

اصلاح رابطه شتاب معادل زلزله‌های افقی و قائم در مخازن بیضوی روزمینی

رضا لطفی^۱، مسعود محمودآبادی^{۲*}، احسان دهقانی^۳

^۱ دکترای سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

^۲ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

^۳ استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم

دریافت: ۱۴۰۱/۲/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۱/۲۲، نشر آنلاین: ۱۴۰۲/۱/۲۲

چکیده

در این تحقیق به موضوع شتاب معادل زلزله در مخازن بیضوی روزمینی پرداخته شده است. اساساً مخزن سازه‌ای است که برای ذخیره انواع مایع به کار می‌رود و در انواع زمینی و هوایی و نیز بتنی و فولادی، کاربرد گسترده‌ای در تصفیه‌خانه‌ها، پالایشگاه‌ها و کارخانه‌ها دارد. با توجه به اعمال نیروهای دینامیکی و هیدرودینامیکی عظیم به یک مخزن بزرگ در هنگام زلزله و اهمیت زیاد تداوم عملکرد کامل سازه مذکور در شرایط بحرانی، مطالعه رفتار لرزه‌ای آن از اهمیت بالایی برخوردار است. در بارگذاری لرزه‌ای مخازن با استفاده از روابط نظریه هانز (Housner)، پارامترهای شتاب معادل زلزله افقی و قائم مورد نیاز هستند لذا هدف تحقیق حاضر به دست آوردن روابطی با دقت مناسب برای پارامترهای مذکور در مخازن بیضوی می‌باشد. برای حصول به هدف مذکور، مخازن بیضوی مختلف با تکنیک اجزای محدود در نرم‌افزار آنسیس (ANSYS) مدل‌سازی و تحت زلزله‌های گوناگون تحلیل دینامیکی گردیده‌اند. سپس با استفاده از روش برازش آماری بر اساس نتایج روش اجزای محدود، روابطی غیرخطی برای پارامترهای مذکور به دست آمده‌اند. از تحقیق حاضر نتیجه گردید که دقت میانگین روابط شتاب معادل زلزله افقی و قائم پیشنهادی این تحقیق، به ترتیب ۱۶ درصد و ۲۶ درصد از دقت میانگین رابطه شتاب معادل زلزله آیین‌نامه طراحی نیروگاه‌های اتمی بالاتر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: مخازن بیضوی، روابط هیدرودینامیک، نظریه هانز، اجزای محدود، برازش آماری.

۱- مقدمه

بیضوی به دلیل عملکرد سازه‌ای بهتر و نمای معماری زیباتر جذابیت بیشتری دارند.

در گذشته برای تحلیل و طراحی مخزن از روش‌های دستی ساده‌ای استفاده می‌شد که روش‌های مذکور به دلیل محدودیت‌های علمی و تکنولوژیک فاقد توانایی احتساب مسائل پیچیده علمی در تحلیل و طراحی بودند. اما امروزه با گسترش دانش اجزای محدود و تقویت سخت‌افزاری کامپیوترها و همچنین پیشرفت نرم‌افزارهای کامپیوتری مختلف مثل آنسیس امکان احتساب مسایل پیچیده علمی در تحلیل و طراحی مخازن فراهم گردیده است.

آنسیس دارای قابلیت مدل‌سازی سه‌بعدی انواع سازه‌های پیچیده به همراه محیط خاک و سیال مجاور آن‌ها و نیز المان‌های جامد و سیال سه‌بعدی متنوعی با قابلیت‌های رفتاری گوناگون مانند کشسانی، مومسانی، اصطکاک، میرایی و هیبریدی می‌باشد لذا در این تحقیق برای انجام تحلیل اجزای محدود از این نرم‌افزار استفاده شده است.

مخزن سازه‌ای است که برای ذخیره انواع مایع به کار می‌رود و در انواع زمینی و هوایی و نیز بتنی و فولادی کاربرد گسترده‌ای در تصفیه‌خانه‌ها و پالایشگاه‌ها و کارخانه‌ها دارد. با توجه به اعمال نیروهای دینامیکی و هیدرودینامیکی عظیم به یک مخزن بزرگ در هنگام زلزله و اهمیت زیاد تداوم عملکرد کامل سازه مذکور در شرایط بحرانی، مطالعه رفتار لرزه‌ای آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

مخزن سازه‌ای است که به دلیل ممنوعیت نشت یا سرریز مایع درون آن باید در مقابل زلزله‌های بزرگ بدون شکستگی یا ترک خوردگی قابل ملاحظه مقاومت نماید. شکل هندسی مخزن در میزان تلاش‌های داخلی آن در اثر زلزله تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. مخازن زمینی شامل انواع مختلفی مانند مربعی و مستطیلی و دایره‌ای و بیضوی می‌شوند که از بین آن‌ها مخازن دایره‌ای و

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۵-۳۲۱۰۳۵۶۷

دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش ضریب کشسانی، زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص خاک و کاهش چسبندگی آن، فشار اعمالی بر دیواره مخزن به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

Kalani و همکاران (۲۰۱۴) مخازن هوایی ذخیره آب را تحت مؤلفه‌های دورانی و انتقالی حرکات زمین تحت تحلیل دینامیکی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مؤلفه‌های دورانی حرکت زمین اثر بیشتری روی جابه‌جایی افقی و نیروی برشی دارند اما نیروی واکنش قائم را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند.

Kotrasova و همکاران (۲۰۱۴) پاسخ دینامیکی تاریخچه زمانی مخزن استوانه‌ای را تحت زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که دانستن فشارهای عمل‌کننده بر روی دیواره‌ها و کف مخزن، فشارهای درون بدنه آن‌ها، فرایند تلاطم سطح مایع و ارتفاع ماکزیمم موج آن در طی یک زلزله، نقشی اساسی را در طراحی مطمئن و پایای مقاوم لرزه‌ای مخازن بازی می‌کند.

Tiwari و Hora (۲۰۱۵) سیستم مخزن اینترزه^۱ و سیال و خاک لایه‌بندی‌شده را تحت تحلیل اندرکنشی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که اثر اندرکنش افزایش متغیری را در تنش‌های درون اجزای مختلف مخزن ایجاد می‌نماید.

Tiwari و Hora (۲۰۱۵) سیستم مخزن هوایی آب اینترزه و سیال و خاک را تحت تحلیل گذرا قرار دادند. آن‌ها دریافتند که فرکانس طبیعی سیستم اندرکنشی کاهش می‌یابد هنگامی که وزن آب در مخزن افزایش می‌یابد.

Musa و Eldamatty (۲۰۱۷) رویه طراحی را برای مخازن مخروطی فولادی ذخیره مایع تحت بارگذاری لرزه‌ای ارائه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که برش پایه ضربه‌ای ماکزیمم هنگامی که مخزن مایلتر می‌شود کاهش می‌یابد درحالی‌که برش پایه موج برای مقادیر زاویه شیب بالاتر افزایش پیدا می‌کند.

Alemzade و Shakib (۲۰۱۷) پاسخ مخازن زمینی فولادی را با حرکت گهواره‌ای آزاد تحت اثر تحریک افقی زلزله مورد مطالعه عددی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پاسخ‌های نیرویی مخزن مهارنشده نسبت به مخزن مهارشده کاهش و پاسخ‌های تغییرمکانی بام و جرم ضربه‌ای سیال افزایش دارند.

Sensebastian و همکاران (۲۰۱۷) مخزن هوایی آب را در یک ساختمان قاب‌بندی‌شده تحت تحلیل لرزه‌ای قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مخزن مستطیلی آب قرارگرفته نزدیک موقعیت گوشه در ساختمان قاب‌بندی‌شده از گزینه‌های دیگر، بهتر عمل می‌کند.

Kianoush و Ghaemmaghani (۲۰۱۱) اثر محتوای فرکانسی زلزله را بر رفتار لرزه‌ای مخازن مستطیلی بتنی مایع با استفاده از روش اجزای محدود با احتساب اندرکنش خاک و سازه بررسی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که رفتار دینامیکی سیستم سیال و مخزن و خاک تا حد بالایی به خصوصیات فرکانسی رکورد زلزله حساس می‌باشد.

Wieschollek و همکاران (۲۰۱۱) طراحی لرزه‌ای مخازن کروی ذخیره مایع را بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که یک کره حمل‌شده توسط تعدادی از پایه‌ها به‌جای یک پاندول معکوس، بیشتر شبیه یک قاب رفتار می‌نماید.

Mehrpouya و Kazem (۲۰۱۲) ارتفاع موج تلاطم را در مخازن استوانه‌ای پهن ذخیره نفت با استفاده از روش‌های عددی تخمین زدند. آن‌ها با استفاده از رگرسیون آماری رابطه‌ای را برای ارتفاع موج بر حسب نسبت ارتفاع آب به قطر مخزن به‌دست آوردند.

Cakir و Livaoglu (۲۰۱۲) مدل تحلیلی عملی سریعی را برای تحلیل سیستم‌های اندرکنشی خاکریز و مخزن مستطیلی و سیال ارائه دادند. آن‌ها نشان دادند که اندرکنش خاکریز و انعطاف دیواره و اندرکنش سیال به‌طور قابل ملاحظه‌ای جابه‌جایی‌های جانبی را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

Moslemi و Kianoush (۲۰۱۲) رفتار دینامیکی مخازن زمینی استوانه‌ای را مورد مطالعه پارامتریک قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که رویه طراحی فعلی در تخمین فشار هیدرودینامیکی بسیار محافظه‌کارانه می‌باشد.

Jabar و Patel (۲۰۱۲) رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی بتنی مسلح آب را تحت چیدمان‌های متفاوت اعضا و خصوصیات متفاوت زلزله بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که پاسخ‌های سازه به‌طور فوق‌العاده‌ای توسط وجود آب و خصوصیات زلزله تحت تأثیر قرار می‌گیرند.

Kralik (۲۰۱۲) اندرکنش خاک و سیال و مخزن را به‌واسطه رخداد زلزله تحت تحلیل دینامیکی قرار داد. او نتیجه گرفت که عملکرد دیواره فولادی مخزن رضایت‌بخش است اما عملکرد مهار مخزن به پی و رینگ بتنی مسلح و بلوک بتنی پی رضایت‌بخش نمی‌باشند.

Ranjbar و همکاران (۲۰۱۳) رفتار لرزه‌ای مخازن هوایی بتنی آب را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پاسخ‌های سیستم تا حد بالایی توسط پارامترهای سازه‌ای و مشخصات زلزله از قبیل محتوای فرکانس تحت تأثیر قرار می‌گیرند.

Yosefi و همکاران (۲۰۱۳) مخازن ذخیره را با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه تحت تحلیل استاتیکی و دینامیکی قرار

به واسطه احتساب ناکافی انعطاف دیوار به‌وسیله این آیین‌نامه می‌باشد.

