

بررسی تجربی اثر تیغه‌های فولادی در کاهش ارتفاع موج سیال در مخازن استوانه‌یی فولادی روزمینی به کمک آزمایش میز لرزان

مجتبی کی‌پور سنگری* (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
نقدعلی حسین‌زاده (استادیار)
حمید توکلیان فردوسی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
بزهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (شماره ۲-۳، ص ۹۳-۹۹، یادداشت‌شماره ۱/۳)

هدف از این پژوهش، مطالعه‌ی کاهش ارتفاع تلاطم سیال در مخازن ذخیره‌ی فولادی روزمینی با استفاده از تیغه‌های میراگر فولادی حلقوی (بغل) است، که به دیواره‌ی مخزن متصل شده باشند. در این پژوهش، یک مخزن نمونه‌ی مقیاس شده با ضریب مقیاس هندسی ($\lambda_L = 1:16$) به عنوان نماینده‌ی مخازن مهارشده مورد بررسی آزمایشگاهی روی میز لرزان قرار گرفته است، که در آن نسبت ارتفاع سیال به قطر مخزن متفاوت در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها به وسیله‌ی میز لرزان در حالات با و بدون حضور بغل صورت پذیرفته است. سه رکورد زلزله‌ی واقعی پس از مقیاس‌بندی به عنوان تحریک ورودی مدل توسط میز لرزان تولید شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بغل‌ها آثار قابل ملاحظه‌یی در کاهش ارتفاع تلاطم سیال دارند، و بنابراین به عنوان میراگرهای متغیر در مخازن موردنظر قابل استفاده هستند.

واژگان کلیدی: مخازن ذخیره‌ی فولادی روزمینی، تیغه‌های میراگر (بغل)، تلاطم سیال، میز لرزان.

۱. مقدمه

مخازن استوانه‌یی روزمینی فولادی یکی از پرکاربردترین سازه‌های مورد استفاده در پالایشگاه‌ها، کارخانجات صنعتی، و... هستند؛ که زلزله‌های گذشته، نشان از آسیب‌پذیری بالای سازه‌های مذکور در خلال این پدیده‌ی طبیعی دارند. رفتار دینامیکی مخازن، اولین بار توسط هاوزنر مدل‌سازی شده و مبنای آیین‌نامه‌های طراحی قرار گرفته است. وی چنین عنوان کرده است که در یک مخزن با سطح آزاد که در معرض شتاب جانبی دینامیکی قرار دارد، سیال از دو طریق بر روی جداره اثر می‌گذارد: ۱. فشار نوسانی، ۲. فشار ضربانی. فشار نوسانی، در اثر حرکت سیال مواج در بالای مخزن پدید می‌آید و فشار ضربانی، در اثر حرکت قسمتی از سیال در پایین مخزن و هماهنگ با پوسته ایجاد می‌شود. در حقیقت، بسامد حرکت نوسانی به میزان قابل توجهی پایین‌تر از بسامد حرکت ضربانی است، بدین معنی که این مود در دوره‌های تناوب بالای زلزله تحریک می‌شود.^[۱]

با وقوع زمین‌لرزه‌ی آلاسکا در سال ۱۹۶۴، خسارت‌های شدیدی به مخازن سیال وارد شده است، که بیشتر خسارت‌های وارد شده ناشی از عدم در نظر گرفتن آثار انعطاف‌پذیری دیواره‌ی مخازن در طراحی آنها بوده است. برخی پژوهشگران در سال

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۱/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۰/۲۰، پذیرش ۱۳۹۴/۲/۲۱.

m.kaypour@srbiau.ac.ir
hosseinz@iiees.ac.ir
h.tavakolian@iiees.ac.ir

۱۹۸۲، با استفاده از روش‌های عددی، مسئله‌ی اندرکنش سیال و سازه را تحلیل و نهایتاً مدل ساده‌شده‌ی ارائه کرده‌اند، که اثر انعطاف‌پذیری دیواره‌ی مخزن در آن لحاظ شده بود.^[۲]

اصولاً می‌توان خسارت‌های وارد به مخزن را به ۷ مود اصلی شکست تقسیم کرد، که عبارت‌اند از: واژگونی، کماتش کشسان جداره، لغزش مخزن، کماتش پافیلی (کشسان‌خمیری) جداره، آسیب‌دیدگی سقف، بلندشدگی کف، و نشست نامتقارن بستر. خلاصه‌یی از مدهای شکست مخازن به این شرح است:^[۳]

۱. واژگونی: وقتی نسبت ارتفاع به قطر زیاد می‌شود، پایداری مخزن در برابر نیروهای جانبی زلزله کاهش می‌یابد. علت این پدیده، بالابودن ارتفاع مرکز ثقل مخزن است.

۲. کماتش کشسان جداره: مخازن با ارتفاع زیاد یا نسبت ارتفاع به قطر زیاد معمولاً دچار این چنین آسیبی می‌شوند، به طوری که بخشی از جداره‌ی قائم مخزن دچار کماتش می‌شود.

۳. لغزش مخزن: همان‌طور که از نام این مکانیزم خرابی می‌توان استنباط کرد، نیروی

برشی بزرگ در مقابل نیروی اصطکاک باعث این پدیده است و مخزن در تراز پایه دچار لغزش می‌شود.

۴. کمناش پافیلی (کشسان‌خمیری) جداره: این نوع آسیب در جداره‌ی قائم مخزن و بیشتر به علت افزایش قابل توجه تنش‌های فشاری قائم جداره در اثر بلندشدگی رخ می‌دهد. این نوع کمناش معمولاً در بخشی از پوسته که در مجاورت کف مخزن است (روبروی بخش بلندشده‌ی مخزن)، ایجاد می‌شود. این بخش از پوسته‌ی مخزن تحت اثر تنش دومحوری، تنش‌های حلقوی و قائم قرار دارد. علاوه بر این، ورق کف مخزن از تغییرشکل شعاعی جداره‌ی قائم، تحت اثر فشار مایع درون مخزن جلوگیری می‌کند، که این مسئله سبب ایجاد خمش در پوسته می‌شود. وجود چنین لنگر خمشی در پوسته، سبب افزایش تمایل پوسته به کمناش می‌شود.

