

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال هشتم/ شماره سی و یکم/ زمستان ۱۴۰۰

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric PowerPlant
8th Year/ No. 31/ March 2022

بهسازی لرزه‌ای مخازن هوایی استوانه‌ای ذخیره‌ی آب به کمک جداسازهای غیرخطی با در نظر گرفتن اندرکنش سیال - سازه

محمد رضا شکاری^{۱*}

مجتبی حسنی^۲

محمد رضا زارعی فرد^۳

چکیده

وسعت احداث مخازن هوایی به عنوان یکی از مهمترین سازه‌های تأمین‌کننده آب بهداشتی شهرها، و ضعف آنها در برابر زلزله، ضرورت تحقیق راجع به روش‌های نوین کنترل غیر فعال این سازه‌ها را دو چندان می‌نماید. از جمله فناوری‌های نوین مهندسی زلزله، طراحی جداسازهای لرزه‌ای و کاربرد آن در سازه‌های خاص از جمله مخازن هوایی محتوی مایع است. در تحقیقات انجام شده تاکنون بررسی خاصی بر روی کارایی این نوع سیستم‌ها در کاهش پاسخ لرزه‌ای مخازن هوایی استوانه‌ای با در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری پوسته انجام نشده‌است. در این پژوهش با انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، عملکرد لرزه‌ای یک مخزن فولادی هوایی با جداساز و بدون آن، تحلیل و نتایج با هم مقایسه شدند. بدین منظور، از دو نوع جداساز هسته‌سربی و الاستومری استفاده شده‌است. جهت نیل به این هدف، المان‌های محدود با رفتار پوسته‌ای برای جداره‌ی مخزن، المان‌های محدود داخلی برای سیال درون مخزن و المان‌های هیستریزس با رفتار دوخطی برای جداسازها انتخاب گردیده و آنالیز لرزه‌ای مخزن انعطاف‌پذیر تحت تأثیر زلزله واقعی در حوزه زمان انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که جداسازی افقی علیرغم ایجاد تغییرمکان قابل توجه در سازه، کارایی بیشتری در کاهش پاسخ لرزه‌ای سیستم دارد که این موضوع به خصوصیات زلزله بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی

مخزن هوایی مایع، جداسازی پایه، تحلیل لرزه‌ای، روش المان محدود

^{۱*} استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی استهبان. shekari.2291@gmail.com

^۲ دانش آموخته دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت تهران

^۳ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، مرکز آموزش عالی استهبان

علمی-پژوهشی

مقدمه

سازه‌های هیدرولیکی نظیر سدها، مخازن حاوی مایعات، برج‌های آبگیر، خطوط لوله انتقال مایع و ... از جمله زیرساخت‌های حیاتی به شمار می‌آیند که نه تنها در طی دوره عمر بهره‌برداری می‌بایست از عملکرد مطلوب برخوردار باشند، بلکه در شرایط بحرانی همچون زلزله نیز باید از صدمه موضعی و تخریب آن جلوگیری گردد. آسیب و انهدام جدی اجزای مخازن ممکن است فجایع زیان‌باری از جمله بحران آب، آتش‌سوزی بخاطر انتشار مایعات قابل اشتعال، تهدید سلامت موجودات زنده به دلیل انتشار مواد شیمیایی و سایر معضلات زیست محیطی را در پی داشته باشد. به عنوان مثال یک حادثه لرزه‌ای در مخازن حاوی سیال در پالایشگاه‌های نفتی و میادین ذخیره مواد شیمیایی می‌تواند میلیون‌ها دلار خسارت وارد نموده و باعث تعطیلی چندروزه فعالیت‌های صنعتی تابعه گردد. شانگ و لین^۱ (۲۰۰۶)، ۲۴۲ حادثه در طی چهل سال اخیر در مخازن نگهداری مایعات و تأسیسات صنعتی وابسته به آنها را مورد بررسی قرار دادند که نتایج مطالعه آنها نشان داد، ۷۴ درصد از خرابی‌ها در مخازن محتوی نفت و مشتقات آن رخ داده است که ۸۵ درصد از این میزان در اثر انفجار و آتش‌سوزی بوده است. کوپر^۲ و همکاران (۱۹۹۹) در بررسی‌های خود به تشریح آسیب‌های وارد شده به مخازن فولادی تحت تأثیر زمین-لرزه‌های آلاسکا (۱۹۶۴)، نورتریج (۱۹۹۴) و لومپریتا (۱۹۸۹) پرداختند. مطالعات تحلیلی اولیه در زمینه رفتار دینامیکی مخازن نگهداری مایعات با فرض صلب بودن دیواره و اتصال گیردار سازه به پی صلب صورت گرفته است که براین اساس، تحت اثر تحریکات زمین، قسمتی از جرم مایع درون مخزن موسوم به جرم سخت (مؤلفه ضربه‌ای) همگام با شتاب تحریکات وارده به جداره ارتعاش می‌کند، درحالی‌که مابقی مایع که به جرم مواج (مؤلفه همرفتی) موسوم است به صورت مستقل از دیواره مخزن نوسان می‌کند (هاوزنر^۳، ۱۹۶۳، یانگ^۴، ۱۹۷۶). هارون در سال ۱۹۸۵ با در

نظرگیری مولفه‌های افقی و دورانی زلزله، فشارهای هیدرودینامیک درون مخازن را با استفاده از رویکرد جریان پتانسیل کلاسیک محاسبه کرد و اثرات انعطاف‌پذیری دیواره بر پاسخ لرزه‌ای مخازن را تحلیل نمود (هارون^۵، ۱۹۸۵). روش‌های ارائه شده بر پایه پژوهش‌های مذکور، سالیان متمادی مبنای تخمین فشارهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه مخازن و تعیین پاسخ لرزه‌ای آنها در بسیاری از آیین‌نامه‌های طراحی مخازن بوده است. وندی و مهدی^۶ (۱۹۸۹) با استفاده از مدل‌سازی هیستریزیس سه بعدی به تحلیل عددی نوسان سطح آزاد سیال (تلاطم) در مخازن هوایی فولادی با هندسه‌های مختلف پرداختند. با در نظر گرفتن اثر اندرکنش آب و سازه، کیم^۷ و همکارانش (۱۹۹۶) نیز به تحلیل عددی پاسخ لرزه‌ای مخازن مکعبی روزمینی پرداختند و نتیجه گرفتند که بر اثر انعطاف‌پذیری جداره مخزن بخش سخت مایع درون مخزن ممکن است با شتاب‌هایی به مراتب بزرگ‌تر از شتاب اوج زمین ارتعاش کند درحالی‌که اثر مذکور بر نوسان‌های بخش مواج قابل اغماض است. داماتی^۸ و همکاران (۱۹۹۸) با استفاده از روش تقریبی جرم افزوده پیشنهادی توسط هاوزنر به بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی مخروطی شکل با هندسه‌های لاغر و چاق پرداختند و با مدل‌سازی پوسته سازه توسط المان‌های محیطی اثر اندرکنش سیال و سازه را در نظر گرفتند. لیواغلو^۹ و همکارش (۲۰۰۶، ۲۰۰۷) با در نظرگیری طیف وسیعی از خصوصیات مکانیکی خاک به بررسی اثرات پی مدفون بر رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی آب پرداختند. آنها از تکنیک اجزاء محدود برای مدل‌سازی سیستم استفاده کرده و نشان دادند که تغییر مکان سقف مخزن ارتباط تنگاتنگی با سختی خاک زیر پی دارد. آنها همچنین روابط تحلیلی ساده شده برای مخازن هوایی با در نظرگیری اثر اندرکنش آب-سازه و خاک ارائه نمودند. کلانتری و احمدی (۱۳۸۲) با در نظرگیری اثر موده‌های اول و دوم تلاطم سطحی آب در مخازن هوایی استوانه‌ای به ارائه مدل مکانیکی مرکب از گروه

⁶ Wandi & Mahdi

⁷ Kim

⁸ El Dmatty

⁹ Livaoğlu

¹ Cheng & Lin

² Cooper

³ Housner

⁴ Yang

⁵ Haroun

جرم و فنر جانشین سیستم مایع پرداختند، بنحوی که سازه تحت شتاب افقی زمین، برش پایه و لنگر واژگونی معادل مدل واقعی ایجاد کند.