Uhirova و همکاران (۲۰۱۹) تحلیل دینامیکی مخزن مستطیلی را با استفاده از طیف‌های پاسخ انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که هرچه رده خاک زیرین یا مقدار شتاب لرزه‌ای، بالاتر باشد، اثرات بار لرزه‌ای روی خود سازه بزرگتر می‌باشند.

Zhang و همکاران (۲۰۲۰) اثر مؤلفه‌های جهتی زلزله‌ها را روی رفتار لرزه‌ای یک مخزن فولادی مهارنشده مطالعه نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مؤلفه لرزه‌ای قائم، تنش محوری فشاری بالایی را تولید می‌کند و آن همچنین باعث افزایش برکنش و لغزش کف مخزن به‌طور قابل ملاحظه‌ای می‌گردد.

Rawat و همکاران (۲۰۲۰) تحلیل لرزه‌ای مخزن فولادی ذخیره مایع استوانه‌ای را با استفاده از روش جزء محدود سازه‌ای-آکوستیک هم‌بسته برای اندرکنش سیال-سازه انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که جابه‌جایی تلاطم به‌وسیله انعطاف مخزن تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد اما فشار هیدرودینامیکی ضربه‌ای و مؤلفه ضربه‌ای برش پایه با انعطاف مخزن افزایش می‌یابد.

Jani و همکاران (۲۰۲۰) اثرات وضعیت خاک را روی مخزن آب هوایی با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی با سامانه‌های اسکلت متفاوت مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نوع خاک اثر قابل ملاحظه‌ای روی اندرکنش خاک و سازه دارد. خاک نرم اندرکنش بیشتری با سازه از خاک متوسط و سنگی دارد.

Dubey و همکاران (۲۰۲۰) تحلیل تاریخچه زمانی مخزن آب زیرزمینی را برای شدت‌های لرزه‌ای متفاوت انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که روش تاریخچه زمانی برای تضمین ایمنی در برابر نیروهای زلزله لازم می‌گردد.

Pandit و همکاران (۲۰۲۰) ارزیابی ویژگی‌های دینامیکی تلاطم سیال را در مخازن با کف شیب‌دار انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پاسخ دینامیکی مشخص می‌شود که با افزایش در شیب مخزن افزایش می‌یابد حتی اگر جرم سیال ثابت بماند.

Jin و همکاران (۲۰۲۱) اثرات پیکربندی‌های متفاوت دیواره میراگر را بر پاسخ دینامیکی یک مخزن مایع تحت تحریک لرزه‌ای بررسی نمودند. آن‌ها بر اساس تحلیل پاسخ دینامیکی، یک سیستم مناسب دیواره میراگر را برای همه تحریکات لرزه‌ای توسعه دادند. Ozsarac و همکاران (۲۰۲۱) پاسخ تلاطم غیرخطی ناشی از زلزله مخازن فولادی روزمینی را با سقف شناور میرا یا نامیرا بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که حتی اگر سیستم اتلاف، اصولاً برای مخازن دارای ظرفیت بزرگ، طراحی شده باشد می‌تواند به‌طور مؤثری برای ارتقای عملکرد هر سیستمی برای کاهش ارتفاع موج تلاطم مورد استفاده قرار گیرد.

Lee و Lee (۲۰۲۱) پاسخ دینامیکی غیرخطی یک مخزن مستطیلی بتنی ذخیره مایع را روی خاک صلب در معرض حرکت

Gurkalo و همکاران (۲۰۱۷) یک برج آب بتنی مسلح شکاف‌دار ابداعی را در مناطق لرزه‌ای تحت تحلیل غیرخطی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با یک طراحی مناسب، تبدیل یک برج آب توپر به یک برج شکاف‌دار می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای شکل‌پذیری آن را تحت کنش لرزه‌ای بدون لطمه قابل ملاحظه به ظرفیت باربری آن افزایش دهد.

Kotrasova و همکاران (۲۰۱۷) علل ممکن آسیب به مخازن بتنی را با بررسی عددی اندرکنش سیال و سازه و خاک مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که وقتی مخزن بتنی روی خاک‌های نرم قرار داده می‌شود اندرکنش سیال و سازه و خاک نقش مهمی را در پاسخ لرزه‌ای مخازن ذخیره خواهد داشت.

Phan و همکاران (۲۰۱۷) مخازن فولادی هوایی ذخیره متکی بر ستون‌های بتنی مسلح را تحت تحلیل شکنندگی لرزه‌ای قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در حالت تحلیل‌شده، شتاب ماکزیمم زمین، بهترین عملکرد را در میان تخمین‌های شدت انتخاب‌شده بروز می‌دهد.

Curadelli و Compagnoni (۲۰۱۷) پاسخ مخازن فولادی استوانه‌ای را تحت تحریک لرزه‌ای، مورد مطالعه آزمایشگاهی و عددی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که مدل مکانیکی ساده‌شده، ارتفاع تلاطم را کمتر از حد و نیروی برشی پایه و گشتاور واژگونی را بیشتر از حد تخمین می‌زند.

Narehsh (۲۰۱۹) تحلیل لرزه‌ای مخزن آب اینتزه هوایی را تحت اثر تلاطم انجام داد. او نتیجه گرفت که به‌منظور اجتناب از گسیختگی، رجحان زیادی باید به تلاطم در مناطق مستعد زلزله داده شود و ارتفاع آزاد کافی باید برای کنترل حرکت تلاطمی سیال تأمین شود.

Joseph و همکاران (۲۰۱۹) اثر اندرکنش سیال-سازه-خاک را روی رفتار دینامیکی مخازن آب دایره‌ای مطالعه نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که خصوصیت خاک، محتوای بسامد زلزله و میزان پرشدگی از آب اثر قابل ملاحظه‌ای روی رفتار لرزه‌ای مخازن آب دارند.

Rawat و همکاران (۲۰۱۹) تلاطم ناشی از زلزله و فشارهای هیدرودینامیکی را در مخازن صلب ذخیره مایع تحلیل‌شده به-وسیله روش‌های سازه‌ای-آکوستیک هم‌بسته و اولیری-لاگرانژی مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که غیرخطی بودن جابه‌جایی موج تلاطم، نقش مهمی را هنگام محاسبه توزیع فشار هیدرودینامیکی روی دیوارهای مخزن صلب بازی نمی‌کند.

Behnamfar و همکاران (۲۰۱۹) تحلیل دینامیکی مخازن بتنی منعطف ذخیره استوانه‌ای را تحت حرکت افقی و قائم زمین انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تخمین‌های آیین‌نامه‌ای سی آی ۳-۳۵۰، متفاوت با تخمین‌های روش تحلیلی آن‌ها هستند که

و موج به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند. سیال، تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود و تغییر مکان‌های آن کوچک فرض می‌گردند.

بر اساس نظریه هازنر، فشار ضربه‌ای وارد بر دیواره مخزن برحسب پاسکال از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{iw} = \sqrt{3} a_h \rho \left(h - z - \frac{(h-z)^2}{2h} \right) \tanh \frac{\sqrt{3}l}{2h} \quad (1)$$

که در آن a_h شتاب معادل افقی بر حسب متر بر مجذور ثانیه، ρ چگالی مایع بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، h ارتفاع مایع بر حسب متر و l قطر مخزن موازی با جهت زلزله است.

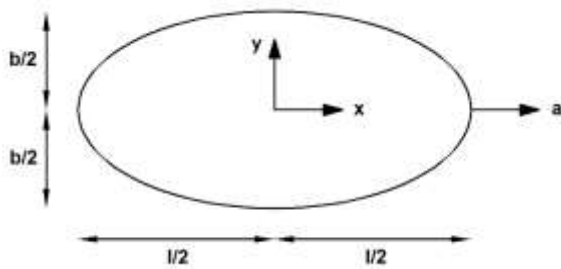
در رابطه (۱) مختصه Z هر نقطه دیوار از کف مخزن سنجیده می‌شود. بنابراین اگر در رابطه (۱) مختصه Z برابر با صفر قرار داده شود حداکثر فشار ضربه‌ای وارد بر دیواره مخزن بر حسب پاسکال از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{iwmax} = \frac{\sqrt{3}}{2} a_h \rho h \tanh \frac{\sqrt{3}l}{2h} \quad (2)$$

طبق اصول مکانیک سیالات، فشار هیدرودینامیکی قائم وارد بر کف مخزن برحسب پاسکال نیز از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$P_v = a_v \rho h \quad (3)$$

که در آن a_v شتاب معادل قائم بر حسب متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. در این بخش روابط لرزه‌ای مخزن بیضوی صلب با استفاده از نظریه هازنر استخراج می‌گردند. در شکل (۲) مخزنی بیضوی به قطر بزرگ l و قطر کوچک b با عمق مایع h تحت شتاب افقی a قرار گرفته است.



شکل ۲- مخزن بیضوی

برای پارامتریک‌سازی معادله بیضی از اتحاد مثلثاتی زیر استفاده می‌شود:

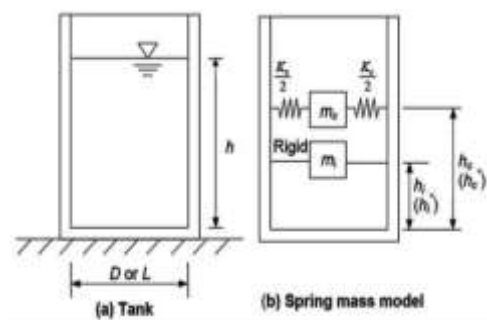
$$\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi = 1 \quad (4)$$

زمین سه‌جهتی مطالعه نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که جهت‌ی بودن زلزله، اثر قابل ملاحظه‌ای روی مقدار حداکثر ارتفاع تلاطم دارد. اصولاً طبق نشریه ۱۲۳ سازمان برنامه با عنوان ضوابط و معیارهای طرح و محاسبه مخازن آب زمینی، از نظر رفتار سازه و پدافند غیرعامل، مخازن منحنی بر مخازن تخت برتری قابل ملاحظه‌ای دارند. لذا بهتر است که در زمین‌های مربعی از مخزن دایره‌ای و در زمین‌های مستطیلی از مخزن بیضوی استفاده گردد. در بارگذاری لرزه‌ای مخازن بر اساس نظریه هازنر، فشار هیدرودینامیکی ضربه‌ای مایع با استفاده از پارامتر شتاب معادل زلزله افقی محاسبه می‌گردد. اما در نظریه هازنر، رابطه پارامتر مذکور برای مخازن ارائه نگردیده است.