۵. آسیب دیدگی سقف: نیروی ارتعاشی زلزله باعث ارتعاش مخزن و مایع داخل آن می‌شود. ارتعاش امواج با بسامدی خیلی پایین‌تر از بسامد جداره، ولی با دامنه‌ی زیاد رخ می‌دهد و متأثر از ارتعاش جداره نیست. در این حالت اگر پیش‌بینی‌های لازم در نظر گرفته نشود، جداره‌ی سقف صدمه می‌بیند و محتویات درونی مخزن به بیرون پاشیده می‌شود و یا با ضربه‌ی شدید به قسمت‌هایی از نگه‌دارنده‌های سقف صدمه می‌زند. عامل کنترل‌کننده‌ی این آسیب، ارتفاع موج است.^[۱]

۶. بلندشدگی کف: این آسیب دیدگی از عوامل متعددی ناشی می‌شود، که مهم‌ترین آنها نسبت ارتفاع به قطر و ضخامت جداره‌ی کف مخزن هستند. بلندشدگی کف مخزن در صورتی که از مقدار مجاز آن (۳۰ سانتی‌متر)،^[۲] بیشتر شود، ممکن است باعث پارگی جداره‌ی کف مخزن و یا شکستگی لوله‌ی متصل به آن شود.^[۱]

۷. نشست نامتقارن بستر: این آسیب دیدگی در اثر ضربه‌ی ناشی از بلندشدگی کف مخزن ناشی می‌شود، به طوری که بخشی از خاک زیر مخزن دچار نشست می‌شود.

شایان ذکر است که افزودن تیغه‌های فولادی می‌تواند نسبت به تخفیف مدهای شکست فوق‌الذکر مؤثر باشد، که این موضوع نیازمند مطالعات فراتر است.

با بررسی رفتار مخازن در زلزله‌های گذشته می‌توان دریافت که تالطم سیال، یکی از شایع‌ترین علل خرابی‌های به‌وجودآمده در زلزله‌های به‌وقوع پیوسته از سال ۱۹۳۳ به بعد است.^[۵] برای کنترل تالطم سیال در هنگام وقوع زلزله در صورت عدم استفاده از ابزار کاهش ارتفاع تالطم، فقط ویسکوزیته‌ی سیال در میرایی نقش خواهند داشت.^[۶] در این حالت رعایت ضوابط آیین‌نامه از قبیل ایجاد محفظه‌ی ثانویه برای سرریز، رعایت ارتفاع سطح آزاد، و همچنین طراحی سقف مخازن برای تحمل فشارهای ناشی از تالطم امری اجتناب‌ناپذیر است. راه دیگر استفاده از تیغه‌های فولادی (Baffle) است، که بیشتر در مخازن حمل سوخت مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ لیکن، این تیغه‌ها در مخازن فولادی استوانه‌یی روزمینی به ندرت مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۲. مطالعات پیشین در خصوص مخازن با تیغه‌ی فولادی

شروع مطالعات بر روی تیغه‌های میراگر به مطالعات سازمان ملی هوانوردی آمریکا بر می‌گردد.^[۷] اما اولین بار در پژوهشی در سال ۱۹۵۸،^[۸] ضریب میرایی حاصل از تیغه‌های رینگ‌ی در مخازن استوانه‌یی عمودی تحت اثر تحریک افقی به شکل

تحلیلی با استفاده از کار حاصل از نیروی درگ وارد بر جریان از طرف تیغه و نیز نسبت آن به کل انرژی نوسانی مایع محاسبه شده است (رابطه‌ی ۱). همچنین در پژوهش دیگری در سال ۱۹۶۰،^[۹] رابطه‌ی ۱ که به‌صورت تابعی از دامنه‌ی تالطم سیال بوده است، به‌صورت تابعی از نیروی افقی تالطم بیان شده است.

$$\xi_{sw} = \frac{4.98}{2\pi} \sqrt{\frac{v}{R^{1/8} g^{3/8}}} \left[1 + \frac{0.318}{\sinh\left(\frac{1.82h}{R}\right)} \left(1 + \frac{1 - \left(\frac{h}{R}\right)}{\cosh\left(\frac{1.82h}{R}\right)} \right) \right] \quad (1)$$

که در آن، ξ_{sw} میرایی جداره‌ی صاف (ضریب میرایی ویسکوز، n ویسکوزیته‌ی کینماتیکی سیال، R شعاع مخزن، و h ارتفاع موج هستند. ضریب k یک ضریب عددی است، که مقادیر آن وابسته به هندسه‌ی مخزن و سطح پُرشدگی است و برای مخازن استوانه‌یی برابر ۱ است.

همچنین برخی پژوهشگران (۱۹۶۲)، آزمایش‌هایی با تیغه‌های رینگ‌ی برای مشاهده‌ی اثر مقادیر مختلف عرض و ارتفاع تیغه و همچنین اثر ارتفاع تالطم در میرایی و بسامد تالطم انجام داده‌اند.^[۱۰] پژوهشگران دیگری (۱۹۶۳) نیز ضریب میرایی حاصل از دو تیغه را مورد آزمایش قرار داده‌اند.^[۱۱]

مسئله‌ی تالطم در مخازن استوانه‌یی با/بدون حضور تیغه نیز در پژوهش دیگری (۲۰۰۳)،^[۱۲] به‌صورت عددی مطالعه و حرکت غیرخطی سطح آزاد سیال با توجه به تالطم سیال در تانکرهای نیمه‌پر مورد بررسی قرار گرفته است. برخی پژوهشگران نیز تالطم سیال را تحت بار ضربه‌یی توسط روش تفاضل محدود به‌صورت ۲ و ۳ بُعدی در تانکرهای حمل سوخت مورد تحلیل قرار داده و معادلات ناویر-استوکس را با مرز آزاد و با حل و فشار ضربه در دو حالت با و بدون تیغه مقایسه کرده‌اند.^[۱۳]

در پژوهش دیگری (۲۰۰۶)،^[۱۵] نیز تأثیر تیغه‌های رینگ‌ی در تالطم غیرخطی در دو مخزن استوانه‌یی و مستطیلی با استفاده از روش المان محدود بررسی و نتایج نشان داده شده است که هر چه تیغه به سطح سیال نزدیک‌تر باشد، تأثیر بیشتری در بسامد تالطم خواهد داشت. علاوه بر این باید توجه شود که پدیده‌ی تالطم در صورتی که بسامد تالطم در نزدیکی بسامد مخزن باشد، دیگر به‌صورت خطی نخواهد بود. همچنین برخی پژوهشگران (۲۰۰۹)،^[۱۶] جریان سیال را به‌صورت ۳ بُعدی و ۲ فازی به‌صورت عددی و برای شبیه‌سازی اغتشاش تالطم سیال در مخازن با و بدون تیغه مدل کرده و مورد مطالعه قرار داده و مفهوم روش حجم مرزی محدود (VBF) برای مدل‌سازی تیغه‌ی داخلی را استفاده کرده‌اند. پژوهشگران دیگری (۲۰۱۱)،^[۱۷] نیز مدل‌سازی ۳ بُعدی عددی را برای مطالعه‌ی تالطم سیال تحت تحریک بسامد تشدید در مخزن مطالعه و تأکید کرده‌اند که تیغه‌های رینگ‌ی، ابزاری مؤثر برای کاهش دامنه‌ی تالطم اغتشاش است.

