

Modification of Water Equivalent Displacement Relation under the Horizontal Seismic Load in the Ground Elliptical Tanks

Reza Lotfi¹, Masoud Mahmoudabadi^{2*}, Ehsan Dehghani³

1- Other, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

ABSTRACT

The water equivalent displacement under horizontal seismic load in the ground elliptical tanks has been investigated in the current study. Basically, tank is a structure used to store different types of fluid, and it is also widely used in refineries, sewage treatment plants, and factories in the form of ground and elevated tanks made from concrete and steel. Regarding the application of huge dynamic and hydrodynamic loads on a tank at the time of earthquake and the great importance of the structure's complete function continuity in the critical situations, it is highly important to study its seismic behavior. In Housner theory, water equivalent displacement is a key parameter in calculation of convective vibration mode parameters such as convective pressure and wave height. US nuclear reactors and earthquakes code has presented a simple relation to calculate water equivalent displacement. To obtain more calculation accuracy in the ground elliptical tanks, a suitable equation has been provided in the current study for the water equivalent displacement, based on modelling and dynamic analysis results of the tanks using finite elements method in ANSYS software, by the use of principles of statistical regression. Because of higher determination index, 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 determination index of water equivalent displacement relation developed by this research is 44.8% higher than that of the corresponding relation of US nuclear reactors and earthquakes code.

ARTICLE INFO

Receive Date: 20 June 2024

Revise Date: 23 September 2024

Accept Date: 29 September 2024

Keywords:

Elliptical tanks
Hydrodynamic relations
Housner theory
Finite elements
Statistical regression

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.459666.3428](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.459666.3428)

*Corresponding author:
Email address:

اصلاح رابطه جابه‌جایی معادل آب ناشی از زلزله افقی در مخازن بیضوی زمینی

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

۱- سایر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

چکیده

در این تحقیق به موضوع اصلاح رابطه جابه‌جایی معادل آب ناشی از زلزله افقی در مخازن بیضوی زمینی 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 هازنر، پارامتر جابه‌جایی معادل آب پارامتری کلیدی در محاسبه پارامترهای مود ارتعاش موج از قبیل فشار موج و ارتفاع موج می‌باشد. آیین‌نامه نیروگاه‌های اتمی آمریکا رابطه ساده‌ای را برای محاسبه جابه‌جایی معادل آب ارائه نموده است. در این تحقیق برای حصول دقت محاسباتی بیشتر در مخازن بیضوی زمینی، بر اساس نتایج مدل‌سازی و تحلیل دینامیکی مخازن مذکور به روش اجزای محدود در نرم‌افزار آنسیس، با استفاده از اصول برازش آماری، رابطه مناسبی برای جابه‌جایی معادل آب به دست آمده است. به دلیل داشتن شاخص دقت بیشتر، استفاده از رابطه پیشنهادی این تحقیق به جای رابطه ارائه شده توسط آیین‌نامه نیروگاه‌های اتمی آمریکا، دقت بالاتری را در کاربردهای طراحی مخازن فراهم می‌نماید. با مطالعه نتایج این تحقیق نتیجه گردید که شاخص دقت رابطه جابه‌جایی معادل آب پیشنهادی این تحقیق، به میزان ۴۴/۸ درصد از شاخص دقت رابطه متناظر آیین‌نامه نیروگاه‌های اتمی آمریکا بالاتر می‌باشد.

کلمات کلیدی: مخازن بیضوی، روابط هیدرودینامیک، نظریه هازنر، اجزای محدود، برازش آماری.

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: 10.22065/jsce.2024.459666.3428 https://doi.org/10.22065/jsce.2024.459666.3428	۱۴۰۳/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۰۷/۰۲	۱۴۰۳/۰۷/۰۸	۱۴۰۳/۰۷/۰۸	۱۴۰۴/۰۳/۳۱
		*نویسنده مسئول:		مسعود محمودآبادی	
		پست الکترونیکی:		m.mahmoudabadi@qom.ac.ir	

۱- مقدمه

کلانی و همکاران در سال ۲۰۱۴ مخازن هوایی ذخیره آب را تحت مولفه‌های دورانی و انتقالی حرکات زمین تحت تحلیل دینامیکی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که مولفه‌های دورانی یک حرکت زمین اثر بیشتری روی جابه‌جایی افقی و نیروی برشی دارند اما نیروی واکنش قائم را تحت تاثیر قرار نمی‌دهند [۱]. کتراسوا و همکاران در سال ۲۰۱۴ پاسخ دینامیکی تاریخچه زمانی مخزن استوانه‌ای را تحت زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش سیال و سازه مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافته‌اند که دانستن فشارهای عمل‌کننده بر روی دیواره‌ها و کف مخازن و فشارهای درون بدنه آنها و 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 [۲]. تیواری و هورا در سال ۲۰۱۵ سیستم مخزن اینترزه و سیال و خاک لایه‌بندی‌شده را تحت تحلیل اندرکنشی قرار دادند. آنها دریافته‌اند که اثر اندرکنش افزایش متغیری را در تنش‌های درون اجزای مختلف مخزن ایجاد می‌نماید [۳]. تیواری و هورا در سال ۲۰۱۵ سیستم مخزن هوایی آب اینترزه و سیال و خاک لایه‌بندی‌شده را هنگامی که وزن آب در مخزن افزایش می‌یابد فرکانس طبیعی سیستم اندرکنشی کاهش می‌یابد [۴]. عالم‌زاده و شکیب در سال 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 [۵]. موسی و الدماتی در سال ۲۰۱۷ رویه طراحی را برای مخازن مخروطی فولادی ذخیره مایع تحت بارگذاری لرزه‌ای ارایه کردند. آنها نتیجه گرفتند که برش پایه ضربه‌ای ماکزیمم هنگامی که مخزن مایل تر می‌شود کاهش می‌یابد درحالی‌که برش پایه موج برای مقادیر زاویه شیب بالاتر افزایش پیدا می‌کند [۶]. سن‌سیاستیان و همکاران در سال 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 بهتر از گزینه‌های دیگر عمل می‌کند [۷]. گورکالو و همکاران در سال 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 به طور قابل‌ملاحظه‌ای شکل‌پذیری آن را تحت کنش لرزه‌ای بدون لطمه قابل‌ملاحظه به ظرفیت باربری آن افزایش دهد [۸]. کتراسوا و همکاران در سال 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 [۹]. فان و همکاران در سال 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 [۱۰]. کمپاگنونی و کورادلی در سال 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 [۱۱]. نارش در سال ۲۰۱۹ تحلیل لرزه‌ای مخزن آب هوایی اینترزه را تحت اثر تلاطم انجام داد. او نتیجه گرفت که به منظور اجتناب از گسیختگی، رجحان زیادی باید به تلاطم در مناطق مستعد زلزله داده شود و ارتفاع آزاد کافی باید برای کنترل حرکت تلاطمی سیال تامین شود [۱۲]. جوزف و همکاران در سال 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 قابل‌ملاحظه‌ای روی رفتار لرزه‌ای مخازن آب دارند [۱۳]. راوات و همکاران در سال ۲۰۱۹ تلاطم ناشی از زلزله و فشارهای هیدرودینامیکی را در مخازن صلب ذخیره مایع تحلیل‌شده به وسیله روش‌های سازه‌ای - آکوستیک هم‌بسته و اوپلری - لاگرانژی مطالعه کردند. آنها نتیجه گرفتند که غیرخطی بودن جابه‌جایی موج تلاطم، نقش مهمی را هنگام محاسبه توزیع فشار هیدرودینامیکی روی دیواره‌های مخزن صلب بازی نمی‌کند [۱۴]. بهنام‌فر و همکاران در سال ۲۰۱۹ تحلیل دینامیکی مخازن بتنی منعطف ذخیره استوانه‌ای را تحت حرکت افقی و قائم زمین انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که تخمین‌های آیین‌نامه ای سی آی ۳-۳۵۰ متفاوت با تخمین‌های روش تحلیلی آنها هستند که به واسطه احتساب ناکافی انعطاف دیوار به وسیله این آیین‌نامه می‌باشد [۱۵]. اوهلیروا و همکاران در سال ۲۰۱۹ تحلیل دینامیکی مخزن مستطیلی را با استفاده از طیف‌های پاسخ انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که هرچه رده زیرخاک یا مقدار شتاب لرزه‌ای بالاتر باشد، اثرات بار

