

شبیه‌سازی عددی اثر شکل ظرف بر رفتار دینامیکی میراگر مایع تنظیم شده

سید مهدی زهرائی

دانشیار، دانشگاه تهران، تهران، ایران
mzahrai@ut.ac.ir:

سیروس کاکویی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران، ایران
s.kakouei@ut.ac.ir:

کلید واژه‌ها: میراگر مایع تنظیم‌شده، پرده‌های قابل تنظیم، ظرف مکعب مستطیلی و استوانه‌ای، نیروی کنترلی اینرسی ثانویه

چکیده

میراگرهای مایع تنظیم‌شده به دلیل هزینه نگهداری و نصب پایین و عملکرد مناسب بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش دو شکل مکعب مستطیلی و استوانه‌ای از ظروف میراگرهای مایع تنظیم‌شده با چهار پره با زاویه ۴۵ درجه بررسی شده است. سیال مورد استفاده در ظرف‌ها آب می‌باشد. برای بررسی این موضوع از نرم‌افزار GAMBIT برای مش‌بندی ظرف‌ها و نرم‌افزار FLUENT 6.3.26 برای تحلیل جریان درون ظرف‌ها استفاده شده است. نتایج نشان داد که ظرف مکعب مستطیلی نیروی کنترلی و میرایی بیشتری نسبت به ظرف استوانه‌ای ایجاد می‌کند، به طوری که در فرکانس ۰/۶۳ حداکثر نیروی کنترلی و میرایی ظرف مکعب مستطیل به ترتیب ۳۶/۳۵ درصد و ۹/۲۲ درصد بیشتر از ظرف استوانه‌ای می‌باشد. همچنین با افزایش عمق آب درون ظرف، مقدار میرایی برای هر دو ظرف کاهش می‌یابد.

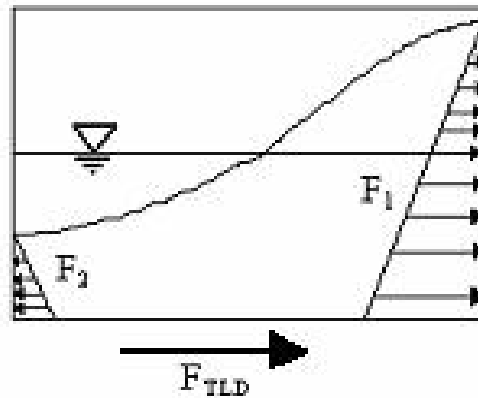
مقدمه

زمانی که سازه‌های عمرانی در برابر بارهای دینامیکی مانند زلزله قرار می‌گیرند دچار ارتعاش می‌شوند. وجود این ارتعاشات باعث خسارات مالی و جانی می‌گردد. بنابراین نیاز اساسی به کنترل سازه‌ها می‌باشد.

میراگر مایعی تنظیم‌شده (TLD) ^۱ یک میراگر مکانیکی غیر فعال است که به منظور کاهش ارتعاشات ناخواسته سازه از طریق تلاطم سیال در یک ظرف صلب طراحی می‌شود. هزینه ساخت و نگهداری پایین آنها از مزیت عمده این نوع میراگرها می‌باشد. TLD به عنوان ابزار کنترل ارتعاشات در بسیاری از سازه‌های مهندسی عمران شامل ساختمان‌های خیلی انعطاف‌پذیر، سازه‌های برجی و ساختمان‌های بلند مرتبه دلالت دارد. میراگر مایع تنظیم‌شده به راحتی با کوچکترین حرکت سازه جابجا می‌شود، در عین حال علاوه بر این قابلیت، می‌توان از آن به عنوان مخزن آب ساختمان استفاده کرد. در این میراگرها انرژی ارتعاشی بصورت اصطکاک در لایه‌های مرزی سیال، مشارکت سطح آزاد و شکست موج مستهلک می‌شود. عموماً مایع مورد استفاده در داخل TLD آب است. در این سیستم اختلاف فشار دینامیکی مایع، روی سطح جداره‌های انتهایی ظرف، باعث ایجاد نیروی کنترلی از نوع اینرسی ثانویه می‌گردد که ارتعاشات سازه را کاهش می‌دهد (شکل ۱). به عبارت دیگر اساس نیروهای کنترلی ایجاد شده در سیستم TLD اندازه حرکت سیال داخل ظرف است.