همچنین در سال ۲۰۰۶ پژوهشگران، به بررسی تحلیلی رابطه‌ی بین بسامد نوسانات، عرض تیغه و موقعیت عمودی تیغه‌ی درون مخزن استوانه‌یی شکل پرداخته و رابطه‌ی برای بررسی رفتار غیرخطی آثار تیغه در مخزن را ارائه کرده‌اند. است، که قابلیت بررسی در موقعیت‌ها و سایزهای مختلف را داشته است.^[۱۸] پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۰۷،^[۱۹] به بررسی کاهش پاسخ لرزه‌یی مخازن با استفاده از جداساز لرزه‌یی پرداخته و نشان داده‌اند که استفاده از جداساز باعث ایجاد جابه‌جایی‌های سیستمی بزرگ‌تری می‌شود و برای کاهش این آثار در یک سیستم به میرایی بالاتری نیاز است، و تیغه‌های فولادی نقش مهمی در تعدیل حرکت مایع ایجاد می‌کنند. همچنین پژوهشگران در سال ۲۰۰۷، نسبت میرایی هیدرودینامیک تالطم سیال را با استفاده از راه حل معادله‌ی لاپلاس در مخزن دارای تیغه، تحت تحریک افقی آزمایش کرده و آن را به‌دست آورده‌اند.^[۱۹] نتایج به‌دست‌آمده بیان‌گر تأثیر بیشتر

تیغه‌های حلقوی در کاهش تلاطم سیال بوده است، مشروط بر اینکه سیال، دامنه‌ی نوسانات بیشتری داشته باشد. در پژوهش‌های دیگری،^{[۲۱]، [۲۰]} نیز توزیع فشار بر روی دیواره‌ی مخزن بدون تیغه و با تیغه با ترتیب‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته و به دست آمده است. همچنین برخی پژوهشگران،^[۲۲] میرایی هیدرودینامیک در مخازن مستطیلی دارای تیغه‌های مختلف را در ارتفاع مورد بررسی آزمایشگاهی قرار داده و بیان کرده‌اند که نسبت میرایی با افزایش تعداد تیغه افزایش می‌یابد. پژوهشگران دیگری،^[۲۳] نیز تلاطم را در مخزن مستطیلی دارای تیغه مورد مطالعه قرار داده و توزیع فشار بر دیواره‌ها را در سطوح مختلف پُرشدگی بررسی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که با اضافه کردن تیغه در مخزن، کاهش قابل توجهی در اثرات تلاطم درون مخزن مشاهده می‌شود، که این اثر به دلیل لبه‌ی تیغه‌ها و ایجاد اغتشاش در میدان جریان و در نتیجه اتلاف بیشتر انرژی جنبشی بر روی دیواره‌هاست و نتیجه‌ی دیگر اینکه تیغه‌های غیرمتعارف از جمله تیغه‌های عمودی با سوراخ‌های بزرگ و تیغه‌های رینگ‌ی در مقایسه با تیغه‌های معمولی مؤثرتر هستند. در پژوهش دیگری^[۲۴]،^(۲۰۰۹) نیز آزمایشی برای محاسبه‌ی نیرو و ممان ناشی از تلاطم در مخازن نیمه‌پر در اثر تحریک طولی و جانبی، که مستقلاً وارد شده است، انجام شده و نتایج به دست آمده نشان داده است که تیغه‌ها تا حد زیادی در کاهش نیروهای طولی و ممان پیچشی مؤثر هستند. همچنین برخی پژوهشگران^[۲۵]،^(۲۰۱۳) مخزن استوانه‌یی مقیاس شده با سطح پُرشدگی متفاوت را به همراه تیغه‌های رینگ‌ی تحت تحریک جانبی - پیچشی قرار داده و مشاهده کرده‌اند که ترتیبات مختلف تیغه در کاهش آثار بارهای تلاطم و بیشینه‌ی فشار بسیار مؤثر هستند.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در مطالعات پیشین می‌توان دریافت که کارهای بسیاری درخصوص تیغه‌های فولادی و روابط تجربی برای به دست آوردن میرایی آنها انجام شده است، اما مکانیزم میرایی و آثار زلزله‌های واقعی بر روی رفتار تیغه‌ها در مخازن کاملاً شناخته نشده است. علاوه بر این، تأثیر میرایی بفل‌ها با شکل و ترتیبات خاص به ندرت به صورت عددی گزارش شده است. در این پژوهش، تلاطم سیال در مخزن فولادی استوانه‌یی مقیاس شده بدون حضور میراگر و پس از آن با وجود ۳ حالت متفاوت تیغه‌ی میراگر فولادی در ارتفاعات پُرشدگی متفاوت تحت ۳ زلزله قرار گرفته و ارتفاع تلاطم و کاهش آن بعد از اضافه کردن تیغه‌ی میراگر و همچنین میرایی معادل سیال برای مخزن مذکور محاسبه و ارائه شده است.

$$T_c = 1.8 K_s \sqrt{D} \quad (2)$$

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{0.68H}{D}\right)}} \quad (3)$$

$$T_i = \frac{1}{\sqrt{2000}} \frac{C_i H \sqrt{\frac{D}{E}}}{\sqrt{\frac{t_w}{D}}} \quad (4)$$

که در آن‌ها، K_s ضریب دوری تناوب تلاطم و C_i ضریبی برای تعیین دوره‌ی تناوب ضربانی سیستم مخزن هستند. بقیه‌ی پارامترها نیز در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