در خصوص توسعه روش‌های عددی و کاربرد آن در مسائل مختلف مهندسی از جمله بررسی عملکرد مخازن هنگام وقوع زلزله تحقیقات متعددی انجام شده‌است، که در این میان می‌توان به روش‌های اجزاء محدود و اجزاء مرزی به عنوان بارزترین روش‌ها در این زمینه اشاره نمود. مسلمی و همکاران (۲۰۱۱) با توسعه یک الگوریتم المان محدود به آنالیز لرزه‌ای مخازن هوایی استوانه‌ای تحت تأثیر مؤلفه افقی زلزله واقعی، در قلمرو زمان پرداختند و مؤلفه‌های پاسخ ضربه‌ای و نوسانی را استخراج نمودند. آنها در ادامه با بهره‌گیری از روش المان‌های محدود به تحلیل و طراحی لرزه‌ای مخازن هوایی مخروطی شکل پرداختند (مسلمی و همکاران، ۲۰۱۶). لیو^۱ و همکاران (۲۰۲۰) با در نظرگیری اثرات اندرکنش مایع-مخزن و خاک، فشارهای هیدرودینامیک درون مخازن استوانه‌ای را با استفاده از تئوری جریان پتانسیل محاسبه کرده و مدل مکانیکی ساده شده‌ای جهت طراحی این نوع از سازه‌ها ارائه نمودند.

از روش‌های متداول جهت ایمن‌سازی سازه در برابر لرزش زمین، تقویت اجزاء آن می‌باشد که ممکن است نیروهای زیادی به سازه القا کند. یکی از ابزارهای مهندسی جایگزین در جهت تضمین ایمنی سازه، جداسازی است. با عمل جداسازی سازه از زمین توسط سیستم جداساز در زیر سازه توأم با ایجاد میرایی مناسب، نیروهای انتقال یافته به آن تا حد زیادی کاهش می‌یابد. در واقع به واسطه انعطاف‌پذیر بودن جداساز، سازه فوقانی معمولاً در زمین‌لرزه‌های متوسط و خفیف به صورت الاستیک خطی رفتار می‌کند (نعیم و کلی^۲، ۱۹۹۹). تاکنون مطالعات اندکی در رابطه با بررسی پاسخ لرزه‌ای مخازن هوایی ذخیره مایع کف جدا تحت تأثیر زمین‌لرزه‌های واقعی انجام شده است. کیم و لی^۳ (۱۹۹۵) در یک بررسی آزمایشگاهی عملکرد مخازن صلب نگهداری مایع جدا شده با جداگرهای لاستیکی را تحت حرکات دو

جهت بررسی کردند و نشان دادند که جداسازی در افت چشمگیر پاسخ دینامیکی سازه مؤثر واقع شده است. شکاری (۲۰۱۸) با بهره‌گیری از تحلیل عددی سه بعدی به بررسی تأثیر سیستم‌های جداساز بر عملکرد لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای زمین‌ی انعطاف‌پذیر پرداخت و نتیجه گرفت که کارایی چنین سیستم‌هایی در کاهش پاسخ سازه به محتوای فرکانسی و خصوصیات دینامیکی زلزله بستگی دارد. مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶) با بهره‌گیری از روش اجزاء محدود به بررسی تأثیر سیستم‌های جداساز افقی و عمودی بر پاسخ لرزه‌ای مخازن هوایی استوانه‌ای صلب پرداختند و اثر چشمگیر چنین سیستم‌هایی را در کاهش پاسخ سازه مشاهده کردند. هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر سیستم‌های جداساز لرزه‌ای افقی و عمودی بر پاسخ مخازن استوانه‌ای هوایی تحت تحریک زلزله واقعی است. جهت مدل‌سازی پوسته مخزن و سیال درون آن از روش عددی توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۴ استفاده شده است. در این مقاله ابتدا فرمولاسیون المان محدود سه‌بعدی برای مخازن استوانه‌ای انعطاف‌پذیر در حالت صلبیت کف و جداسازی شده ارائه شده و در ادامه به بررسی تأثیر انواع جداساز که شامل صحت‌سنجی فرمول‌بندی مزبور برای این نوع مخازن است، در حوزه زمان پرداخته می‌شود. قابل ذکر است که در زمینه‌ی کارایی سیستم‌های جداساز غیرخطی در کاهش پاسخ لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای هوایی با توجه به ماهیت زلزله، مطالعه هدفمندی انجام نشده است که به‌نوبه خود به انجام تحقیق حاضر ضرورت می‌بخشد. از جنبه‌های بارز و نوآوری تحقیق حاضر می‌توان به بررسی نقاط ضعف سیستم‌های جداساز غیرخطی و تأثیر آنها در پاسخ لرزه‌ای مخزن استوانه‌ای هوایی با در نظر گرفتن اثر انعطاف‌پذیری دیواره آن اشاره نمود.

معادلات حرکت سیستم کوپله سیال- سازه

برای بررسی تأثیر سیستم جداساز لرزه‌ای در عملکرد ارتعاشی مخازن هوایی فولادی آب، یک مدل مخزن هوایی با ارتفاع کل ۳۹/۳ متر و حجم مخزن ۷۵۷۱ مترمکعب با

³ Kim & Lee

⁴ ABAQUS

¹ Lyu

² Naeim & Kelly

تعداد المان‌های به کار برده شده در مدل‌سازی به اندازه‌ای در نظر گرفته شده است که دقت کافی برای تخمین پاسخ دینامیکی فراهم نماید و در ادامه صحت مدل‌سازی با استناد به منابع و مراجع معتبر تأیید شده است. به منظور مدل‌سازی سیستم مخزن-جداساز و برای به دست آوردن معادله کوپله جداره-سیال، می‌توان معادله حاکم بر قلمرو سیال و جداره را به صورت همزمان با استفاده از روش اجزاء محدود به شرح زیر گسسته‌سازی نمود.

معادله دینامیکی حاکم بر قلمرو سیال

معادله تعادل دینامیکی سیال تراکم‌ناپذیر و غیرلزج به عنوان یک محیط پیوسته صرفنظر از قسمت نوسانی سیال با استفاده از قوانین پیوستگی و اندازه حرکت و یک‌سری از فرضیات بر روی معادلات ناویر استوکس^۱ و کاربرد تابع پتانسیل سرعت، معادله لاپلاس به صورت زیر خواهد بود (فرانکوز و جوز^۲، ۲۰۰۷):

$$\nabla^2 \phi(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

که در آن ϕ تابع پتانسیل سرعت است. توزیع تابع پتانسیل سرعت و به تبع آن فشار هیدرودینامیک در قلمرو سیال با استفاده از شرایط مرزی مربوطه به دست خواهد آمد:

(الف) شرط مرزی سطح آزاد: با توجه به اینکه در مخازن نگهداری مایع امواج ثقلی تأثیر قابل توجهی بر توزیع فشار هیدرودینامیکی وارد بر بدنه مخزن دارند، با در نظر گرفتن تراکم‌ناپذیری سیال و کم بودن اثرات کشش سطحی نسبت به تأثیر ثقل، شرط مرزی سطح آزاد به صورت زیر بیان می‌گردد:

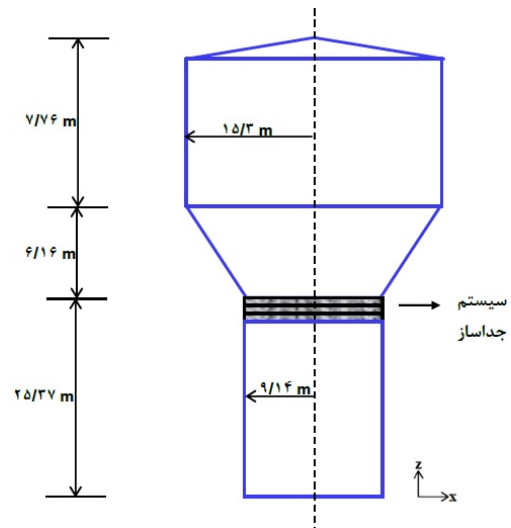
$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

(ب) شرط مرزی سطح تماس مایع-سازه: شرط مرزی محل تماس مایع با مرزهای شتابدار بدنه مخزن (مرز اندرکنش) باید به گونه‌ای باشد که تغییر مکان‌های عمود بر سطح برای محیط سیال و سازه یکسان باشند.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} = v_n(t) \quad (3)$$

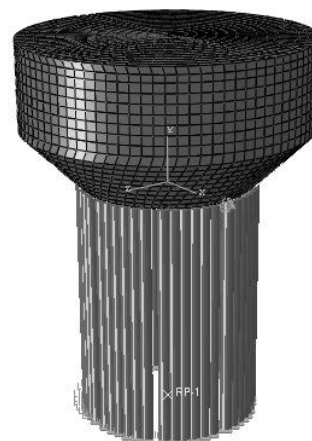
در این روابط $\mathbf{g}$ شتاب گرانش زمین، $\mathbf{n}$ بردار عمود بر مرز جامد و به سمت خارج از قلمرو مایع و v نیز سرعت سیال

بدنه انعطاف‌پذیر مطابق مشخصات شکل (۱) انتخاب شده است که بر روی سیستم جداساز لرزه‌ای قرار گرفته است. ضخامت دیواره مخزن نیز ۸/۸ میلیمتر در نظر گرفته شده است. ابعاد مخزن مورد مطالعه برگرفته از یک مخزن واقعی ذخیره آب اجرا شده در ایالات متحده آمریکا می‌باشد که توسط سایر محققین نیز مورد تحلیل واقع شده است (مسلمی و کیانوش، ۲۰۱۱).



شکل (۱): مشخصات هندسی مخزن هوایی مورد مطالعه

برای مدل‌سازی جداره فولادی مخزن از المان‌های ۴ گرهی SHELL با درجات آزادی $U_x, U_y, U_z, ROT_x, ROT_y$ و برای محدوده سیال از المان‌های ۸ گرهی FLUID با درجات آزادی U_x, U_y, U_z استفاده شده است. مدل سه بعدی مش‌بندی شده مخزن و مایع در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): مدل اجزاء محدود مخزن

¹ Navier-Stokes

² Francois & Jose

در محل جداره است. در کف مخزن نیز با توجه به اینکه تحلیل لرزه‌ای با فرض بارگذاری در راستای افقی انجام می‌شود، سرعت قائم صفر است. پس از تحلیل تابع پتانسیل سرعت، می‌توان فشار دینامیکی p وارد بر جداره مخزن را در زمان‌های مختلف از رابطه زیر به دست آورد (چن^۱ و کیانوش، ۲۰۰۶):

در تحلیل لرزه‌ای با فرض بارگذاری در راستای افقی انجام می‌شود، سرعت قائم صفر است. پس از تحلیل تابع پتانسیل سرعت، می‌توان فشار دینامیکی p وارد بر جداره مخزن را در زمان‌های مختلف از رابطه زیر به دست آورد (چن^۱ و کیانوش، ۲۰۰۶):

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (۴)$$

که در آن، ρ دانسیته مایع می‌باشد. پس از تخمین مقادیر پتانسیل سرعت و به تبع آن فشار دینامیکی در سطح آزاد مایع، تغییر مکان نقاط مختلف آن را می‌توان از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

$$p = \rho g \eta(x, y, t) \quad (۵)$$

در این رابطه، η نشان‌دهنده تغییر مکان نقاط مختلف نوسانات سطح آزاد مایع تحریک شده است.

معادله دینامیکی حاکم بر قلمرو سازه

معادله دیفرانسیل حاکم بر تعادل دینامیکی محیط پوسته مخزن توسط معادله زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_{ij,i} - F_i = \rho \frac{\partial^2 u_{si}}{\partial t^2} \quad (۶)$$

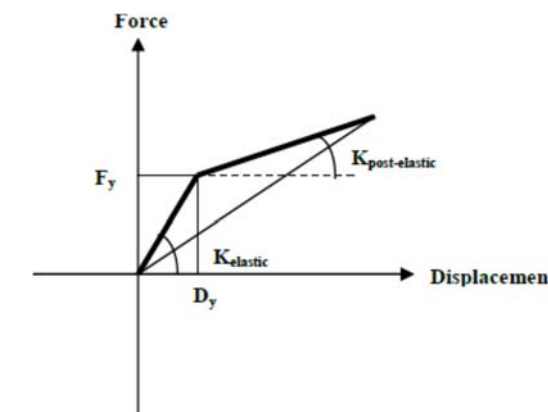
در این رابطه، u_{si} و σ_{ij} به ترتیب مؤلفه‌های تنش و جابجایی، F_i بردار تحریک خارجی زلزله و ρ دانسیته مصالح می‌باشد. معادله فوق با گسسته‌سازی به شکل زیر بازنویسی می‌شود (کلاته و عطارنژاد، ۲۰۱۲):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_s + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_s + \mathbf{K}\mathbf{u}_s = \mathbf{F}(t) \quad (۷)$$

در رابطه (۷) $\mathbf{M}$ ، $\mathbf{C}$ و $\mathbf{K}$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی پوسته و $\mathbf{u}$ نیز بردار جابجایی نقاط مختلف جداره مخزن در محل تماس با سیال است. $\mathbf{F}$ نیز بردار نیروهای خارجی وارده بر سازه مخزن است که شامل دو مؤلفه فشار دینامیکی آب و نیروی حاصل از اثر زلزله بر سازه است.

معادله کوپله مایع-پوسته مخزن- جداگر

با بهره‌گیری از سیستم جداگر لرزه‌ای در کف مخزن نیروی انتقال‌یافته از زمین به سازه فوقانی تا حد زیادی کاهش می‌یابد، لیکن کاهش مذکور پاسخ سازه با تغییر مکان نسبی قابل توجهی بین فونداسیون سازه و زمین همراه خواهد بود.