لرزه‌های روی خود سازه بزرگ‌تر می‌باشند [۱۶]. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ اثر مولفه‌های جهتی زلزله‌ها را روی رفتار لرزه‌ای یک مخزن فولادی مهارنشده مطالعه نمودند. آنها نتیجه گرفتند که مولفه لرزه‌ای قائم، تنش محوری فشاری بالایی را تولید می‌کند و آن همچنین باعث افزایش برکنش و لغزش کف مخزن به طور قابل ملاحظه‌ای می‌گردد [۱۷]. راوات و همکاران در سال 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 به وسیله انعطاف مخزن تحت تاثیر قرار نمی‌گیرد اما فشار هیدرودینامیکی ضربه‌ای و مولفه ضربه‌ای برش پایه با انعطاف مخزن افزایش می‌یابد [۱۸]. جانی و همکاران در سال 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 [۱۹]. دویی و همکاران در سال 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 [۲۰]. پاندیت و همکاران در سال ۲۰۲۰ ارزیابی ویژگی‌های دینامیکی تلاطم سیال را در مخازن با کف شیب‌دار انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که حتی اگر جرم سیال ثابت بماند پاسخ دینامیکی با افزایش در شیب مخزن افزایش می‌یابد [۲۱].

با توجه به مطالب فوق، می‌توان دریافت که در تحقیقات گذشته پیرامون مخازن، علیرغم کار روی اشکال پلان مختلفی مانند مربعی و مستطیلی و دایره‌ای، رفتار لرزه‌ای مخازن دارای پلان بیضوی مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین در کشورهای مختلف آیین‌نامه‌های گوناگونی از قبیل ACI 350.3 و Eurocode 8.4 برای بارگذاری لرزه‌ای مخازن آب دارای اشکال مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند که هیچ‌کدام از آنها به بارگذاری لرزه‌ای مخازن بیضوی نمی‌پردازد. بنابراین، مطالعه رفتار لرزه‌ای مخازن دارای پلان بیضوی، نوآوری این تحقیق محسوب می‌شود.

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. مخازن زمینی شامل انواع مختلفی مانند مربعی و مستطیلی و دایره‌ای و بیضوی می‌شوند که از بین آنها مخازن دایره‌ای و بیضوی به دلیل عملکرد سازه‌ای بهتر و نمای معماری زیباتر، جذابیت بیشتری دارند. 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 تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. اصولاً طبق آیین‌نامه طراحی مخازن ایران 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 [۲۲].

به طور کلی از دیدگاه اجرایی، مخازن زمینی مستطیلی و بیضوی برای زمین‌هایی مناسب هستند که طولشان به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از عرضشان می‌باشد. از دیدگاه طراحی، یک مخزن مستطیلی به دلیل داشتن گوشه‌های تیز و دیوارهای تخت لنگرهای خمشی و نیروهای برشی داخلی بزرگ‌تری را از یک مخزن بیضوی با حجم و عمق آب یکسان تجربه می‌کند. از دیدگاه بهره‌برداری، یک مخزن بیضوی به دلیل داشتن سختی سازه‌ای بیشتر تغییرشکل‌ها و ترک خوردگی‌های کمتری را از یک مخزن مستطیلی با حجم و عمق آب یکسان تجربه می‌نماید. همچنین طبق مطالعه اقتصادی انجام‌شده توسط لطفی، هزینه ساخت مخزن بتنی شامل مجموع هزینه‌های بتن‌ریزی و آرماتوربندی و قالب‌بندی، برای ابعاد زمین و حجم آب یکسان، برای مخزن بیضوی کمتر از مخزن مستطیلی می‌باشد [۲۳].

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 آب به وسیله نظریه هازنر، پارامترهای مهمی از قبیل فشار موج و ارتفاع موج با استفاده از پارامتر جابه‌جایی معادل آب محاسبه می‌شوند. بنابراین محاسبه جابه‌جایی معادل آب با دقت مناسب برای طراحی صحیح مخازن آب ضروری می‌باشد. 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 مسایل پیچیده علمی در تحلیل و طراحی بودند. اما امروزه با گسترش دانش اجزای محدود و تقویت سخت‌افزاری کامپیوترها و همچنین پیشرفت

نرم افزارهای کامپیوتری مختلف مثل آنسیس^۱ امکان احتساب مسایل پیچیده علمی در تحلیل و طراحی مخازن فراهم گردیده است. آنسیس دارای قابلیت مدل سازی سه بعدی انواع سازه های پیچیده به همراه محیط خاک و سیال مجاور آنها و نیز المان های جامد و سیال سه بعدی متنوعی با قابلیت های رفتاری گوناگون مانند کشسانی و مومسانی و اصطکاک و میرایی و هیبریدی می باشد لذا در این تحقیق برای انجام تحلیل اجزای محدود از این نرم افزار استفاده شده است.

در بارگذاری لرزه ای مخازن با استفاده از روابط نظریه هازنر، پارامتر جابه جایی معادل آب پارامتری کلیدی در محاسبه پارامترهای مود ارتعاش موج از قبیل فشار موج و ارتفاع موج می باشد. بنابراین هدف تحقیق حاضر، به دست آوردن رابطه ای با دقت مناسب برای پارامتر جابه جایی معادل آب در مخزن زمینی بیضوی می باشد. برای حصول هدف مذکور، مجموعه ای از مخازن بیضوی زمینی با تکنیک اجزای محدود در نرم افزار آنسیس مدل سازی و تحت زلزله افقی مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفته اند. صحت سنجی روش مطالعه از طریق مقایسه نتایج حاصل از روش های نظریه هازنر و اجزای محدود تحت اعمال زلزله افقی، انجام شده و صحت نتایج حاصله از نظر انطباق بر هم با دقت قابل قبول، مورد بررسی قرار گرفته است.

در این تحقیق با تحلیل دینامیکی ۸ مخزن بیضوی مختلف تحت ۸ زلزله افقی گوناگون در جهات طولی و عرضی در نرم افزار آنسیس ارتفاع موج آب در حالت های مختلف به دست آمده است. سپس با استفاده از روابط نظریه هازنر، جابه جایی معادل آب در حالت های مذکور محاسبه گردیده است. نهایتاً با استفاده از روش برازش آماری غیرخطی در نرم افزار ممتیکا، رابطه ای با دقت مناسب برای پارامتر جابه جایی معادل آب در مخزن زمینی بیضوی پیشنهاد گردیده است.

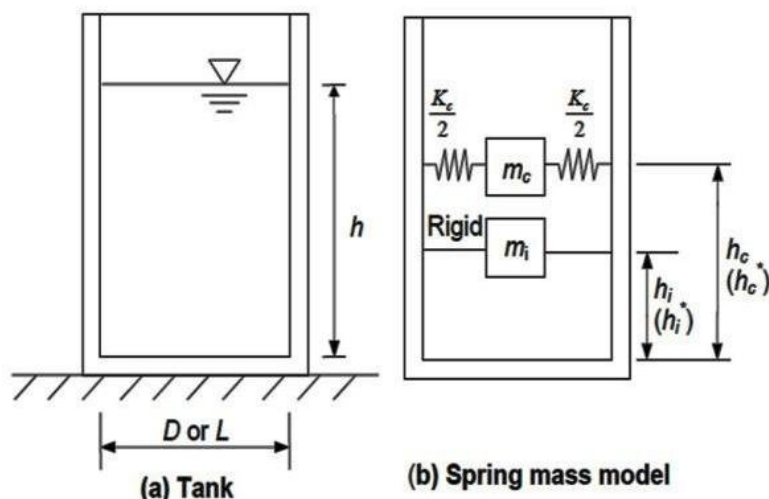
۲- نظریه هازنر

بر اساس نظریه هازنر ارتعاش سیال درون یک مخزن دارای دو محور تقارن طولی و عرضی تحت شتاب افقی ثابت از دو مود اصلی ضربه ای و موج تشکیل می شود. فشارهای ضربه ای همراه با نیروهای اینرسی ای هستند که به وسیله حرکات ضربه ای دیواره های مخزن تولید می شوند. فشارهای تولید شده مستقیماً با شتاب دیواره های مخزن متناسب می باشند. فشارهای موج به وسیله نوسان سیال تولید می گردند و لذا نتایج فشارهای ضربه ای می باشند. در این نظریه فشارهای ضربه ای و موج به طور جداگانه مورد بررسی قرار می گیرند. به طور کلی نظریه هازنر بر فرض های زیر مبتنی می باشد:

- ۱) فشارهای ضربه ای و موج مستقل از هم هستند.
- ۲) سیال تراکم ناپذیر می باشد.
- ۳) جابه جایی های سیال کوچک هستند.
- ۴) شتاب سیال در جهت عرضی کوچک می باشد.
- ۵) پلان مخزن تقارن دوطرفه دارد.

