

ارزیابی تأثیر جداسازهای غیرخطی بر عملکرد لرزه‌ای مخازن مستطیلی جداسازی شده مایعات با احتساب اندرکنش سیال و سازه

محمدرضا شکاری^{۱*}

چکیده

تغییر مکان‌های نسبی و شتاب ایجادشده در مخازن محتوی مایع حین زلزله، از عوامل ایجاد صدمه در این نوع سازه‌ها می‌باشند. جهت کاهش عوامل فوق و به دنبال آن کاهش خسارت وارده به این سازه‌های ویژه می‌توان از سیستم‌های جداگر لرزه‌ای استفاده نمود که به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین گزینه‌های مهندسی زلزله در زمینه کنترل غیرفعال بشمار می‌رود. در پژوهش‌های انجام‌شده تاکنون بررسی خاصی بر روی تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر کارایی این نوع سیستم‌ها در کاهش پاسخ لرزه‌ای مخازن مستطیلی انجام‌نشده است. در این پژوهش سعی می‌شود که رفتار مخازن مستطیلی جداسازی شده پایه تحت اثر زلزله‌های مختلف با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی موردبررسی قرار گیرد که بدین منظور، دو مخزن لاغر و چاق برای دو حالت پایه ثابت و پایه جداسازی شده با جداگرهای سری-لاستیکی با سختی‌های مختلف، شامل جداساز سخت و نرم در نظر گرفته می‌شود. در مدل توسعه داده‌شده با کاربرد المان‌های محدود با رفتار پوسته‌ای برای سازه مخزن، المان‌های مرزی داخلی برای سیال درون مخزن و المان‌های هیستریزیس با رفتار دوخطی برای جداگرها، آنالیز مخزن انعطاف‌پذیر در قلمرو فرکانس و زمان انجام می‌شود. در ادامه تأثیر جداسازهای لرزه‌ای بر پاسخ لرزه‌ای سازه شامل فرکانس طبیعی و تغییر مکان امواج متلاطم سطحی، برش پایه و لنگر واژگونی و فشار دینامیکی وارد بر جداره مخزن تحت اثر تحریک هارمونیک و زلزله واقعی بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی

مخزن مستطیلی، جداسازی لرزه‌ای، تلاطم سطح آزاد، اندرکنش آب و سازه، پاسخ لرزه‌ای

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

مقدمه

مخازن مستطیلی ذخیره سیال به عنوان سازه های ویژه و حائز اهمیت زیاد در ذخیره آب شرب و آتش نشانی، فرآورده های نفتی، مواد شیمیایی و فاضلاب و در شبکه های آبرسانی شهری به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرند. بنابراین حصول اطمینان از عملکرد ایمن و بی وقفه آن ها هنگام وقوع زمین لرزه ای شدید احتمالی و پس از آن جهت جلوگیری از نشت مواد سمی و شیمیایی بسیار اهمیت دارد. بررسی عملکرد مخازن طی زلزله های گذشته از جمله کوبه^۱ ژاپن (۱۹۹۵)، ازمیت^۲ ترکیه (۱۹۹۹) نشان دهنده سطح بالای آسیب پذیری لرزه ای مخازن مستطیلی و استوانه ای به خصوص مخازن مهار نشده است.

اکثر مطالعه های موجود در زمینه مخازن به بحث و بررسی مخازن استوانه ای بخصوص از نوع فولادی اختصاص یافته است و از این رو توجه کمتری به آنالیز و طراحی لرزه ای مخازن مستطیلی شده است به گونه ای که فقدان ضوابط و معیارهای طراحی مناسب منجر به ساخت نامطلوب این نوع مخازن شده است. پژوهش های اولیه در زمینه هیدرودینامیک مخازن ذخیره آب تحت تحریک های ناشی از زلزله به گونه ای بوده که مایع درون مخزن تراکم ناپذیر و جداره و پی مخزن صلب فرض شده و از اثر اندرکنش آب و سازه چشم پوشی شده است (هاوسنر^۳، ۱۹۶۳؛ یانگ^۴، ۱۹۷۶). بر اساس نتایج این تحلیل ها، تحت اثر تحریکات زمین، قسمتی از جرم مایع درون مخزن که به جرم سخت (ضربانی) موسوم است با شتابی مشابه تحریکات وارده به مخزن نوسان می کند،

در حالی که مابقی مایع که به جرم مایع (نوسانی) موسوم است با دوره تناوبی بزرگ تر از دوره تناوب قسمت سخت نوسان می کند.

روش های پیشنهادی بر پایه این پژوهش های مبنای محاسبه فشارهای هیدرودینامیکی وارد بر بدنه مخازن و تعیین پاسخ لرزه ای آن ها در بسیاری از آیین نامه های طراحی مخازن بوده است. با در نظر گرفتن انعطاف پذیری پوسته، ولتسوس^۵ (۱۹۸۴) و کیم و همکارانش^۶ (۱۹۹۶) به تحلیل عددی اثر اندرکنش آب و سازه در مخازن پرداختند و نتیجه گرفتند که بر اثر انعطاف پذیری جداره مخزن بخش سخت مایع درون مخزن ممکن است شتاب هایی به مراتب بزرگ تر از شتاب اوج زمین تجربه کند در حالی که اثر مذکور بر نوسان های بخش مایع قابل اغماض است. چن و کیانوش^۷ (۲۰۰۵) با توسعه یک الگوریتم عددی به تحلیل فشار دینامیکی روی دیوارهای مخازن مستطیلی بتنی لاغر و چاق انعطاف پذیر پرداختند که در آن فقط اثرات جرم سخت در نظر گرفته شده است.

یکی از مهم ترین پدیده های مرتبط با اندرکنش آب و سازه در مخازن نگهداری مایعات، نوسان سطح آزاد سیال (تلاطم) است که در اثر تحریک خارجی منتقل شده از زمین به بدنه مخزن ایجاد می شود و باعث اعمال فشارهای هیدرودینامیکی قابل توجهی بر جداره مخزن می شود (ایگلسیس و همکاران^۸، ۲۰۰۶). بر اساس نتایج تحقیق آلکیدز و اونال^۹ (۲۰۰۶) دامنه تلاطم مایع در مخازن مستطیلی به محتوای فرکانسی شتاب زمین، ارتفاع مایع درون مخزن، خصوصیات مایع و ابعاد مخزن بستگی دارد.

^۵ Veletsos

^۶ Kim et al.

^۷ Chen and Kianoush

^۸ Souto-Iglesias et al.

^۹ Akyildiz and Unal

^{۱۰} Livaoglu

^۱ Kobe

^۲ Izmit

^۳ Housner

^۴ Yang

مهندسی زلزله جهت کنترل غیرفعال است که باعث جدا شدن کل سازه یا قسمتی از آن از زمین شده و از انتقال انرژی زمین‌لرزه به سازه جلوگیری می‌کند (نعیم و کلی^{۱۴}، ۱۹۹۹). اخیراً در زمینه کاربرد جداسازها در مخازن استوانه‌ای نگهداری مایعات و تأثیر آن‌ها بر عملکرد این نوع سازه‌ها پژوهش‌هایی در حوزه‌های فرکانس و زمان انجام شده است (کیم و همکاران^{۱۵}، ۲۰۰۲؛ چو و همکاران^{۱۶}، ۲۰۰۴). شکاری و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی تأثیر سیستم‌های جداساز بر عملکرد لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای نتیجه گرفتند که بسته به محتوای فرکانسی زلزله جداگرها ممکن است باعث تشدید پاسخ سازه شوند. بذرافشان و خاجی (۱۳۹۵) به بررسی تأثیر جداسازها بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بلند تحت اثر زلزله‌های پربود بلند پرداختند و مشاهده نمودند که تحت اثر چنین تحركاتی سازه‌ها دچار تشدید می‌شوند. کورادلی^{۱۷} (۲۰۱۳) با مدل‌سازی سیال درون مخزن توسط جرم‌های معادل به بررسی عملکرد لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای جداسازی شده توسط المان‌های هیستریزیس پرداخت. بررسی نتایج پژوهش‌های پیشین نشانگر این مطلب است که با کاربرد جداگرهای لرزه‌ای در مخازن می‌توان آسیب‌های وارده به سازه را تا حد زیادی کاهش داد.

هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر، بررسی تأثیر جداسازهای لرزه‌ای بر پاسخ مخازن مستطیلی زمینی تحت تحریک هارمونیک و زلزله واقعی است. جهت مدل‌سازی پوسته مخزن از المان‌های محدود و سیال درون مخزن از المان‌های مرزی استفاده شده است. از محاسن روش المان مرزی در مدل‌سازی محدوده سیال، احتساب موده‌ای بالاتر تغییر شکل امواج سطحی می‌باشد. در این مقاله ابتدا

لیواگلو^{۱۸} (۲۰۰۸) با استفاده از روش تقریبی جرم افزوده پیشنهادی توسط هاوونر به بررسی رفتار لرزه‌ای یک مخزن مستطیلی بتنی در دو حالت صلبیت و انعطاف‌پذیری دیواره تحت تأثیر زلزله‌های مختلف، در حوزه فرکانس پرداخت. چن و کیانوش^{۱۹} (۲۰۰۹) با تحلیل رفتار مخازن مستطیلی بتنی نظیر سیستم‌های یک‌درجه آزاد تعمیم یافته (SDOF) به تخمین پاسخ لرزه‌ای و طراحی این نوع سازه‌ها پرداختند و نتیجه گرفتند که مود دوم تغییر شکل سیستم سیال-سازه تأثیر بسزایی در پاسخ کل سیستم دارد. با توجه به نوسان‌های فشار هیدرودینامیکی سیال در هنگام زلزله، برای تخمین جرم‌های سخت و مواب و فرکانس و محل اثر آن‌ها می‌توان از روابط توصیه‌شده در آیین‌نامه طراحی مخازن بتنی آمریکا^{۱۲} بهره گرفت.

در خصوص توسعه روش‌های عددی و کاربرد آن در مسائل مختلف مهندسی ازجمله بررسی رفتار لرزه‌ای مخزن تلاش‌های چشمگیری شده است که در این میان می‌توان به روش‌های المان محدود و المان مرزی به‌عنوان پرکاربردترین روش‌ها در مدل‌سازی مخازن اشاره کرد. کیانوش و قائم‌مقامی^{۱۳} (۲۰۱۱) با استفاده از روش المان‌های محدود به بررسی پاسخ لرزه‌ای مخازن بتنی زمینی مستطیلی تحت تأثیر مؤلفه‌های افقی و عمودی زلزله‌های مختلف، در قلمرو زمان پرداختند و نتیجه گرفتند که نحوه المان بندی، نوع خاک زیر سازه، خصوصیات زلزله و ابعاد مخزن تأثیر بسزایی در رفتار دینامیکی سازه دارد. شکاری (۱۳۹۴) با استفاده از المان‌های مرزی و تابع گرین به توسعه مدلی برای بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن صلب متقارن محوری مجهز به تیغه‌های میراگر محیطی چندگانه در قلمرو فرکانس و زمان پرداخت. جداسازی لرزه‌ای به‌عنوان یکی از ابزارهای

^{۱۴} Naein and Kelly

^{۱۵} Kim et al.

^{۱۶} Cho et al.

^{۱۷} Curadelli

^{۱۱} Chen and Kianoush

^{۱۲} ACI 350

^{۱۳} Kianoush and Ghaemmaghami

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

در این رابطه ϕ تابع پتانسیل سرعت است. مقدار پتانسیل سرعت و به تبع آن فشار هیدرودینامیک در دامنه سیال با استفاده از روابط شرط مرزی پیرو به دست خواهد آمد:

الف) شرط مرزی سطح آزاد: از آنجایی که در مخازن محدود امواج سطحی تأثیر قابل توجهی بر توزیع فشار هیدرودینامیکی وارد بر جداره مخزن دارند، با در نظر گرفتن تراکم ناپذیری سیال و ناچیز بودن اثرات کشش سطحی نسبت به تأثیر ثقل، شرط مرزی سطح آزاد به صورت زیر ارائه می شود:

الف) شرط مرزی سطح آزاد: از آنجایی که در مخازن محدود امواج سطحی تأثیر قابل توجهی بر توزیع فشار هیدرودینامیکی وارد بر جداره مخزن دارند، با در نظر گرفتن تراکم ناپذیری سیال و ناچیز بودن اثرات کشش سطحی نسبت به تأثیر ثقل، شرط مرزی سطح آزاد به صورت زیر ارائه می شود:

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

g: شتاب گرانش زمین

ب) شرط مرزی سطح مشترک سیال - جداره: شرط مرزی محل تماس سیال با مرزهای شتابدار جامد (مرز اندرکنش) باید به گونه ای باشد که تغییر مکان های عمود بر سطح برای محیط سیال و سازه برابر باشند.

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

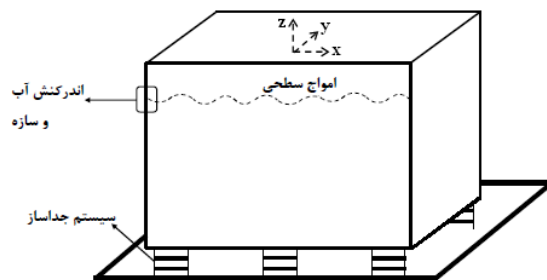
در رابطه (۳)، $\mathbf{n}$ بردار عمود بر سطح و به سمت خارج از میدان سیال و v نیز سرعت سیال در محل دیواره مخزن است. در کف مخزن مؤلفه قائم سرعت به علت حرکت افقی صفر است. پس از تحلیل رابطه پتانسیل سرعت، می توان فشار دینامیکی p را در نقاط مختلف جداره مخزن از رابطه زیر به دست آورد (کیانوش و چن^{۱۹}، ۲۰۰۶):

$$p = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1-4)$$

فرمولاسیون روش درگیر المان مرزی- المان محدود سه بعدی برای مخازن مستطیلی انعطاف پذیر در حالت صلبیت کف و جداسازی شده ارائه شده و در ادامه به شرح مطالعه های پارامتریک در حوزه های فرکانس و زمان که شامل صحت سنجی فرمول بندی مزبور برای این نوع مخازن است، پرداخته می شود. شایان ذکر است که در زمینه کارایی سیستم های جداساز غیرخطی در کاهش پاسخ لرزه ای مخازن مستطیلی با توجه به ماهیت زلزله مطالعه هدفمندی انجام نشده است که به نوبه خود به انجام تحقیق حاضر ضرورت می بخشد. از جنبه های بارز و نوآوری تحقیق حاضر می توان به بررسی نقاط ضعف سیستم های جداساز غیرخطی و تأثیر آن ها در تشدید پاسخ لرزه ای مخازن مستطیلی زمینی انعطاف پذیر اشاره نمود.

معادله دینامیکی حرکت سیال

در شکل (۱) یک مخزن مکعبی سه بعدی با بدنه انعطاف پذیر نشان داده شده که بر روی سیستم جداساز لرزه ای قرار گرفته است.



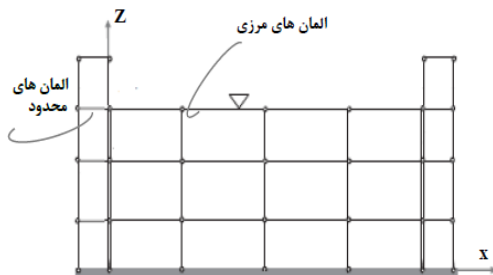
شکل (۱): مدل مخزن سه بعدی و پدیده های حاکم

معادله دیفرانسیل جزئی حاکم بر حرکت سیال با استفاده از قوانین پیوستگی و مومنتوم و یکسری از فرضیات بر روی معادلات ناویر استوکس و کاربرد تابع پتانسیل سرعت و نیز با در نظر گرفتن سیال به عنوان یک محیط پیوسته، تراکم ناپذیر با جریان غیرچرخشی و بدون اصطکاک، معادله لاپلاس به شکل زیر خواهد بود (فرانسویز و جوز^{۱۸}، ۲۰۰۷):

با جایگزینی شرایط مرزی در رابطه (۶)، می‌توان فرم ماتریسی معادله المان مرزی حاکم بر رفتار سیال درون مخزن را به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{ii} & \mathbf{H}_{is} \\ \mathbf{H}_{si} & \mathbf{H}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -\mathbf{p}_i / \rho\omega \\ \boldsymbol{\varphi}_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{ii} & \mathbf{G}_{is} \\ \mathbf{G}_{si} & \mathbf{G}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{u}}_i \\ -\ddot{\boldsymbol{\varphi}}_s / g \end{Bmatrix} \quad (۸)$$

به طوری که $\dot{\mathbf{u}}_i$ بردار سرعت در راستای عمود بر اندرکنش سیال و جداره مخزن و ω فرکانس شتاب زمین است. با استفاده از معادله اخیر می‌توان مقدار فشار هیدرودینامیکی روی المان‌های موجود در مرز اندرکنش و سطح آزاد سیال را به ازای فرکانس و دامنه مشخص تحلیل نمود.