آیین‌نامه نیروگاه‌های اتمی آمریکا، مقدار شتاب طیفی ضربه‌ای را برای شتاب معادل زلزله افقی و قائم پیشنهاد نموده است. هدف این تحقیق آن است که با اصلاح رابطه موجود برای مخازن زمینی بیضوی، دقت آن را افزایش دهد. برای حصول هدف مذکور، مخازن بیضوی زمینی با تکنیک اجزای محدود در نرم‌افزار فلونت به عنوان زیربرنامه سیالاتی نرم‌افزار آنسیس، مدل‌سازی و تحت زلزله مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفته‌اند. صحت‌سنجی مدل‌سازی از طریق مقایسه نتایج حاصل از تحقیق حاضر و تحقیقات Moslemi و Jamalvandi تحت اعمال شتاب متغیر زلزله، انجام شده و صحت نتایج حاصله از نظر انطباق بر هم با دقت قابل قبول، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- نظریه هازنر

در نظریه هازنر مطابق شکل (۱) (برگرفته از مقاله هازنر) فشارهای هیدرودینامیکی مایع به دو قسمت ضربه‌ای و موج تفکیک می‌شوند. فشارهای ضربه‌ای همراه با نیروهای اینرسی‌ای هستند که به وسیله حرکات ضربه‌ای دیواره‌های مخزن تولید می‌شوند. فشارهای تولیدشده، مستقیماً با شتاب دیواره‌های مخزن متناسب می‌باشند.



شکل ۱- جرم‌های مایع ضربه‌ای و موج

فشارهای موج به وسیله نوسان سیال تولید می‌گردند و لذا نتایج فشارهای ضربه‌ای می‌باشند. در این نظریه، فشارهای ضربه‌ای

$$\begin{aligned}
 I &= \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \int_{-b\sqrt{\frac{1-x^2}{l^2}}}^{b\sqrt{\frac{1-x^2}{l^2}}} x^2 dy dx \\
 &= \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} (x^2 y) \Big|_{-b\sqrt{\frac{1-x^2}{l^2}}}^{b\sqrt{\frac{1-x^2}{l^2}}} dx \\
 &= \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} 2bx^2 \sqrt{\frac{1-x^2}{l^2}} dx \\
 &= \frac{2b}{l} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} x^2 \sqrt{l^2 - x^2} dx \\
 &= \frac{2b}{l} \left(\frac{x}{8} \sqrt{l^2 - x^2} (2x^2 - \frac{l^2}{4}) + \frac{l^4}{128} \sin^{-1} \frac{2x}{l} \right) \Big|_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \\
 &= \frac{2b}{l} \left(\frac{l^4}{128} \frac{\pi}{2} + \frac{l^4}{128} \frac{\pi}{2} \right) \\
 &= \frac{\pi b l^3}{64}
 \end{aligned} \tag{۱۳}$$

با استفاده از روابط (۸)، (۹) و (۱۲) ضریب یکنواختی سطح مخزن از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\begin{aligned}
 Q &= \int_0^\varphi \frac{Bx}{2} dx \\
 &= \int_0^\varphi -\frac{b}{2} \sin\varphi \frac{l}{2} \cos\varphi \frac{l}{2} \sin\varphi d\varphi \\
 &= \int_0^\varphi -\frac{bl^2}{8} \cos\varphi \sin^2\varphi d\varphi = -\frac{bl^2}{8} \left(\frac{\sin^3\varphi}{3} \right) \Big|_0^\varphi \\
 &= -\frac{bl^2}{24} \sin^3\varphi
 \end{aligned} \tag{۱۴}$$

با استفاده از روابط (۸)، (۹)، (۱۲) و (۱۴) ضریب تناسب سطح مخزن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

در دستگاه مختصات دکارتی، معادله بیضی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{x^2}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{b}{2}\right)^2} = 1 \tag{۵}$$

با مقایسه روابط (۴) و (۵) روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\cos^2\varphi = \frac{x^2}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} \tag{۶}$$

$$\sin^2\varphi = \frac{y^2}{\left(\frac{b}{2}\right)^2} \tag{۷}$$

با استفاده از رابطه (۶) مختصه x هر نقطه روی بیضی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$x = \frac{l}{2} \cos\varphi \tag{۸}$$

با گرفتن دیفرانسیل از طرفین رابطه (۸) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$dx = -\frac{l}{2} \sin\varphi d\varphi \tag{۹}$$

با استفاده از رابطه (۷) مختصه y هر نقطه روی بیضی نیز از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$y = \frac{b}{2} \sin\varphi \tag{۱۰}$$

با گرفتن دیفرانسیل از طرفین رابطه (۱۰) رابطه زیر به دست می‌آید:

$$dy = \frac{b}{2} \cos\varphi d\varphi \tag{۱۱}$$

با استفاده از رابطه (۱۰) عرض بیضی در یک نقطه دلخواه از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$B = 2y = b \sin\varphi \tag{۱۲}$$

با استفاده از رابطه (۵) ممان اینرسی سطح مخزن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\int_0^\pi \left(\frac{bl^5}{2304} \left(\frac{5}{2} - 4\cos(2\varphi) + \frac{3}{2}\cos(4\varphi) + \cos(2\varphi)\sin^2(2\varphi) \right) + \frac{b^3l^3}{6912} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos(4\varphi) - \cos(2\varphi)\sin^2(2\varphi) \right) \right) d\varphi$$

$$= \left(\frac{bl^5}{2304} \left(\frac{5}{2}\varphi - 2\sin(2\varphi) + \frac{3}{8}\sin(4\varphi) + \frac{1}{6}\sin^3(2\varphi) \right) + \frac{b^3l^3}{6912} \left(\frac{1}{2}\varphi - \frac{1}{8}\sin(4\varphi) - \frac{1}{6}\sin^3(2\varphi) \right) \right) \Big|_0^\pi$$

$$= \frac{bl^5}{2304} \left(\frac{5\pi}{2} - 0 \right) + \frac{b^3l^3}{6912} \left(\frac{\pi}{2} - 0 \right)$$

$$= \frac{\pi bl^3}{4608} \left(5l^2 + \frac{b^2}{3} \right)$$

با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۵) ضریب شکل سطح مخزن از رابطه زیر به دست می آید:

$$\lambda = \sqrt{\frac{I}{K}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi bl^3}{64}}{\frac{\pi bl^3}{4608} \left(5l^2 + \frac{b^2}{3} \right)}} = \frac{6\sqrt{6}}{\sqrt{b^2 + 15l^2}} \quad (16)$$

با استفاده از رابطه (۱۶) فرکانس زاویه‌ای موج ارتعاش مایع از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\omega = \sqrt{g\lambda \tanh(\lambda h)}$$

$$= \sqrt{\frac{6\sqrt{6}g}{\sqrt{b^2 + 15l^2}} \tanh \frac{6\sqrt{6}h}{\sqrt{b^2 + 15l^2}}} \quad (17)$$

که در آن g شتاب گرانش برحسب متر بر مجذور ثانیه و b طول مخزن عمود بر جهت حرکت برحسب متر می باشد. طبق آیین نامه طراحی نیروگاه‌های اتمی آمریکا، شتاب معادل زلزله افقی و قائم بر حسب متر بر مجذور ثانیه از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$a_e = S_a \quad (18)$$

که در آن S_a شتاب طیفی ضربه‌ای زلزله بر حسب متر بر مجذور ثانیه است.

$$K = - \int_0^\pi \frac{Q^2}{B} \left(4 + \frac{1}{3} \left(\frac{dB}{dx} \right)^2 \right) dx$$

$$= - \int_0^\pi \frac{Q^2}{B} \left(4 + \frac{1}{3} \left(\frac{dB}{d\varphi} \right)^2 \right) d\varphi$$

$$= \int_0^\pi \frac{\left(-\frac{bl^2}{24} \sin^3\varphi \right)^2}{b\sin\varphi} \left(4 + \frac{1}{3} \left(\frac{b\cos\varphi}{\frac{-l}{2}\sin\varphi} \right)^2 \right) l \sin\varphi d\varphi$$

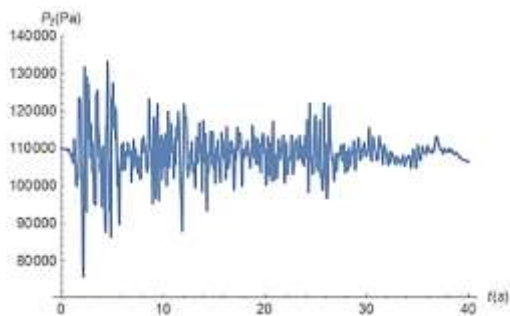
$$= \int_0^\pi \frac{bl^5 \sin^6\varphi}{288} \left(1 + \frac{b^2 \cos^2\varphi}{3l^2 \sin^2\varphi} \right) d\varphi$$

$$= \int_0^\pi \left(\frac{bl^5 \sin^6\varphi}{288} + \frac{b^3 l^3 \cos^2\varphi \sin^4\varphi}{864} \right) d\varphi =$$

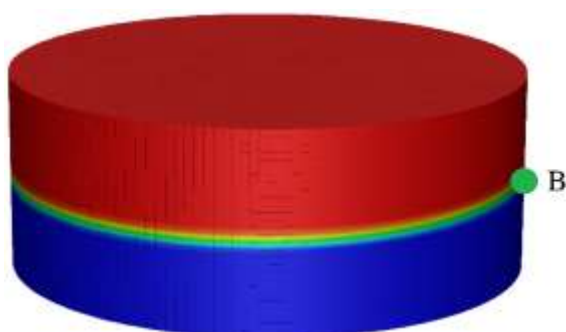
$$\int_0^\pi \left(\frac{bl^5}{2304} (1 - \cos(2\varphi))^3 + \frac{b^3 l^3}{6912} (1 + \cos(2\varphi))(1 - \cos(2\varphi))^2 \right) d\varphi$$

$$= \int_0^\pi \left(\frac{bl^5}{2304} \left(1 - 3\cos(2\varphi) + 3\cos^2(2\varphi) - \cos^3(2\varphi) \right) + \frac{b^3 l^3}{6912} (1 - \cos(2\varphi) - \cos^2(2\varphi) + \cos^3(2\varphi)) \right) d\varphi$$

$$= \int_0^\pi \left(\frac{bl^5}{2304} \left(1 - 3\cos(2\varphi) + \frac{3}{2}(1 + \cos(4\varphi)) - \cos(2\varphi)(1 - \sin^2(2\varphi)) \right) + \frac{b^3 l^3}{6912} \left(1 - \cos(2\varphi) - \frac{1}{2}(1 + \cos(4\varphi)) + \cos(2\varphi)(1 - \sin^2(2\varphi)) \right) \right) d\varphi =$$

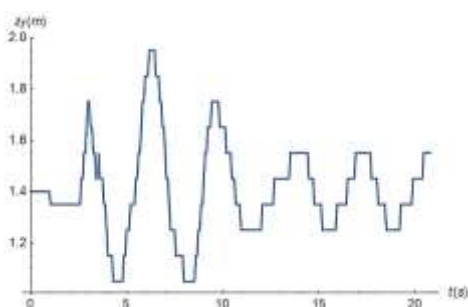


شکل ۴- نمودار فشار کل آب بر حسب زمان



شکل ۵- مخزن دایره‌ای روزمینی ۷/۲×۱/۴ متر

Jamalvandi در سال ۲۰۲۱ ارتفاع ماکزیمم موج مخزن مذکور را تحت زلزله فوق‌الذکر به‌دست آورده است. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، نمودار تراز سطح آزاد آب در نقطه B بر حسب زمان مطابق شکل (۶) به‌دست آمده است.