تلاطم سیال به عنوان روشی برای استهلاک انرژی در TLD توسط محققین بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است. ساتو و نیز مودی و همکاران از اولین کسانی بودند که کاربرد سیستم‌های میراگر TLD را برای کنترل ارتعاشات سازه‌ها پیشنهاد نمودند. ساتو (۱۹۸۷) ظرف مستطیلی، و مودی و همکاران (۱۹۸۸) ظرف تیوبی شکل را مطالعه کرده‌اند. مطالعات گسترده‌ای روی پارامترهای مختلف میراگر TLD توسط فوجینو و همکاران (۱۹۸۸) صورت گرفت. این پارامترها عبارت بودند از: نسبت فرکانس مایع به فرکانس سازه، ویسکوزیته مایع، زبری کف ظرف، ارتفاع سقف ظرف و نسبت جرمی بین میراگر و سازه. اندرکنش بین میراگر و TLD و سازه برای دامنه‌های کوچک تحریک، توسط چایسری و همکاران (۱۹۸۹) به دو شکل تحلیلی و آزمایشگاهی صورت گرفت. ایشان نشان دادند که پس از تحریک حرکت موجی، آب در TLD به سرعت در یک یا دو پرید توسعه پیدا می‌کند. به عبارت دیگر حرکت موجی آب بلافاصله پس از اتمام تحریک تمام نمی‌شود و یک تاخیر زمانی قبل از توقف





شکل ۱: شکل‌گیری نیروی کنترل ناشی از میراگرهای مایع با در نظر گرفتن مقطع طولی ظرف (زهرائی و حیدرزاده، ۱۳۸۳)

کامل حرکت آب وجود دارد. این رفتار موج پیوسته، اغلب در خلال نوسان آزاد، موجب پدیده "ضربان" یا تعدیل دامنه می‌شود که به روشنی مصداق رفتار معکوس TLD است. برای مقابله با این رفتار تلاش‌های متعددی برای افزایش میرایی و اصلاح TLD صورت گرفت که حرکت موج را سریعاً پس از توقف حرکت اجباری متوقف کند. همچنین مطالعات عددی کاملی توسط سان (۱۹۹۱) انجام گرفت. او یک مدل عددی را توسعه داد که اندرکنش مابین سازه و میراگر TLD را در نظر می‌گرفت و دو ضریب برای شکست موج ارائه نمود. هر دو ضریب توسط کارهای آزمایشگاهی کالیبره شدند. مدل سان بعدها توسط کوه و همکاران (۱۹۹۴) برای تحریکات دلخواه بسط داده شد. پس از نصب سیستم میراگر TLD در هتل شین یوکوهاما مطالعات بعدی روی آن توسط واکاهارا و همکاران (۱۹۹۴) صورت گرفت و مشخص شد که ارتعاشات ناشی از باد به تراز قابل‌پذیرشی از دیدگاه نیازهای راحتی و سرویس‌دهی کاهش یافته است. همچنین دماتی (۲۰۰۲) به مطالعه عددی و آزمایشگاهی TLD روی سازه در زلزله پرداخته است. نتایج این پژوهش نشان داد که با استفاده از TLD می‌توان حتی در زلزله‌های قوی تا ۶۰ درصد از پاسخ ساختمان ۸ طبقه فولادی کاست که این امر به نحو چشمگیری باعث افزایش عملکرد سازه می‌گردد. در پژوهش دیگری زهرائی و همکاران (۲۰۱۲) نیز از دریچه‌های قابل تنظیم در مخزن مستطیلی استفاده نمودند. ایشان نشان دادند بهترین حالت برای کنترل سازه تحت تحریک‌های سینوسی در زاویه جهت‌گیری برابر ۷۵ درجه می‌باشد.