شکل (۳): مدل رفتار دوطبی برای سیستم جداگر

در معادله (۱۰)، $\mathbf{K}^*$ ، $\mathbf{C}^*$ و $\mathbf{M}^*$ ماتریس‌های مشخصه مخزن جداسازی شده هستند که به صورت زیر بیان می‌شوند:

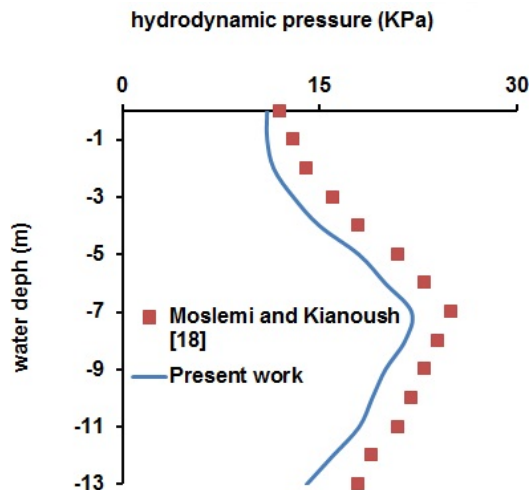
$$\mathbf{M}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{r}^T \mathbf{M} \mathbf{r} + \mathbf{m}_b & \mathbf{r}^T \mathbf{M} \\ \mathbf{M} \mathbf{r} & \mathbf{M} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K} \end{bmatrix} \quad (۹)$$

که در آن $\mathbf{m}_b$ ، $\mathbf{c}_b$ و $\mathbf{k}_b$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سیستم جداساز لرزه‌ای، $\ddot{\mathbf{u}}_g$ بردار شتاب زمین در حوزه فرکانس و $\mathbf{r}$ بردار حرکت سازه (متشکل از درایه‌های صفر و یک) است. بردار تغییر مکان $\mathbf{u}^* = [\mathbf{u}_b, \mathbf{u}_s]$ می‌باشد که در آن، $\mathbf{u}_b$ و $\mathbf{u}_s$ به ترتیب نشان‌دهنده بردار جابجایی سیستم جداساز نسبت به زمین و بردار جابجایی نقاط مختلف مخزن نسبت به سیستم جداساز می‌باشند. سرانجام بر اساس رابطه (۸) می‌توان بردار جابجایی نسبی هر درجه آزادی نقاط مختلف مخزن و سیستم جداساز را نسبت به زمین، به ازای زمان و دامنه مشخص محاسبه نمود. جهت حل درگیر معادلات مایع-پوسته مخزن، ابتدا فشار هیدروپنوماتیکی را با استفاده از معادله (۵) در گره‌های المان‌های محدود محاسبه نموده و سپس مقادیر

² bilinear hysteretic elements

¹ Chen

البته لازم به ذکر است که در مدل سازی اجزاء محدود مرجع، از نرم افزار انسیس استفاده شده است و از اختلاف موجود بین نتایج چنین امری قابل مشاهده است. از سوی دیگر در مطالعه مرجع جز یک اشاره کلی در شرایط مرزی، بحث خاصی بر روی تأثیر انعطاف پذیری جداره بر پاسخ دینامیکی سازه صورت نگرفته است و اختلاف بین نتایج ممکن است ناشی از در نظر گیری الگوهای متفاوت اندرکنش آب-سازه باشد.



شکل (۴): مقایسه نتایج تحلیل حاضر با مرجع (مسلمی و کیانوش، ۲۰۱۶)

تحلیل لرزه ای مخزن هوایی

در این بخش، پاسخ لرزه ای مخزن استوانه ای هوایی نشان داده شده در شکل (۱) تحت تحریک واقعی زلزله ۱۹۸۹ لوماپریتا^۴ بررسی می شود. شکل (۵) شتاب نگاشت اعمال شده بر مخزن به همراه طیف پاسخ شتاب آن را نشان می دهد. همانگونه که از طیف پاسخ شتاب نگاشت مزبور پیداست این زلزله جزء زلزله های پریود بلند به شمار میرود. لازم به ذکر است که مایع درون مخزن آب با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است و دیواره آن از جنس فولاد با مدول کشسانی ۲۰۵ گیگاپاسکال، چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت پواسون ۰/۲۸ فرض شده است. در تحلیل های انجام شده تنش تسلیم فولاد نیز ۲۷۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

محاسبه شده را به عنوان نیروی خارجی در محل گره های المان های پوسته وارد نموده و به ازای زمان های مختلف بارگذاری مسئله اندرکنش سیال و سازه بررسی می گردد.

مطالعه عددی رفتار لرزه ای مخازن هوایی

در این پژوهش پاسخ مخزن هوایی ذخیره سیال تحت دو حالت مختلف مخزن به پایه ثابت و مخزن کف جدا با هم مقایسه می شوند. همانگونه که بیان گردید، برای مدلسازی سازه حاوی آب نرم افزار اجزای محدود آباکوس به کار گرفته شده و در مدل المان محدود مورد استفاده جهت اعمال اندرکنش مابین دیواره مخزن و محیط آب درون آن از روش کوپل اولری-لاگرانژی^۱ استفاده شده است. در این بخش ابتدا به ارزیابی نتایج برنامه توسعه داده شده در مقایسه با نتایج حاصل از پژوهش های سایر محققین پرداخته می شود، و در ادامه نتایج تحلیل های لرزه ای حاضر تحت زلزله واقعی در حوزه زمان مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

ارزیابی مدل عددی

به منظور بررسی صحت عملکرد نرم افزار آباکوس، نتایج حاصل از برنامه حاضر با نتایج به دست آمده توسط مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶) مقایسه می شود که در آن مرجع، مخزن هوایی معرفی شده در شکل (۱) تحت تأثیر مولفه افقی زلزله السنترو^۲ مورد تحلیل تاریخچه زمانی قرار گرفته است. پوسته فولادی و سیستم جداساز افقی سربی-لاستیکی بررسی شده در مرجع (مسلمی و کیانوش، ۲۰۱۶) با مشخصات مدول الاستیسیته ۲۰۵ گیگاپاسکال، چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت پواسون ۰/۲۸ برای فولاد، و تنش تسلیم ۱۲ مگاپاسکال و نسبت پواسون ۰/۲۸ برای جداساز در نرم افزار انسیس^۳ مدل سازی شده که در ادامه به مقایسه نتایج می پردازیم. شکل (۴) نشان دهنده نتایج حاصل شده برای توزیع بیشینه فشار هیدرو دینامیکی وارد بر بدنه مخزن برای مدل مقاله مرجع و تحلیل عددی حاضر است، که بیانگر همخوانی قابل قبول بین نتایج و صحت روند شبیه سازی عددی حاضر می باشد.

⁴ Loma Prieta earthquake

¹ Couple Lagrangian-Eulerian

² El Centro earthquake

³ ANSYS

۴۷..... بهسازی لرزه‌ای مخازن هوایی استوانه‌ای ذخیره‌ی آب به کمک جداسازهای غیرخطی با در نظر گرفتن اندرکنش سیال- سازه

در این بخش نتایج تحلیل‌ها شامل تلاطم سطح آزاد، برش پایه، لنگر واژگونی، تغییرمکان جانبی نسبی رأس مخزن و تغییرمکان نسبی کف آن برای بارگذاری زمین‌لرزه لوماپریتا ارائه خواهد شد.

جدول (۱): مشخصات سیستم جداساز

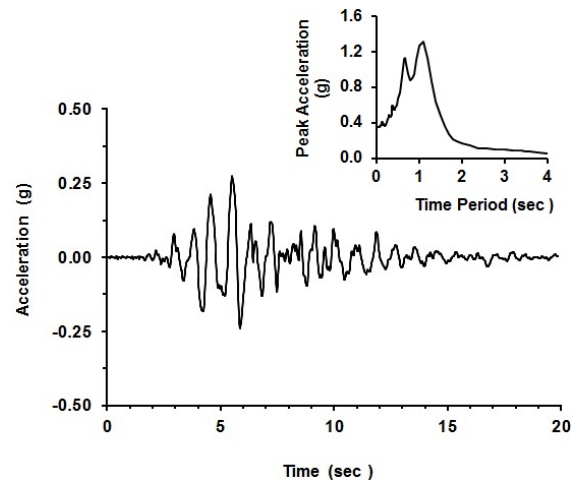
K_e (KN/mm)	K_p (KN/mm)	K_v (KN/mm)	F_y (KN)
۱۷	۲	۶۰۰	۲۲۴