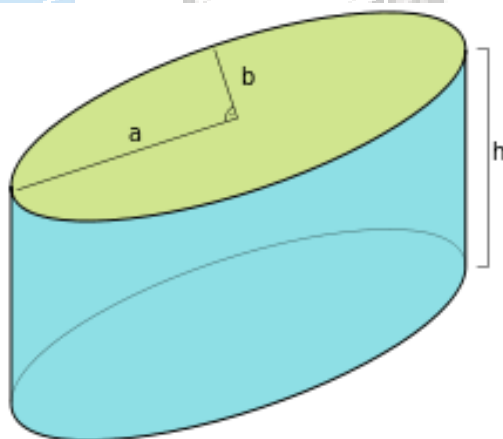
مطابق شکل ۱ جرم ضربه ای سیال به وسیله میله های صلب به مخزن متصل می شود در حالی که جرم موج به وسیله فنرهای کشسان به مخزن متصل می گردد. همچنین در شکل ۱ مطابق فرض، نیروهای افقی ضربه ای و موج مایع به ترتیب در ترازهای h_i و h_c به دیواره مخزن اعمال می شوند. پارامتر جابه جایی معادل مایع مطابق شکل ۱ به صورت میزان افزایش یا کاهش طول فنرهای متصل کننده جرم موج به دیواره مخزن تعریف می گردد. این پارامتر نقشی کلیدی را در محاسبه پارامترهای مود موج ارتعاش مخزن بازی می کند [۲۴].

¹ ANSYS



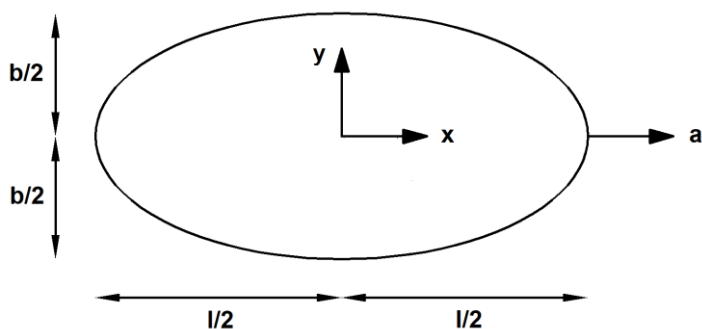
شکل ۱: جریمهای مایع ضربه‌ای و موج [۲۴].

با توجه به لزوم جامعیت رابطه هدف این تحقیق، زلزله‌های قدرتمندی باید در فرایند تحلیل دینامیکی مخازن به آنها اعمال شوند که در صورت انعطاف مخازن، تغییرشکل‌های بسیار بزرگی را در المان‌های بدنه آنها ایجاد می‌نمایند که این پدیده باعث خطای اساسی برنامه و توقف زودهنگام تحلیل می‌گردد. بنابراین، جهت اجتناب از مشکل فوق، با توجه به اینکه طبق مطالعه مسلمی، انعطاف دیواره مخزن اثر ناچیزی بر پارامترهای دینامیکی مود موج ارتعاش آب درون مخزن تحت بار زلزله دارد، کلیه مخازن تحت مطالعه در این تحقیق، صلب در نظر گرفته شده‌اند [۲۵]. شایان ذکر است که فرض فوق برای مخازن بتنی متعارف که در آنها ضخامت دیواره در حدود یک‌دهم ارتفاع آب می‌باشد، صدق می‌نماید. نمونه‌ای از مخازن بیضوی در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: مخزن بیضوی.

در شکل ۲، a و b و h به ترتیب شعاع بزرگ و شعاع کوچک پلان مخزن بیضوی و ارتفاع آب درون آن می‌باشند. مبدا سیستم مختصات دکارتی مطابق شکل ۳ در مرکز کف مخزن قرار گرفته است. در استخراج روابط نظریه هازنر مطابق شکل ۳ مطابق فرض، جهت شتاب افقی موازی با قطر بزرگ بیضی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳: پلان مخزن بیضوی.

عرض معادل مخزن بر حسب متر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$B = 2y \quad (1)$$

که در آن y مختصه عرضی سیستم مختصات بر حسب متر می‌باشد.

ضریب یکنواختی سطح پلان مخزن بر حسب متر مکعب از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$Q = \int \frac{Bx}{2} dx \quad (2)$$

که در آن x مختصه طولی سیستم مختصات بر حسب متر می‌باشد.

ضریب تناسب سطح پلان مخزن بر حسب متر به توان ۶ از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

ممان اینرسی سطح پلان مخزن بر حسب متر به توان ۴ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I = \iint x^2 dx dy \quad (4)$$

ضریب شکل سطح پلان مخزن بر حسب معکوس متر از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\lambda = \sqrt{\frac{I}{K}} \quad (5)$$

سرعت زاویه‌ای موج بر حسب رادیان بر ثانیه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\omega = \sqrt{g\lambda \tanh(\lambda h)} \quad (6)$$

که در آن h ارتفاع مایع بر حسب متر و g شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه می‌باشند.

دوره تناوب موج بر حسب ثانیه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_c = \frac{2\pi}{\omega} \quad (7)$$

سرعت زاویه‌ای سطحی بر حسب رادیان بر ثانیه از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\Omega = \frac{\omega\theta \cos(\omega t) \sinh(\lambda z)}{\sinh(\lambda h)} \quad (8)$$

که در آن θ زاویه دوران سطحی بر حسب رادیان، t زمان بر حسب ثانیه و z مختصه ارتفاعی سیستم مختصات بر حسب متر می‌باشند.

سرعت طولی بر حسب متر بر ثانیه از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v_x = \frac{-2Q}{B} \frac{d\Omega}{dz} \quad (9)$$

سرعت عرضی بر حسب متر بر ثانیه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v_y = \frac{2yQ}{B^2} \frac{dB}{dx} \frac{d\Omega}{dz} \quad (10)$$

سرعت ارتفاعی بر حسب متر بر ثانیه از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$v_z = x\Omega \quad (11)$$

انرژی جنبشی بر حسب ژول از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E = \frac{\rho}{2} \iiint (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) dy dx dz \quad (12)$$

که در آن ρ چگالی مایع بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

شتاب زاویه ای بر حسب رادیان بر مجذور ثانیه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \frac{-\theta\omega^2 \sin(\omega t) \sinh(\lambda z)}{\sinh(\lambda h)} \quad (13)$$

فشار موج بر حسب پاسکال از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$P_c = \rho \frac{d\alpha}{dz} \left(\int \frac{2Q}{B} dx + \frac{Qy^2}{2B^2} \frac{dB}{dx} \right) \quad (14)$$

نیروی موج بر حسب نیوتن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_c = \iint P_c dy dz \quad (15)$$

وزن موج بر حسب نیوتن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W_c = \frac{gF_c^2}{2E_{\max}\omega^2} \quad (16)$$

که در آن F_{\max} نیروی موج ماکزیمم بر حسب نیوتن و E_{\max} انرژی جنبشی ماکزیمم بر حسب ژول می‌باشند.