جانگ و همکاران (۲۰۱۲) اثر ارتفاع پره‌های قائم را روی نوسانات مایع در ظرف مستطیلی در حالت سه‌بعدی به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس این پژوهش با افزایش ارتفاع پره‌ها مقدار گردابه‌های تولیدی ناشی از جدایی جریان از پره‌ها، ضعیف‌تر و کمتر می‌شود. تاکاهارا و کیمورا (۲۰۱۲) با بررسی روی پاسخ فرکانسی نوسانات ظرف حلقوی استوانه‌ای تحت تحریک‌های مومونیک به این نتیجه رسیدند که ویژگی‌های غیرخطی حرکت آب درون ظرف حلقوی استوانه‌ای بسیار پیچیده‌تر از ظرف استوانه‌ای است، علاوه بر این نشان دادند که تحلیل غیرخطی برای تخمین پاسخ نوسانات بسیار مهم می‌باشد.

در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار Fluent 6.3.26 رفتار لرزه‌ای میراگرهای مکعب مستطیلی و استوانه‌ای با ۴ پره قابل تنظیم در زاویه ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

طراحی میراگر مایع تنظیم شده

طراحی بهینه TLD باید بر اساس فرکانس مد اول سازه باشد. در نتیجه باید ابعاد TLD و عمق آب بگونه‌ای تنظیم شوند که با مد اول سازه برابر گردند. فرکانس طبیعی تالطم آب در میراگرهای مایع برای ظروف آب با مقاطع مستطیلی و دایره‌ای به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ بدست می‌آیند:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{ng}{D} \tanh\left(\frac{nh}{D}\right)} \quad (1) \quad \text{برای ظرف مکعب مستطیل}$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3.68ng}{D} \tanh\left(\frac{3.68nh}{D}\right)} \quad (2) \quad \text{برای ظرف استوانه‌ای}$$

h ارتفاع آب درون ظرف، L طول ظرف مکعب مستطیل و D قطر ظرف استوانه‌ای می‌باشد. همچنین n شماره مد سازه که در این پژوهش برابر یک در نظر گرفته شده است.

برای بررسی اثر شکل مقطع در رفتار لرزه‌ای میراگر مایع تنظیم شده در زاویه ۴۵ درجه، ظرف‌ها در فرکانس‌های یکسان مورد بررسی قرار گرفت. طول، عرض و ارتفاع ظرف مکعب مستطیل به ترتیب برابر با ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۴ و قطر و ارتفاع ظرف استوانه‌ای به ترتیب برابر با ۰/۱۶ و ۰/۴ در نظر گرفته شد. ارتفاع آب درون ظرف‌ها با استفاده از روابط ۱ و ۲ بدست آمد که در جدول ۱ ارائه شده است.



جدول ۱: ارتفاع آب درون ظرف‌های مکعب مستطیلی و استوانه‌ای

فرکانس	ارتفاع آب درون ظرف مکعب مستطیل (متر)	ارتفاع آب درون ظرف استوانه‌ای (متر)
۰/۶۳	۰/۰۶	۰/۰۴۳
۰/۷۵	۰/۰۹	۰/۰۶۴
۰/۸۵	۰/۱۲	۰/۰۸۴

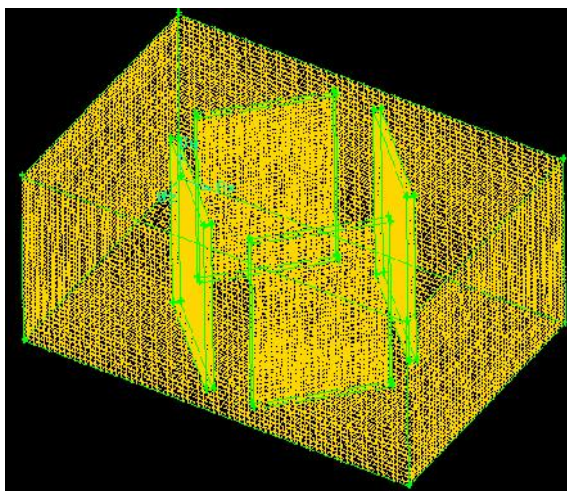
نیروی کنترلی که در این پژوهش برای کاهش ارتعاشات سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد از فشار دینامیکی‌ای که روی سطح جداره‌های انتهایی ظرف اثر می‌کند تولید می‌شود. اختلاف فشار ناشی از تفاوت رقوم سطح آزاد مایع در جداره‌های انتهایی به صورت یک نیروی برشی در کف مخزن ظاهر می‌گردد. نیروی کنترل ناشی از میراگرهای مایع تنظیم شده از رابطه ۳ بدست می‌آید:

