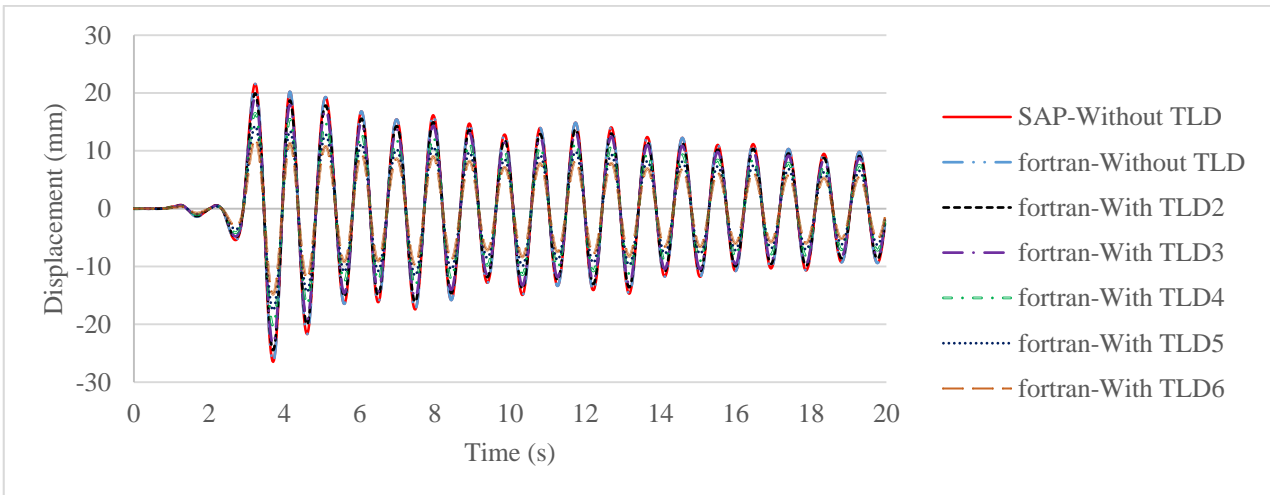


شکل ۱۰. نمودار تغییر مکان برج فرودگاهی در اثر ۱۰٪ زلزله لوما پریتا

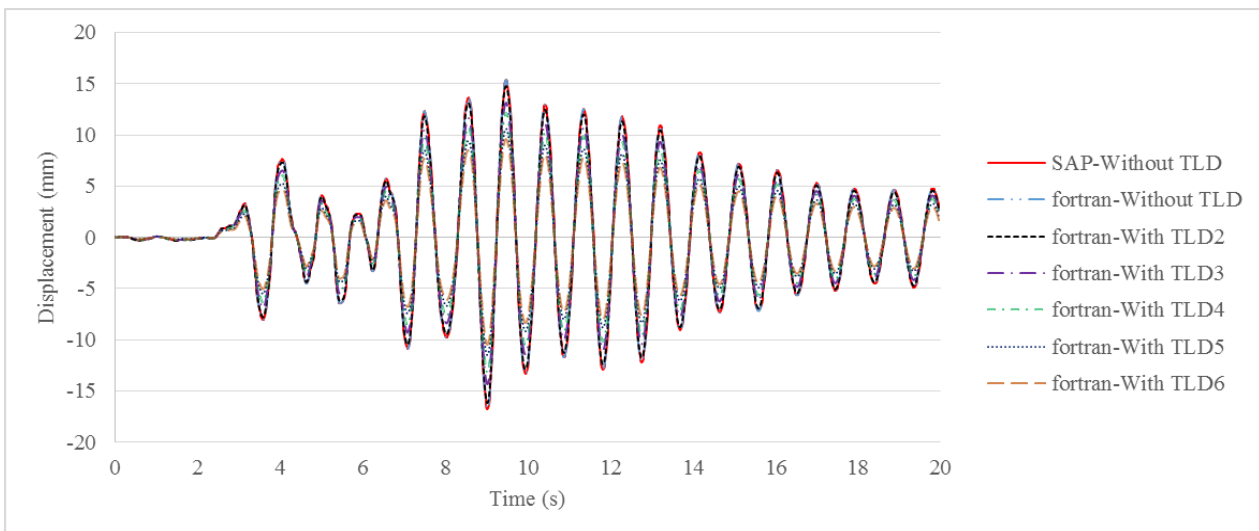




شکل ۱۱. نمودار تغییر مکان برج فرودگاهی در اثر ۱۰٪ زلزله پارک فیلد



شکل ۱۲. نمودار تغییر مکان برج فرودگاهی در اثر ۱۰٪ زلزله اریزکان



شکل ۱۳. نمودار تغییر مکان برج فرودگاهی در اثر ۱۰٪ زلزله نرتریج

## مدلسازی عددی کاربرد میراگر مایع تنظیم شده در برج های فرودگاهی

جدول ۳: نتایج آزمایش بر روی TLD های مختلف با شتاب ۱۰٪ زلزله السترو

شماره TLD	میزان کاهش		RMS (mm)	میزان کاهش RMS (%)	
	حداکثر تغییر مکان (mm)	حداکثر تغییر مکان (%)			
TLD بدون سازه	-	18.87	-	8.52	-
سازه با TLD	2	17.69	6.25%	8.10	4.93%
	3	16.51	12.51%	7.58	11.03%
	4	13.64	27.72%	6.42	24.65%
	5	11.91	36.88%	5.10	40.14%
	6	9.82	47.96%	4.36	48.83%

جدول ۴: نتایج آزمایش بر روی TLD های مختلف با شتاب ۱۰٪ زلزله کوبه

شماره TLD	میزان کاهش		RMS (mm)	میزان کاهش RMS (%)	
	حداکثر تغییر مکان (mm)	حداکثر تغییر مکان (%)			
TLD بدون سازه	-	40.53	-	17.47	-
سازه با TLD	2	35.50	12.41%	15.38	11.96%
	3	34.14	15.77%	13.82	20.89%
	4	27.97	30.99%	10.57	39.50%
	5	23.44	42.17%	10.19	41.67%
	6	22.50	44.49%	9.09	47.97%

جدول ۵: نتایج آزمایش بر روی TLD های مختلف با شتاب ۱۰٪ زلزله طبس