۲.۳. آماده‌سازی مدل‌های آزمایشگاهی و میز لرزان

آزمایش دینامیکی مدل‌های مخزن مورد نظر روی میز لرزان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام شده است. ابعاد میز مذکور 1.45×1.2 متر است، که توسط یک سیستم پمپ هیدرولیکی به ارتفاعش در می‌آید. دستگاه محرک میز و سیستم کنترلی آن، توانایی ایجاد بیشینه‌ی نیرو و بسامد ۵ تن و 50° هرتز را دارد (شکل ۱). برای مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثرات اندرکنش سازه - سیال، ۴ حالت ارتفاع متفاوت سیال معادل 60° ، 80° ، 100° و 120° سانتی‌متر انتخاب شده است. سیستم سازه‌یی مخزن، به صورت مهارشده فرض شده است. هدف از انجام آزمایش‌ها، شبیه‌سازی اندرکنش سیال - سازه در زمین‌های نوع II مطابق با استاندارد 280° زلزله‌ی ایران و برایش سوم بوده است. در آیین‌نامه‌ی مذکور، حدود تقریبی سرعت موج برشی در زمین‌های نوع II برابر $75 < V_s < 375$ متر بر ثانیه داده شده است، که مطابق با خاک نوع C در آیین‌نامه‌ی ASCE است. تیغه‌های استفاده شده‌ی آزمایش‌های مذکور شامل دو تیغه‌ی رینگ‌ی به عرض ۳ و ۵ سانتی‌متر در ۳ حالت چپش متفاوت بوده است، که به جداره‌ی مخزن متصل شده بودند. قطر خارجی تیغه‌های رینگ‌ی برابر قطر داخلی مخزن و قطر داخلی آنها

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در مطالعات پیشین می‌توان دریافت که کارهای بسیاری درخصوص تیغه‌های فولادی و روابط تجربی برای به دست آوردن میرایی آنها انجام شده است، اما مکانیزم میرایی و آثار زلزله‌های واقعی بر روی رفتار تیغه‌ها در مخازن کاملاً شناخته نشده است. علاوه بر این، تأثیر میرایی بفل‌ها با شکل و ترتیبات خاص به ندرت به صورت عددی گزارش شده است. در این پژوهش، تلاطم سیال در مخزن فولادی استوانه‌یی مقیاس شده بدون حضور میراگر و پس از آن با وجود ۳ حالت متفاوت تیغه‌ی میراگر فولادی در ارتفاعات پُرشدگی متفاوت تحت ۳ زلزله قرار گرفته و ارتفاع تلاطم و کاهش آن بعد از اضافه کردن تیغه‌ی میراگر و همچنین میرایی معادل سیال برای مخزن مذکور محاسبه و ارائه شده است.

۳. برنامه‌ریزی آزمایش مدل مخزن روی میز لرزان

۱.۳. مشخصات هندسی و مکانیکی مخزن مورد نظر

استفاده از مدل‌های مقیاس شده می‌تواند برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده مانند مخازن ذخیره‌ی سیال و شناخت مکانیزم‌های اصلی عملکرد آنها تحت شرایط کنترل شده مفید باشد. در بسیاری از آزمایش‌های استاتیکی، مدل‌های مقیاس شده نسبت به نمونه‌های با مقیاس واقعی بسیار اقتصادی هستند. همچنین، در بسیاری از آزمایش‌های دینامیکی روی مدل‌های مقیاس شده می‌توان پدیده‌هایی را شبیه‌سازی کرد، که در نمونه‌های با مقیاس واقعی قابل بررسی نیست. به علاوه، نتایج آزمایش مدل‌های مقیاس شده اغلب به عنوان مبنای کالیبراسیون روش‌های تحلیلی و یا برای ارزیابی کیفی پاسخ نمونه‌های واقعی و تکمیل اطلاعات تجربی پراکنده و ناقص مورد استفاده قرار می‌گیرد.

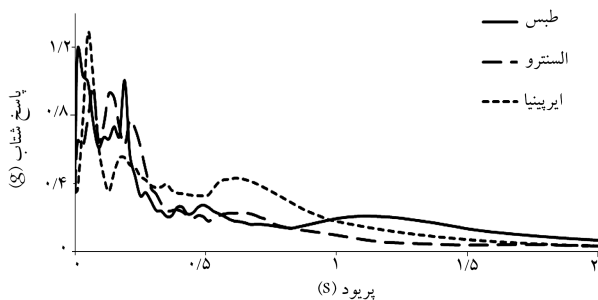
با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی از جمله ابعاد میز لرزان و ظرفیت جک

جدول ۱. مشخصات هندسی و مکانیکی مخزن مقیاس شده ($\lambda_L = 16$).

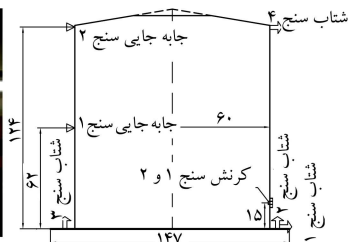
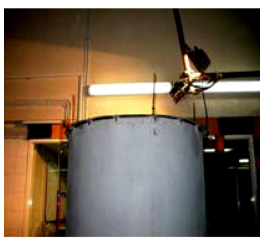
ردیف	شرح	پارامتر	مقدار
۱	قطر مخزن (متر)	D	۱٫۲
۲	ضخامت جداره‌ی مخزن و تیغه‌های فولادی (میلی‌متر)	t_u	۲
۳	ضخامت ورق کف مخزن (میلی‌متر)	b	۱۰
۴	ارتفاع جداره‌ی مخزن (متر)	H_W	۱٫۲۵
۵	ارتفاع پُرشدگی سیال (متر)	H	۱٫۲ - ۱ - ۰٫۸ - ۰٫۶
۶	چگالی سیال (Kg/m^3)	ρ	۱۰۰۰
۷	جرم سیال (کیلوگرم)	m	۱۳۵۷ و ۱۱۳۱٫۹۰۵، ۶۷۸
۸	مدول کشسانی مخزن (Mpa)	E	۲۱۰۰۰۰
۹	جرم کل مدل (کیلوگرم)	w	۱۵۶۲

جدول ۲. مشخصات زلزله‌های استفاده‌شده در آزمایش دینامیکی.

مدت زمان (sec)	PGA (g)	فاصله از کانون (km)	بزرگا	زلزله
۳۲٫۷۸	۰٫۸۵۲	-	۷٫۴	طیس (ایران) ۱۹۷۸/۱۶/۰۹
۳۱٫۱۶	۰٫۳۱۸	-	۷٫۲	ال سنتر (آمریکا) ۱۹۴۰
۴۰	۰٫۳۱۳	۳۲	۶٫۵	ایرپینیا (ایتالیا) ۱۹۸۰/۲۳/۱۱



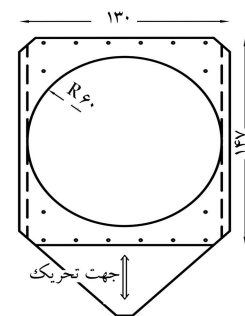
شکل ۳. طیف پاسخ ۳ زلزله‌ی طیس، ال سنتر و ایرپینیا (میرایی ۵٪ و مقیاس هم‌پایه‌سازی g ۰٫۴).