$$F_{TLD} = \frac{b\rho g}{2} [(\eta_1 + h_0)^2 - (\eta_2 + h_0)^2] \quad (3)$$

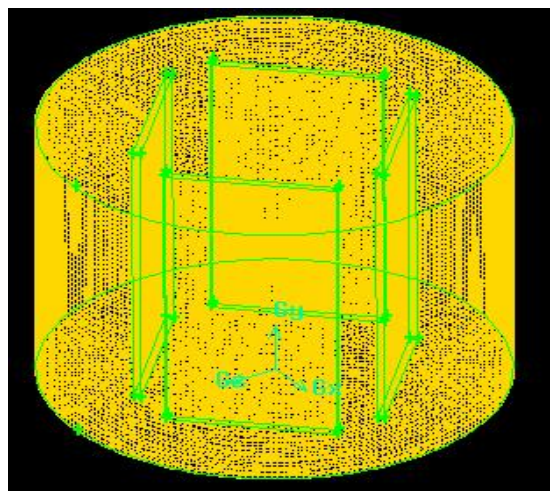
که در این رابطه، b برای ظرف مکعب مستطیلی، عرض و برای ظرف استوانه‌ای، قطر می‌باشد. η_1 و η_2 سطح آزاد مایع در جداره‌های انتهایی ظرف، h_0 ارتفاع آب ساکن در ظرف، F_{TLD} ، نیروی کنترل ناشی از میراگر می‌باشد. برای محاسبه η_1 و η_2 باید معادلات حاکم بر تلاطم مایع در میراگر را در طول زمان زلزله حل نمود تا در هر لحظه موقعیت η_1 و η_2 بدست آید. برای اعمال تحریک ظرف‌ها، ظرف‌ها با شتاب ثابتی برابر با $1/3$ متر بر مجذور ثانیه مدت $0/5$ ثانیه به حرکت درآمدند. در این شرایط آب درون ظرف‌ها شروع به ارتعاش آزاد خواهد کرد و می‌توان از تحلیل آن نیروی کنترلی سازه را بدست آورد.

مدلسازی عددی

برای شبیه‌سازی جریان درون ظروف از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLUENT 6.3.26 که قادر است معادلات ناویراستوکس را به صورت سه‌بعدی برای هر سیال در حال حرکت حل نماید، استفاده شد. از آنجایی که در نظر است یک تلاطم آبی کم‌عمق در داخل یک مخزن مدل‌سازی شود، لازم است که از یک مدل دو فازی استفاده شود. بنابراین بهترین روش برای مدل‌سازی مسائل مرتبط با دو سیال غیراختلاط‌پذیر یعنی حجم سیال (Volume Of Fluid) انتخاب شده است. در این روش به ازای هر فازی که وارد می‌شود، متغیری به جزء حجمی فاز در سلول محاسباتی، معرفی می‌شود. در هر حجم کنترل، مجموع جزء حجمی تمام فازهای موجود در آن برابر واحد است. بسته به مقادیر جزء حجم هر فاز در یک سلول، سلول می‌تواند معرف خصوصیات یک یا چند فاز باشد. از آنجایی که تراکم جریان مورد توجه نیست، الگوریتم حل معادلات ناویر-استوکس بر مبنای فشار مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین با توجه به اینکه امواج در حیطه‌ی جریان‌های غیردائمی طبقه‌بندی می‌شوند، نوع فرمول‌بندی مسئله به صورت ضمنی و نسبت به زمان نیز غیردائمی منظور گردیده و از اثرات پیشرفت گردابه‌ها و آشفتگی جریان صرف‌نظر گردید. برای ساخت هندسه مدل از نرم‌افزار GAMBIT استفاده شده است. شرط مرزی WALL برای جداره‌های ظرف و شرط مرزی PRESSURE_INLET برای جداره فوقانی ظرف انتخاب گردید. شکل ۲ مش‌بندی ظرف‌ها را نشان می‌دهد.