شکل ۶- نمودار تراز سطح آزاد آب بر حسب زمان

فشار ماکزیمم ضربه‌ای آب بر حسب پاسکال از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

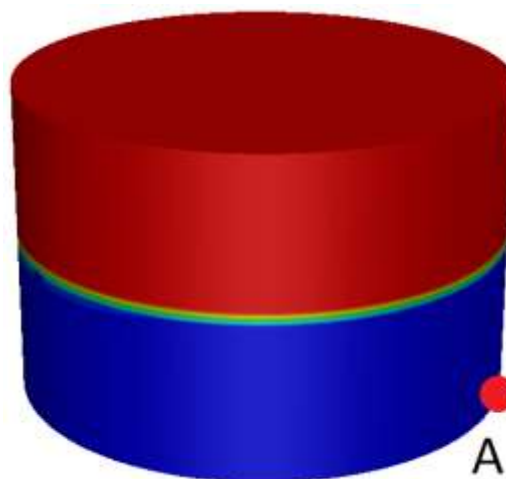
$$P_t = |P_t - \gamma_w h| \quad (19)$$

در رابطه فوق P_t فشار کل آب بر حسب پاسکال است. γ_w نیز وزن مخصوص آب بر حسب نیوتن بر مترمکعب می‌باشد.

برای اصلاح رابطه شتاب معادل زلزله، ابتدا باید مقادیر دقیق شتاب معادل زلزله به‌دست آورده شوند تا بر اساس آن‌ها بتوان دقت رابطه اصلاح‌شده شتاب معادل را ارزیابی نمود. ابتدا با تحلیل دینامیکی توسط نرم‌افزار، فشار ضربه‌ای به‌دست آورده می‌شود سپس با استفاده از رابطه (۲) مقدار دقیق شتاب معادل محاسبه می‌گردد. در این تحقیق با تحلیل دینامیکی ۵ مخزن بیضوی مختلف تحت ۸ زلزله گوناگون در جهات طولی، عرضی و قائم و مطالعه نتایج حاصله، با استفاده از روش برازش آماری، روابطی با دقت مناسب برای پارامترهای شتاب معادل زلزله افقی و قائم در مخزن زمینی بیضوی پیشنهاد گردیده‌اند.

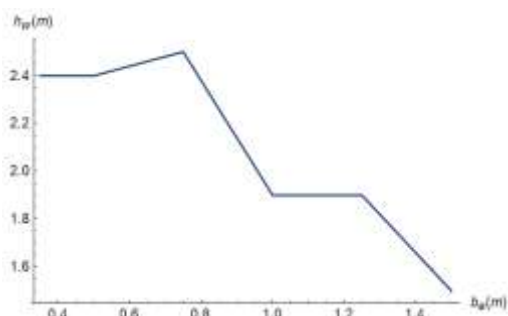
۳- صحت‌سنجی مدل‌سازی

برای صحت‌سنجی روش تحقیق، یک مخزن صلب روزمینی دایره‌ای با کف گیردار به قطر ۳۴ متر و ارتفاع آب ۱۱ متر مطابق شکل (۳) تحت مؤلفه طولی زلزله السنترو مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفته است.



شکل ۳- مخزن دایره‌ای روزمینی ۳۴×۱۱ متر

Moslemi در سال ۲۰۱۱ فشار ماکزیمم ضربه‌ای مخزن مذکور را تحت زلزله فوق‌الذکر به‌دست آورده است. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به‌عنوان زیربرنامه سیالاتی نرم‌افزار آنسیس، نمودار فشار کل در نقطه A بر حسب زمان مطابق شکل (۴) به‌دست آمده است. همچنین برای صحت‌سنجی روش مدل‌سازی تحت شتاب متغیر، یک مخزن روزمینی دایره‌ای با کف گیردار به قطر ۷/۲ متر و ارتفاع آب ۱/۴ متر مطابق شکل (۵) تحت مؤلفه طولی زلزله ارزینکان^۲ مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفته است.



شکل ۷- نمودار ارتفاع ماکزیمم موج بر حسب اندازه المان

۴- تحلیل دینامیکی

جهت به دست آوردن رابطه مناسبی برای شتاب معادل زلزله افقی، ۵ مخزن بیضوی بتنی روزمینی با پایه گیردار با مشخصات مندرج در جدول (۲) تحت مطالعه قرار گرفته‌اند. ابعاد مخازن مذکور به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که از نظر اندازه مخزن، مخازن بزرگ، متوسط و کوچک مختلفی در روش رگرسیون غیرخطی گنجانده شوند. همچنین با استفاده از پایگاه اطلاعات پژوهشگاه مهندسی زلزله پاسیفیک، ۸ زلزله مختلف با مشخصات مندرج در جدول (۳) برای انجام تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شده‌اند.

ارتفاع ماکزیمم موج آب بر حسب متر از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$h_w = |z_f - z_s| \quad (20)$$

در رابطه فوق، z_f و z_s به ترتیب تراز سطح آزاد دینامیکی و استاتیکی آب بر حسب متر می‌باشند. نتایج مطالعات Moslemi، Jamalvandi و تحقیق حاضر در جدول (۱) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. بررسی جدول (۱) نشان می‌دهد که نتایج متناظر مطالعه Moslemi، Jamalvandi و تحقیق حاضر، با دقت مناسبی با یکدیگر تطابق دارند. همچنین برای صحت‌سنجی اندازه المان‌های به کار رفته در روش اجزای محدود، تحلیل حساسیت برای مخزن بیضوی $20 \times 10 \times 5$ متر، تحت اعمال هم‌زمان مؤلفه‌های افقی طولی و عرضی زلزله طیس انجام و نمودار حاصله در شکل (۷) نشان داده شده است. با بررسی شکل (۷) مشخص می‌شود که مقدار ارتفاع ماکزیمم موج در اندازه المان $0/5$ متر به مقدار $2/4$ متر همگرا می‌گردد.

جدول ۱- مقایسه نتایج مطالعه Moslemi، Jamalvandi و تحقیق حاضر

نام متغیر	واحد متغیر	مطالعه مسلمی	مطالعه جمالوندی	تحقیق حاضر	درصد خطای نسبی
فشار ماکزیمم ضربه‌ای	پاسکال	۳۶۰۰۰	-	۳۵۰۰۰	۳
ارتفاع ماکزیمم موج	متر	-	۰/۵	۰/۵۵	۹

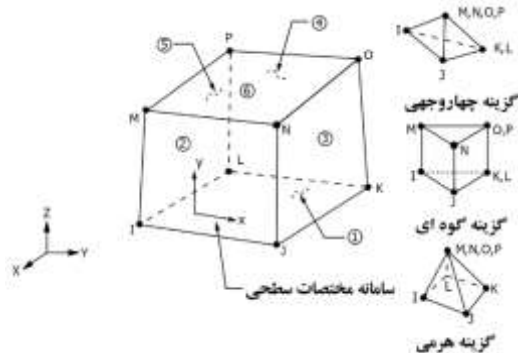
جدول ۲- مشخصات مخازن بیضوی تحت مطالعه

نوع مخزن	طول مخزن (متر)	عرض مخزن (متر)	ارتفاع مخزن (متر)
A	۲۰	۱۰	۵
B	۳۰	۱۰	۶
C	۳۰	۲۰	۷
D	۵۰	۲۰	۸
E	۵۰	۳۰	۹

جدول ۳- مشخصات زلزله‌های افقی اعمالی به مخازن

نام زلزله	شتاب بیشینه (متر بر مجذور ثانیه)	سرعت بیشینه (متر بر ثانیه)	جابه‌جایی بیشینه (متر)	زمان تداوم (ثانیه)
کیپ X	۱۴/۹۷۳	۱/۲۵۱	۰/۳۹۷	۲۹/۹۸
چیچی X	۹/۶۷۵	۱/۰۷۶	۰/۱۸۶	۸۹/۹۹۵
طیس X	۸/۳۵۸	۰/۹۷۸	۰/۳۸۷	۳۲/۸۲
کوبه X	۶/۹۳۴	۰/۶۸۳	۰/۲۶۷	۴۰/۹۵
لوما X	۵/۲۸۵	۰/۳۵	۰/۰۹۱	۳۹/۹۵
منجیل X	۵/۱۴۶	۰/۴۲۵	۰/۱۴۹	۵۳/۵
السنتر X	۳/۱۲۹	۰/۲۹۷	۰/۱۳	۳۹/۹۹
نورتریج X	۳/۰۸۱	۰/۲۳۱	۰/۱۰۷	۳۹/۹۸

شکل (۹) از المان فلوئید^{۳۰} استفاده شده است. این المان مکعبی دارای ۸ گره با درجات آزادی جابه‌جایی و نیز فشار می‌باشد.



شکل ۹- المان فلوئید ۳۰

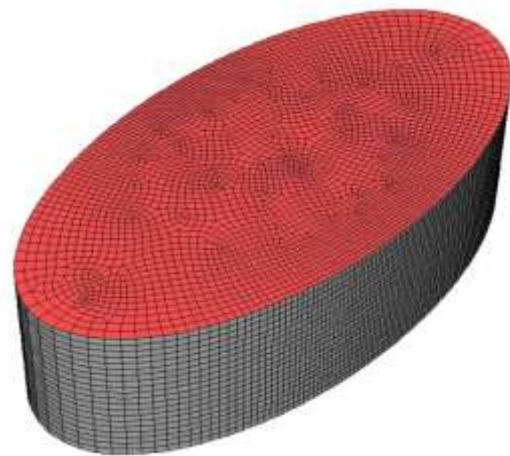
شرایط مرزی کف مخزن به صورت تکیه‌گاه‌های گیردار تعریف شده‌اند. به دلیل عدم وجود سقف، سطح فوقانی مدل به صورت خروجی فشار تعریف گردیده است. همچنین لغزش آب بر روی سطوح داخلی مخزن در امتداد موازی با سطح داخلی، به صورت بدون اصطکاک تعریف شده است. در این تحقیق برای تحلیل دینامیکی مخزن، از روش تاریخچه زمانی استفاده شده است. در این روش، نداشت سرعت زلزله به مخزن صلب اعمال گردیده است. جهت حصول دقت کافی و زمان معقول برای تحلیل دینامیکی، تعداد گام‌های زمانی برابر با ۱۰۰۰ انتخاب شده است. اندازه گام زمانی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\Delta t = \frac{t_d}{n_s} \quad (21)$$

در رابطه فوق t_d زمان تداوم زلزله و n_s تعداد گام‌های زمانی می‌باشند. با توجه به زمان تداوم زلزله‌ها، تعداد گام‌های زمانی برابر با ۱۰۰۰، اندازه گام زمانی مناسبی را ارائه می‌نماید. لازم به ذکر است که مطابق شکل (۱۰)، فشار کل ماکزیمم آب تحت زلزله طولی در نقطه C یعنی پایین دیوار در انتهای قطر بزرگ و تحت زلزله عرضی در نقطه D یعنی پایین دیوار در انتهای قطر کوچک اتفاق می‌افتد. به عنوان نمونه نمودارهای تاریخچه زمانی فشار کل ماکزیمم آب تحت زلزله کیپ^۳ X در جهات طولی و عرضی برای مخزن A به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است. تحلیل دینامیکی گذرای مخزن آب بیضوی تحت زلزله اعمالی در جهت قائم با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. لازم به ذکر است که فشار کل قائم ماکزیمم آب تحت زلزله قائم در پایین دیوار و روی کف مخزن اتفاق می‌افتد.