تلاطم سطح آزاد

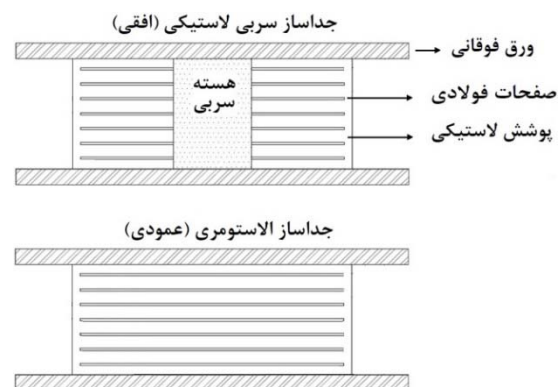
یکی از پارامترهایی که در تحلیل عملکرد لرزه‌ای مخازن اهمیت شایانی دارد، مطالعه رفتار سطح آزاد سیال در حضور سیستم جداساز است. نوسانات سطح آزاد سیال حین زلزله می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی شود و لذا ارتفاع تلاطم سطح آزاد سیال عامل اساسی در تعیین ارتفاع آزاد مخزن است. در این قسمت، برای درک بهتر سیستم جداساز بر تغییر مکان سطح مایع، نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان سطح آب، برای مخازن با جداسازهای افقی و عمودی ارائه می‌شود. در شکل (۷)، تغییرات ارتفاع سطح آب مخزن با جداره انعطاف‌پذیر با پایه ثابت و جداسازی شده در یک نقطه از این سطح در طول تحریک نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست تأثیر سیستم جداساز بر دامنه تلاطم امواج سطحی جزئی است، که دلیل این تأثیر جزئی را می‌توان به تأثیرپذیری ناچیز مؤلفه نوسانی حرکت سیال از ارتعاشات سیستم جداساز دانست.

با توجه به تحلیل‌های تاریخچه زمانی حداکثر ارتفاع امواج سطحی در حالات مختلف پایه ثابت، جداسازی افقی و عمودی به ترتیب ۷۴۴/۴۵، ۸۴۷/۴۳ و ۵۴۷/۴۱ میلیمتر به دست می‌آید. بر این اساس، ماکزیمم دامنه امواج متلاطم با جداسازی افقی تحت اثر زلزله مزبور ۱۳/۸۳ افزایش، و با در نظر گرفتن جداساز عمودی ۲۶/۴۷ کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج کمی شکل مزبور می‌توان دریافت که با نصب سیستم جداساز عمودی ارتفاع تلاطم سطح آزاد ناشی از تحریک زلزله تا حدی کاهش پیدا می‌کند، اما جداساز افقی باعث تشدید پاسخ بیشینه ارتفاع امواج متلاطم سطحی شده است که دلیل آن را می‌توان به تحریک مؤلفه نوسانی پاسخ مخزن تحت رکورد زلزله لوماپریتا مربوط دانست.

مدل‌سازی به صورت سه بعدی بوده و مخزن بدون سقف فرض شده است. سیستم‌های جداساز مورد مطالعه در این تحقیق نوع سربی-لاستیکی متشکل از یک هسته سربی استوانه‌ای و چندین لایه لاستیک و فولاد با قابلیت تغییر شکل افقی، و نوع الاستومری بدون هسته سربی و با قابلیت تغییر شکل عمودی است. سیستم‌های مذکور در شکل (۶) نشان داده شده است.



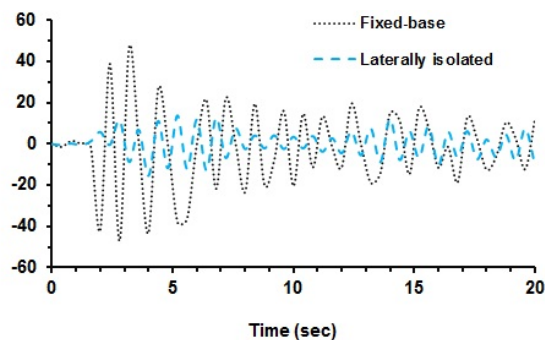
شکل (۵): شتاب نگاشت مورد استفاده در این پژوهش



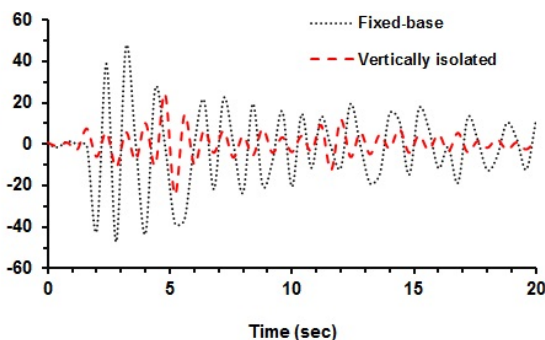
شکل (۶): مدل میراگرهای مورد استفاده در این پژوهش

در جداساز نوع افقی صفحات فولادی تحت تأثیر تحریک خارجی بر روی یکدیگر حرکت می‌کنند ولی هسته سربی در برابر جابجایی صفحات مقاومت کرده و دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود که به نوبه خود باعث استهلاک انرژی می‌شود. جداساز عمودی نیز به دلیل قیدهای تکیه‌گاهی صرفاً در راستای قائم می‌تواند حرکت نموده و منجر به استهلاک انرژی زلزله شود. مشخصات سیستم جداساز در جدول (۱) ارائه شده است.

جداساز در کاهش پاسخ لرزه‌ای سیستم مفید می‌باشد. براساس نتایج کمی نقش جداساز افقی در کاهش برش پایه چشم‌گیرتر است که دلیل آن را می‌توان در کاهش میزان انرژی ورودی به سازه و به تبع آن کاهش میزان انرژی هیستریزس در مخزن جدا شده از زمین دانست.



(الف)



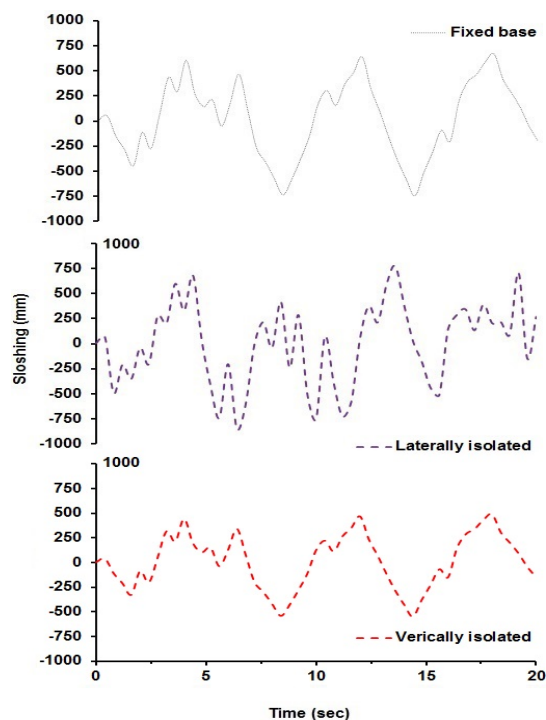
(ب)

شکل (۸): مقایسه تغییرات زمانی نیروی برش پایه در مخزن با حالات مختلف پایه؛ الف) مقایسه با جداساز افقی (ب) مقایسه با جداساز عمودی

لنگر واژگونی

بخشی از تحلیل‌های لرزه‌ای پژوهش حاضر، به چگونگی تأثیرگذاری مکانیزم جداسازی بر پاسخ دینامیکی مخزن هوایی انعطاف‌پذیر اختصاص یافته‌است. نتایج مطالعه مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶) در مخازن استوانه‌ای جداسازی شده نشانگر این مطلب است که کارایی سیستم جداساز در کاهش پاسخ لرزه‌ای مخزن به طور قابل توجهی تحت تأثیر ماهیت شتاب زمین قرار دارد، لیکن در زمینه مخازن استوانه‌ای با در نظر گرفتن ماهیت شتاب زمین توصیه خاصی تاکنون ارائه نشده است. شکل (۹) نمودار تاریخچه زمانی لنگر واژگونی در مخزن با پایه ثابت و جداسازی شده در طول تحریک را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل

مشابه نتایج تحلیل حاضر در خصوص اثر سیستم جداساز بر افزایش دامنه امواج سطحی در مخزن هوایی تحلیل شده توسط مسلمی و کیانوش (۲۰۱۶) تحت تأثیر زلزله السنترو (۱۹۴۰) گزارش شده است.