شکل (۲): مدل گسسته سازی شده مخزن

معادله دینامیکی حاکم بر جداره مخزن

با گسسته‌سازی پوسته مخزن با استفاده از المان‌های ایزوپارامتریک ۸ گرهی (شکل (۲)) و با در نظر گرفتن نیروهای خارجی زلزله در حوزه فرکانس، معادله دینامیکی المان محدود حاکم پوسته مخزن به فرم ماتریسی زیر نوشته خواهد شد (زینکویچ و تیلور^{۲۱}، ۲۰۰۰):

$$(-\mathbf{M}_s \omega^2 + \mathbf{C}_s i\omega + \mathbf{K}_s) \mathbf{u}(\omega) = \mathbf{F}(\omega) \quad (۹)$$

در رابطه (۹)، $\mathbf{M}$ ، $\mathbf{C}$ و $\mathbf{S}$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سازه و $\mathbf{u}$ نیز بردار تغییر مکان نقاط مختلف جداره مخزن در محل تماس با سیال می‌باشند. $\mathbf{F}$ نیز بردار نیروهای خارجی وارده بر سازه مخزن است که شامل دو مؤلفه فشار هیدرودینامیک آب و نیروی ناشی از اثر زلزله بر سازه است. جهت حل درگیر معادلات سیال-

که در آن، ρ جرم واحد حجم سیال می‌باشد. پس از محاسبه مقادیر پتانسیل سرعت و به تبع آن فشار دینامیکی در سطح آزاد سیال، می‌توان تغییر مکان نقاط مختلف آن به صورت زیر به دست آورد:

$$p = \rho g \eta(x, y, t) \quad (۲-۴)$$

که در آن، η نشان‌دهنده تغییر مکان نقاط مختلف نوسانات سطح آزاد سیال درون مخزن است. جهت تعیین مقادیر مختلف تابع پتانسیل سرعت، مرزها را توسط المان‌های مرزی خطی گسسته‌سازی نموده (شکل (۲)) و معادله انتگرال مرزی زیر را در سطح المان‌ها حل می‌کنیم:

$$\frac{\alpha}{2\pi} \phi_k = \int_S \phi_k \frac{\partial \psi}{\partial n} ds - \int_S \psi \frac{\partial \phi_k}{\partial n} d\Omega \quad (۵)$$

که در آن S مرزهای قلمرو سیال بوده و α برابر π برای نقاط روی سطح المان‌ها بدون شکستگی مرزهای المان می‌باشند. از آنجایی که محاسبه انتگرال حل اساسی به صورت تحلیلی دشوار است، معادله انتگرالی را به فرم گسسته سازی شده بر اساس گره‌های مرزی تعریف شده در مرزهای اندرکنش و سطح آزاد متلاطم به صورت زیر می‌توان بازنویسی نمود (رابل^{۲۰}، ۲۰۰۲):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{ii} & \mathbf{H}_{is} \\ \mathbf{H}_{si} & \mathbf{H}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varphi}_i \\ \boldsymbol{\varphi}_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{ii} & \mathbf{G}_{is} \\ \mathbf{G}_{si} & \mathbf{G}_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_i \\ \mathbf{q}_s \end{Bmatrix} \quad (۶)$$

در رابطه (۶) $\mathbf{H}$ و $\mathbf{G}$ به ترتیب ماتریس‌های ضرایب فرمولاسیون روش المان مرزی هستند که تابعی از هندسه مخزن بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$H = -(1/4\pi r^2)(\partial r / \partial n) \quad (۱-۷)$$

$$G = 1/4\pi r \quad (۲-۷)$$

در رابطه فوق r برداری است که نقطه شروع آن وسط المان اول و انتهای آن در سطح المان دوم تعریف می‌شود و $\boldsymbol{\varphi}$ و $\mathbf{q}$ نیز به ترتیب بردارهای پتانسیل سرعت و مشتق آن نسبت به بردار نرمال می‌باشند. همچنین اندیس‌های i و s به ترتیب معرف مرز اندرکنش و سطح آزاد سیال است.

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

$$\mathbf{M}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{r}^T \mathbf{M} \mathbf{r} + \mathbf{m}_b & \mathbf{r}^T \mathbf{M} \\ \mathbf{M} \mathbf{r} & \mathbf{M} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\mathbf{C}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_b & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K} \end{bmatrix}$$

که در آن، $\mathbf{m}_b$ ، $\mathbf{c}_b$ و $\mathbf{k}_b$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سیستم جداساز لرزه‌ای و $\ddot{\mathbf{u}}_g$ بردار شتاب زمین در حوزه فرکانس 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. در نهایت بر اساس رابطه (۱۰) می‌توان بردار جابجایی نسبی هر درجه آزادی نقاط مختلف مخزن و سیستم جداساز را نسبت به زمین، به ازای فرکانس و دامنه مشخص به دست آورد.

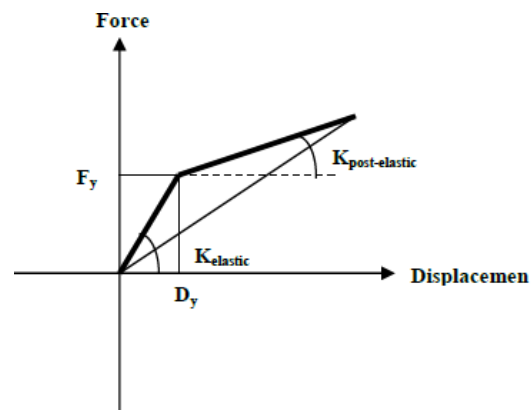
از اهداف مهم تحقیق حاضر بررسی رفتار امواج سطحی تحت تأثیر فرکانس‌های مختلف زلزله است، لیکن با توجه به ماهیت غیرخطی رفتار دینامیکی مخازن ایزوله شده اصولاً تحلیل دینامیکی معادلات کوپله در قلمرو فرکانس اعتباری ندارد. لذا جهت بررسی دقیق اثرات غیرخطی سیستم درگیر، شتاب‌های اعمالی به مخزن را به قطعات زمانی بسیار کوچک تقسیم نموده و با استفاده از تبدیل فوریه به قلمرو فرکانس انتقال داده می‌شود و پس از انجام تحلیل‌ها در قلمرو فرکانس، نتایج با استفاده از تبدیل فوریه معکوس به قلمرو زمان منتقل می‌شود؛ بنابراین از جنبه‌های بارز تحقیق حاضر استفاده از معادلات انتگرال مرزی حوزه فرکانس جهت حل یک مسئله غیرخطی است.

پوسته مخزن، ابتدا فشار هیدرودینامیکی را با استفاده از معادله (۸) در گره‌های المان‌های مرزی محاسبه نموده و سپس مقادیر محاسبه شده را به عنوان نیروی خارجی در محل گره‌های المان‌های پوسته وارد نموده و به ازای فرکانس‌های مختلف بارگذاری مسئله اندرکنش سیال و سازه تحلیل می‌شود.

معادله اندرکنش سیال- پوسته مخزن- جداساز لرزه‌ای

با کاربرد سیستم جداساز لرزه‌ای در کف مخزن نیروی انتقال یافته از زمین به روسازه تا حد زیادی کاهش پیدا می‌کند، لیکن کاهش مذکور پاسخ سازه با تغییر مکان نسبی فراوانی بین فونداسیون سازه و زمین همراه خواهد بود. در مطالعه حاضر جهت مدل‌سازی رفتار سیستم جداساز، از مدل المان هیستریزیس دوخطی استفاده شده است (شکل (۳))؛ (نعیم و کلی^{۲۲}، ۱۹۹۹). روابط (۸) و (۹) معادلات حرکت سیال و سازه به طور مجزا هستند که با در نظر گرفتن پارامترهای سیستم جداساز و حل هم‌زمان این معادلات، معادله سیال- پوسته مخزن- جداساز را می‌توان به فرم ماتریسی زیر نوشت:

$$(-\mathbf{M}^* \omega^2 + \mathbf{C}^* i \omega + \mathbf{K}^*) \mathbf{u}^*(\omega) = -\mathbf{M} \mathbf{r} \ddot{\mathbf{u}}_g(\omega) \quad (10)$$



شکل (۳): مدل رفتار دوخطی برای سیستم جداساز

شرح تحلیل‌های دینامیکی بر روی مخازن مدل‌سازی مخازن

در این پژوهش، به‌منظور مطالعه عددی سیستم درگیر سیال- پوسته مخزن- جداساز از روش ترکیبی المان مرزی و المان محدود کمک گرفته‌شده و یک برنامه رایانه‌ای به زبان فرترن بر اساس فرمول‌بندی توسعه داده‌شده در بخش قبل تهیه‌شده است. ورودی برنامه شتاب زمین است که سابروتین ابتدایی برنامه آن را در گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای به حوزه فرکانس منتقل نموده و سپس شتاب حوزه فرکانس را به پایه منتقل می‌کند. درنهایت خروجی برنامه فشار هیدرو دینامیکی وارد بر جداره و تغییر شکل آن در گرہ‌های مختلف می‌باشد.

جهت صحت‌سنجی نتایج برنامه توسعه داده‌شده، مثال‌های متعددی از مخازن در حالات مختلف پایه ثابت و جداسازی شده مورد تحلیل دینامیکی در حوزه‌های فرکانس و زمان قرار گرفته و نتایج آن‌ها با نتایج حاصل از پژوهش‌های سایر محققین مقایسه شده است که در ادامه شرح داده می‌شود.

صحت سنجی برنامه در حوزه‌های فرکانس و زمان

به‌منظور صحت سنجی خروجی برنامه در حوزه فرکانس، فرکانس طبیعی مود اول تلاطم مایع در مخازن با پایه ثابت و هندسه‌های مختلف با نتایج به‌دست‌آمده توسط رابطه تحلیلی توصیه‌شده توسط آیین‌نامه طراحی مخازن بتنی آمریکا، رابطه (۱۲)، مقایسه شده است. درواقع پاسخ لرزه‌ای مایع درون مخزن متأثر از نسبت ارتفاع به طول آن خواهد بود.