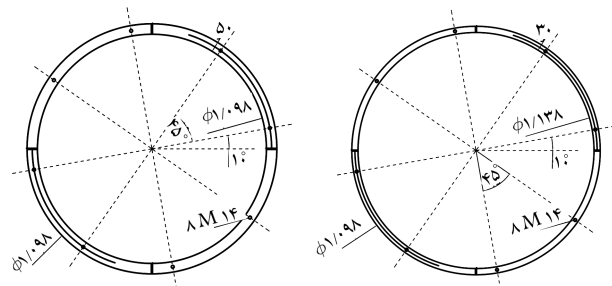
شکل ۴. محل قرارگیری حس‌گرهای ورودی مخزن روی میز لرزان و دوربین برای ثبت ارتعاشات تلاطم سیال.

مدل با مقیاس واقعی ۴ برابر کاهش می‌یابد.

برای ثبت ارتعاشات از دستگاه ۸ DMCPPLUS کاناله استفاده شده است، که ۴ کانال به شتاب‌سنج، ۲ کانال به جایه‌جایی‌سنج و ۲ کانال به کرنش‌سنج اختصاص یافته است. برای به‌دست‌آوردن تلاطم سیال از روش برداشت به‌وسیله‌ی دوربین باکیفیت HD استفاده شده است. نمایی از موقعیت حس‌گرها و دوربین ثبت ارتعاشات در شکل ۴ نشان داده شده است. شایان ذکر است که ۲ عدد از شتاب‌سنج‌ها به‌صورت قائم بر روی میز لرزان در دو طرف مخزن قرار



شکل ۱. پلان هندسی میز لرزان و نمای مخزن نصب‌شده بر روی آن.

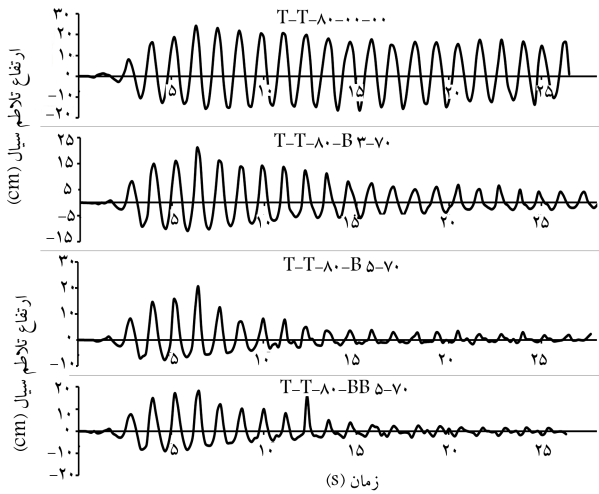


شکل ۲. مشخصات هندسی تیغه‌های رینگ‌ی استفاده‌شده در آزمایش میز لرزان. تیغه ۵ cm (ورق فولاد به ضخامت ۲ mm) (ب) تیغه فولادی ۵ cm تیغه ۳ cm (ورق فولاد به ضخامت ۲ mm) (الف) تیغه فولادی ۳ cm

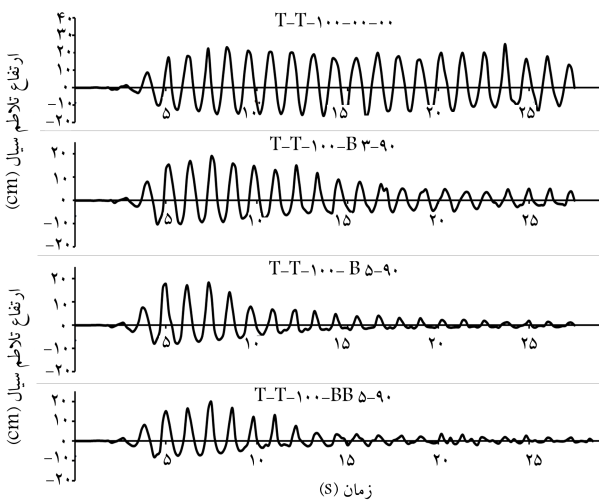
شکل ۲. مشخصات هندسی تیغه‌های رینگ‌ی استفاده‌شده در آزمایش میز لرزان.

۱۱۴ و ۱۱۰ سانتی‌متر بوده است. به‌عبارت دیگر، نسبت عرض تیغه به شعاع مخزن معادل ۲٫۵٪ و ۴٫۲٪ بوده است، که در شکل ۲ نشان داده شده است.

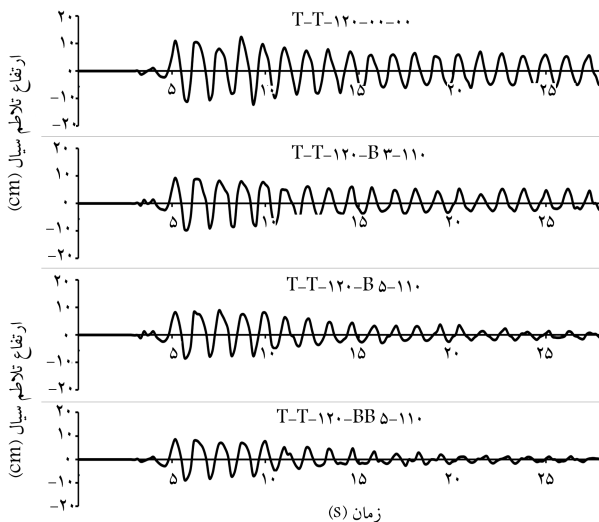
از میان رکوردهای ثبت‌شده از زلزله‌های گذشته، مؤلفه‌ی افقی طولی ۳ زلزله‌ی ال سنتر (آمریکا)، طیس (ایران)، و ایرپینیا (ایتالیا) برای آزمایش میز لرزان انتخاب شده است. هر ۳ زلزله در خاک نوع II طبق استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران قرار داشته‌اند. مشخصات زلزله‌های مذکور در جدول ۲ ارائه شده است. بیشینه‌ی شتاب افقی زلزله‌های ذکر شده (PGA) به مقدار g ۰٫۴ هم‌پایه شده و طیف پاسخ شتاب آن‌ها برای میرایی ۵٪ در شکل ۳ نشان داده شده است. شایان ذکر است که با توجه به ضریب مقیاس هندسی مخزن ($\lambda_L = 16$) ضریب مقیاس زمانی برای مخزن مقیاس‌شده ($\lambda_L = \frac{1}{4}$) در نظر گرفته شده است. ضریب ذکر شده بیان‌گر آن است که پارامتر زمان مانند فواصل زمانی رکوردهای زلزله در مدل مقیاس‌شده نسبت به



شکل ۶. تاریخچه‌ی زمانی تلاطم سیال مخزن موردنظر تحت زلزله‌ی طیس در ارتفاع سیال ۸۰ سانتی متر در حالت با و بدون تیغه.