جابه‌جایی معادل مایع بر حسب متر از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$d = \frac{gF_c}{W_c\omega^2 \sin(\omega t)} \quad (17)$$

ارتفاع موج بر حسب متر از رابطه زیر به دست می آید [۲۴]:

$$h_w = \frac{P_c}{\rho(g - \alpha x)} \quad (18)$$

همچنین دوره تناوب ضربه‌ای آب مخزن دایره‌ای بر حسب ثانیه از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۶]:

$$T_i = \frac{0.444h \sqrt{\frac{\rho_c D}{E_c J_w}}}{0.094 + 0.204 \frac{h}{D} - 0.103 \left(\frac{h}{D}\right)^2 - 0.125 \left(\frac{h}{D}\right)^3 + 0.127 \left(\frac{h}{D}\right)^4 - 0.032 \left(\frac{h}{D}\right)^5} \quad (19)$$

که در آن D و h و t_w به ترتیب قطر و ارتفاع آب و ضخامت دیوار مخزن دایره‌ای بر حسب متر هستند. E_c و ρ_c نیز به ترتیب چگالی بتن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و ضریب کشسانی بتن بر حسب پاسکال می‌باشند.

۳- مخزن بیضوی

برای به دست آوردن رابطه جابه‌جایی معادل مایع در مخزن بیضوی ابتدا باید روابط پارامترهای لرزه‌ای مخزن مذکور با استفاده از نظریه هازنر به دست آورده شوند. معادله ریاضی بیضی مطابق شکل ۳ با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{x^2}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{b}{2}\right)^2} = 1 \quad (20)$$

که در آن b عرض مخزن بیضوی بر حسب متر و l طول مخزن بیضوی بر حسب متر می‌باشند.

با استفاده از روابط ۱ و ۲۰ عرض معادل مخزن بیضوی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$B = 2b \sqrt{\frac{1-x^2}{l^2}} \quad (21)$$

با استفاده از روابط ۲ و ۲۱ ضریب یکنواختی سطح پلان مخزن بیضوی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = \frac{-bl^2}{24} \sqrt{1 - \frac{4x^2}{l^2}} \left(1 - \frac{4x^2}{l^2}\right) \quad (22)$$

با استفاده از روابط ۳ و ۲۱ و ۲۲ ضریب تناسب سطح پلان مخزن بیضوی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K = \frac{\pi bl^4}{4608} \left(5l + \frac{b^2}{3l}\right) \quad (23)$$

با استفاده از روابط ۴ و ۲۰ ممان اینرسی سطح پلان مخزن بیضوی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$I = \frac{\pi bl^3}{64} \quad (24)$$

با استفاده از روابط ۵ و ۲۳ و ۲۴ ضریب شکل سطح پلان مخزن بیضوی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{6\sqrt{6}}{\sqrt{b^2 + 15l^2}} \quad (25)$$

با استفاده از روابط ۶ و ۲۵ سرعت زاویه‌ای موج در مخزن بیضوی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega = \sqrt{\frac{6\sqrt{6}g}{\sqrt{b^2 + 15l^2}} \tanh \frac{6\sqrt{6}h}{\sqrt{b^2 + 15l^2}}} \quad (26)$$

با استفاده از روابط ۸ و ۹ و ۲۱ و ۲۲ سرعت طولی در مخزن بیضوی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$v_x = \frac{\lambda\omega\theta \cos(\omega t) \cosh(\lambda z)(l^2 - 4x^2)}{12 \sinh(\lambda h)} \quad (27)$$

با استفاده از روابط ۸ و ۱۰ و ۲۱ و ۲۲ سرعت عرضی در مخزن بیضوی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$v_y = \frac{\lambda\omega\theta xy \cos(\omega t) \cosh(\lambda z)}{3 \sinh(\lambda h)} \quad (28)$$

با استفاده از روابط ۸ و ۱۱ سرعت ارتفاعی در مخزن بیضوی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v_z = \frac{\omega\theta x \cos(\omega t) \sinh(\lambda z)}{\sinh(\lambda h)} \quad (29)$$

با استفاده از روابط ۱۲ و ۲۰ و ۲۷ و ۲۸ و ۲۹ انرژی جنبشی در مخزن بیضوی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$E = \frac{\pi\rho b g \theta^2 l^3 \cos^2(\omega t)}{128} \quad (30)$$

با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۴ و ۲۱ و ۲۲ فشار موج در مخزن بیضوی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_c = \frac{\lambda\rho\theta\omega^2 \sin(\omega t) \cosh(\lambda z)}{12 \sinh(\lambda h)} \left(x^3 \left(\frac{b^2}{l^2} - \frac{4}{3} \right) + x \left(l^2 - \frac{b^2}{4} \right) \right) \quad (31)$$

با استفاده از روابط ۱۵ و ۲۱ و ۳۱ نیروی موج در مخزن بیضوی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_c = \frac{\pi\rho\theta b l \omega^2 \sin(\omega t)(12l^2 - b^2)}{768} \quad (32)$$

با استفاده از روابط ۱۶ و ۳۰ و ۳۲ وزن موج در مخزن بیضوی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$W_c = \frac{\pi\rho b \omega^2 (12l^2 - b^2)^2}{9216l} \quad (33)$$

با استفاده از روابط ۱۷ و ۳۲ و ۳۳ جابه‌جایی معادل مایع در مخزن بیضوی از رابطه زیر به دست می‌آید:

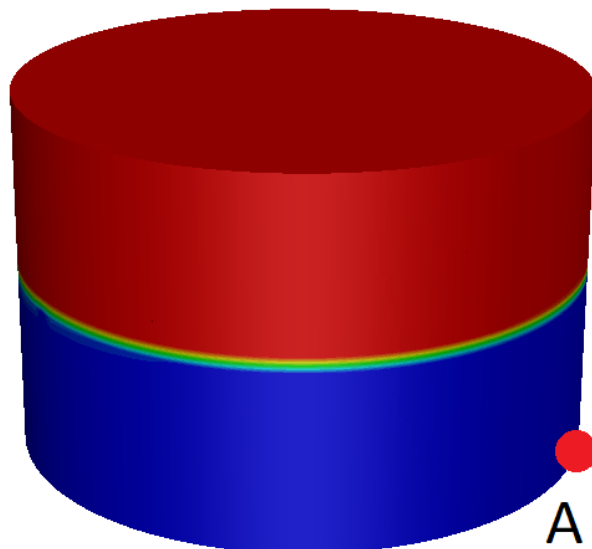
$$d = \frac{12g\theta l^2}{\omega^2 (12l^2 - b^2)} \quad (34)$$

با استفاده از روابط ۱۳ و ۱۸ و ۳۱ و ۳۴ ارتفاع ماکزیمم موج در مخزن بیضوی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h_{w\max} = \frac{\lambda d l^2 \omega^4 (12l^2 - b^2)}{18 \tanh(\lambda h) (24lg^2 - d\omega^4 (12l^2 - b^2))} \quad (35)$$