شماره TLD	میزان کاهش		RMS (mm)	میزان کاهش RMS (%)	
	حداکثر تغییر مکان (mm)	حداکثر تغییر مکان (%)			
TLD بدون سازه	-	22.60	-	6.11	-
سازه با TLD	2	20.55	9.07%	5.52	9.66%
	3	19.40	14.16%	5.12	16.20%
	4	18.02	20.27%	4.65	23.90%
	5	16.20	28.32%	4.15	32.08%
	6	14.83	34.38%	3.61	40.92%

جدول ۶. نتایج آزمایش بر روی TLD های مختلف با شتاب ۱۰٪ زلزله لوماپریتا

TLD شماره	میزان کاهش		RMS (mm)	میزان کاهش RMS (%)
	حداکثر تغییر مکان (mm)	حداکثر تغییر مکان (%)		
TLD بدون سازه	-	6.58	2.62	-
TLD با سازه	2	6.23	2.42	7.63%
	3	5.82	2.35	10.31%
	4	4.99	2.01	23.28%
	5	4.16	1.59	39.31%
	6	3.35	1.35	48.47%

جدول ۷. نتایج آزمایش بر روی TLD های مختلف با شتاب ۱۰٪ زلزله پارکفیلد

TLD شماره	میزان کاهش		RMS (mm)	میزان کاهش RMS (%)
	حداکثر تغییر مکان (mm)	حداکثر تغییر مکان (%)		
TLD بدون سازه	-	10.19	4.77	-
TLD با سازه	2	9.80	4.53	5.03%
	3	8.42	3.41	28.51%
	4	6.66	3.11	34.80%
	5	5.58	2.51	47.38%
	6	4.71	2.31	51.57%

جدول ۸. نتایج آزمایش بر روی TLD های مختلف با شتاب ۱۰٪ زلزله اریزکان

TLD شماره	میزان کاهش		RMS (mm)	میزان کاهش RMS (%)
	حداکثر تغییر مکان (mm)	حداکثر تغییر مکان (%)		
TLD بدون سازه	-	26.48	9.72	-
TLD با سازه	2	24.46	8.94	8.02%
	3	23.48	8.68	10.70%
	4	20.23	7.35	24.38%
	5	17.58	6.40	34.16%
	6	14.77	5.82	40.12%