شکل ۷. تاریخچه‌ی زمانی تلاطم سیال مخزن موردنظر تحت زلزله‌ی طیس در ارتفاع سیال ۱۰۰ سانتی متر در حالت با و بدون تیغه.



شکل ۸. تاریخچه‌ی زمانی تلاطم سیال مخزن موردنظر تحت زلزله‌ی طیس در ارتفاع سیال ۱۲۰ سانتی متر در حالت با و بدون تیغه.

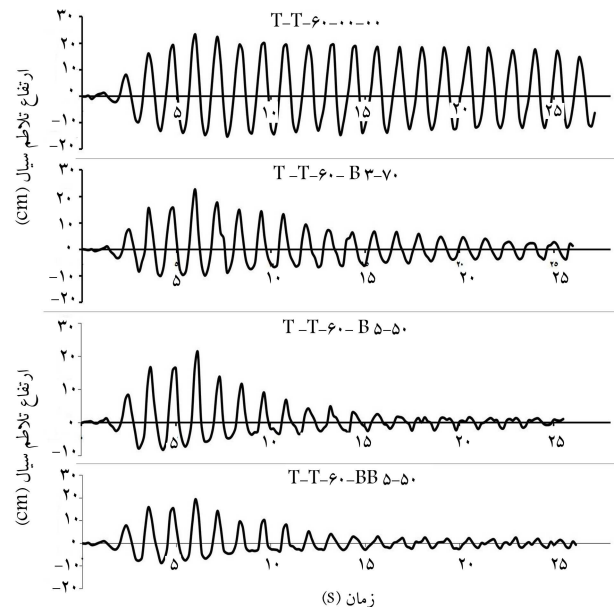
داده شده‌اند تا ارتعاشات عمودی ناخواسته‌ی میز قابل بررسی باشد. برای ثبت ارتعاشات نوسانی سیال، از نرم‌افزار استفاده و فیلم‌ها به صورت فریم به فریم قرانت شده‌اند.

۳.۳. نام‌گذاری مدل‌های آزمایش مخزن موردنظر

با توجه به اینکه پارامترهای متعددی در آزمایش‌های مختلف مدنظر است، لذا از کدگذاری ویژه‌ی استفاده شده است. برای نام‌گذاری مدل‌های آزمایش از کدگذاری ۵ بخشی استفاده شده است، که با خط تیره (-) از هم جدا شده‌اند. بخش اول، در تمام نام‌گذاری‌های حرف T است. بخش دوم، عبارت تک‌حرفی است و بیان‌گر نوع تحریک لرزه‌ی اعمال شده به میز به صورت T (Tabas)، E (Elcentro) و I (Irpinia) تعریف شده است. بخش سوم، عدد ۲ یا ۳ رقمی است، که بیان‌گر ارتفاع سیال بر حسب سانتی‌متر است. بخش چهارم، ترکیب حروف B به معنی تیغه‌ی تکی یا BB به معنی تیغه‌ی دوبل با عدد بعد از آن که بیان‌گر عرض تیغه بر حسب سانتی‌متر است (۵، ۳ و ۰). بخش پنجم، نیز عدد ۲ یا ۳ رقمی است که ارتفاع تیغه‌ی میراگر فوقانی را از کف مخزن نشان می‌دهد (۱۱۰، ۱۰۰، ۹۰، ۷۰ و ۵۰). به‌عنوان مثال، کد T-T-۱۰۰-B۳-۹۰ بیان‌گر آزمایش مخزن تحت زلزله‌ی ال‌سترو و ارتفاع سیال ۱۰۰ سانتی‌متر در حالت تیغه‌ی ۳ سانتی‌متری است، که در ارتفاع ۹۰ سانتی‌متری از کف مخزن قرار دارد.

۴. تعیین بیشینه‌ی ارتفاع تلاطم سیال

نمونه‌ی از نتایج تاریخچه‌ی زمانی تلاطم سیال در ناحیه‌ی ارتعاش اجباری و ارتعاش آزاد مربوط به آزمایش‌های مخزن موردنظر تحت زلزله‌ی طیس در شکل‌های ۵ الی ۸ نشان داده شده است، که در آن‌ها کاهش دامنه‌ی تلاطم سیال نسبت به زمان قابل مشاهده است. به‌علاوه می‌توان کاهش بیشتر دامنه‌ی تلاطم سیال را در



شکل ۹. نمونه‌ی نتایج تاریخچه‌ی زمانی تلاطم سیال مخزن موردنظر تحت زلزله‌ی طیس با ارتفاع سیال ۶۰ سانتی‌متر در حالت‌های با و بدون تیغه‌ی فولادی.

جدول ۳. بیشینه‌ی ارتفاع تلاطم و درصد کاهش ارتفاع تلاطم سیال در مخزن مورد آزمایش در حالت‌های مختلف.