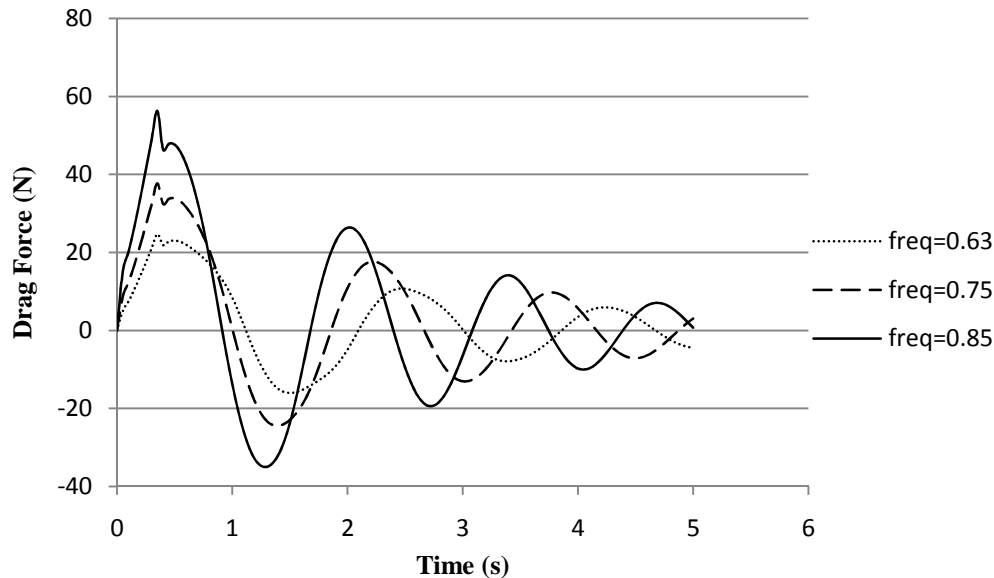
(ب)



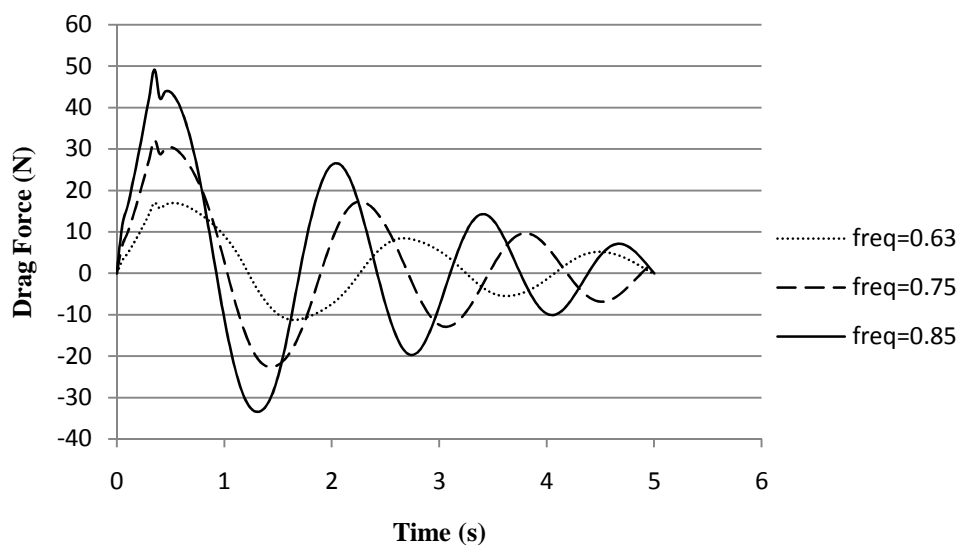
(الف)

شکل ۲: مش‌بندی ظرف‌ها (الف) - ظرف استوانه‌ای ب - ظرف مکعب مستطیلی

شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب تغییرات نیروی کنترلی وارده بر ظرف‌های مکعب مستطیلی و استوانه‌ای را در فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهند. با افزایش فرکانس در یک طول ثابتی از ظرف مکعب مستطیلی، ارتفاع آب درون ظرف افزایش می‌یابد که با افزایش ارتفاع آب، نیروی دراگ افزایش می‌یابد. بطور مشابه این نتیجه در یک قطر ثابت در ظرف استوانه‌ای نیز بدست آمده است.