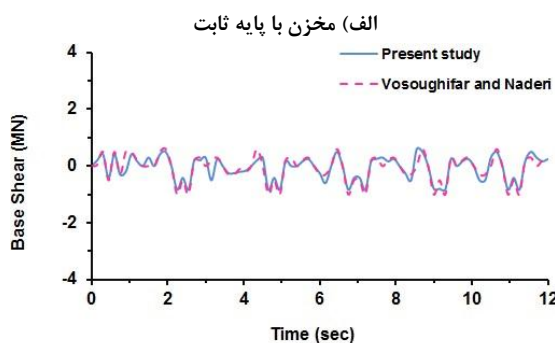
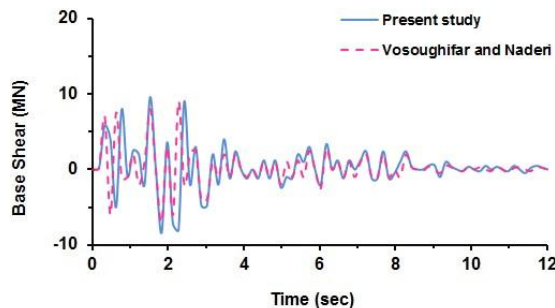
$$\omega_c = \sqrt{3.16 \frac{g}{L} \tanh(3.16 \frac{H_L}{L})} \quad (12)$$

که در آن، H_L ارتفاع مایع و L بعد مخزن است.

جدول (۱): فرکانس طبیعی مود اول مخزن (رادیان بر ثانیه)

H_L/L	مطالعه حاضر	ACI 350	درصد اختلاف
0.15	0.83	0.81	2.08
0.3	1.07	1.08	0.92
0.5	1.19	1.21	1.40
1.5	1.24	1.27	2.02
3	1.24	1.25	0.40

نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که انطباق مناسبی بین فرکانس‌های طبیعی تلاطم مایع به‌دست‌آمده از برنامه حاضر و حل رابطه (۱۲) وجود دارد.



شکل (۴): تاریخچه زمانی برش پایه مخزن مستطیلی برای حالات مختلف مخزن ثابت و جداسازی شده

همچنین جدول (۱) گویای این مهم است که برای نسبت ارتفاع به طول مخزن بزرگ‌تر از ۱/۵ تأثیر هندسه مخزن بر فرکانس طبیعی تلاطم مایع ناچیز است. در ادامه به مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی حوزه زمان یک مخزن مستطیلی بتنی با پایه‌های ثابت و جداسازی شده، حاصل از الگوریتم پژوهش حاضر و نتایج بدست آمده توسط وثوقی‌فر و نادری^{۲۳} پرداخته می‌شود. به‌منظور آنالیز دینامیکی، از شتاب‌نگاشت زلزله سال ۱۹۹۴ نورتریج^{۲۴} با شتاب بیشینه ۰/۵۶۸ برابر شتاب ثقل استفاده‌شده است. طول، عرض و ارتفاع سیال درون مخزن مورد تحلیل ۲۳/۵، ۱۵ و ۳/۱۶ متر می‌باشد و سیال در نظر گرفته‌شده در تحلیل‌ها آب با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب

^{۲۳} Vosoughifar and Naderi

^{۲۴} Northridge

جدول (۲): مشخصات هندسی مخازن انتخاب شده				
نوع مخزن	عرض مخزن L_x, L_y (m)	ارتفاع مخزن L_z (m)	جرم حجمی پوسته (Kg/m^3)	مدول یانگ پوسته (GPa)
چاق ^{۲۵}	30	6.6	2300	26.44
لاغر ^{۲۶}	10	15.6	2300	26.44

در تمامی تحلیل‌ها سیال در نظر گرفته شده آب با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بوده و ۲۰٪ ارتفاع مخزن جهت جلوگیری از سرریزی امواج متلاطم سطحی خالی در نظر گرفته شده است. ضخامت دیواره مخازن انعطاف‌پذیر ۰/۵ متر و مخازن صلب نیز ۱ متر در نظر گرفته شده است. جهت انتخاب ابعاد اولیه مقطع مخازن موردنظر از کینوش و قائم مقامی (۲۰۱۱) استفاده شده است. جهت بررسی پاسخ لرزه‌ای مخازن مزبور در حالت جداسازی شده، دو نوع سیستم جداساز سخت و نرم با مشخصات مکانیکی ذکر شده در جدول (۳) در نظر گرفته شده‌اند.

جدول (۳): مشخصات مکانیکی جداسازهای انتخاب شده				
نوع جداساز	سختی خطی K_e (Kg/m)	سختی غیر خطی K_p (Kg/m)	نیروی گسیختگی F_y (Kg)	میرایی افقی
سخت ^{۲۷}	93×10^6	15.5×10^6	9.3×10^5	0.06
نرم ^{۲۸}	27×10^6	4.5×10^6	2.7×10^5	0.06

در مطالعه پارامتریک سیستم جداساز، سختی آن به گونه‌ای در نظر گرفته شد که پیوند غالب سیستم جداسازی شده به پیوند غالب زلزله نزدیک شود. با در نظر گرفتن ترکیبات مختلف هندسه مخزن و نوع دیواره، نوع پایه مخزن و شتاب‌نگاشت‌های مختلف، تعداد ۳۶ آنالیز دینامیکی انجام شده است که در ادامه به ارزیابی نتایج حاصل شده پرداخته می‌شود.

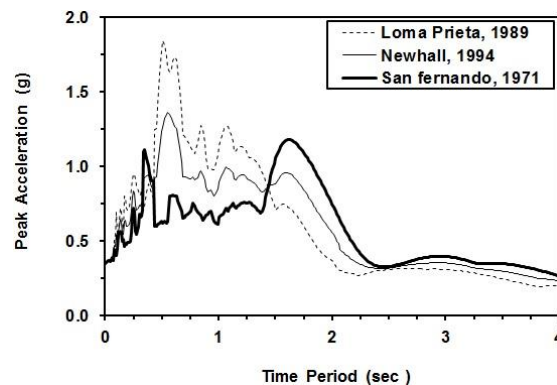
بررسی پاسخ برش پایه

در شکل (۶)، تغییرات برش پایه در مخزن چاق با جداره انعطاف‌پذیر با پایه ثابت و جداسازی شده برای حرکات

است. ضخامت پوسته مخزن نیز ۰/۵ متر و مدول یانگ آن 26.44 GPa است. شکل‌های (۴- الف و ۴- ب) نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی مخزن مورد مطالعه مبنا را در قالب برش پایه در مقایسه با نتایج پژوهش حاضر، به ترتیب برای حالات پایه ثابت و جداسازی شده نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۴) پیداست، هماهنگی خوبی بین نتایج این تحقیق و نتایج تحقیق مبنا در حالات مختلف قرارگیری مخزن وجود دارد.

مطالعه‌های عددی و نتایج

در این بخش به آنالیز دینامیکی دو مخزن مکعبی بتنی لاغر و چاق تحت تأثیر رکوردهای پیوند کوتاه سال ۱۹۸۹ لوماپریته آمریکا (با بیشینه شتاب ۰/۳ برابر شتاب ثقل)، ۱۹۹۴ نیوهال آمریکا (با بیشینه شتاب ۰/۶۷۸ برابر شتاب ثقل) و پیوند بلند سال ۱۹۷۱ سان‌فرناندو (با بیشینه شتاب ۰/۱۳۱ برابر شتاب ثقل) که بر مبنای ۰/۳۵ برابر شتاب ثقل مقیاس شده‌اند، پرداخته می‌شود. در شکل (۵)، طیف پاسخ شتاب مقیاس شده رکوردهای ذکر شده نشان داده شده است.

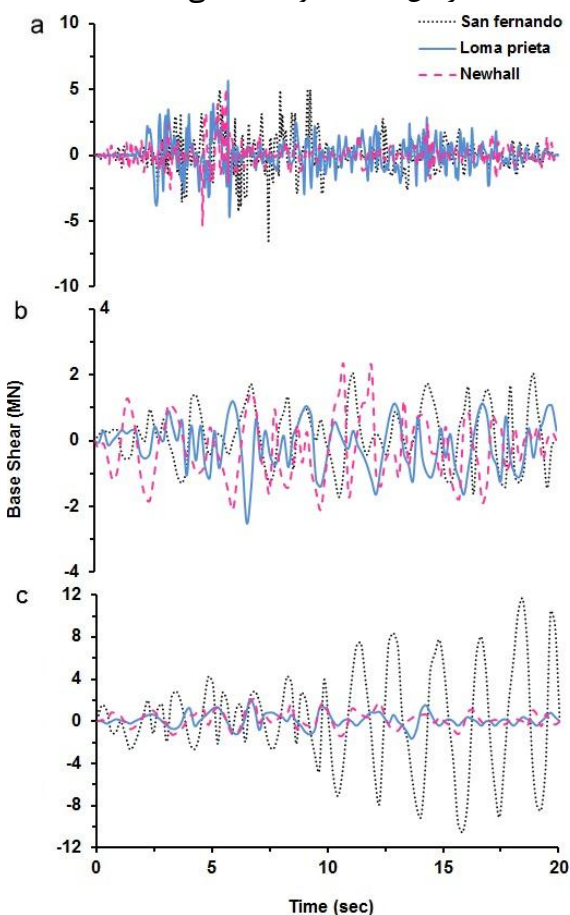


شکل (۵): طیف پاسخ شتاب مقیاس شده رکوردهای مورد استفاده در این پژوهش

در جدول (۲) مشخصات هندسی مخازن انتخاب شده جهت انجام تحلیل دینامیکی نشان داده شده است.