۴- صحت‌سنجی مدل‌سازی

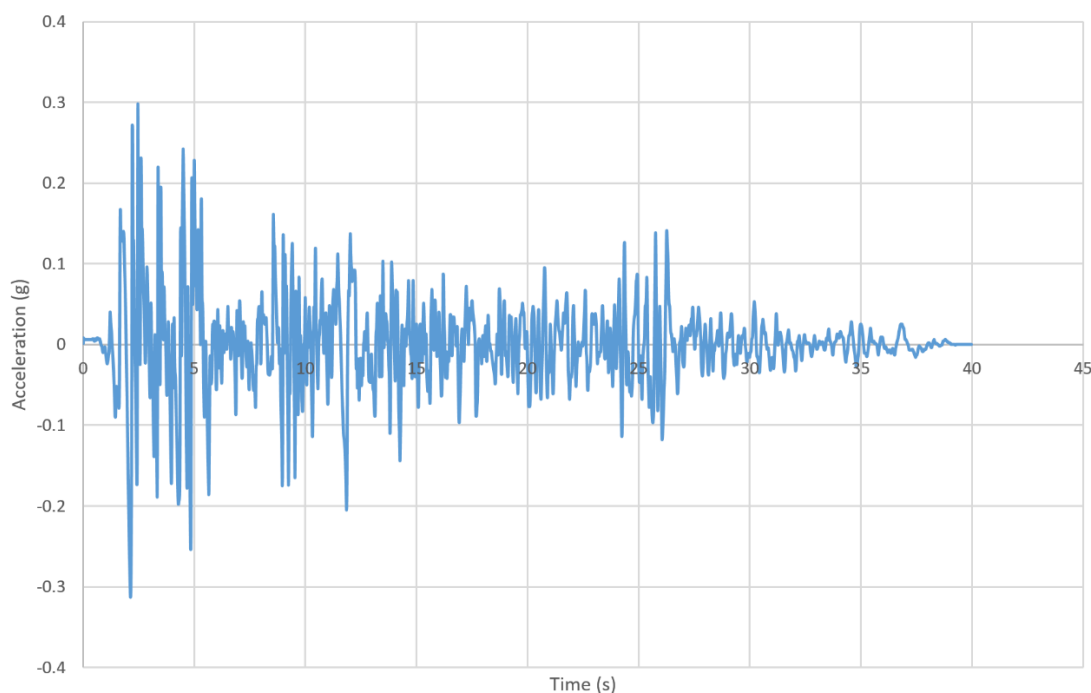
برای صحت‌سنجی مدل‌سازی، یک مخزن صلب زمینی دایره‌ای بی‌سقف با کف گیردار به قطر ۳۴ متر و ارتفاع آب ۱۱ متر و ارتفاع هوای ۱۱ متر مطابق شکل ۴ تحت مولفه طولی زلزله امپریال ولی مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفته است.



شکل ۴: مخزن دایره‌ای زمینی ۱۱*۳۴ متر.

در شکل ۴، نواحی آبی و قرمز به ترتیب نشان‌دهنده آب و هوا می‌باشند. همچنین ناحیه بسیار نازک سبز، ناحیه انتقالی مرزی بین آب و هوا را نمایش می‌دهد. سطح این ناحیه مرزی، همان سطح آزاد آب را تعریف می‌نماید. در شکل ۵ نمودار شتاب‌نگاشت مولفه طولی زلزله امپریال ولی نمایش داده شده است.

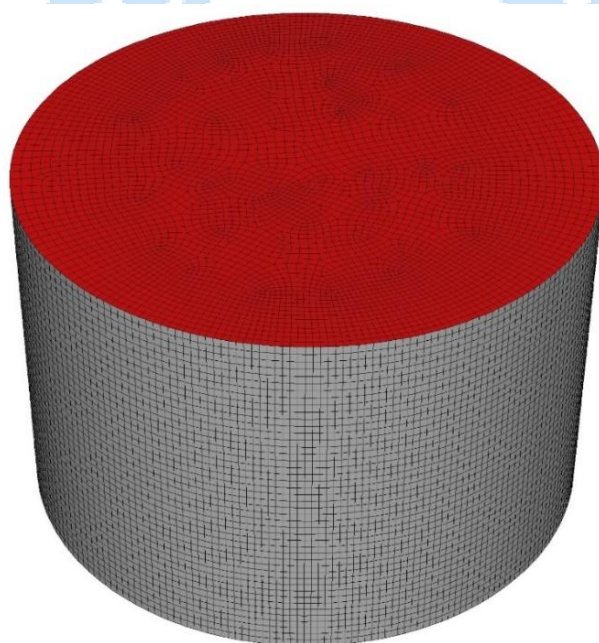
Longitudinal Component



شکل ۵: شتاب‌نگاشت مولفه طولی زلزله امپریال ولی.

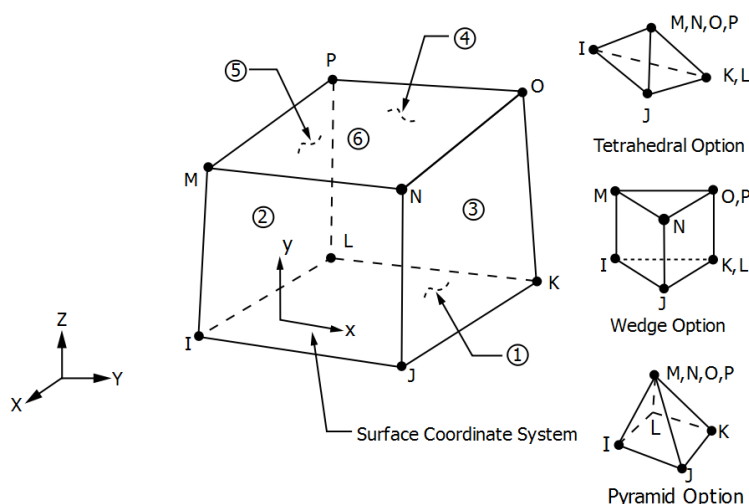
در مدل‌سازی مخازن، چگالی، لزجت، سرعت صوتی و نسبت میرایی ضربه‌ای و موج آب درون مخزن به ترتیب برابر با ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ۰/۱۱۵ میلی‌پاسکال ثانیه، ۱۵۰۰ متر بر ثانیه، ۵ درصد و ۰/۵ درصد فرض گردیده‌اند. پدیده تلاطم در مخزن آب تحت زلزله‌های قوی تغییرشکل‌های بزرگی را در آب ایجاد می‌کند. در روش لاگرانژی المان‌های سالیید نمی‌توانند تغییرشکل‌های بزرگی را تحمل کنند در حالی که در روش اویلری المان‌های فلویید می‌توانند تغییرشکل‌های بزرگی را در طی تحلیل دینامیکی تحمل نمایند. بنابراین زیربرنامه فلوئنت نرم‌افزار آنسیس برای تعیین فشار ماکزیمم ضربه‌ای و ارتفاع ماکزیمم موج مایع تحت شتاب افقی زلزله مورد استفاده قرار گرفته است.

زیربرنامه فلوئنت از روش اویلری برای تحلیل دینامیکی مدل استفاده می‌کند لذا آب با المان‌های فلویید مدل گردیده است. در این روش، مخزن به صورت صلب مدل می‌شود لذا شتاب زلزله به المان‌های فلویید اعمال گردیده است. در مدل‌سازی پدیده تلاطم به وسیله زیربرنامه فلوئنت، به منظور اجتناب از سرریز موج مایع و خطای تحلیل، معمولا ارتفاع هوا برابر با ارتفاع آب در نظر گرفته می‌شود. فلسفه این کار آن است که معمولا ارتفاع ماکزیمم موج آب از ارتفاع استاتیکی آب بیشتر نمی‌گردد. معمولا در مدل‌سازی مخازن با روش اجزای محدود، اندازه المان مطابق شکل ۶، برابر با یک‌دهم کوچک‌ترین بعد حجم آب در نظر گرفته می‌شود تا از یک طرف، دقت کافی برای تحلیل به دست آید و از طرف دیگر، زمان معقول برای تحلیل صرف گردد.



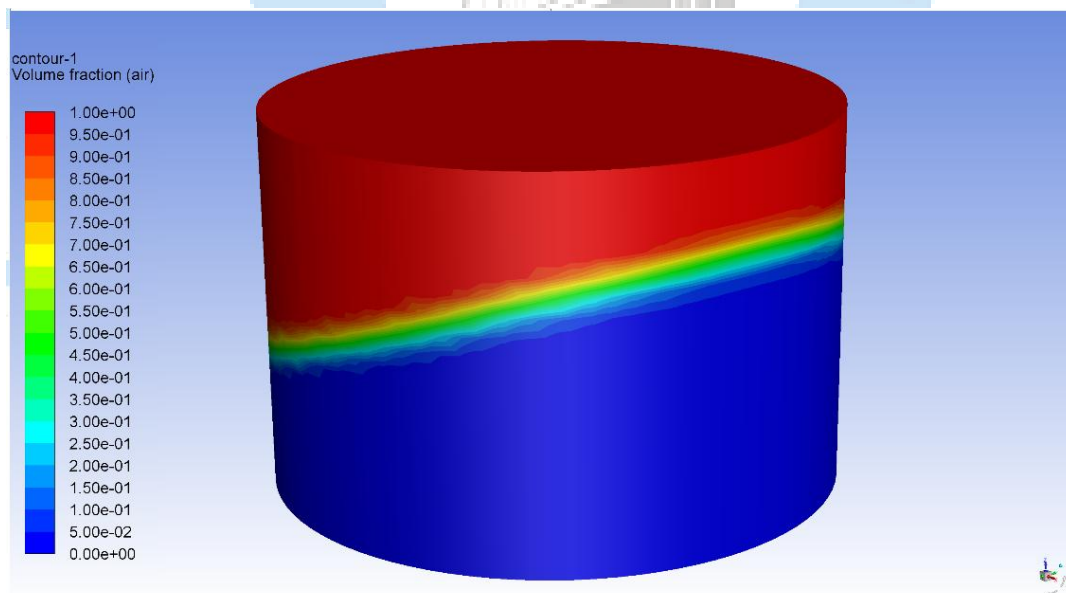
شکل ۶: مش‌بندی مخزن دایره‌ای زمینی ۱۱*۳۴ متر.