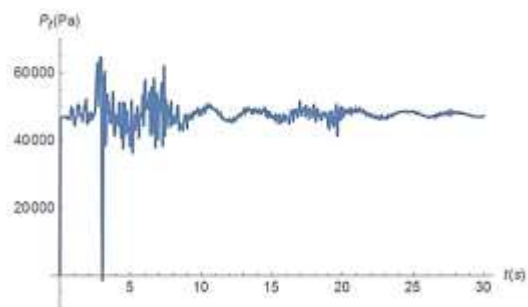
زلزله‌های مذکور به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که از نظر حداکثر شتاب زلزله، زلزله‌های ضعیف، متوسط و قوی مختلفی در روش رگرسیون غیرخطی گنجانده شوند. تحلیل دینامیکی گذرای هر یک از مخازن بیضوی، تحت هر یک از زلزله‌های اعمالی، در هر یک از جهات طولی و عرضی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. چگالی، ضرایب پواسون و کشسانی و نسبت میرایی بتن دیوار و کف به ترتیب برابر با ۲۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۲، ۲۰۰۰۰ مگاپاسکال و ۵ درصد در نظر گرفته شده‌اند. همچنین چگالی، لزجت، سرعت صوتی و نسبت میرایی ضربه‌ای و موج آب درون مخزن به ترتیب برابر با ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ۰/۱۱۵ میلی‌پاسکال ثانیه، ۱۵۰۰ متر بر ثانیه، ۵ درصد و ۰/۵ درصد فرض گردیده‌اند.

معمولاً در مدل‌سازی مخازن با روش اجزای محدود جهت نیل به دقت کافی اندازه المان برابر ۰/۱ کوچک‌ترین بعد مخزن در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مطابق شکل (۸) از اندازه المان ۰/۵ متر برای مش‌بندی مایع استفاده گردیده که با توجه به ابعاد مخزن از دقت کافی برخوردار می‌باشد.

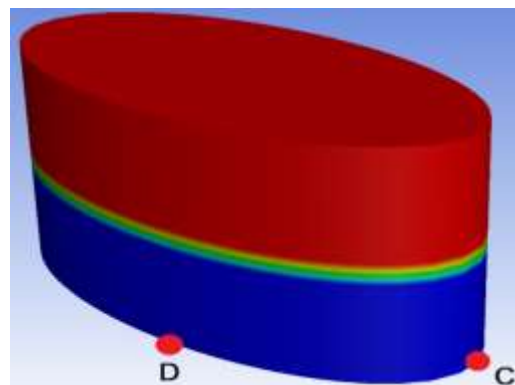


شکل ۸- مش‌بندی مخزن بیضوی

پدیده تلاطم در مخزن آب تحت زلزله‌های قوی، تغییر شکل‌های بزرگی را در آب ایجاد می‌کند. در روش لاگرانژی، المان‌های سالید نمی‌توانند تغییر شکل‌های بزرگی را تحمل کنند در حالی که در روش اویلری، المان‌های فلوئید می‌توانند تغییر شکل‌های بزرگی را تحمل نمایند. بنابراین برای انجام تحلیل دینامیکی با فرض صلبیت مخزن، از روش اویلری با به‌کارگیری المان‌های فلوئید استفاده شده است. برای مدل‌سازی آب در نرم‌افزار آنسیس، مطابق



شکل ۱۲- نمودار تاریخچه زمانی فشار کل زلزله کیپ X در جهت عرضی در نقطه D

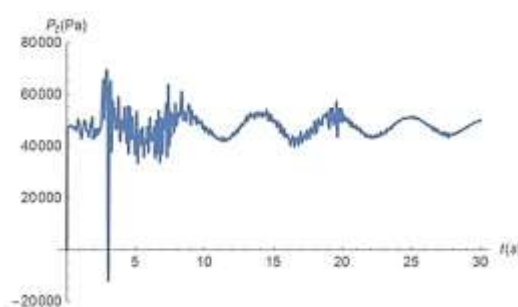


شکل ۱۰- مخزن بیضوی ۲۰×۱۰×۵ متر

با استفاده از معادله (۲) شتاب معادل زلزله افقی بر حسب متر بر مجذور ثانیه از رابطه زیر به دست می آید:

$$a_h = \frac{2P_{iwmax}}{\sqrt{3} \rho h \tanh \frac{\sqrt{3} l}{2h}} \quad (22)$$

به عنوان نمونه در جدول (۴) مقدار شتاب معادل برای زلزله های مختلف برای مخزن A درج گردیده است.



شکل ۱۱- نمودار تاریخچه زمانی فشار کل زلزله کیپ X در جهت طولی در نقطه C

جدول ۴- شتاب معادل برای زلزله های مختلف

نام زلزله	شتاب معادل طولی (متر بر مجذور ثانیه)	شتاب معادل عرضی (متر بر مجذور ثانیه)
کیپ X	۱۴/۴۰۳	۱۲/۴۰۶
چیچی X	۸/۰۱۵	۶/۷۹۹
طبس X	۷/۶۶۶	۶/۴۴۱
کوبه X	۶/۱۵۶	۵/۲۴۹
لوما X	۴/۹۹۵	۴/۱۷۵
منجیل X	۴/۲۹۸	۳/۶۹۸
السنتر و X	۳/۳۶۹	۲/۸۶۳
نورتریج X	۳/۳۶۹	۲/۷۴۴

جدول ۵- مشخصات زلزله های قائم اعمالی به مخازن

نام زلزله	شتاب بیشینه (متر بر مجذور ثانیه)	سرعت بیشینه (متر بر ثانیه)	جابه جایی بیشینه (متر)	زمان تداوم (ثانیه)
کیپ Z	۷/۵۳۶	۰/۶۲۷	۱/۱۰۶	۲۹/۹۸
چیچی Z	۷/۲۴۴	۰/۴۹۱	۰/۲۷۸	۸۹/۹۹۵
طبس Z	۶/۸۸۵	۰/۴۴۵	۰/۱۶۷	۳۲/۸۲
کوبه Z	۴/۳۳۴	۰/۳۴۸	۰/۱۲۴	۴۰/۹۵
لوما Z	۵/۴۱۱	۰/۱۷۸	۰/۰۳۶	۳۹/۹۵
منجیل Z	۵/۳۸	۰/۴۲۹	۰/۲۹۵	۵۳/۴
السنتر و Z	۲/۰۵۲	۰/۱۰۷	۰/۰۹۱	۳۹/۹۹
نورتریج Z	۵/۵۲۳	۰/۱۸	۰/۱۰۴	۳۹/۹۸

جدول ۶- شتاب معادل زلزله قائم برای زلزله‌های مختلف

نام زلزله	شتاب معادل قائم (متر بر مجذور ثانیه)
کیپ Z	۶
چیچی Z	۴/۳
طبس Z	۴/۷
کوبه Z	۳/۵
لوما Z	۳/۷
منجیل Z	۲/۹
السنترو Z	۱/۹
نورتیج Z	۴/۷

۵- رگرسیون نتایج

به‌طور کلی برای یافتن یک رابطه ریاضی مناسب جهت مرتبط ساختن چند پارامتر مختلف، از روش رگرسیون غیرخطی استفاده می‌شود. در روش مذکور، متغیر هدف r به‌صورت تابع مناسبی از متغیرهای طراحی x و y و غیره و ضرایب مجهول α و β و غیره به‌شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$r = f(x, y, \dots, \alpha, \beta, \dots) \quad (25)$$

در رابطه فوق f یک تابع ریاضیاتی غیرخطی چندمتغیره است. خطای رگرسیون در نقطه i ام به‌وسیله معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$e_i = r_i - f(x_i, y_i, \dots, \alpha, \beta, \dots) \quad (26)$$

در رابطه فوق r_i مقدار دقیق متغیر هدف در نقطه i ام است. همچنین x_i و y_i و ... مقادیر متغیرهای طراحی در نقطه i ام می‌باشند. شاخص خطای رگرسیون به‌وسیله معادله زیر تعیین می‌گردد:

$$\chi = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (27)$$

در رابطه فوق، e_i ها مانده‌هایی هستند که تفاوت میان هر نقطه اطلاعات اصلی و مقدار برازش یافته آن را ارائه می‌دهند. n نیز تعداد نقاط جمعیت آماری می‌باشد. برای ماکزیمم شدن دقت رگرسیون، باید شاخص خطای آن مینیمم شود. شرط مذکور به دستگاه چند معادله و چند مجهول غیرخطی زیر منجر می‌گردد:

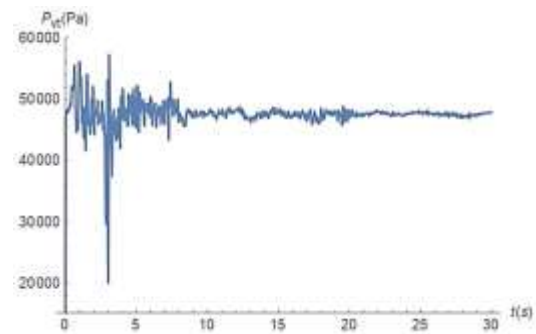
$$\begin{cases} g(\alpha, \beta, \dots) = 0 \\ h(\alpha, \beta, \dots) = 0 \\ \dots \end{cases} \quad (28)$$

با حل دستگاه معادلات (۲۸)، ضرایب مجهول α و β و غیره به‌دست می‌آیند. سپس با قرار دادن مقادیر ضرایب α و β و غیره در رابطه (۲۵)، رابطه ریاضی متغیر هدف مشخص می‌شود.

با بررسی مقادیر شتاب‌های معادل زلزله طولی و عرضی در مخازن تحت مطالعه، نتیجه می‌شود که مقدار شتاب معادل زلزله افقی به متغیرهای زیر بستگی دارد:

- (۱) شتاب ماکزیمم زلزله افقی
- (۲) شتاب طراحی زلزله افقی
- (۳) میزان کشیدگی مخزن

همچنین جهت به‌دست آوردن رابطه مناسبی برای شتاب معادل زلزله قائم، مخزن بیضوی بتنی روزمینی تیپ A تحت هشت زلزله قائم با مشخصات مندرج در جدول (۵) تحت تحلیل دینامیکی قرار گرفته است. نمودارهای تاریخچه زمانی فشار کل قائم ماکزیمم آب تحت زلزله کیپ Z در جهت قائم برای مخزن A در شکل (۱۳) نمایش داده شده است.