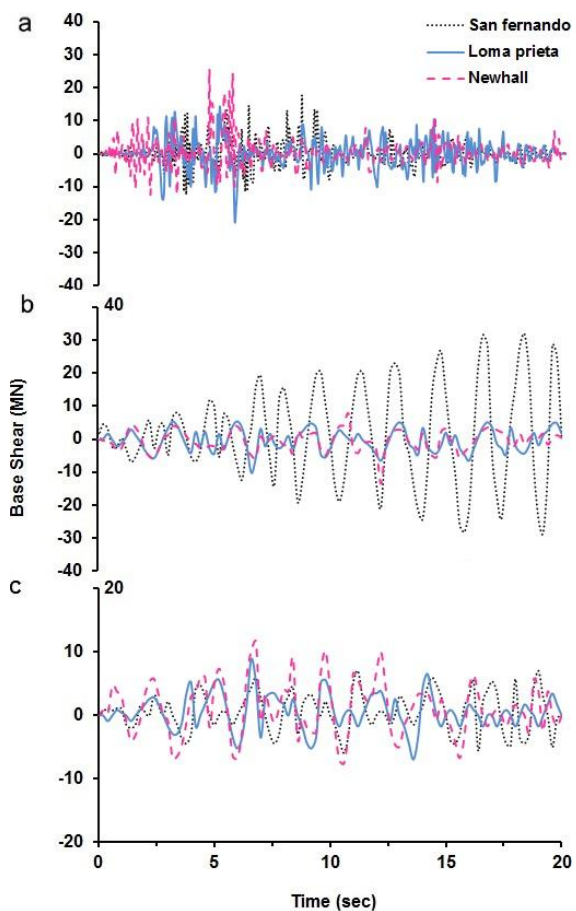
^{۲۵} Shallow tank
^{۲۶} Slender tank
^{۲۷} Stiff isolator
^{۲۸} Flexible isolator

شکل (۷) نمودار تاریخچه زمانی برش پایه در مخزن لاغر انعطاف‌پذیر با پایه ثابت و جداسازی شده برای زلزله‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شکل مذکور، مقدار بیشینه برش پایه تحت اثر رکوردهای سان‌فرناندو، لوماپریتا و نیوهال^{۳۱} در حالت پایه ثابت به ترتیب برابر با ۱۷/۷۴، ۲۰/۶۱ و ۲۵/۶۶، در حالت قرارگیری جداساز سخت مخزن نیز ۳۱/۴۸، ۱۰/۵۳ و ۱۳/۸۶ و در حالت جداسازی نرم نیز ۷/۰۷، ۸/۸۷ و ۱۱/۶۲ مگانیوتن است. بر این اساس، مقدار کاهش برش پایه در مخزن چاق با جداسازی سخت تحت اثر زلزله‌های مزبور به ترتیب ۷۷/۵۰ (افزایش)، ۴۸/۹۱ و ۴۵/۹۹ درصد و با جداسازی نرم نیز به ترتیب ۶۰/۱۳، ۵۶/۹۵ و ۵۴/۷۱ درصد است.



شکل (۷): تاریخچه زمانی برش پایه در مخزن لاغر؛ (a) پایه ثابت (b) جداساز سخت (c) جداساز نرم همان‌طور که از نتایج کمی به‌دست‌آمده از شکل‌های (۶) و (۷) نتیجه می‌شود، تحت تأثیر کلیه شتاب‌نگاشت‌های

پریود کوتاه و پریود بلند نشان داده شده است. با توجه به تحلیل‌های انجام‌گرفته بر روی مخزن چاق، مقدار بیشینه برش پایه تحت اثر رکوردهای سان‌فرناندو^{۲۹}، لوماپریتا^{۳۰} و نیوهال^{۳۱} در حالت پایه ثابت به ترتیب برابر با ۱۷/۷۴، ۲۰/۶۱ و ۲۵/۶۶، در حالت قرارگیری جداساز سخت زیر مخزن نیز ۳۱/۴۸، ۱۰/۵۳ و ۱۳/۸۶ و در حالت جداسازی نرم نیز ۷/۰۷، ۸/۸۷ و ۱۱/۶۲ مگانیوتن است. بر این اساس، مقدار کاهش برش پایه در مخزن چاق با جداسازی سخت تحت اثر زلزله‌های مزبور به ترتیب ۷۷/۵۰ (افزایش)، ۴۸/۹۱ و ۴۵/۹۹ درصد و با جداسازی نرم نیز به ترتیب ۶۰/۱۳، ۵۶/۹۵ و ۵۴/۷۱ درصد است.



شکل (۶): نمودارهای برش پایه-زمان در مخزن چاق؛ (a) پایه ثابت (b) جداساز سخت (c) جداساز نرم

^{۲۹}San Fernando
^{۳۰}Loma Prieta
^{۳۱}Newhall

جداسازی شده به عنوان سیستمی یک درجه آزاد، فرکانس های طبیعی دو مدل مخزن چاق و لاغر اخیر معادل 0.628 Hz و 0.625 Hz خواهند بود که در محاسبه آن ها، سختی سیستم یک درجه آزادی همان سختی سیستم جداساز و جرم آن معادل جرم کل مخزن در نظر گرفته شده است. این مهم نشانگر این واقعیت است که با ایزوله نمودن مخزن از کف، رفتار دینامیکی آن به مدل یک درجه آزادی معادل نزدیک شده و جداساز عملکرد لرزه ای کل سیستم را کنترل می کند.

نکته حائز اهمیت دیگری که از مقایسه کمی پاسخ مخازن جداسازی شده برداشت می شود این است که سیستم جداساز نرم برش پایه را تحت زلزله پریرود بلند سان فرناندو به مقدار بیشتری نسبت به سایر رکوردها کاهش داده است که این تأثیر به محتوای فرکانسی شتاب اعمال شده کاملاً وابسته است.

بررسی امواج متلاطم سطحی

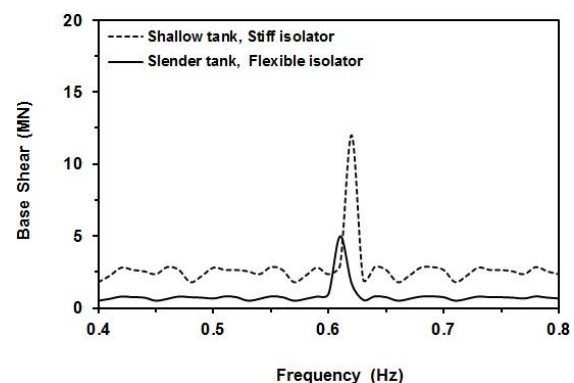
یکی از مواردی که در تحقیق روی مخازن جداسازی شده اهمیت بسزایی دارد، مطالعه نوسانات سطح آزاد سیال در حضور سیستم جداساز است. امواج تلاطمی می تواند باعث ایجاد خسارات جدی بر جداره و سقف مخازن در هنگام وقوع زمین لرزه شود و لذا ارتفاع امواج متلاطم سطحی (اختلاف ارتفاع سطح متلاطم نسبت به سطح اولیه سیال) عامل مهمی در تعیین ارتفاع آزاد مخزن است.

در این بخش، برای درک بهتر تأثیر سیستم جداساز بر تغییر مکان سطح آب، نمودار تاریخچه زمانی تغییر مکان سطح آب برای مخازن چاق و لاغر تحت زلزله لوماپریتا، نیوهایل و سان فرناندو در حالت های پایه ثابت و جداسازی شده مخزن ارائه شده است.

شایان ذکر است که برای محاسبه ارتفاع امواج متلاطم سطحی، رفتار سیال درون مخزن خطی فرض می شود و لذا، با استفاده از رابطه (۵) و با داشتن فشار به دست آمده از

یادشده هرچه سختی سیستم جداساز کمتر باشد، نقش آن در کاهش برش پایه زیادتر خواهد بود و تأثیر سیستم جداساز در کاهش پاسخ مخزن لاغر نسبت به مخزن چاق چشم گیرتر است.

همچنین بررسی نمودارهای اخیر نشان می دهد که تحت تحریک زلزله پریرود بلند سان فرناندو، جداساز سخت در مخزن چاق و جداساز نرم در مخزن لاغر افزایش زیاد پاسخ دینامیکی سازه را در برداشته اند و در مخازن مذکور پدیده تشدید رخ داده است. جهت بررسی علت عملکرد معکوس جداسازی بر رفتار مخازن فوق، پاسخ دینامیکی هر دو مدل مخزن تحت تحریک هارمونیک با دامنه واحد و فرکانس های متعدد بررسی گردید تأثیر سیستم جداساز بر برش پایه برای دو مدل مخزن مطالعه شده در شکل ۸ نشان داده شده است.