المان فلویید ۳۰ برای مدل‌سازی آب در زیربرنامه فلوئنت مورد استفاده قرار گرفته است. این المان مکعبی مطابق شکل ۷، ۸ گره با درجات آزادی جابه‌جایی و فشار دارد [۲۷].



شکل ۷: المان فلوئید ۳۰ [۲۷].

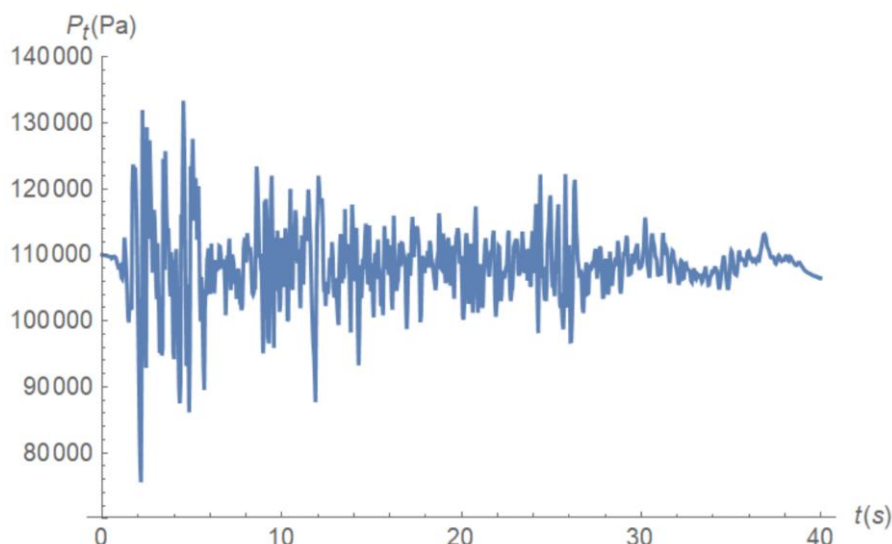
همچنین در شکل ۷، حالت‌های خاصی از المان مکعبی مانند المان هرمی و المان گوه‌ای و المان چهاروجهی نمایش داده شده‌اند که المان‌های مذکور از انطباق بعضی از گره‌های المان مکعبی بر هم ایجاد می‌گردند و در مدل‌سازی گوشه‌های جسم به کار می‌روند. شرایط مرزی کف مخزن به صورت گیردار و شرایط مرزی دیواره آن به صورت صلب تعریف شده‌اند. مخزن فاقد سقف است لذا سطح فوقانی آن به صورت خروجی فشار تعریف گردیده است. همچنین لغزش آب روی سطوح مخزن در امتدادهای موازی با سطح دیواره و کف آن با استفاده از گزینه دیوار استاندارد تامین شده است. بعد از تعریف مصالح و شرایط مرزی و اعمال سرعت‌نگاشت زلزله به مخزن، تحلیل لرزه‌ای به وسیله زیربرنامه فلوئنت انجام گردیده است. در تحلیل تاریخچه زمانی، تعداد گام‌های زمانی به منظور حصول دقت کافی و زمان معقول برای تحلیل، برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه، موج تلاطم آب در مخزن دایره‌ای ۱۱*۳۴ متر در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸: تلاطم مایع در مخزن دایره‌ای ۱۱*۳۴ متر.

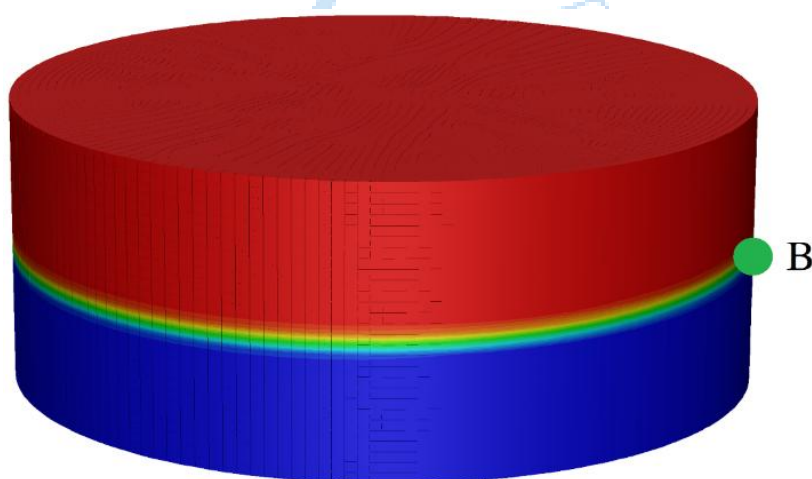
در شکل ۸، رنگ‌های قرمز و آبی به ترتیب نشان‌دهنده وجود کامل و عدم وجود هوا در حجم مدل می‌باشند. سایر رنگ‌ها نیز تبدیل تدریجی فاز آب به فاز هوا را در یک ناحیه مرزی بسیار نازک نمایش می‌دهند. در زیربرنامه فلوئنت، سطح آزاد آب به عنوان مکان

هندسی نقاطی تعریف می‌شود که نسبت حجمی هوای برابر با ۰/۵ دارند. همچنین یک خط قائم روی دیواره مخزن و در انتهای طول آن تعریف می‌گردد. تاریخچه زمانی تراز سطح آزاد آب با محاسبه مختصه Z نقطه مشترک سطح آزاد و خط قائم در زمان‌های مختلف به دست می‌آید. مسلمی در سال ۲۰۱۱ فشار ماکزیمم ضربه‌ای مخزن مذکور را تحت زلزله فوق‌الذکر به دست آورده است [۲۵]. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به عنوان زیربرنامه سیالاتی نرم‌افزار آنسیس، نمودار فشار کل در نقطه A بر حسب زمان مطابق شکل ۹ به دست آمده است.