شکل ۱۳- نمودار تاریخچه زمانی فشار کل قائم زلزله کیپ Z در جهت قائم

فشار هیدرودینامیکی قائم ماکزیمم مایع بر حسب پاسکال از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

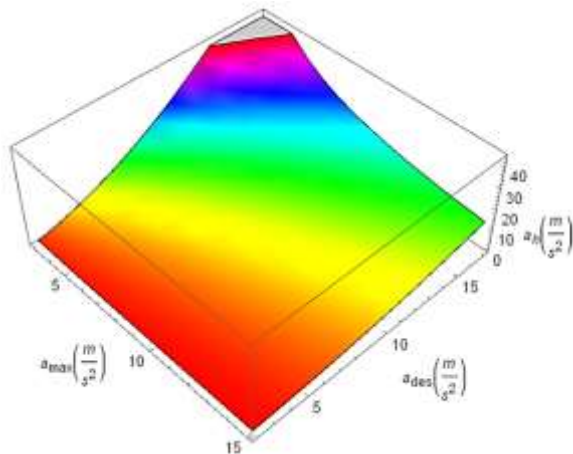
$$P_v = |P_{vt} - \gamma h| \quad (29)$$

که در آن P_{vt} فشار ماکزیمم کل قائم مایع بر حسب پاسکال می‌باشد. با استفاده از رابطه (۳) شتاب معادل زلزله قائم بر حسب متر بر مجذور ثانیه از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$a_v = \frac{P_v}{\rho h} \quad (24)$$

مقدار شتاب معادل زلزله قائم برای زلزله‌های مختلف برای مخزن A در جدول (۶) درج گردیده است. با بررسی مقادیر شتاب معادل زلزله قائم در مخازن تحت مطالعه، نتیجه می‌شود که مقدار شتاب معادل زلزله قائم به متغیرهای زیر بستگی دارد:

- (۱) شتاب ماکزیمم زلزله قائم
- (۲) شتاب طراحی زلزله قائم



شکل ۱۴- نمودار شتاب معادل زلزله افقی برای ضریب کشیدگی ۲ (l/b=2)

به منظور ارائه نمونه‌ای از کاربرد رابطه (۲۹)، زلزله بم x در جهات طولی و عرضی به مخزن بیضوی با ابعاد ۷×۲۰×۴۰ متر اعمال شده است و شتاب‌های معادل حاصل از تحلیل دینامیکی و رابطه شتاب معادل نیروگاه‌های اتمی و رابطه شتاب معادل تحقیق حاضر در جدول (۷) درج گردیده‌اند.

بنابراین با استفاده از روش رگرسیون آماری، رابطه زیر برای شتاب معادل زلزله افقی در مخازن بیضوی صلب بر حسب متر بر مجذور ثانیه پیشنهاد گردیده است:

$$a_h = \frac{1.247 a_{des}^{1.771} \left(\frac{l}{b}\right)^{0.09}}{a_{max}^{0.97}} \quad (29)$$

در رابطه فوق، a_{max} شتاب ماکزیمم زلزله افقی بر حسب متر بر مجذور ثانیه و a_{des} شتاب طراحی زلزله افقی بر حسب متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. لازم به ذکر است که شتاب طراحی زلزله، با مقدار شتاب حداکثر به دست آمده پس از فیلترکردن پایین‌گذر تاریخچه زمانی زلزله با فرکانس قطع ۹ هرتز، متناظر می‌باشد. همچنین در رابطه فوق، $\frac{l}{b}$ ضریب کشیدگی مخزن بیضوی است که برابر با نسبت قطر موازی زلزله به قطر عمود بر زلزله می‌باشد. در رابطه (۲۹) مقدار شتاب ماکزیمم زلزله افقی از ۳/۰۸۱ متر بر مجذور ثانیه تا ۱۴/۹۷۳ متر بر مجذور ثانیه تغییر می‌کند. همچنین مقدار شتاب طراحی زلزله افقی از ۲/۸۷ متر بر مجذور ثانیه تا ۱۶/۵۴ متر بر مجذور ثانیه تغییر می‌نماید. مقادیر طول و عرض مخزن بیضوی نیز از ۱۰ متر تا ۵۰ متر تغییر می‌نمایند. نمودار رابطه (۲۹) با فرض میزان کشیدگی برابر با ۲ در شکل (۱۴) نمایش داده شده است.

جدول ۷- شتاب‌های معادل تحلیل دینامیکی و روابط شتاب معادل زلزله افقی

نام متغیر	واحد متغیر	تحلیل دینامیکی	رابطه شتاب معادل نیروگاه‌های اتمی	رابطه شتاب معادل تحقیق حاضر
شتاب معادل افقی طولی	متر بر مجذور ثانیه	۴/۷۸۴	۸/۰۷۷	۵/۴۲۵
شتاب معادل افقی عرضی	متر بر مجذور ثانیه	۴/۳۵	۸/۰۷۷	۴/۷۹۷

۶- اثر انعطاف

لازم به ذکر است که رابطه (۲۹) با فرض صلبیت مخزن به دست آمده است لذا باید در ضریبی به نام ضریب انعطاف ضرب شود زیرا افزایش انعطاف مخزن باعث افزایش فشار ضربه‌ای مایع می‌گردد. در مخازن متعارف معمولاً ارتفاع مخزن خیلی بزرگتر از ابعاد پلان آن نمی‌باشد. لذا مخزن به صورت برشی رفتار می‌نماید. بنابراین رابطه ضریب انعطاف مخزن بر حسب سختی برشی آن به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$c_f = \left(1 + \frac{\alpha}{k_s \beta}\right)^\gamma \quad (31)$$

در رابطه فوق k_s سختی برشی مخزن بر حسب نیوتن بر متر است. α و β و γ نیز ضرایب ثابتی هستند که با استفاده از روش برازش آماری تعیین می‌گردند. ضریب برشی مصالح مخزن بر حسب پاسکال از رابطه (۳۲) محاسبه می‌شود:

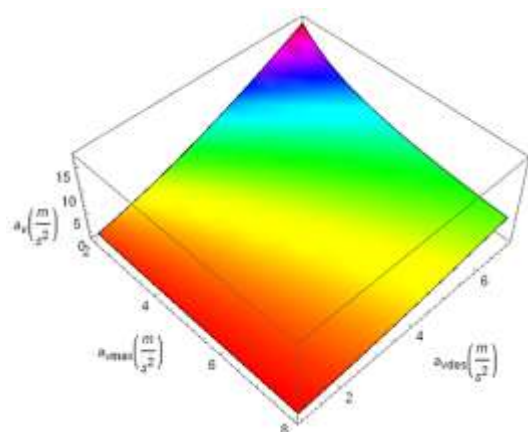
با بررسی نتایج جدول (۷) مشخص می‌شود که شتاب‌های معادل افقی حاصل از رابطه شتاب معادل تحقیق حاضر، دارای دقت بالاتری از شتاب‌های معادل افقی حاصل از رابطه شتاب معادل آیین‌نامه نیروگاه‌های اتمی می‌باشند. در تحلیل آماری، خطای نسبی میانگین بر حسب درصد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$e_{ave} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{z_i}{y_i} - 1 \right| \quad (30)$$

که در آن n تعداد نقاط آماری، i متغیر جمع‌بندی، z_i شتاب معادل تخمینی نقطه i ام بر حسب متر بر مجذور ثانیه و y_i شتاب معادل دقیق نقطه i ام بر حسب متر بر مجذور ثانیه است. برای ۸۰ نقطه آماری تحت مطالعه با استفاده از رابطه (۳۰) مقدار خطای نسبی میانگین برای روابط (۱۸) و (۲۹) به ترتیب برابر با ۲۱ درصد و ۵ درصد به دست آمده است.

$$a_v = \frac{1.815a_{vdes}^{1.48}}{a_{vmax}^{0.87}} \quad (37)$$

در رابطه فوق a_{vmax} شتاب ماکزیمم زلزله قائم بر حسب متر بر مجذور ثانیه و a_{vdes} شتاب طراحی زلزله قائم بر حسب متر بر مجذور ثانیه می‌باشند. در رابطه (۳۷) مقدار شتاب ماکزیمم زلزله قائم از ۲/۰۵۲ متر بر مجذور ثانیه تا ۷/۵۳۶ متر بر مجذور ثانیه تغییر می‌کند. شتاب طراحی زلزله قائم نیز از ۱/۵۹ متر بر مجذور ثانیه تا ۶/۸۶ متر بر مجذور ثانیه تغییر می‌نماید. نمودار رابطه (۳۷) در شکل (۱۵) نمایش داده شده است.



شکل ۱۵- نمودار شتاب معادل زلزله قائم

به‌منظور ارائه نمونه‌ای از کاربرد رابطه (۳۷)، زلزله بم z در جهت قائم به مخزن بیضوی A اعمال شده است و شتاب معادل حاصل از تحلیل دینامیکی و رابطه شتاب معادل نیروگاه‌های اتمی و رابطه شتاب معادل تحقیق حاضر در جدول (۹) درج گردیده است.

$$G = \frac{0.5E}{v+1} \quad (32)$$

در رابطه فوق، E و v به‌ترتیب ضریب کشسانی مصالح مخزن بر حسب پاسکال و ضریب پواسون مصالح مخزن می‌باشند. مساحت مقطع مخزن بیضوی بر حسب مترمربع از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$A = \frac{\pi}{4}(BL - (B - 2t)(L - 2t)) \quad (33)$$

در رابطه فوق، B و L و t به‌ترتیب عرض خارجی، طول خارجی و ضخامت دیوار مخزن بیضوی بر حسب متر می‌باشند. نهایتاً سختی برشی مخزن بر حسب نیوتن بر متر از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$k_s = \frac{GA}{H} \quad (34)$$

در رابطه فوق، H ارتفاع دیوار مخزن بر حسب متر است.