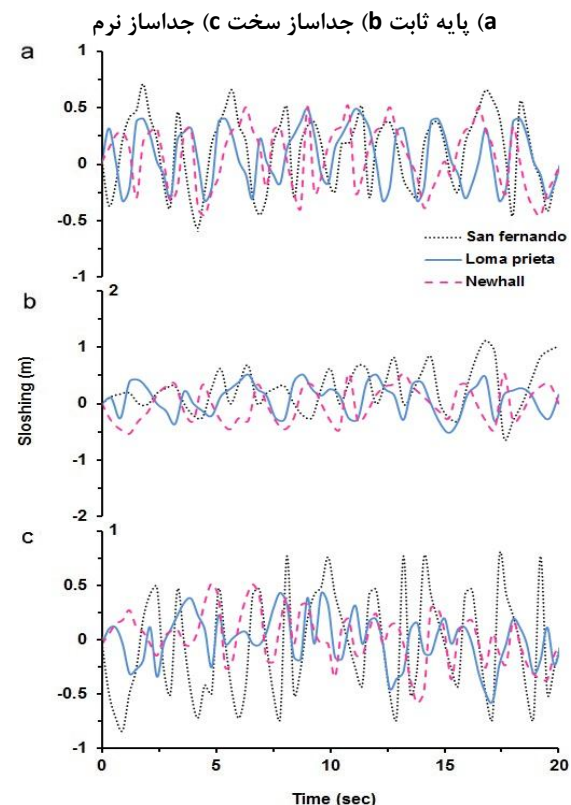
شکل (۸): نمودارهای برش پایه-فرکانس در مخازن جداسازی شده

این شکل نتایج خروجی تحلیل روش المان مرزی- المان محدود را در بردارد که از روی نقاط بیشینه نمودارهای آن می توان فرکانس طبیعی مخزن را مشاهده کرد. بررسی مقادیر شکل مزبور نشان می دهد که پاسخ دینامیکی مدل مخزن چاق ایزوله شده با جداساز سخت تحت اثر تحریک هارمونیک با فرکانس 0.635 Hz و مدل مخزن لاغر با جداساز نرم تحت اثر فرکانس 0.618 Hz دچار پدیده تشدید شده است چون این فرکانس به فرکانس غالب زلزله سان فرناندو (0.621 Hz) بسیار نزدیک می باشند. شایان ذکر است که با در نظر گرفتن مخزن حاوی سیال

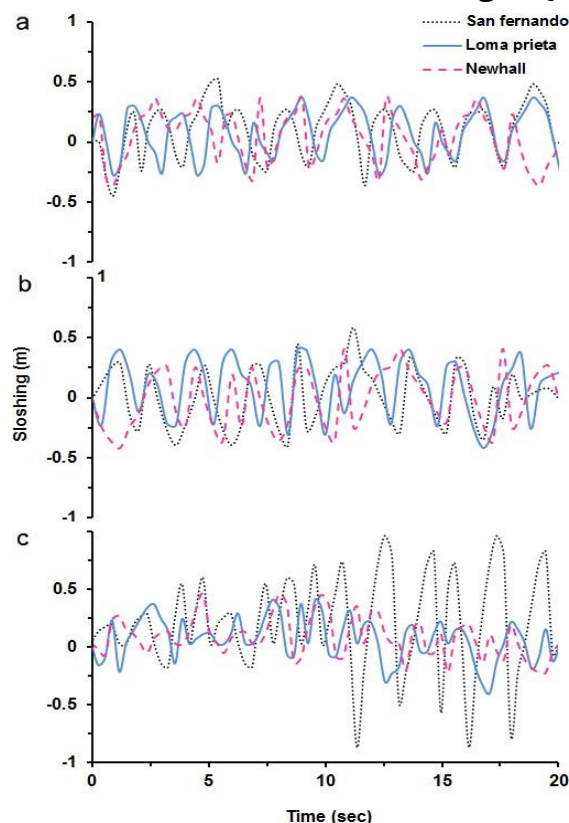
روش المان مرزی می‌توان تغییر مکان سطح آزاد را در نقاط مختلف مخزن محاسبه نمود.

شکل (۹) تغییرات ارتفاع امواج سطحی در مخزن چاق انعطاف‌پذیر را در طول تحریکات مورد مطالعه نشان می‌دهد. از تحلیل‌های تاریخچه زمانی حداکثر ارتفاع امواج سطحی تحت تحریک رکوردهای سان‌فرناندو، لوماپریتا و نیوهال در حالت پایه ثابت به ترتیب ۶۸/۵۲، ۴۶/۶۶ و ۴۸/۴۹ سانتیمتر به دست می‌آید که با قرارگیری جداساز سخت زیر مخزن مقادیر متناظر به ترتیب ۱۱۱/۶۶، ۵۱/۶۰ و ۵۳/۷۸ سانتیمتر و با قرارگیری جداسازی نرم نیز ۸۰/۷۴، ۵۳/۱۸ و ۵۵/۴۱ سانتیمتر برآورد شده است. بر اساس نتایج شرح داده شده، مقدار افزایش ارتفاع تالطم سطح آزاد در مخزن چاق با جداسازی سخت تحت اثر زلزله‌های مزبور به ترتیب ۶۲/۹۵، ۱۰/۶۱ و ۱۰/۸۹ درصد و با جداسازی نرم نیز به ترتیب ۱۷/۸۳، ۱۳/۹۹ و ۱۴/۲۶ درصد است.

شکل (۹): تاریخچه زمانی تالطم امواج سطحی در مخزن چاق؛

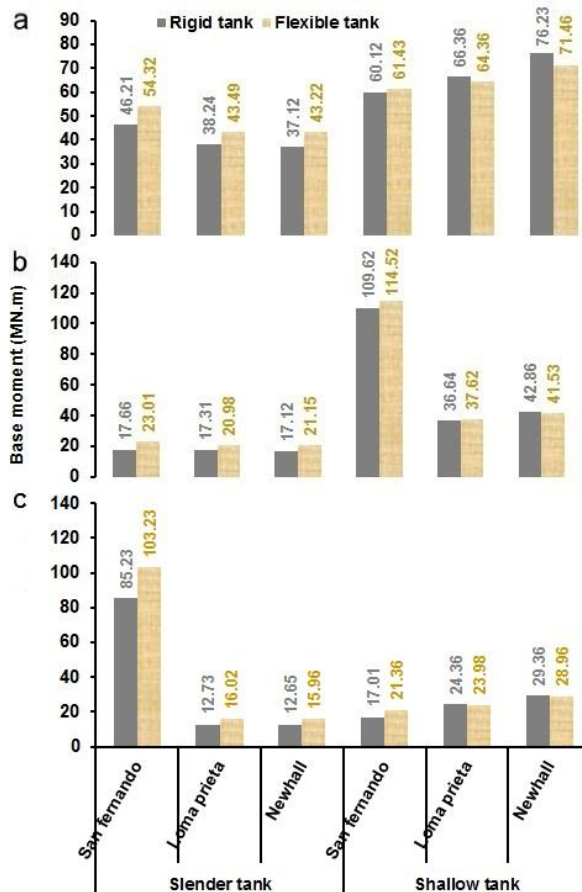


در شکل (۱۰) تغییرات ارتفاع امواج متلاطم سطحی در مخزن لاغر انعطاف‌پذیر تحت تأثیر زلزله‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. با توجه به نتایج کمی شکل مزبور، مقدار بیشینه ارتفاع امواج سطحی تحت اثر رکوردهای سان‌فرناندو، لوماپریتا و نیوهال در حالت پایه ثابت به ترتیب ۵۲/۱۳، ۳۷/۰۳ و ۳۶/۷۴ سانتیمتر به دست می‌آید که با قرارگیری جداساز سخت زیر مخزن مقادیر متناظر به ترتیب ۵۹/۱۳، ۴۰/۹۸ و ۴۱/۴۴ سانتیمتر و با قرارگیری جداسازی نرم نیز ۹۳/۰۸، ۴۲/۹۷ و ۴۲/۶۲ سانتیمتر برآورد شده است. بر این اساس تحت اثر زلزله‌های مزبور، مقدار درصد افزایش ارتفاع امواج متلاطم در مخزن لاغر با جداسازی سخت به ترتیب ۱۳/۴۴، ۱۰/۶۶ و ۱۲/۷۹ درصد و با جداسازی نرم نیز به ترتیب ۷۸/۵۵، ۱۶/۰۶ و ۱۶/۰۲ درصد می‌باشد.