شکل (۷): مقایسه تغییرات زمانی ارتفاع سیال در مخزن با حالات مختلف پایه

نیروی برش پایه

در شکل (۸)، تغییرات برش پایه در مخزن با پایه ثابت و جداسازی شده در طول تحریک نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست سیستم جداساز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ مخزن دارد.

علت این امر را می‌توان با توجه به انعطاف‌پذیری روسازه، در افزایش زمان تناوب سازه جداسازی شده نسبت به حالت پایه ثابت دانست؛ بنحوی که این تغییر در زمان تناوب باعث تغییر پاسخ لرزه‌ای روسازه می‌شود.

با توجه به تحلیل‌های انجام گرفته مقدار بیشینه برش پایه در حالات مختلف پایه ثابت، جداسازی افقی و عمودی به ترتیب ۴۷/۱۳، ۱۵/۴۷ و ۲۴/۴۸ مگانیوتن است. بر این اساس، مقدار کاهش برش پایه در حالات قرارگیری جداساز افقی و عمودی به ترتیب ۶۷/۱۸ و ۴۸/۰۶ درصد است. با استناد به نتایج حاصل شده، کاربرد هر دو نوع سیستم

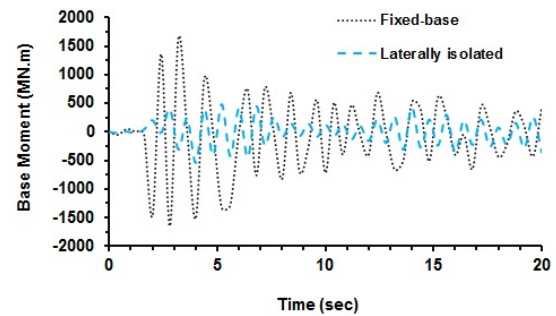
۴۹..... بهسازی لرزه‌ای مخزن هوایی استوانه‌ای ذخیره‌ی آب به کمک جداسازهای غیرخطی با در نظر گرفتن اندرکنش سیال- سازه

بسیار زیادی طراحی می‌شود تا بتواند وزن سازه را تحمل کند و در راستای افقی بسیار انعطاف‌پذیر است تا در زمان زلزله با تغییر مکان بتواند انرژی سازه را میرا نماید. در شکل (۱۰)، نمودار تغییرمکان نسبی سقف مخزن نسبت به کف آن با پایه ثابت و جداسازی شده در طول زلزله نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست سیستم جداساز عمودی تأثیر بسزایی بر کاهش تغییر مکان مخزن دارد. با توجه به نتایج کمی مقدار بیشینه جابجایی سقف مخزن در حالات مختلف پایه ثابت، جداسازی افقی و عمودی به ترتیب ۶/۱۸، ۳/۲۱ و ۱/۷۹ میلیمتر است. بر این اساس، مقدار کاهش تغییر مکان در حالات قرارگیری جداساز افقی و عمودی به ترتیب ۴۸/۰۶ و ۷۱/۰۴ درصد است. براساس نتایج کمی سیستم روسازه در اثر جداسازی شبیه یک جسم نسبتاً صلب حرکت می‌کند و اثر انعطاف‌پذیری دیواره به دلیل کاهش قابل توجه شتاب انتقالی به روسازه به طور محسوسی ناچیز می‌گردد. همچنین نقش جداساز عمودی در کاهش جابجایی سقف مخزن کارا تر است و به نوبه خود این موضوع در کنترل پایداری سازه جداسازی شده هنگام تحریک زلزله اهمیت قابل توجهی دارد. این موضوع به‌خصوص در مخزن هوایی از جهت خرابی سیستم لوله کشی متصل به جداره سازه در اثر تغییر مکان‌های کنترل نشده از اهمیت خاصی برخوردار است.

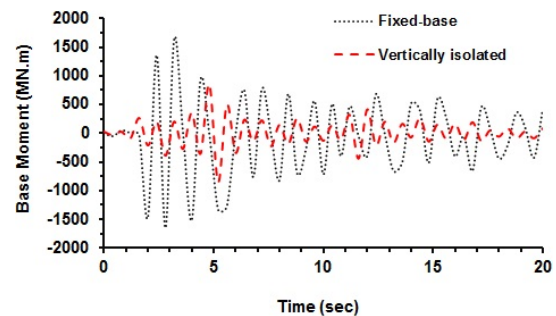
در ادامه تحلیل‌های تاریخچه زمانی، شکل (۱۱) نمودار تغییر مکان نسبی سقف مخزن (دریفت^۱) را نسبت به تراز زمین در حالات مختلف پایه ثابت و جداسازی شده در طول زلزله نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج کمی تحلیل‌های دینامیکی بیشینه جابجایی سقف مخزن نسبت به زمین در حالات مختلف پایه ثابت، جداسازی افقی و عمودی به ترتیب ۲۶/۹۲، ۱۱/۸۶ و ۷/۸۸ میلیمتر به دست می‌آید. بر این اساس، ماکزیمم دریفت با جداسازی افقی تحت اثر زلزله مزبور ۵۵/۹۴ درصد کاهش، و با در نظر گرفتن جداساز عمودی نیز ۷۰/۷۳ درصد کاهش یافته‌است. همانگونه که از نتایج مشخص است دریفت سازه که ممکن است موجب گسیختگی و انهدام آن شود با جداساز

پیداست سیستم جداساز کاهش قابل توجه پاسخ مخزن را به‌همراه داشته است.



(الف)



(ب)

شکل (۹): مقایسه تغییرات زمانی لنگر واژگونی در مخزن با

حالات مختلف پایه؛ الف) مقایسه با جداساز افقی ب)

مقایسه با جداساز عمودی

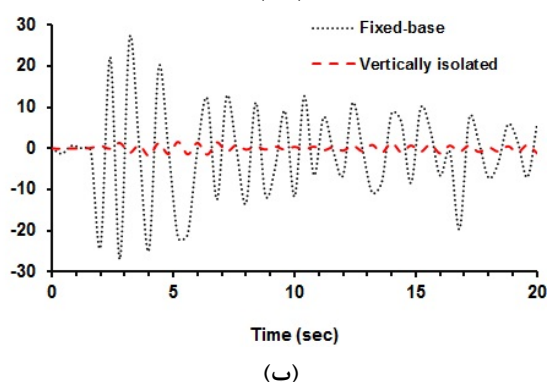
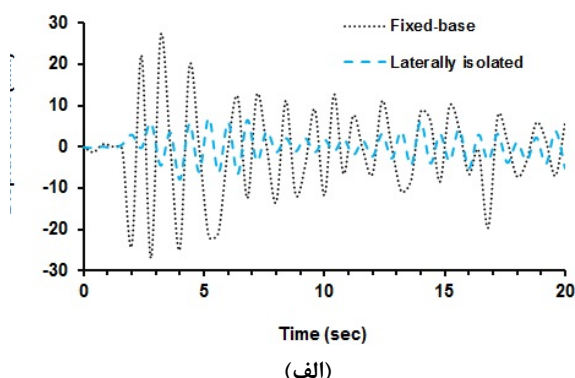
با توجه به نتایج کمی تحلیل‌های دینامیکی بیشینه لنگر واژگونی در حالات مختلف پایه ثابت، جداسازی افقی و عمودی به ترتیب ۱۶۴۹/۴۵، ۵۴۰/۹۹ و ۸۵۳/۶۲ مگانیوتن در متر به دست می‌آید. بر این اساس، ماکزیمم مقدار لنگر واژگونی با جداسازی افقی تحت اثر زلزله مزبور ۶۷/۲ درصد کاهش، و با در نظر گرفتن جداساز عمودی نیز ۴۸/۲۵ درصد کاهش یافته‌است. همانگونه که از نتایج کمی پیداست، نقش جداساز افقی در کاهش لنگر واژگونی مشابه برش پایه چشم‌گیرتر است. در واقع دلیل این امر را می‌توان در کاهش بیشتر انرژی ورودی به روسازه دانست. در مجموع حدود دو سوم از نیروی لنگر واژگونی در تراز لایه جداساز افقی و نیمی از آن در تراز لایه جداساز عمودی مستهلک شده و بقیه آن وارد سازه می‌گردد.