ردیف	نام آزمایش	بیشینه‌ی ارتفاع تلاطم سیال حاصل از آزمایش (cm)	درصد کاهش بیشینه‌ی ارتفاع تلاطم نسبت به حالت بدون تیغه
۱	T-T-۶۰-۰-۰-۰-۰	۲۳٫۲	-
۲	T-T-۶۰-B۳-۵	۲۲٫۴	۳٫۴۵
۳	T-T-۶۰-B۵-۵	۲۱٫۱	۹٫۰۵
۴	T-T-۶۰-BB۵-۵	۱۹٫۴	۱۶٫۳۸
۵	T-E-۶۰-۰-۰-۰-۰	۵	-
۶	T-E-۶۰-B۳-۵	۴٫۴	۱۲
۷	T-E-۶۰-B۵-۵	۴٫۳	۱۴
۸	T-E-۶۰-BB۵-۵	۴	۲۰
۹	T-I-۶۰-۰-۰-۰-۰	۱۰٫۲	-
۱۰	T-I-۶۰-B۳-۵	۷٫۲	۲۹٫۴۱
۱۱	T-I-۶۰-B۵-۵	۷٫۱	۳۰٫۳۹
۱۲	T-I-۶۰-BB۵-۵	۷	۳۱٫۳۷
۱۳	T-T-۸۰-۰-۰-۰-۰	۲۴٫۳	-
۱۴	T-T-۸۰-B۳-۷	۲۱	۱۳٫۵۸
۱۵	T-T-۸۰-B۵-۷	۲۰٫۵	۱۵٫۶۴
۱۶	T-T-۸۰-BB۵-۷	۱۸	۲۵٫۹۳
۱۷	T-E-۸۰-۰-۰-۰-۰	۴٫۸۵	-
۱۸	T-E-۸۰-B۳-۷	۴٫۷	۳٫۰۹
۱۹	T-E-۸۰-B۵-۷	۳٫۹	۱۹٫۵۹
۲۰	T-E-۸۰-BB۵-۷	۳٫۳	۳۱٫۹۶
۲۱	T-I-۸۰-۰-۰-۰-۰	۱۱٫۵	-
۲۲	T-I-۸۰-B۳-۷	۱۰	۱۵٫۳۸
۲۳	T-I-۸۰-B۵-۷	۷٫۵	۴۳٫۰۸
۲۴	T-I-۸۰-BB۵-۷	۷٫۱	۴۵
۲۵	T-T-۱۰۰-۰-۰-۰-۰	۲۳	-
۲۶	T-T-۱۰۰-B۳-۹	۱۹	۱۷٫۳۹
۲۷	T-T-۱۰۰-B۵-۹	۱۸٫۲	۲۰٫۸۷
۲۸	T-T-۱۰۰-BB۵-۹	۱۶٫۶	۲۷٫۸۲
۲۹	T-E-۱۰۰-۰-۰-۰-۰	۵	-
۳۰	T-E-۱۰۰-B۳-۹	۳٫۹	۲۲
۳۱	T-E-۱۰۰-B۵-۹	۳٫۷	۲۶
۳۲	T-E-۱۰۰-BB۵-۹	۳٫۵	۳۰
۳۳	T-I-۱۰۰-۰-۰-۰-۰	۱۱٫۵	-
۳۴	T-I-۱۰۰-B۳-۹	۱۰	۱۳٫۰۴
۳۵	T-I-۱۰۰-B۵-۹	۷٫۵	۳۴٫۷۸
۳۶	T-I-۱۰۰-BB۵-۹	۷٫۱	۳۸٫۲۶
۳۷	T-T-۱۲۰-۰-۰-۰-۰	۱۲٫۱	-
۳۸	T-T-۱۲۰-B۳-۱۱	۹٫۵	۲۱٫۴۹
۳۹	T-T-۱۲۰-B۵-۱۱	۸٫۳	۳۱٫۴
۴۰	T-T-۱۲۰-BB۵-۱۱	۸	۳۳٫۸۸
۴۱	T-E-۱۲۰-۰-۰-۰-۰	۶	-
۴۲	T-E-۱۲۰-B۳-۱۱	۴٫۳	۲۸٫۳۳
۴۳	T-E-۱۲۰-B۵-۱۱	۴٫۵	۲۵
۴۴	T-E-۱۲۰-BB۵-۱۱	۴٫۵	۲۵
۴۵	T-I-۱۲۰-۰-۰-۰-۰	۱۱	-
۴۶	T-I-۱۲۰-B۳-۱۱	۱۰٫۳	۶٫۳۶
۴۷	T-I-۱۲۰-B۵-۱۱	۹٫۳	۱۵٫۴۵
۴۸	T-I-۱۲۰-BB۵-۱۱	۸٫۶	۲۱٫۸۲

حالت‌هایی که از تیغه‌ی دوپل ۵ سانتی‌متری استفاده می‌شود، نسبت به حالت متناظر آنها با تیغه‌ی تک ۳ سانتی‌متر و تیغه‌ی تک ۵ سانتی‌متری مشاهده کرد.

بیشینه‌ی ارتفاع تلاطم سیال در مخزن موردنظر تحت زلزله‌ی طیس در ارتفاعات سیال ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر در حالت بدون تیغه به ترتیب برابر ۲۳٫۲، ۲۴٫۳، ۲۳ و ۱۲٫۱ سانتی‌متر است، این مقادیر برای مخزن مجهز به تیغه‌ها کاهش قابل توجهی دارند، به طوری که در حالت استفاده از تیغه‌ی دوتایی ۵ سانتی‌متر، میزان تلاطم سیال به مقادیر ۱۹٫۴، ۱۸، ۱۹٫۶ و ۸ سانتی‌متر کاهش می‌یابد.

با جمع‌بندی نتایج آزمایش‌های مختلف از نظر نوع زلزله، نوع تیغه، و ارتفاع سیال خلاصه‌ی مقادیر بیشینه‌ی ارتفاع تلاطم سیال در جدول ۳ خلاصه شده است. همچنین در جدول مذکور، درصد کاهش بیشینه‌ی ارتفاع تلاطم سیال در هر یک از آزمایش‌ها ارائه شده است.

بررسی نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که وجود تیغه‌های میراگر فولادی، اثرات قابل توجهی در کاهش ارتفاع تلاطم سیال دارد. به‌عنوان مثال، در حالت وجود تیغه‌ی دوتایی ۵ سانتی‌متری، بیشینه‌ی ارتفاع تلاطم در حدود ۴۵٪ نسبت به حالت بدون تیغه کاهش یافته است. این کاهش در حالات تیغه‌ی تک ۳ سانتی‌متری و تک ۵ سانتی‌متری به ترتیب برابر ۲۹٪ و ۴۳٪ بوده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل مقیاس‌شده از مخزن فولادی استوانه‌ی با ضریب مقیاس هندسی ($\lambda_L = 16$) تحت آزمایش‌های دینامیکی روی میز لرزان قرار گرفته است. ضریب مذکور بیان‌گر نسبت ابعاد هندسی مخزن واقعی (مانند قطر، ارتفاع و...) به مخزن مقیاس‌شده است. مخزن مورد مطالعه در حالت‌های مختلف بدون تیغه و با تیغه‌ی تکی و دوپل و با عمق‌های مختلف سیال تحت اثر ۳ زلزله‌ی ورودی‌ال‌سنتر، طیس، و ایرینیا آزمایش شده است. با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف نظیر: بسامدهای ارتعاشی و ضریب میرایی مودهای نوسانی و ضربانی، این نتایج حاصل شده است:

۱. میرایی مود نوسانی سیال در مخزن بدون تیغه در حدود ۰٫۴٪ بوده است، که قدری کمتر از مقدار آیین‌نامه (۰٫۵٪) است.