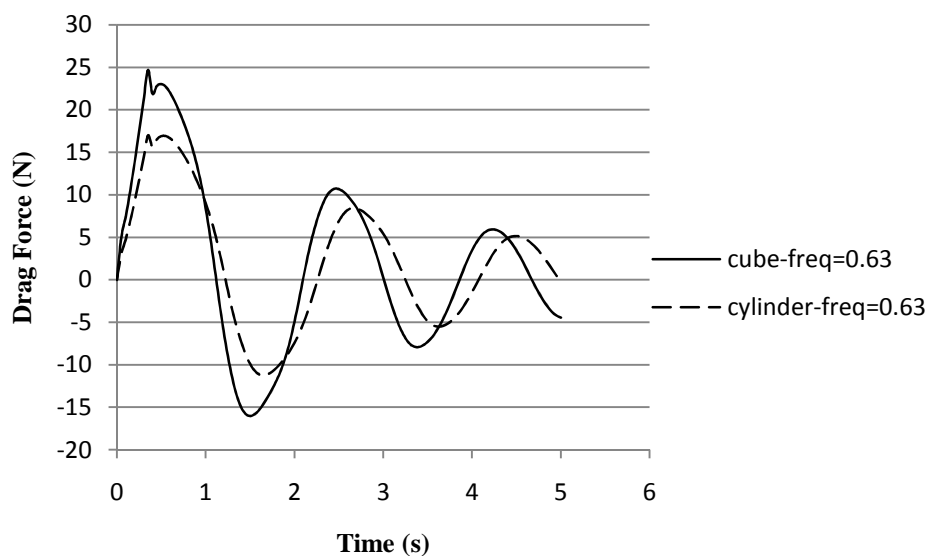
شکل ۳: تغییرات نیروی کنترلی وارده بر ظرف مکعب مستطیل با فرکانس‌های مختلف



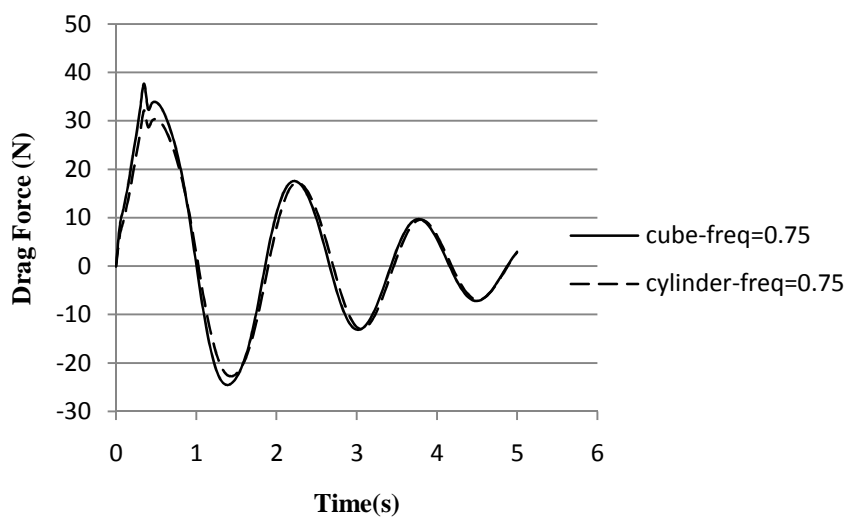
شکل ۴: تغییرات نیروی کنترلی وارده بر ظرف استوانه‌ای با فرکانس‌های مختلف

نیروی کنترلی وارد بر مخزن در 0.5 ثانیه اول ناشی از شتاب اعمال شده به میدان بوده است و نیروی کنترلی ناشی از تلاطم سیال بعد از این نقطه آغاز می‌گردد. با توجه به نمودارهای رسم شده، با کاهش تلاطم آب درون ظرف، اختلاف تراز آب در دو سمت ظرف کاهش یافته، در نتیجه نیروی کنترلی وارده از طرف سیال به ظرف در حال کاهش می‌باشد.