شکل (۱۰): نمودارهای ارتفاع تالطم-زمان در مخزن لاغر؛ (a) پایه ثابت (b) جداساز سخت (c) جداساز نرم

درصد (با جداساز نرم) است که در حالت انعطاف پذیری جداره مقادیر متناظر به ترتیب ۵۷/۶۴، ۵۱/۷۷ و ۵۱/۰۶ درصد (با جداساز سخت) و ۸۲/۹۲، ۶۳/۱۹ و ۶۳/۰۷ درصد (با جداساز نرم) می باشد. همچنین مقدار درصد کاهش پاسخ مخزن چاق صلب ایزوله شده تحت اثر شتاب نگاشت های یاد شده به ترتیب ۸۲/۳۳، ۴۴/۷۹ و ۴۳/۷۷ درصد (با جداساز سخت) و ۷۱/۷۲، ۶۳/۲۹ و ۶۱/۴۷ درصد (با جداساز نرم) است که در حالت انعطاف پذیری جداره مقادیر متناظر به ترتیب ۸۱/۲۸، ۴۱/۵۵ و ۴۱/۸۸ درصد (با جداساز سخت) و ۶۵/۲۳، ۶۲/۷۴ و ۵۹/۴۷ درصد (با جداساز نرم) است.



شکل (۱۱): بیشینه لنگر واژگونی؛ (a) پایه ثابت (b) جداساز سخت (c) جداساز نرم

همان طور که از مقایسه نتایج پیداست، به صورت کلی می توان گفت که کارایی سیستم جداساز در کاهش پاسخ

با توجه به نتایج کمی شکل های (۹) و (۱۰) می توان نتیجه گرفت، تحریک پریود بلند نسبت به حرکات پریود کوتاه منجر به بیشینه تلاطم سطحی بیشتری شده است که این موضوع برای هر دو مدل مخزن با پایه های ثابت و جداسازی شده قابل مشاهده است. علاوه بر این، با نصب سیستم جداساز ارتفاع تلاطم سطح آزاد ناشی از تحریک توسط شتاب نگاشت های مختلف تا حدی افزایش پیدا می کند که این تأثیر در تحریک پریود بلند چشمگیرتر است. همچنین با بررسی نمودارهای مزبور می توان دریافت که تحت تحریک زلزله پریود بلند سان فرناندو، جداساز سخت در مخزن چاق و جداساز نرم در مخزن لاغر باعث تشدید پاسخ بیشینه ارتفاع امواج متلاطم سطحی شده اند که دلیل آن نزدیکی فرکانس غالب این دو مدل مخزن به فرکانس غالب زلزله سان فرناندو است.

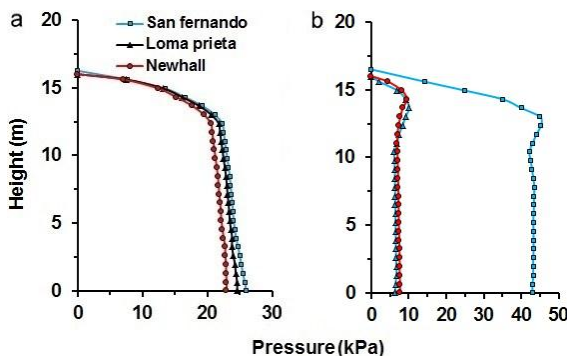
بررسی تأثیر انعطاف پذیری جداره مخزن

بخشی از تحلیل های لرزهای پژوهش حاضر، به چگونگی تأثیرگذاری سیستم های جداساز بر پاسخ دینامیکی مخازن صلب و انعطاف پذیر با هندسه های مختلف اختصاص یافته است. نتایج مطالعه چو و همکاران (۲۰۰۴) در مخازن استوانه ای جداسازی شده نشانگر این مطلب است که کارایی سیستم جداساز در کاهش پاسخ لرزهای مخزن به طور قابل توجهی تحت تأثیر انعطاف پذیری دیواره (اندركنش سیال- سازه) قرار دارد، لیکن در زمینه مخازن مستطیلی با در نظر گرفتن ماهیت شتاب زمین توصیه خاصی تاکنون ارائه نشده است.

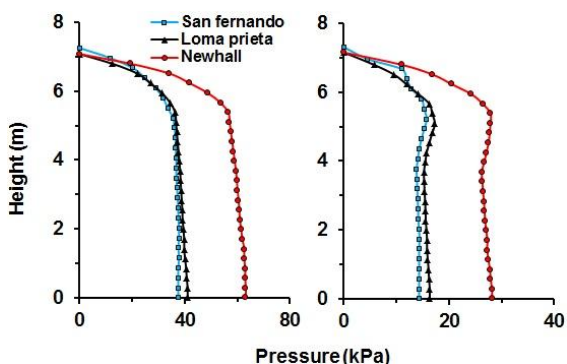
شکل (۱۱) مقدار بیشینه لنگر واژگونی در دو مدل مخزن چاق و لاغر را در شرایط مختلف جداره تحت تأثیر رکوردهای مورد مطالعه نشان می دهد. با توجه به نتایج کمی شکل مزبور، مقدار درصد کاهش پاسخ مخزن لاغر صلب ایزوله شده تحت اثر رکوردهای سان فرناندو، لوما پریتا و نیوهال به ترتیب ۶۱/۷۸، ۵۴/۷۳ و ۵۳/۸۸ درصد (با جداساز سخت) و ۸۴/۴۴، ۶۶/۷۱ و ۶۵/۹۲

مخازن صلب نسبت به مخازن انعطاف‌پذیر بیشتر است که این موضوع به‌خصوص در مخزن لاغر ایزوله شده با جداساز سخت تحت تأثیر زلزله پریود کوتاه نمود بیشتری پیدا کرده است. در ادامه، تأثیر انعطاف‌پذیری جداره بر ارتفاع تلاطم سطح آزاد در مخزن لاغر تحت تأثیر رکوردهای مختلف مطالعه شده و در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به مقایسه نتایج، دامنه موج سطحی در مخازن صلب و انعطاف‌پذیر تقریباً یکسان است، چون پریود امواج سطحی آن‌قدر بلند است که پریود ارتعاشات دیواره مخزن نتواند بر آن تأثیر بگذارد.

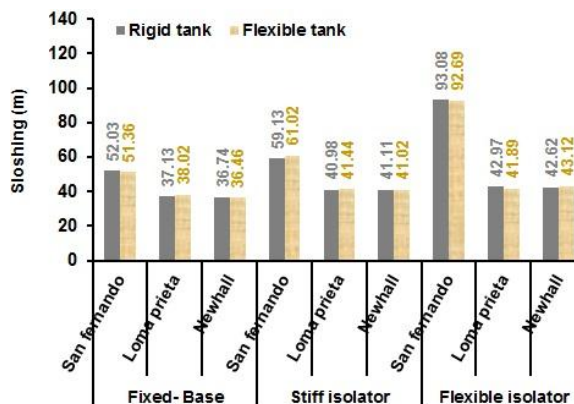
همچنین مقدار بیشینه فشار دینامیکی در مخزن چاق تحت اثر رکوردهای یادشده در حالت پایه ثابت به‌ترتیب ۳۷/۷۵، ۴۱/۰۵ و ۶۳/۱۷ کیلو پاسکال به‌دست می‌آید که با قرارگیری جداساز نرم زیر مخزن مقادیر متناظر به‌ترتیب ۱۵/۲۹، ۱۵/۷۲ و ۲۸/۱۵ است. درواقع با قرار دادن سیستم جداساز در کف مخزن، فرکانس مود طبیعی مخزن تغییر کرده و در اغلب موارد فشار دینامیکی وارد بر جداره‌های مخزن کاهش می‌یابد که البته این تأثیر به محتوای فرکانسی شتاب اعمال‌شده به مخزن وابسته است. با توجه به نتایج شکل مشخص است که به‌تبع روال تغییرات برش پایه تحت تحریک زلزله سان‌فرناندو، جداساز نرم در مخزن لاغر افزایش زیاد فشار دینامیکی وارد بر جداره مخزن را در برداشته است و در مخزن مذکور تشدید پاسخ رخ داده است.