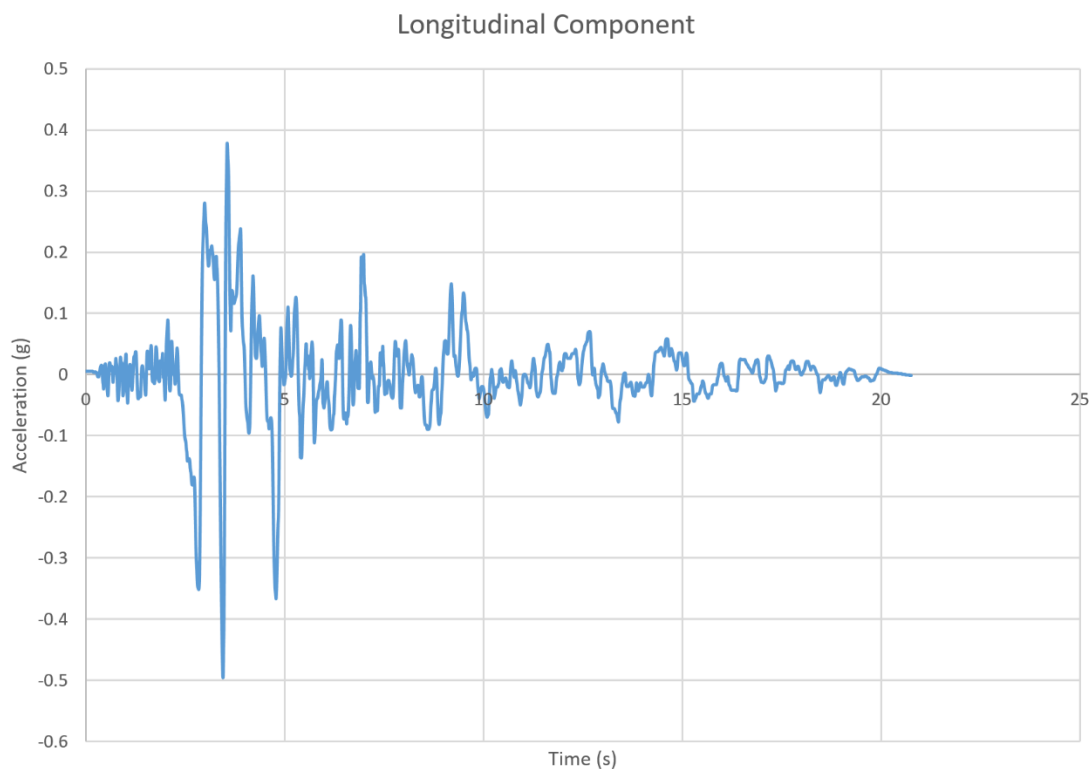
شکل ۹: نمودار فشار کل آب بر حسب زمان.

مطابق شکل ۹، میزان فشار کل آب در مدت اعمال زلزله، حول مقدار فشار استاتیکی آب یعنی ۱۱۰ کیلوپاسکال، نوسان می‌نماید. همچنین برای صحت‌سنجی روش مدل‌سازی تحت شتاب متغیر، یک مخزن زمینی دایره‌ای با کف گیردار به قطر ۷/۲ متر و ارتفاع آب ۱/۴ متر و ارتفاع هوای ۱/۴ متر مطابق شکل ۱۰ تحت مولفه طولی زلزله ارزیگان مورد تحلیل دینامیکی قرار گرفته است.



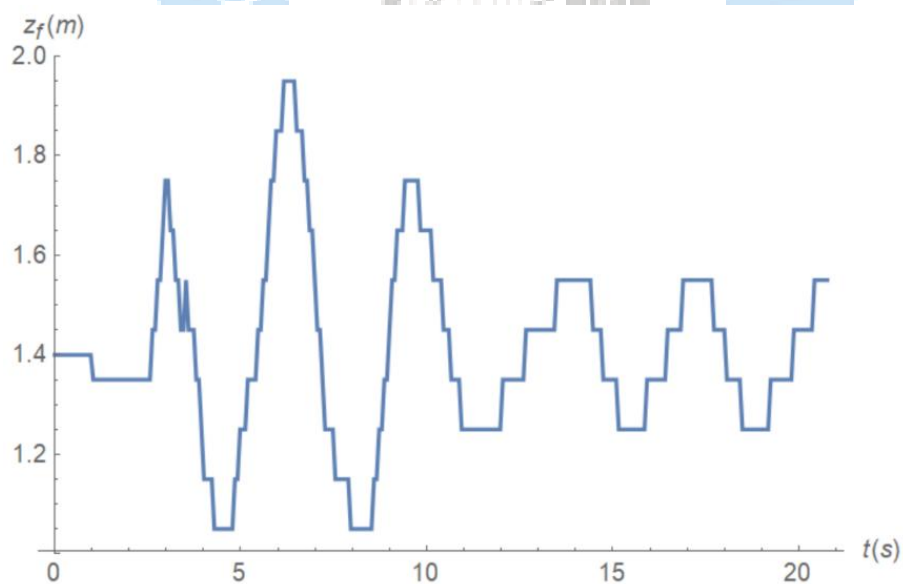
شکل ۱۰: مخزن دایره‌ای زمینی ۱/۴*۷/۲ متر.

در شکل ۱۱ نمودار شتاب‌نگاشت مولفه طولی زلزله ارزیگان نمایش داده شده است.



شکل ۱۱: شتاب نگاشت مولفه طولی زلزله ارزیکن.

جمالوندی در سال ۲۰۲۱ ارتفاع ماکزیمم موج مخزن مذکور را تحت زلزله فوق الذکر به دست آورده است [۲۸]. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار فلوئنت، نمودار تراز سطح آزاد آب در نقطه B بر حسب زمان مطابق شکل ۱۲ به دست آمده است.



شکل ۱۲: نمودار تراز سطح آزاد آب بر حسب زمان.

مطابق شکل ۱۲، میزان تراز سطح آزاد آب در مدت اعمال زلزله، حول مقدار تراز استاتیکی آب یعنی ۱/۴ متر، نوسان می نماید. فشار ماکزیمم ضربه ای آب بر حسب پاسکال از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$P_t = abs(P_t - \gamma_w h) \quad (36)$$

در رابطه فوق P_t فشار کل آب بر حسب پاسکال است. γ_w نیز وزن مخصوص آب بر حسب نیوتن بر متر مکعب می‌باشد. شایان ذکر است که فشار ماکزیمم کل آب در پایین دیواره مخزن و انتهای طول آن اتفاق می‌افتد. ارتفاع ماکزیمم موج آب بر حسب متر از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

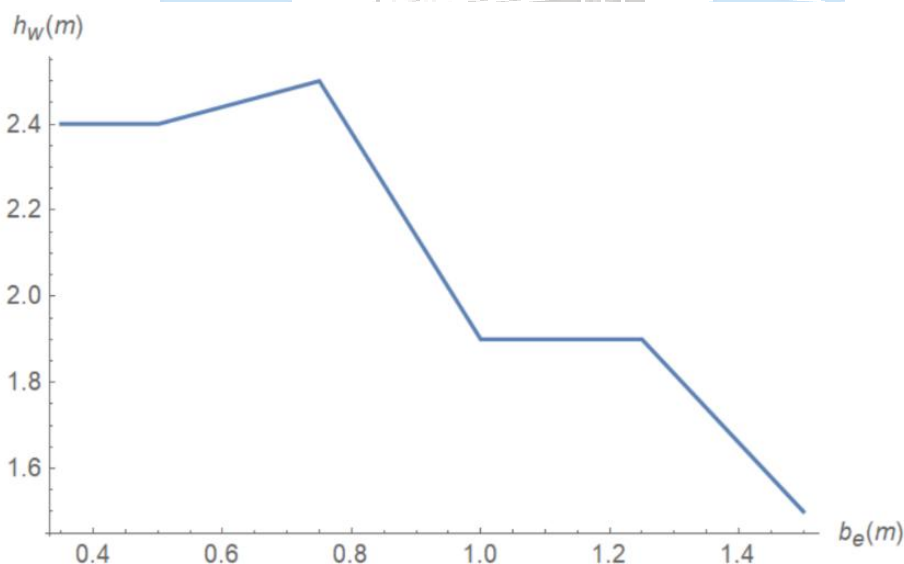
$$h_w = abs(z_f - z_s) \quad (37)$$

در رابطه فوق z_f و z_s به ترتیب تراز سطح آزاد دینامیکی و استاتیکی آب بر حسب متر می‌باشند. شایان ذکر است که ارتفاع ماکزیمم موج آب در سطح آزاد آن و انتهای طول مخزن اتفاق می‌افتد. نتایج مطالعات مسلمی، جمالوندی و تحقیق حاضر در جدول ۱ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

جدول ۱: مقایسه نتایج مطالعه مسلمی، جمالوندی 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

بررسی جدول ۱ نشان می‌دهد که نتایج متناظر مطالعه مسلمی، جمالوندی و تحقیق حاضر، تفاوت ناچیزی با یکدیگر دارند که ناشی از کاربرد نرم‌افزارهای مختلف برای انجام تحلیل می‌باشد. بنابراین نتایج متناظر مطالعه مسلمی، جمالوندی و تحقیق حاضر، با دقت مناسبی با یکدیگر تطابق دارند. همچنین برای صحت‌سنجی اندازه المان‌های به‌کاررفته در روش اجزای محدود، تحلیل حساسیت برای مخزن بیضوی ۵*۱۰*۲۰ متر، تحت اعمال هم‌زمان مولفه‌های افقی طولی و عرضی زلزله طبس انجام و نمودار حاصله در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: نمودار ارتفاع ماکزیمم موج بر حسب اندازه المان.