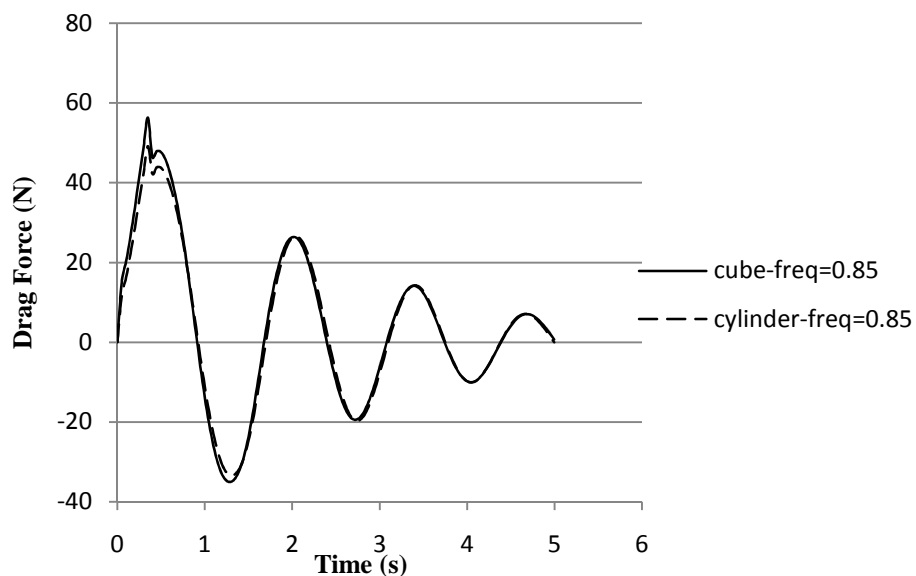
شکل‌های ۵، ۶ و ۷ به ترتیب نیروی کنترلی را در فرکانس‌های 0.63 ، 0.75 و 0.85 هرتز در هر دو ظرف مکعب مستطیلی و استوانه‌ای نشان می‌دهند.



شکل ۵: تغییرات نیروی کنترلی وارده بر ظرف‌های استوانه‌ای و مکعب مستطیلی با فرکانس $0.63/\text{هرتز}$



شکل ۶: تغییرات نیروی کنترلی وارده بر ظرف‌های استوانه‌ای و مکعب مستطیلی با فرکانس $0.75/\text{هرتز}$



شکل ۷: تغییرات نیروی کنترلی وارده بر ظرف‌های استوانه‌ای و مکعب مستطیلی با فرکانس $0.85/\text{هرتز}$



با توجه به شکل‌های بالا، مشاهده می‌شود که مقدار نیروی کنترلی در ظرف مکعب مستطیل در هر ۳ فرکانس بیشتر از ظرف استوانه‌ای می‌باشد که با افزایش فرکانس، اختلاف نیروی کنترلی در دو ظرف کاهش می‌یابد. از آنجایی که در تمامی مدل‌سازی‌ها، تحریک پایه یکسان منظور شده است (شتاب $1/3$ متر بر مجذور ثانیه به مدت $0/5$ ثانیه) می‌توان میرایی سیستم را با استفاده از روش کاهش لگاریتمی بدست آورد. در جدول ۲ میرایی ظرف‌های مکعب مستطیلی و استوانه‌ای ارائه شده است.

جدول ۲: میرایی ظرف‌های مکعب مستطیلی و استوانه‌ای

فرکانس	میرایی ظرف مکعب مستطیل	میرایی ظرف استوانه‌ای
۰/۶۳	۰/۱۵۴	۰/۱۴۱
۰/۷۵	۰/۱۴۲	۰/۱۱۳
۰/۸۵	۰/۱۲۷	۰/۰۴۳

همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش عمق آب داخل ظرف‌ها، میرایی کاهش می‌یابد. این امر به دلیل کاهش تأثیر کشش سطحی سیال و همچنین مشارکت بیشتر آب در فرآیند تلاطم است. به عبارت دیگر نوع امواجی که تشکیل می‌شوند در عمق بیشتر آب، بیشتر متمایل به موج‌های ایستا هستند تا موج‌های انتقالی. در امواج انتقالی انرژی مورد نیاز برای انتقال موج از یک نقطه به نقطه دیگر از میدان گرفته می‌شود و بنابراین در عمق‌های پایین‌تر برای ادامه فرآیند تلاطم انرژی بیشتری صرف خواهد شد که در نتیجه میرایی بیشتری مورد انتظار است. با توجه به نتایج، میراگرهای با شکل مکعب مستطیل نسبت به میراگرهای استوانه‌ای در فرکانس یکسان، نیروی کنترلی و ضریب میرایی بزرگتری تولید می‌کنند.