شکل (۱۳): نمودارهای توزیع فشار دینامیکی در مخزن لاغر؛ (a) پایه ثابت (b) جداساز نرم



شکل (۱۴): نمودارهای توزیع فشار دینامیکی در مخزن چاق؛ (a) پایه ثابت (b) جداساز نرم



شکل (۱۲): بیشینه ارتفاع تلاطم سطحی در مخزن لاغر؛ (a) پایه ثابت (b) جداساز سخت (c) جداساز نرم

بررسی توزیع فشار دینامیکی

ازجمله موارد حائز اهمیت در تحلیل رفتار لرزه‌ای مخازن جداسازی شده، مطالعه توزیع فشار دینامیکی سیال بر جداره مخزن است. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ توزیع ارتفاعی فشار دینامیکی وارد بر جداره عمود بر راستای تحریک مخزن را نشان می‌دهد. نتایج نشان داده‌شده توزیع فشار دینامیکی را در زمان رخداد بیشینه پاسخ برش پایه نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که مقدار بیشینه فشار دینامیکی در مخزن لاغر تحت اثر رکوردهای سان‌فرناندو، لوماپریتا و نیوهال در حالت پایه ثابت به‌ترتیب ۲۶/۰۱، ۲۴/۶۰ و ۲۲/۹۷ کیلو پاسکال به‌دست می‌آید که با قرارگیری جداساز نرم زیر مخزن مقادیر متناظر به‌ترتیب ۲۱/۴۵،

نتیجه گیری

در این پژوهش با درگیر نمودن معادله المان محدود پوسته مخزن ذخیره آب و معادله المان مرزی سیال درون آن جهت تحلیل اندرکنش میان آن‌ها و نهایتاً ترکیب معادله حاصل شده با معادله حرکت سیستم جداساز لرزه‌ای، مدلی برای بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن مستطیلی انعطاف پذیر جداسازی شده در قلمرو فرکانس و زمان توسعه داده شده است. جهت شناسایی نقاط ضعف سیستم جداساز در این گونه مخازن، مطالعه پارامتریک بر روی دو مدل مخزن لاغر و چاق جداسازی شده توسط دو نوع جداساز غیرخطی سخت و نرم تحت اثر زلزله‌های پریود بلند و پریود کوتاه انجام شده است. نتایج این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

الف) جداساز در دو مدل مخزن لاغر و چاق تحت اثر رکوردهای پریود کوتاه، بیشینه پاسخ کل سیستم را در قالب برش پایه، لنگر واژگونی و فشار دینامیکی وارد بر جداره را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد که گرادیان کاهش پاسخ با کاهش سختی جداساز به خصوص در مخزن لاغر فراوان تر خواهد بود؛ به طوری که جداساز نرم در مخزن لاغر تحت تأثیر زلزله لوماپریتا لنگر پایه را تا حدود ۶۷٪ کاهش داده است.

ب) در رکورد پریود بلند سان‌فرناندو، بیشینه پاسخ مخزن چاق با جداساز سخت و مخزن لاغر با جداساز نرم نسبت به پایه ثابت تا حدود ۸۵٪ تشدید شده است؛ درواقع با آنالیز مخازن مذکور در حوزه فرکانس مشخص گردید رفتار مخزن جداسازی شده به رفتار سیستم یک درجه آزادی معادل (با جرم مخزن و سختی جداساز) بسیار نزدیک است و علت تشدید پاسخ مزبور را می‌توان نزدیک شدن فرکانس غالب زلزله به فرکانس طبیعی مخزن ایزوله شده دانست.

پ) جداساز در مخازن مختلف بیشینه ارتفاع تلاطم سطح آزاد ناشی از تحریک توسط شتاب‌نگاشت‌های مختلف را تا حدی افزایش می‌دهد که این تأثیر در پاسخ مخزن بلند

چشمگیرتر است؛ به گونه‌ای که تحت تأثیر رکورد پریود بلند سان‌فرناندو، بیشینه ارتفاع تلاطم در مخزن بلند با جداساز نرم حدود ۷۹٪ افزایش یافته است. (ت) در رکوردهای مختلف، عمل جداسازی برای مخازن صلب مفیدتر از مخازن انعطاف پذیر است، به طوری که جداساز سخت در مخزن لاغر صلب لنگر پایه را تحت اثر زلزله سان‌فرناندو حدود ۵٪ بیشتر از مقدار متناظر آن در مدل مخزن مشابه با جداره انعطاف پذیر کاهش داده است. با توجه به مشاهده عملکرد معکوس سیستم جداساز در جهت تشدید پاسخ مخازن تحت تأثیر زلزله پریود بلند، بررسی و یا پیش‌بینی میزان تأثیر سیستم‌های جداساز عنوان شده در تحقیق حاضر بر رفتار مخازن با شرایط فوق می‌تواند در پژوهش‌های آتی با مطالعه پارامتریک کامل‌تری انجام شود.

مراجع

- ۱- شکری، محمدرضا، (۱۳۹۴). " تحلیل لرزه‌ای مخازن متقارن محوری مجهز به تیغه‌های میراگر محیطی چندگانه با استفاده از روش المان مرزی"، نشریه سد و نیروگاه برق آبی، سال دوم، شماره ششم.
- ۲- بذرافشان، ارسلان، حاجی، ناصر، (۱۳۹۵). " پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بلند جداسازی شده تحت اثر حرکات پریود بلند زمین"، مجله علمی پژوهشی - عمران مدرس، دوره شانزدهم، شماره دوم.
- 3- Housner, G. W. (1963). The dynamic behavior of water tank. Bulletin of the Seismological Society of American; 74: 1031-1041.
- 4- Yang, J.Y. (1976). Dynamic Behavior of Fluid-Tank System. Ph.D. thesis, Houston (Texas), Civil Engineering, Rice University.
- 5- Veltsos, A. S. (1984). Seismic response and design of liquid storage tanks. Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering ASCE, New York: 255-370.
- 6- Kim, J. Koh, H. and Kwah, I. (1996). Dynamic response of rectangular flexible fluid containers. Journal of Engineering Mechanics, ASCE; 122(9): 807-816.
- 7- Chen, J.Z. and Kianoush, M.R. (2005). Seismic response of concrete rectangular tanks for liquid containing structures. Canadian Journal of Civil Engineering; 739-752.
- 8- Souto-Iglesias, A. Delorme, L. Perez-Rojas, L. and Abril-Perez, S. (2006). Liquid moment amplitude assessment in sloshing type problems with smooth particle hydrodynamics. Ocean Engineering; 33: 1462-84.
- 9- Akyildiz, H. Unal, NE. (2006). Sloshing in a three-dimensional rectangular tank: numerical simulation and

- domain. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24, 839–852.
- 17- Shekari, M.R. Khaji, N. Ahmadi, M.T. (2011). On the seismic behavior of cylindrical base-isolated liquid storage tanks excited by long-period ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*; 30: 968–980.
- 18- Curadelli, O. (2013). Equivalent linear stochastic seismic analysis of cylindrical base-isolated liquid storage tanks. *Journal of Constructional Steel Research*; 83: 166–176.
- 19- Francois, A. and Jose, A. (2007). *Modelling of mechanical systems fluid-structure Interaction*. Butterworth-Heinemann, Elsevier.
- 20- Chen, J.Z. Kianoush, M.R. (2006). Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks. *Engineering Structures*; 28: 704-715.
- 21- Wrobel, L.C. (2002). *The boundary element method, vol. 1 Applications in thermo- fluids and acoustics*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- 22- Zienkiewicz, O.C and Taylor, R.L. (2000). *The finite element method*. Oxford: Butterworth and Heinmann.
- 23- Naeim, F. and Kelly, J. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley and Sons, New York.
- 24- Vosoughifar, H. R and Naderi, M. A. (2014). *British Journal of Mathematics & Computer Science* 4(21): 3054-3067.
- experimental validation. *Ocean Engineering*; 33: 2135–2149.
- 10- Livaoglu, R. (2008). Investigation of seismic behavior of fluid-rectangular tank-soil/foundation systems in frequency domain. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*; 28: 132–146.
- 11- Chen, J.Z. Kianoush, M.R. (2009). Generalized SDOF system for seismic analysis of concrete rectangular liquid storage tanks. *Engineering Structures*; 31: 2426–2435.
- 12- ACI 350, 2006. *Seismic Design of Liquid-containing Concrete Structures and Commentary*. 350.3-06. ACI, USA: 3–06.
- 13- Kianoush, M.R. Ghaemmaghami, A.R. (2011). The effect of earthquake frequency content on the seismic behavior of concrete rectangular liquid tanks using the finite element method incorporating soil–structure interaction. *Engineering Structures*; 33: 2186–2200.
- 14- Naeim, F. Kelly, J. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley and Sons, New York.
- 15- Kim, M.K. Lim, Y.M. Cho, S.Y. Cho, K.H. Lee, K.W. 2002. Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks using the BE–FE–BE coupling technique. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22, 1151–1158.
- 16- Cho, K.H. Kim, M.K. Lim, Y.M. Cho, S.Y. (2004). Seismic response of base-isolated liquid storage tanks considering fluid–structure–soil interaction in time

Investigation of effect of nonlinear isolators on the seismic performance of base-isolated rectangular liquid containers incorporating liquid–structure interaction

Mohammad Reza Shekari ^{*1}

Abstract

Real accelerations and subsequent wall diapleacements appear as the main damage Factors to liquid storage tanks. Base-isolation systems, as the most appropriate earthquake engineering options in passive control, can be used to reduce these factors and following destruction of these special structures. In this paper, the dynamic behavior of base-isolated rectangular tanks is studied under different ground motions in which, two tanks (one broad and one slender) with fixed-base and LRB base-isolations including different stiffnesses, i.e. stiff and flexible, are considered. In the developed model, finite elements and boundary elements for the shell and liquid domains and nonlinear hysteretic elements for isolation system are respectively employed to perform the analysis of the flexible tank in frequency and time domains. Further, the effect of base-isolators on the seismic response of the whole system including natural frequency, liquid sloshing height, base shear and moment and dynamic pressure on the tank shell, under harmonic and real earthquake has been inspected.

Keywords

Rectangular tank, Seismic isolation, Sloshing, Fluid–structure interaction, Seismic response.

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