۲. با افزودن تیغه‌های میراگر حلقوی، ضریب میرایی مود نوسانی حدود ۴ الی ۶ برابر در حالت تیغه‌ی تکی و در حدود ۸ برابر در حالت تیغه‌ی دوپل نسبت به مخزن بدون تیغه‌ی میراگر افزایش یافته است.

۳. بیشینه‌ی دامنه‌ی ارتعاش سیال متناسب با افزایش میرایی مود نوسانی سیال در مخزن دارای تیغه‌ی میراگر، کاهش قابل توجهی پیدا کرده است؛ به طوری که این کاهش در حالت مخزن دارای تیغه‌ی تکی به حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد و در حالت تیغه‌ی دوپل به حدود ۴۵٪ رسیده است.

۴. مقادیر افزایش میرایی و کاهش دامنه‌ی ارتعاش سیال تحت زلزله‌های مختلف متفاوت و در زلزله‌هایی که باعث نوسانات پُردامنه‌ی سیال می‌شوند، میرایی بیشتر بوده است.

منابع (References)

- ASCE, Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities (2003).
- Haroun, M.A. and Housner, G.W. "Model for flexible tanks undergoing rocking", *J. Eng. Mech.*, **111**(2), pp. 143-157 (1985).
- Hosseinzadeh, N., Kazem, H., Ghahremannejad, M., Ahmadi, E. and Kazem, N. "Comparison of API650-2008 provisions with FEM analyses for seismic assessment of existing steel oil storage tanks", *J. of Loss Prevention in the Process Industries*, **26**(4), pp. 666-675 (2013).
- Iranian Seismic Design Code for Oil Industries*, 2nd Edition, seismic Design of oil facilities code 038-2rd (2010).
- Cooper, T.W., *A Study of the Performance of Petroleum Storage Tanks During Earthquakes: 1933-1995*, Report No. NIST GCR 97-720, U.S. Department of Commerce (1997).
- Ziyaeifar, M. and Maleki, A. "Sloshing damping in cylindrical liquid storage tank with baffle", *J. of Sound and Vib.*, **311**(1-2), pp. 732-385 (2008).
- Brevoort, M.J. "Energy loss, velocity distribution, and temperature distribution for baffled cylindrical model", National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Report Archive and Image Library Note No. 620 (1937).
- Miles, J.W. "Ring damping of free surface oscillations in a circular tank", *J. of Applied Mech.*, **25**, pp. 274-276 (1958).
- O'Neil, J.P. "Final report on an experimental investigation of sloshing", STL/TR-59-0000-09960, Space Tech., Lab., Inc. (4 March 1960).
- Stephens, D.G., Leonard, H.W. and Perry, T.W. "Investigation of the damping of liquids in ring circular-cylindrical tanks", Washington, D.C., National Aeronautics and Space Administration (NASA), TN D-1367 (1962).
- Garza, L.R. and Abramson, H.N. "Measurements of liquid damping provided by ring baffles in cylindrical tanks", Southwest Research Institute, Technical Report Prepared for NASA (1963).
- Pal, N.C., Bhattacharyya, S.K. and Sinha, P.K. "Non-linear coupled slosh dynamics of liquid-filled laminated composite containers: A two dimensional finite element approach", *J. Sound Vib.*, **261**(1), pp. 729-749 (2003).
- Kim, Y. "Numerical simulation of sloshing flows with impact load", *Appl. Ocean Res.*, **23**(1), pp. 53-62 (2001).
- Kim, Y., Shin, Y.-S. and Lee, K.H. "Numerical study on slosh-induced impact pressures on three-dimensional prismatic tanks", *Appl. Ocean Res.*, **26**(5), pp. 213-226 (2004).
- Biswal, K.C., Bhattacharyya, S.K. and Sinha, P.K. "Non-linear sloshing in partially liquid filled containers with baffles", *Int. J. for Numerical Methods in Eng.*, **68**(3), pp. 317-337 (2006).
- Liu, D. and Lin, P. "Three-dimensional liquid sloshing in a tank with baffles", *Ocean Eng.*, **36**(2), pp. 202-212 (2009).
- Xue, M.-A. and Lin, P. "Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing", *Comput. Fluids*, **52**, pp. 116-129 (2011).
- Gavrilyuk, I., Lukovsky, I., Trotsenko, Y. and Timokha, A. "Sloshing in a vertical circular cylindrical tank with an annular baffle, Part 1: Linear fundamental solutions", *J. of Eng. Mathematics*, **54**(1), pp. 71-88 (2006).
- Maleki, A. and Ziyaeifar, M. "Damping enhancement of seismic isolated cylindrical liquid storage tanks using baffles", *J. of Eng. Structures*, **29**(12), pp. 3227-3240 (2007).
- Bagci, T. "Examining pressure changing in cylindrical tanks caused by sloshing", M.S. Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey (2007)
- Bayer, A.M. "Design of annular baffles for suppressing the sloshing pressure in cylindrical storage tanks", M.S. Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey (2007).
- Younes, M.F., Younes, Y.K., El-Madah, M., Ibrahim, I.M. and El-Dannanh, E.H. "An experimental investigation of hydrodynamic damping due to vertical baffle arrangements in a rectangular tank", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, **221**(3), pp. 115-123 (2007).
- Panigrahy, P.K., Saha, U.K. and Maity, D. "Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks", *Ocean Eng.*, **36**(3-4), pp. 213-222 (2009).
- Yan, G., Rakheja, S. and Siddiqui, K. "Experimental study of liquid slosh dynamics in a partially-filled tank", *J. Fluids Eng.*, **131**(7), 14 p. (2009).
- Akyildiz, H., Enderm Unal, N. and Aksoy, H. "An experimental of effects of the ring baffles on liquid sloshing in a rigid cylindrical tank", *J. of Ocean Eng.*, **59**, pp. 190-197 (2013).
- API650, *Welded Steel Tank for Oil Storage*, American Petroleum Institute API Standard 650, 11TH Edition, Washington, USA (2008).