تغییر مکان نسبی روسازه

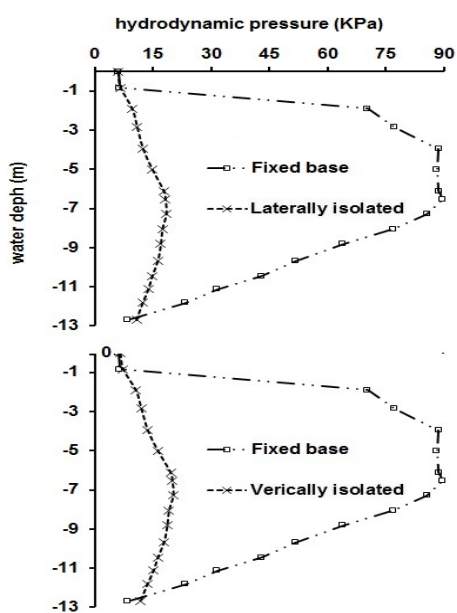
معمولاً سیستم جداسازی لرزه‌ای در راستای قائم با سختی

¹ Drift

شود، بیشتر از فشاری است که جداساز در نظر گرفته شود.

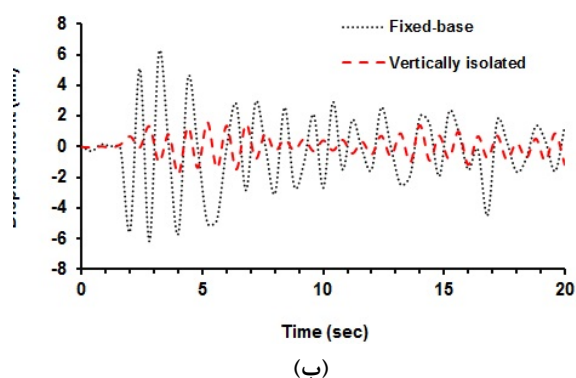
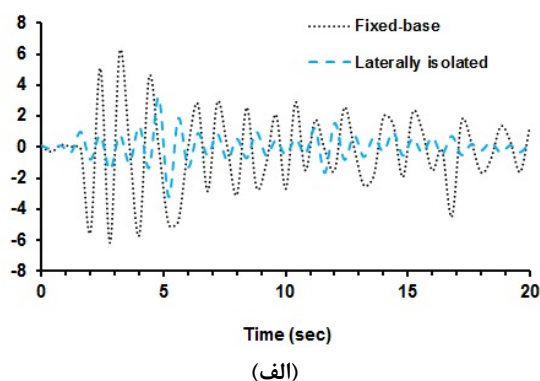


شکل (۱۱): مقایسه تغییرات زمانی (دریافت) سقف مخزن نسبت به تراز زمین با حالات مختلف پایه: الف) مقایسه با جداساز افقی ب) مقایسه با جداساز عمودی



شکل (۱۲): مقایسه فشار هیدرودینامیکی در ارتفاع دیوار مخزن

عمودی به مقدار قابل توجهی کنترل می‌گردد که به نوبه خود مزیت بزرگی برای این نوع از جداسازی محسوب می‌شود. البته باید به این نکته اشاره کرد که اگر تغییر مکان زیاد سازه هنگام وقوع زلزله مقوله قابل اهمیتی نباشد، طراحی جداساز افقی از جهت کنترل قابل ملاحظه پاسخ لرزه‌ای مخزن نسبت به جداساز عمودی ترجیح داده می‌شود. باید اذعان نمود وجه تمایز و اختلاف اصلی تحقیق حاضر با سایر تحقیقات در این زمینه، تحلیل‌های کمی بر روی پاسخ لرزه‌ای مخزن هوایی نسبت به زلزله پریود بلند است که اهمیت در نظر گرفتن تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر کارایی انواع سیستم‌های میراگر را نمایان می‌سازد.



شکل (۱۰): مقایسه تغییرات جابجایی سقف مخزن با حالات مختلف پایه: الف) مقایسه با جداساز افقی ب) مقایسه با جداساز عمودی

در قسمتی از تحلیل‌ها اثرات منحنی‌های توزیع فشار هیدرودینامیک وارد بر دیواره مخزن با پایه‌های مختلف ثابت و جداسازی شده بررسی شده است که نتایج آن در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود فشار هیدرودینامیکی در صورتی که پایه ثابت در نظر گرفته

زمان تحلیل شده‌است. نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- نمودارهای تابع پاسخ زمانی به‌دست‌آمده از تحلیل‌های غیرخطی نشان می‌دهند که استفاده از جداساز لرزه‌ای منجر به کاهش فشار القائی درون مخزن می‌شود و این امر در نهایت باعث کاهش قابل توجه برش پایه و کاهش لنگر واژگونی می‌شود.

۲- جداساز افقی در مقایسه با جداساز عمودی نقش فعال- تری در کاهش پاسخ لرزه‌ای سیستم نشان می‌دهد، به طوری که کاهش نیروی برش پایه تحت جداسازی افقی و عمودی به ترتیب برابر $67/18\%$ و $48/06\%$ و کاهش لنگر واژگونی به ترتیب برابر $67/2\%$ و $48/25\%$ بوده‌است.

۳- براساس نتایج کمی در حالت جداسازی عمودی تغییر مکان افقی سازه تقریباً ۲۳ درصد بیشتر کنترل می‌شود که نشان‌دهنده تضمین مناسب سیستم جداساز عمودی در تأمین پایداری مخازن هوایی است.

۴- تحقیق حاضر نشان می‌دهد که استفاده از سیستم جداساز افقی می‌تواند مقاومت مناسبی در سازه هنگام وقوع زلزله ایجاد کند، با ذکر این مطلب که سیستم مزبور علیرغم کارایی مناسب در استهلاک انرژی ورودی به سازه می‌تواند تا ۱۴ درصد دامنه موج متلاطم سطحی را افزایش دهد؛ درحالی‌که سیستم جداساز عمودی تا ۲۶ درصد دامنه موج متلاطم سطحی را کاهش می‌دهد که به نوبه خود نقطه ضعف جداسازی افقی به شمار می‌رود.

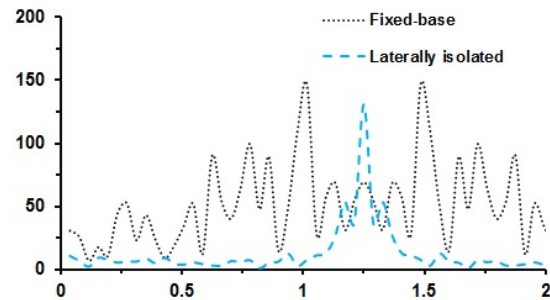
از جمله سیستم‌هایی که می‌تواند در بهبود نقاط ضعف سیستم‌های جداساز از جمله افزایش نسبی دامنه امواج متلاطم سطحی و تغییر مکان نسبی سازه مؤثر باشد، تیغه‌های میراگر است. این موضوع می‌تواند در پژوهش‌های آتی دنبال شود.