نتیجه‌گیری

میراگر مایع تنظیم شده‌یک میراگر مکانیکی غیر فعال است که به منظور کاهش ارتعاشات ناخواسته سازه از طریق تلاطم سیال در یک ظرف صلب طراحی می‌شود. در این پژوهش TLD با دو شکل مقطع متفاوت بصورت عددی با استفاده از نرم‌افزار Fluent 6.3.26 مورد بررسی قرار گرفت. مبنای مقایسه‌ی دو شکل ظرف، فرکانس یکسان بوده است. با توجه به مدل عددی، میراگر مایع تنظیم شده مکعب مستطیلی، نیروی کنترلی بیشتری نسبت به میراگر مایع تنظیم شده استوانه‌ای تولید می‌کند به طوری که در فرکانس $0/63$ ، $0/75$ و $0/85$ مقدار حداکثر نیروی کنترلی ظرف مکعب مستطیل به ترتیب برابر $23/04$ ، $37/68$ و $56/31$ نیوتن و مقدار حداکثر نیروی کنترلی ظرف استوانه‌ای به ترتیب برابر $16/89$ ، $32/11$ و $49/15$ نیوتن بوده است. همچنین ظرف مکعب مستطیل میرایی بزرگتری نسبت به ظرف استوانه‌ای ایجاد نموده است.

فهرست مراجع

- Chaiseri P. Fujino V. Pacheco B. Sun L.M. (1989) Interaction of tuned liquid damper (TLD) and structure, theory experimental verification and application, Structural Engineering/Earthquake Engineering, 6(2):273-282.
- El Damatty A. A. (2002) Studies on the application of tuned liquid dampers to up-grade the seismic resistance of structures, ICLR Research, no. 17.
- Fujino Y. Chaiseri P. Sun L.M. (1988) Parametric studies on tuned liquid damper (TLD) using circular containers by free oscillation experiments, journal of structural engineering, 5:381-391.
- Jung J.H. Yoon H.S. Lee C.Y. Shin S.C. (2012) Effect of the vertical baffle height on the liquid sloshing in a three-dimensional rectangular tank, Journal of Ocean Engineering, 44: 79-89.
- Koh C.G. Mahtama S. Wang C. (1994) Theoretical and experimental studies on rectangular liquid dampers under arbitrary excitations, Journal of Earthquake Engineering and structural dynamics, 23: 17-31.
- Modi V. Welt F. (1988) Damping of wind induced oscillations through sloshing, Journal of wind Engineering and industrial Aerodynamics, 30: 85-94.
- Sato T. (1987) Tuned sloshing damper, Japan Journal of Wind Engineering, 32: 67-68.
- Sun L.M. Fujino Y. Paceno B. and Chaiseri P. (1991) Modeling tuned Liquid Damper, Proceedings of the 8th international Conference on Wind Engineering, Elsevier.
- Takahara H. Kimura K. (2012) Frequency response of sloshing in an annular cylindrical tank subjected to pitching excitation, Journal of Sound and Vibration, 331(13): 3199 – 3212.



Wakahara T. Shimada K. Tamura Y.(1994) Practical application of tuned liquid damper for all buildings, proceeding of the 12th ASCE Structures Congress, Atlanta Georgia,USA,851-856.

Zahrai S.M. Abbasi S. Samali B. Vrcelj Z. (2012)Experimental investigation of utilizing TLD with baffles in a scaled down 5-story benchmark building, Journal of Fluids and Structures, 28: 194-210.

زهرائی م و حیدرزاده م (۱۳۸۳) بررسی تحلیلی کاربرد میراگرهای مایع تنظیم شده برای کاهش ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، ایران.