Tedesco در سال ۱۹۸۲ و Moslemi در سال ۲۰۱۱ مخازنی استوانه‌ای را در حالت‌های صلب و منعطف تحت زلزله السنترو مورد تحلیل دینامیکی قرار دادند که نتایج کار آن‌ها در جدول (۸) درج گردیده‌اند. بر اساس نتایج جدول (۸) با استفاده از روش برازش آماری ضرایب ثابت α و β و γ به‌ترتیب برابر با ۱۱۳ و ۰/۲۲۲ و ۱/۵۴۴ به دست می‌آیند. بنابراین، رابطه (۳۱) به‌شکل زیر در می‌آید:

$$c_f = \left(1 + \frac{113}{k_s^{0.222}}\right)^{1.544} \quad (35)$$

نهایتاً شتاب معادل زلزله افقی در مخازن بیضوی منعطف بر حسب متر بر مجذور ثانیه از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$a_{he} = c_f a_h \quad (36)$$

همچنین با استفاده از روش رگرسیون آماری، رابطه زیر برای شتاب معادل زلزله قائم بر حسب متر بر مجذور ثانیه پیشنهاد گردیده است:

جدول ۸- نتایج کارهای Tedesco و Moslemi

شماره مخزن	نوع مخزن	قطر خارجی (متر)	ارتفاع دیوار (متر)	ضخامت دیوار (متر)	سختی برشی (گیگانیوتن بر متر)	ضریب انعطاف
۱	بتنی	۴۸/۵	۶	۰/۳	۸۱/۱۶	۱/۷
۲	بتنی	۳۵	۱۲	۰/۵	۴۸/۴۱	۱/۸
۳	فولادی	۳۶/۵۹۳	۱۲/۱۹	۰/۰۲۵	۱۹/۰۵	۲/۱
۴	فولادی	۱۴/۶۴۳	۲۱/۹۵	۰/۰۲۵	۴/۲۲۷	۲/۵

جدول ۹- شتاب معادل تحلیل دینامیکی و روابط شتاب معادل زلزله قائم

نام متغیر	واحد متغیر	تحلیل دینامیکی	رابطه شتاب معادل نیروگاه‌های اتمی	رابطه شتاب معادل تحقیق حاضر
شتاب معادل قائم	متر بر مجذور ثانیه	۳/۲	۹/۶۹۵	۳/۸۶۱

- ۳) دقت میانگین رابطه شتاب معادل زلزله افقی پیشنهادی این تحقیق، به میزان ۱۶ درصد بیشتر از دقت میانگین رابطه متناظر آیین نامه طراحی نیروگاه‌های اتمی است.
- ۴) دقت میانگین رابطه شتاب معادل زلزله قائم پیشنهادی این تحقیق، به میزان ۲۶ درصد بیشتر از دقت میانگین رابطه متناظر آیین نامه طراحی نیروگاه‌های اتمی می‌باشد.

۸- مراجع

- Alemzade H, Shakib H, "Numerical study of the response of ground steel tanks with free rocking motion under effect of horizontal excitation of earthquake", *Structure and Steel Journal*, 2016, 13, 71-79. <http://journaliss.ir/article-1-179-fa.html>
- Behnamfar F, Moradi R, Hashemi S, "Dynamic analysis of flexible concrete cylindrical storage tanks subjected to horizontal and vertical ground motion", *Journal of Concrete Research*, 2019, 12 (1), 39-57. <https://sid.ir/paper/197195/fa>
- Cakir T, Livaoglu R, "Fast practical analytical model for analysis of backfill rectangular tank fluid interaction systems", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Journal*, 2012, 37, 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.01.013>
- Compagnoni M, Curadelli O, "Experimental and numerical study of the response of cylindrical steel tanks under seismic excitation", *Journal of Civil Engineering*, 2017, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0218-3>
- Dubey A, Maurya M, Tripathi S, "Time history analysis of underground water tank for different seismic intensities", *International Journal of Science and Research*, 2020, 9 (6), 963-967. DOI:10.21275/SR20612100503
- Gurkalo F, Du Y, Poutos K, Bescos C, "The nonlinear analysis of an innovative slit reinforced concrete water tower in seismic regions", *Engineering Structures Journal*, 2017, 134, 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.033>
- Housner G, "Dynamic pressures on accelerated fluid containers", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1957, 47 (1), 15-35. <https://doi.org/10.1785/BSSA0470010015>
- Jabar A, Patel H, "Seismic behaviour of rc elevated water tank under different staging pattern and earthquake characteristics", *Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 2012, 1 (3), 293-296. <http://doi.org/10.22214/ijraset.2019.6077>
- Jamalvandi M, Amiri M, "Influence of seismic isolation systems on behavior of fluid inside thin-walled steel tanks". *Jordan Journal of Civil Engineering*, 2021, 15 (4), 534-550. <https://search.proquest.com/openview/e50d7f3612c02ee748cd6363e369e0e7/1>
- Jani B, Agrawal V, Patel V, "Effects of soil condition on elevated water tank using time history analysis with different staging systems", *International Journal of Civil Engineering*, 2020, 7 (6), 41-47. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V7I6P105>

با بررسی نتایج جدول (۹) مشخص می‌شود که شتاب معادل قائم حاصل از رابطه شتاب معادل تحقیق حاضر، دارای دقت بالاتری از شتاب معادل قائم حاصل از رابطه شتاب معادل آیین نامه نیروگاه‌های اتمی می‌باشد. برای ۸ نقطه آماری تحت مطالعه با استفاده از رابطه (۳۰)، مقدار خطای نسبی میانگین برای روابط (۱۸) و (۳۷) به ترتیب برابر با ۴۰ درصد و ۱۴ درصد به دست آمده است.

۷- نتیجه گیری

- در بارگذاری لرزه‌ای مخازن بر اساس نظریه هازنر، فشار هیدرودینامیکی ضربه‌ای مایع با استفاده از پارامتر شتاب معادل زلزله افقی محاسبه می‌گردد. اما در نظریه هازنر، رابطه پارامتر مذکور برای مخازن ارائه نگردیده است.
- آیین نامه نیروگاه‌های اتمی آمریکا، مقدار شتاب طیفی ضربه‌ای را برای شتاب معادل زلزله افقی و قائم پیشنهاد نموده است. هدف این تحقیق آن است که با اصلاح رابطه موجود برای مخازن زمینی بیضوی، دقت آن را افزایش دهد. برای حصول هدف مذکور، مخازن بیضوی زمینی با تکنیک اجزای محدود در نرم افزار فلوئنت به عنوان زیربرنامه سیالاتی نرم افزار آنسیس، مدل سازی و تحت زلزله مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفته‌اند.
- در این تحقیق با تحلیل دینامیکی پنج مخزن بیضوی مختلف تحت ۸ زلزله گوناگون در جهات طولی، عرضی و قائم و مطالعه نتایج حاصله، با استفاده از روش برازش آماری، روابطی با دقت مناسب برای پارامترهای شتاب معادل زلزله افقی و قائم در مخزن زمینی بیضوی پیشنهاد گردیده‌اند.
- با استفاده از روابط به دست آمده در این تحقیق، می‌توان شتاب‌های معادل زلزله افقی و قائم را در مخازن بیضوی روزمینی با دقت مناسبی محاسبه نمود. با داشتن مقادیر شتاب‌های معادل زلزله افقی و قائم، می‌توان از نظریه هازنر و مکانیک سیالات به ترتیب، فشارهای ماکزیمم ضربه‌ای و قائم مایع را بر مخزن، جهت بارگذاری لرزه‌ای آن تعیین کرد. بدین ترتیب استفاده از روابط مذکور در کاربردهای طراحی، با توجه به عدم نیاز به انجام تحلیل‌های اجزای محدود پیچیده و زمان‌بر، سهولت و سرعت مناسبی را به وجود می‌آورد. بر اساس مطالعات انجام شده در این تحقیق، نتایج زیر به دست آمده‌اند:
- ۱) شتاب معادل زلزله افقی به پارامترهای شتاب ماکزیمم زلزله افقی، شتاب طراحی زلزله افقی و میزان کشیدگی مخزن بیضوی بستگی دارد.
 - ۲) شتاب معادل زلزله قائم به پارامترهای شتاب ماکزیمم زلزله قائم و شتاب طراحی زلزله قائم بستگی دارد.

- Engineering Structures Journal, 2012, 42, 214-230.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.026>
- Musa A, Eldamatty A, "Design procedure for liquid storage steel conical tanks under seismic loading", Journal of Civil Engineering, 2017, 1-53.
<https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0297>
- Naresh K, "Seismic analysis of overhead INTZE water tank subjected to sloshing effect", International Journal of Innovative Research in Technology, 2019, 6 (3), 105-112.
https://www.academia.edu/40064692/Seismic_Analysis_of_Over_Head_INTZE_Water_Tank_Subjected_to_Sloshing_Effect
- Ozсарac V, Brunesi E, Nascimbene R, "Earthquake-induced nonlinear sloshing response of above-ground steel tanks with damped or undamped floating roof", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 144.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106673>
- Pacific earthquake engineering research center, "Ground motion database", Berkeley, USA, 2020.
- Pandit A, Biswal K, "Evaluation of dynamic characteristics of liquid sloshing in sloped bottom tanks", International Journal of Dynamics and Control, 2020, 8 (2), 162-177.
<https://doi.org/10.1007/s40435-019-00527-8>
- Phan H, Paolacci F, Bursi O, Tondini N, "Seismic fragility analysis of elevated steel storage tanks supported by reinforced concrete columns", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 1-50.
<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.02.017>
- Ranjbar M, Bozorgmehrnia S, Madandoust R, "Seismic behaviour evaluation of concrete elevated water tanks", Civil Engineering Infrastructures Journal, 2013, 46 (2), 175-188.
<https://doi.org/10.7508/CEIJ.2013.02.005>
- Rawat A, Matsagar V, Nagpal A, "Seismic analysis of steel cylindrical liquid storage tank using coupled acoustic-structural finite element method for fluid-structure interaction", International Journal of Acoustics and Vibration, 2020, 25 (1), 27-40.
<https://doi.org/10.20855/ijav.2020.25.11499>
- Rawat A, Mittal V, Chakraborty T, Matsagar V, "Earthquake induced sloshing and hydrodynamic pressures in rigid liquid storage tanks analyzed by coupled acoustic structural and Euler Lagrange methods", Thin Walled Structures Journal, 2019, 134, 333-346.
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.10.016>
- SAS IP Inc., "ANSYS Documentation", South pointe, USA, 2016.
- Seismosoft Ltd, "Technical information sheet", Pavia, Italy, 2018.
- Sensebastian N, Thomas A, Kurian J, "Seismic analysis of elevated water tank in a framed building", Journal of Engineering and Technology, 2017, 4 (6), 1629-1632.
https://www.academia.edu/33830614/SEISMIC_ANALYSIS_OF_ELEVATED_WATER_TANK_IN_A_FRAMED_BUILDING
- Tedesco J, "Vibrational characteristics and seismic analysis of cylindrical liquid storage tanks", PhD Thesis, Lehigh University, Bethlehem, USA, 1982.
- Jin H, Calabrese A, Liu Y, "Effects of different damping baffle configurations on the dynamic response of a liquid tank under seismic excitation", Engineering Structures, 2021, 229.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111652>
- Joseph A, Joseph G, "Fluid structure soil interaction effect on dynamic behaviour of circular water tanks", International Journal of Structural Engineering, 2019, 10 (1).
<https://doi.org/10.1504/IJSTRUCTE.2019.101432>
- Kalani L, Navayineya B, Tavakoli H, Vaseghi J, "Dynamic analysis of elevated water storage tanks due to ground motions rotational and translational components", Journal of Science and Engineering, 2014, 39, 4391-4403.
<https://doi.org/10.1007/s13369-014-1042-6>
- Kazem H, Mehrpouya S, "Estimation of sloshing wave height in broad cylindrical oil storage tanks using numerical methods", Journal of Structural Engineering and Geotechnics, 2012, 2 (1), 55-59.
https://journals.iau.ir/article_734_a8a82ba2b558b471bb98ff41a1e54fcd
- Kianoush M, Ghaemmaghami A, "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 Journal, 2011, 33, 2186-2200.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.03.009>
- Kotrasova K, Grajciar I, Kormanikova E, "Dynamic time history response of cylindrical tank considering fluid structure interaction due to earthquake", Applied Mechanics and Materials Journal, 2014, 617, 66-69.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.617.66>
- Kotrasova K, Hegedusova I, Harabinova S, Panulinova E, Kormanikova E, "The possible causes of damage to concrete tanks numerical experiment of fluid structure soil interaction", Key Engineering Materials Journal, 2017, 738, 227-237.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.738.227>
- Kralik J, "Dynamic analysis of soil fluid tank interaction due to earthquake event", International Conference on Dynamics of Rigid and Deformable Bodies, Ustinadlabem, 2012.
https://www.researchgate.net/publication/256429819_Dynamic_analysis_of_soil-fluid-tank_interaction_due_to_earthquake_event
- Lee C, Lee J, "Nonlinear dynamic response of a concrete rectangular liquid storage tank on rigid soil subjected to three-directional ground motion", Applied Sciences, 2021, 11 (10).
<https://doi.org/10.3390/app11104688>
- Lockheed aircraft corporation and Holmes and Narver incorporation, "Nuclear reactors and earthquakes", Division of Reactor Development, Washington, USA, 1963.
- Moslemi M, "Seismic response of ground cylindrical and elevated conical reinforced concrete tanks", PhD Thesis, Ryerson University, Toronto, Canada, 2011.
- Moslemi M, Kianoush M, "Parametric study on dynamic behaviour of cylindrical ground supported tanks",