## مدلسازی عددی کاربرد میراگر مایع تنظیم شده در برج های فرودگاهی

جدول ۹. نتایج آزمایش بر روی TLD های مختلف با شتاب ۱۰٪ زلزله نرتیج

میزان کاهش RMS (%)	RMS (mm)	میزان کاهش حداکثر تغییر مکان (%)	حداکثر تغییر مکان (mm)	شماره TLD
-	6.03	-	16.75	سازه بدون TLD
2.82%	5.86	3.70%	16.13	2
13.60%	5.21	15.64%	14.13	3
19.73%	4.84	21.37%	13.17	4
33.17%	4.03	31.28%	11.51	5
38.31%	3.72	37.61%	10.45	6

سازه موردنظر با یک سازه یک درجه آزادی معادل شد و با استفاده از روش اجزای محدود مدل گردید. جریان درون میراگر مایع نیز با استفاده از فرمول های مربوط به جریان کم عمق و روش حجم محدود مدل گردید.

برنامه کلی نوشته شده قابلیت تحلیل سازه ی یک درجه آزادی به تنهایی و با استفاده از انواع میراگرها را برای انواع زلزله ها را دارا است. سازه موردنظر برای هفت زلزله و برای هر زلزله شش بار (یکبار بدون متصل کردن TLD و پنج بار با اتصال TLD) در برنامه نوشته شده و یکبار در برنامه SAP مورد بررسی قرار گرفت و میزان جابجایی انتهای فوقانی سازه ثبت گردید.

مدلسازی صورت گرفته، توانمندی میراگرهای مایع در کاهش نوسانات ناشی از زلزله در برج های فرودگاهی اثبات نمود. نتایج حاصل نشان داد تمام میراگرهای متصل شده باعث کاهش نوسانات برج فرودگاهی گردیده است، هم چنین برای جرم ثابت آب برای میراگرهای مختلف، با افزایش ابعاد مخزن و در عوض کم کردن تعداد TLD ها میزان کاهش ارتعاش بیشتر می شود. کاهش تغییر مکان حداکثر با استفاده از این میراگرها با توجه به نوع میراگر مورد استفاده از ۵ تا ۵۴ درصد میزان اولیه است.

### ۶. مراجع

-رضائی، سجاد (۱۳۹۳) "مدلسازی اندرکنش بین سازه و میراگر مایع تنظیم شده"، پایان نامه ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

همان طور که از نمودارهای بدست آمده مشخص است در حرکات طبیعی زمین TLD سازه در فازهای اولیه نوسان بصورت موثر کار نمی کند و زمانی که حرکات شدیدتر آغاز می شود TLD شروع به کارکرد موثر می کند. هم چنین تمام TLD ها بعد از طی مراحل اولیه به طور موثری میزان ارتعاش سازه را کاهش داده اند، میزان این کاهش با افزایش نسبت عمق افزایش می یابد. با بررسی نرم پاسخ سازه نیز مشاهده می شود ارتعاشات کلی سازه ها در همه حالات بهبود یافته است.

میزان کاهش تغییر مکان حداکثر در سازه تجربی مورد بررسی در حدود ۴۴ درصد و در مدلسازی صورت گرفته از ۵ تا ۵۴ درصد برای TLD های مختلف متغیر بوده است. این تفاوت را باید در هندسه TLD های استفاده شده در سازه اصلی (که بصورت دایره ای بودند) و TLD های مورد بررسی در مدلسازی صورت گرفته (که بصورت مستطیلی فرض شده است) و همچنین تفاوت در نوع ارتعاشات بوجود آورنده در سازه اصلی که ارتعاش ناشی از باد مورد بررسی قرار گرفته است با ارتعاشات حاصل از زمین لرزه که مبنای این تحقیق است جستجو کرد. با وجود این تفاوت ها TLD های با نسبت ارتفاع ۲۵٪ و ۳۰٪ بسیار مشابه سازه اصلی عمل نموده اند.