References

- 1- Ahmadi, M., and Kalantari, A. (1382). A model for water-air tanks considering the dynamic interaction of the structure and water during an earthquake. Modares Engineering, - (14), 29-38.
- 2- Cooper, T.W., Wachholz, T.P. (1999). Optimizing postearthquake lifeline system reliability, Proceeding of the 5th US conference on lifeline earthquake engineering ASCE, 16, 878-886.

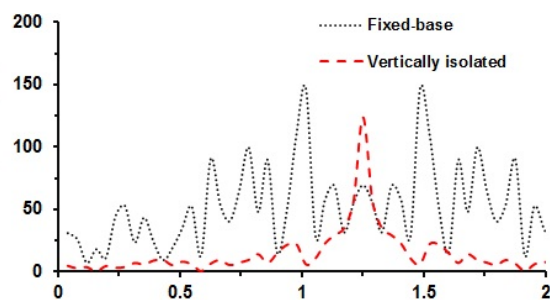
در شکل (۱۳) دامنه فوریه برش پایه در مخزن با پایه ثابت و جداسازی شده نشان داده شده است.

همانطور که از شکل پیداست عمل جداسازی مخزن از پایه باعث کاهش قابل توجه دامنه طیف فوریه برش پایه شده است. از طرفی در مخزن با پایه ثابت در برخی از فرکانس‌ها شاهد پیک‌هایی در پاسخ مخزن هستیم درحالی‌که با عمل جداسازی این پاسخ‌های تشدید شده تقریباً هموار می‌شوند.



Frequency (Hz)

(الف)



Frequency (Hz)

(ب)

شکل (۱۳): طیف دامنه فوریه برش پایه برای مخازن مختلف؛ (الف) مقایسه با جداساز افقی (ب) مقایسه با جداساز عمودی

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تحلیل جدید غیرخطی اجزاء محدود بر کارایی سیستم‌های جداساز به‌کار برده شده در مخازن هوایی استوانه‌ای ذخیره آب با در نظر گرفتن اثرات انعطاف‌پذیر دیواره انجام شده‌است. به منظور بررسی پاسخ‌های دینامیکی و ارتعاشی مخازن هوایی استوانه‌ای ذخیره آب، یک مخزن فولادی در حالت‌های مختلف پایه ثابت و جداسازی شده از کف توسط سیستم‌های جداساز هسته سربی افقی و الاستومری عمودی تحت اثر زلزله ورودی لوماپریتا در حوزه

- 21- Yang, J.Y. (1976). Dynamic Behavior of Fluid-Tank System. Ph.D. thesis, Houston (Texas), Civil Engineering, Rice University.
- 3- Chang, J.I., Lin, C.C. (2006). A Study of Storage Tank Accidents, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 51–59.
- 4- Chen, J.Z., Kianoush, M.R. (2006). Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks. *Engineering Structures*, 28, 704–715.
- 5- El Dmatty, A.A., Korol, R.M., Mirza, F.A. (1998). Stability of elevated liquid-filled conical tanks under seismic loading, Part II—applications. *Earthquakeengineering & Strucural Dynamics*, 26, 1209-1229. 6.
- 6- Francois, A., Jose, A. (2007). Modelling of mechanical systems fluid-structure Interaction. Butterworth-Heinemann, *Journal of Fluids and Structures*, 24, 446-448.
- 7- Housner, G.W. (1963). The dynamic behavior of water tank. *Bulletin of the Seismological Society of American*, 74, 1031-1041.
- 8- Haroun, M.A., Ellaithy, H.M. (1985). Seismically Induced Fluid Forces on Elevated Tanks. *Journal of Technical Topics in Civil Engineering*, 111, 1-15.
- 9- Kalateh, F., Attarnejad, R. (2012). A New Cavitation Simulation Method: Dam-Reservoir Systems. *International Journal of Computational Methods in Engineering Science*, 13, 161–183.
- 10- Kim, N.S., Lee, D.G. (1995). Pseudo-dynamic test for evaluation of seismic performance of base-isolated liquid storage tanks. *Engineering Structures*, 17(3), 198-208.
- 11- Kim, J., Koh, H., Kwah, I. (1996). Dynamic response of rectangular flexible fluid containers. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 122(9), 807-816.
- 12- Livaoglu, R., DoganGun, A. (2006). Simplified seismic analysis procedures for elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction. *Journal of fluids and structures*, 22, 421-439.
- 13- Livaoglu, R., DoganGunm A. (2007). Effect of foundation embedment on seismic behavior of elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27, 855-863.
- 14- Lyu, Y., Sun, J., Sun, Z., Cui, L., Wang, Zh. (2020). Simplified mechanical model for seismic design of horizontal storage tank considering soil-tank-liquid interaction. *Ocean Engineering*, 198, 106953.
- 15- Moslemi M, Kianoush MR, Pogorzelski W, 2011. Seismic response of liquid-filled elevated tanks. *Engineering Structures*, 33, 2074-2084.
- 16- Moslemi, M., Ghaemmaghami, A.R., Kianoush, M.R. (2016). Parametric based study for design of liquid-filled elevated tanks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43.
- 17- Moslemi, M., Kianoush, M.R. (2016). Application of seismic isolation technique to partially filled conical elevated tanks. *Engineering Structures*, 127, 663–675.
- 18- Naeim, F., Kelly, J. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*. John Wiley and Sons, New York.
- 19- Shekari, M.R. (2018). A coupled BE–FE–BE study for investigating the effect of earthquake frequency content and predominant period on seismic behavior of base-isolated concrete rectangular liquid tanks, *Journal of Fluids and Structures*. 77, 19–35.
- 20- Wand, A., Mahdi, A. (1989). Nonlinear seismic response behavior of cross braced steel elevated water tanks. Ph.D. thesis, Civil engineering, University of Michigan.

Improving seismic performance of elevated cylindrical water storage tanks using nonlinear isolators incorporating liquid–structure interaction

Mohammad Reza Shekari^{*1}

Mojtaba Hasani²

Mohammad Reza Zareifard³

Abstract

Pervasive construction of elevated liquid tanks as the most important sources for urban hygienic water, and their failure under earthquake, highlights the necessity for research toward new passive control devices. Design and use of base-isolation systems for elevated liquid tanks is propounded as a novel seismic engineering technology. To date, no special examination has been discussed in relation with the workability of such systems in reducing the seismic response of elevated liquid tanks considering tank wall flexibility. In this study, the seismic performance of a steel elevated water tank with/without isolator was analyzed and outcomes were evaluated using lead-rubber and elastomeric bearings by performing time-history analyses. To this end, finite shell elements for tank wall and internal finite elements for liquid, and bilinear hysteretic elements for the base-isolation systems are elected, and the seismic analysis of flexible liquid tank is performed in the time domain under real earthquake. The results show that the lateral control device despite excessive structural displacement could offer a substantial benefit for reducing the system's seismic response which depends on the earthquake characteristics.

Keywords

Elevated liquid tank, Base-isolation, Seismic analysis, Finite element method

¹ Assistant Professor, Department of civil Engineering, Estahban Higher Education Center, Estahban, Iran. shekari.2291@gmail.com

² Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. mojtahabhasani11@gmail.com

³ Assistant Professor, Department of civil Engineering, Estahban Higher Education Center, Estahban, Iran. zareifard@aut.ac.ir