- Tiwari N, Hora M, "Interaction analysis of intze tank fluid layered soil system", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, 10 (2), 940-953. <https://www.semanticscholar.org/paper/INTERACTION-ANALYSIS-OF-INTZE-TANK-FLUID-LAYERED-Tiwari/a65c2ea9f6c6d01922d2d9516f11758b51655f15>
- Tiwari N, Hora M, "Transient analysis of elevated intze water tank fluid soil system", *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, 10 (2), 869-882. https://www.researchgate.net/publication/282269575_Transient_analysis_of_elevated_intze_water_tank-fluid-soil_system
- Uhlirova L, Jendzelovsky N, "Dynamic analysis of rectangular tank using response spectra", *Vibroengineering Procedia Journal*, 2019, 23, 99-104. <https://doi.org/10.21595/vp.2019.20657>
- Wieschollek M, Kopp M, Hoffmeister B, Feldmann M, "Seismic design of spherical liquid storage tanks", *Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Corfu, 2011. https://www.researchgate.net/publication/262767732_Seismic_design_of_spherical_liquid_storage_tanks
- Wolfram research incorporation, "Mathematica documentation center", Champaign, USA, 2016.
- Yosefi A, Naderi R, Talebpur M, Shahabifar H, "Static and dynamic analysis of storage tanks considering soil structure interaction", *Journal of Applied and Basic Sciences*, 2013, 6 (4), 515-532. <https://www.semanticscholar.org/paper/Static-and-Dynamic-Analysis-of-Storage-Tanks-Samangany-Naderi/5f81a3e7eb5fdb6892a641648c4b4ec53d9e68f1>
- Zhang R, Chu S, Sun K, Zhang Z, Wang H, "Effect of the directional components of earthquakes on the seismic behavior of an unanchored steel tank", *Applied Sciences Journal*, 2020, 10 (16), 54-89. <https://doi.org/10.3390/app10165489>

EXTENDED ABSTRACT

Modification of Equivalent Acceleration Relation of Horizontal and Vertical Earthquakes in Ground Elliptical Tanks

Reza Lotfi, Masoud Mahmoudabadi*, Ehsan Dehghani

Faculty of Engineering, University of Qom, Qom 2532103567, Iran

Received: 06 May 2022; Review: 12 February 2023; Accepted: 11 April 2023

Keywords:

Elliptical tanks, Hydrodynamic relations, Housner theory, Finite elements, Statistical regression.

1. Introduction

Modification of equivalent acceleration relation of horizontal and vertical earthquakes in ground elliptical tanks was done in the current study. The seismic analysis of the tank is highly important because by investigating the results obtained from this analysis, a useful recognition of the tank behavior quality can be obtained at the time of a real earthquake. The results of the seismic analysis include the impulsive pressure and the wave height of fluid on different points of the tank. In Housner theory, earthquake equivalent acceleration is a key parameter in calculation of impulsive vibration mode parameters such as impulsive pressure and impulsive force. US nuclear reactors and earthquakes code presented a simple relation to calculate earthquake equivalent acceleration. To obtain more calculation accuracy in the ground elliptical tanks, a suitable equation was provided in the current study for the earthquake equivalent acceleration, by the use of principles of statistical regression. Because of less average error, the use of the equation proposed by this study instead of the equation presented by US nuclear reactors and earthquakes code, provides more accuracy in the tank design applications. By the study of the conclusions of this research, it was revealed that the accuracy index of horizontal and vertical earthquake equivalent acceleration relations developed by this research is 16% and 26% more than that of the corresponding relations of US nuclear reactors and earthquakes code, respectively.

2. Methodology

In the current study, to obtain more calculation accuracy in the ground elliptical tanks, the impulsive pressure of fluid was obtained under 8 various earthquakes in the longitudinal and transverse directions by doing the seismic analysis on 5 elliptical tanks of the ground type with the clamped floor, in the Fluent software. Then, by the use of Housner theory equations, the earthquake equivalent acceleration was calculated for each of the cases. Finally, by the performing of nonlinear statistical regression by Mathematica software, 2 equations with an acceptable precision were obtained for the horizontal and vertical earthquake equivalent acceleration.

3. Results and discussion

In Housner theory, earthquake equivalent acceleration is a key parameter in calculation of impulsive vibration mode parameters such as impulsive pressure and impulsive force. US nuclear reactors and earthquakes code presented a simple relation to calculate earthquake equivalent acceleration as follows:

* Corresponding Author

E-mail addresses: r.lotfi@stu.qom.ac.ir (Reza Lotfi), m.mahmoudabadi@qom.ac.ir (Masoud Mahmoudabadi), dehghani@qom.ac.ir (Ehsan Dehghani).

$$a_e = S_a \tag{1}$$

In the above equation, S_a is the impulsive spectral acceleration in terms of m/s^2 .

The target of the current study was providing a more comprehensive equation for the horizontal and vertical earthquake equivalent accelerations, to obtain more calculation accuracy in the ground elliptical tanks, by the use of principles of statistical regression.

The plan of elliptical tank under horizontal earthquake equivalent acceleration is presented in Figure 1.

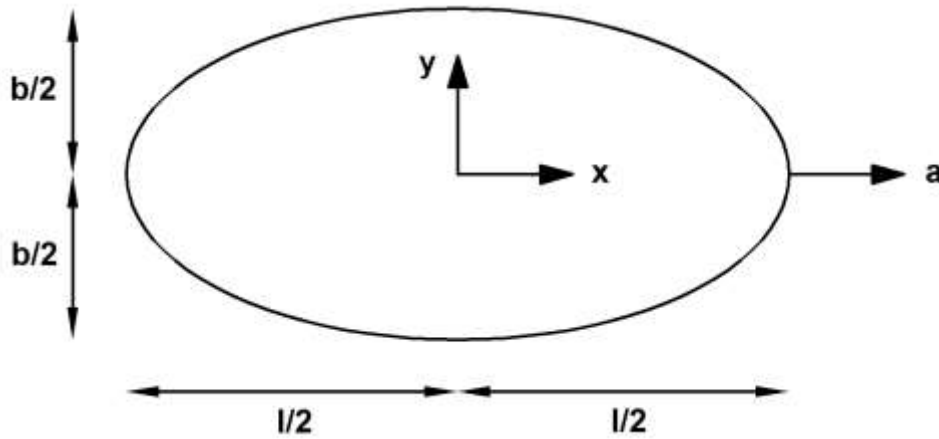


Fig. 1. Elliptical tank plan

By using the statistical regression method, the following equation was suggested for horizontal earthquake equivalent acceleration:

$$a_h = \frac{1.247 a_{des}^{1.771} (\frac{l}{b})^{0.09}}{a_{max}^{0.97}} \tag{2}$$

In the above equation, b and l are the width and length of the elliptical tank in terms of meters, respectively. Also, a_{max} and a_{des} are the earthquake maximum acceleration and earthquake design acceleration, respectively in terms of m/s^2 .

Also, by using the statistical regression method, the following equation was suggested for vertical earthquake equivalent acceleration:

$$a_v = \frac{1.815 a_{vdes}^{1.48}}{a_{vmax}^{0.87}} \tag{3}$$

In the above equation, a_{vmax} and a_{vdes} are the vertical earthquake maximum acceleration and vertical earthquake design acceleration, respectively in terms of m/s^2 .

The comparison of average error of US nuclear reactors and earthquakes code equivalent acceleration relation and relation (2) and relation (3) is presented in Table 1.

Table 1. Comparison of average error of relation (1) and relation (2) and relation (3)

Equation	Average Error (%)	
	horizontal	vertical
Eq. (1)	21	40
Eq. (2)	5	
Eq. (3)		14

4. Conclusions

By the use of the equations obtained from the current study, the horizontal and vertical earthquake equivalent acceleration values in the ground elliptical tanks were calculated with a higher precision. By having the earthquake equivalent acceleration value, the fluid's maximum impulsive pressure on the tank can be obtained from the Housner theory for tank loading. Because of less average error, the use of the equations proposed by this study instead of the equation presented by US nuclear reactors and earthquakes code, provides more calculation accuracy in the tank design applications.

Based on the investigations done in the current study, the following results were obtained:

- 1) The horizontal earthquake equivalent acceleration in elliptical tank, depends on the earthquake maximum acceleration, the earthquake design acceleration and the elongation of the elliptical tank.
- 2) The vertical earthquake equivalent acceleration in elliptical tank, depends on the vertical earthquake maximum acceleration and the vertical earthquake design acceleration.
- 3) The accuracy index of horizontal and vertical earthquake equivalent acceleration relations developed by this research is 16% and 26% more than that of the corresponding relations of US nuclear reactors and earthquakes code, respectively.

5. References

- Housner G, "Dynamic pressures on accelerated fluid containers", Bulletin of the Seismological Society of America, 1957, 47 (1), 15-35.
- Lockheed aircraft corporation and Holmes and Narver incorporation, "Nuclear reactors and earthquakes", Division of reactor development, Washington, USA, 1963.
- Pacific earthquake engineering research center, "Ground motion database", Berkeley, USA, 2020.
- SAS IP Inc., "ANSYS Documentation", South pointe, USA, 2016.
- Wolfram research incorporation, "Mathematica documentation center", Champaign, USA, 2016.