### ۵. نتیجه گیری

در این مطالعه تاثیر استفاده از میراگرهای مایع تنظیم شده در رفتار لرزه ای برج های فرودگاهی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور باید سازه مورد نظر به همراه میراگرهای متصل به آن در برنامه فرتن مدلسازی می شد. برای مدلسازی برج فرودگاهی،

vibration control in civil engineering”,  
Wien – New York: Springer –Verlag

-Sun, L.M., Fujino Y., Pacheco B.M. and Chaiseri P. (1991) “Modelling of tuned liquid damper (TLD)”, Proceedings of 8th International Conference on Wind Engineering .IAWE, London, Canada

-Tamura, Y., Kohasaka, R., Nakamura, O., Miyashita, K. and Modi, V. J. ( 1996) “Wind-induced responses of an airport tower — efficiency of tuned liquid damper” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 65 , Issues 1–3, pp. 121–131.

-Tamura, Y., Kohasaka, R. and Modi, V. J. ( 1992) “Practical application of nutation damper for suppressing wind-induced vibrations of airport towers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 43 , Issues 1–3, pp. 1919-1930.

-Yamazaki, S., Usami, T. and Nonaka, T. (2016) “Developing a new hysteretic type seismic damper (BRRP) for steel bridges”, Engineering Structures, Vol. 124, pp. 286-301.

-Banerji, P., Murudi, M., Shah, A.H. and Popplewell, N (2000) “Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, pp. 587-602

-Casalooti, A., Arena, A. and Lacarbonara, W. (2014) “Mitigation of post-flutter oscillations in suspension bridges by hysteretic tuned mass dampers”, Engineering Structures, Vol. 69, pp. 62-71

-Di Matteo, A., Lo Lacono, F., Navarra, G. and Pirrotta, A. (2015) ”Innovative modeling of Tuned Liquid Column Damper motion”, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 23, Issues 1–3, pp. 229–244

-Kanok-Nukulchai, W. and Tam, T. (1999) “Structure-fluid interaction model of tuned liquid dampers”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 46, pp. 1541-1588

-Leveque, R. J. (2004) “Finite-volume method for hyperbolic problems”, Cambridge, Cambridge University Press.

-Li, Z. X., Chen, Y. and Shi, Y. D. (2016) “Seismic damage control of nonlinear continuous reinforced concrete bridges under extreme earthquakes using MR dampers, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 88, pp. 386-398

-Love, J. S. and Tait, M. J. (2012) “A preliminary design method for tuned liquid dampers conforming to space restrictions”, Engineering Structures, Vol. 40, pp. 187-197

-Luu, M., Martinez-Rodrigo, M. D., Zabel, V. and Konke, C. (2014) ”Semi-active magnetorheological dampers for reducing response of high-speed railway bridges”, Control Engineering Practice, Vol. 32, pp. 147–160

-Soong, T. T. and Constantinou, M., C. (1994) “Passive and active structural

## مدلسازی عددی کاربرد میراگر مایع تنظیم شده در برج های فرودگاهی

سجاد رضائی، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران گرایش سازه های هیدرولیکی در سال ۱۳۹۲ را از دانشگاه تهران اخذ نمود. ایشان از سال ۱۳۹۳ در حال تحصیل در مقطع دکتری در رشته عمران گرایش سازه های هیدرولیکی است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان کنترل ارتعاشات در سازه و مدلسازی عددی اندرکنش بین سازه و آب است.



سید مهدی زهرائی، درجه کارشناسی در رشته عمران را در سال ۱۳۶۶ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سازه را در سال ۱۳۶۸ از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۷۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی سازه از دانشگاه اتاوا شده و در سال ۱۳۷۸ پس از طی دوره پسا دکتری از مرکز تحقیقات ملی کانادا، به عنوان عضو هیات علمی در دانشکده عمران دانشگاه تهران فعالیت نموده است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان انواع روشهای کنترل ارتعاشات در سازه، بارگذاری انواع سازه ها و طراحی و بهسازی لرزه ای سازه های فولادی و بتنی بوده و در حال حاضر با تالیف بیش از ده کتاب و ۳۰۰ مقاله در نشریات و کنفرانسهای معتبر، استاد دانشکده عمران دانشگاه تهران است.