بررسی شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با کاهش اندازه المان، ارتفاع ماکزیمم موج افزایش می‌یابد به طوری که مقدار ارتفاع ماکزیمم موج در اندازه المان ۰/۵ متر به مقدار ۲/۴ متر همگرا می‌گردد. بنابراین استفاده از یک‌دهم کوچک‌ترین بعد حجم آب به عنوان اندازه المان، قابل قبول می‌باشد.

۵- تحلیل دینامیکی

در بارگذاری لرزه‌ای مخازن با استفاده از روابط نظریه هازنر، پارامتر جابه‌جایی معادل مایع پارامتری کلیدی در محاسبه پارامترهای مود ارتعاش موج از قبیل فشار موج و ارتفاع موج می‌باشد. آیین‌نامه نیروگاه‌های اتمی آمریکا رابطه زیر را برای محاسبه جابه‌جایی معادل آب ارائه نموده است [۲۹]:

$$d_e = S_{dc} \quad (38)$$

در رابطه فوق S_{dc} جابه‌جایی طیفی موج آب بر حسب متر می‌باشد. بنابراین هدف تحقیق حاضر، به دست آوردن رابطه‌ای جامع‌تر جهت حصول دقت محاسباتی بیشتر، با استفاده از اصول برازش آماری غیرخطی برای پارامتر جابه‌جایی معادل آب در مخزن زمینی بیضوی می‌باشد. برای دستیابی به هدف مذکور بهتر است که جابه‌جایی معادل آب به عنوان تابعی از جابه‌جایی طیفی موج آن بیان شود. مزیت اصلی پارامتر جابه‌جایی طیفی موج، آن است که با توجه به استخراج آن از طیف جابه‌جایی مخزن، پارامتر مذکور می‌تواند هر دو عامل خصوصیات مخزن و ویژگی‌های زلزله را وارد محاسبات نماید. شایان ذکر است که در نرم‌افزار سیسموسیگنال، مقدار جابه‌جایی طیفی موج باید با استفاده از نسبت میرایی بحرانی برابر با ۰/۵ درصد به دست آورده شود. جهت به دست آوردن رابطه مناسبی برای جابه‌جایی معادل آب، ۸ مخزن بیضوی بتنی زمینی با پایه گیردار با مشخصات مندرج در جدول ۲ تحت مطالعه قرار گرفته‌اند.

جدول ۲: مشخصات مخازن بیضوی تحت مطالعه

نوع مخزن	طول مخزن (متر)	عرض مخزن (متر)	ارتفاع مخزن (متر)
A	۴۰	۲۰	۵
B	۳۳	۲۴	۴
C	۲۵	۱۰	۳
D	۱۹	۱۱	۳
E	۱۵	۱۰	۲
F	۱۳	۶	۲
G	۴	۲	۱
H	۳	۱	۱

شایان ذکر است که مشخصات مخازن جدول ۲ به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که مخازن متعارف گوناگونی شامل مخازن بزرگ و متوسط و کوچک در برازش آماری گنجانده شوند. همچنین با استفاده از پایگاه اطلاعات پژوهشگاه مهندسی زلزله پاسیفیک، زلزله‌های مختلفی با مشخصات تک‌تونیکی مندرج در جدول ۳ برای انجام تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شده‌اند [۳۰].

جدول ۳: مشخصات تک‌تونیکی زلزله‌های افقی اعمالی به مخازن

نام زلزله	نام ایستگاه	تاریخ وقوع	نوع خاک	بزرگای زلزله (ریشتر)	فاصله از گسل (کیلومتر)
کیپ X	کیپ مندوسینو	۱۹۹۲	II	۷/۰۱	۶/۹۶
چیچی X	چی ۸۰	۱۹۹۹	II	۷/۶۲	۲/۶۹
طبس X	طبس	۱۹۷۸	II	۷/۴	۱۰
کوبه X	تاکارازوکا	۱۹۹۵	III	۶/۹	۰/۲۷

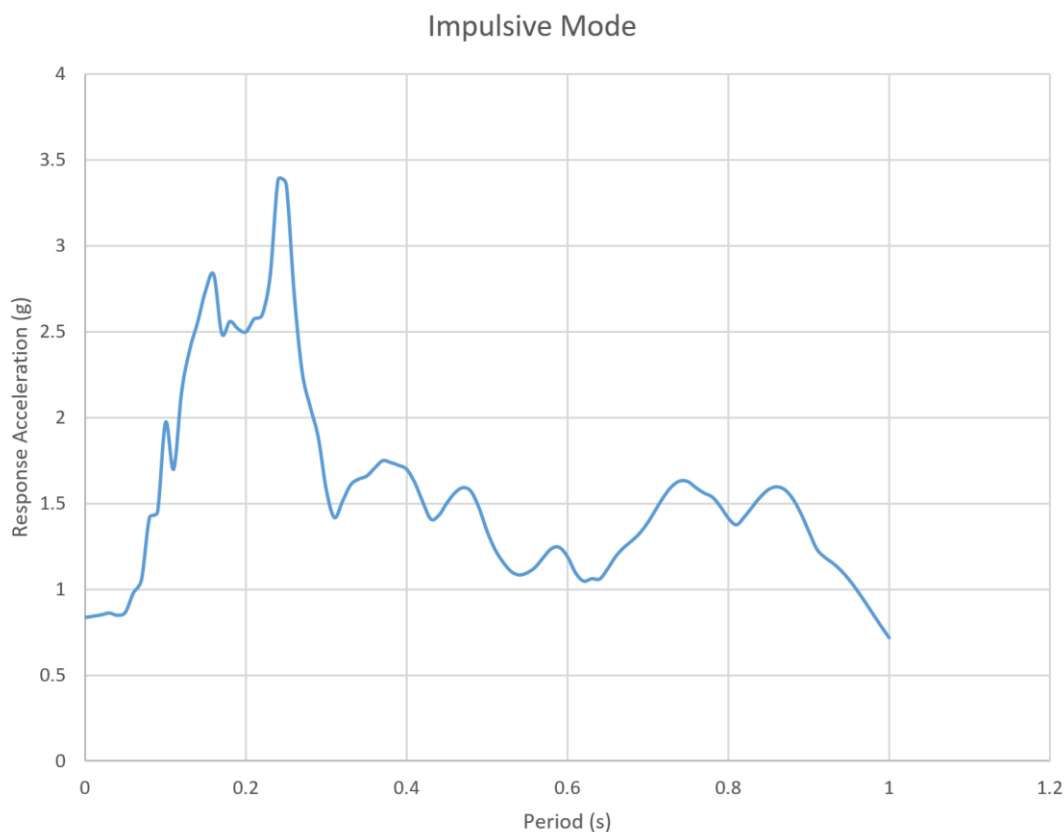
۷۳	۶/۹۳	I	۱۹۸۹	دبیرستان پیدمونت	لوما X
۱۲/۵۵	۷/۳۷	II	۱۹۹۰	آب بر	منجیل X
۶/۰۹	۶/۹۵	III	۱۹۴۰	السنتر	امپریال ولی X
۴۹/۸۱	۶/۶۹	IV	۱۹۹۴	کارسون واتر	نورتریج X
۴/۳۸	۶/۶۹	III	۱۹۹۲	ارزینکان	ارزینکان X

همچنین با استفاده از پایگاه اطلاعات پژوهشگاه مهندسی زلزله پاسیفیک، ۸ زلزله مختلف با مشخصات فیزیکی مندرج در جدول ۴ برای انجام تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شده‌اند [۳۰].

جدول ۴: مشخصات فیزیکی زلزله‌های افقی اعمالی به مخازن

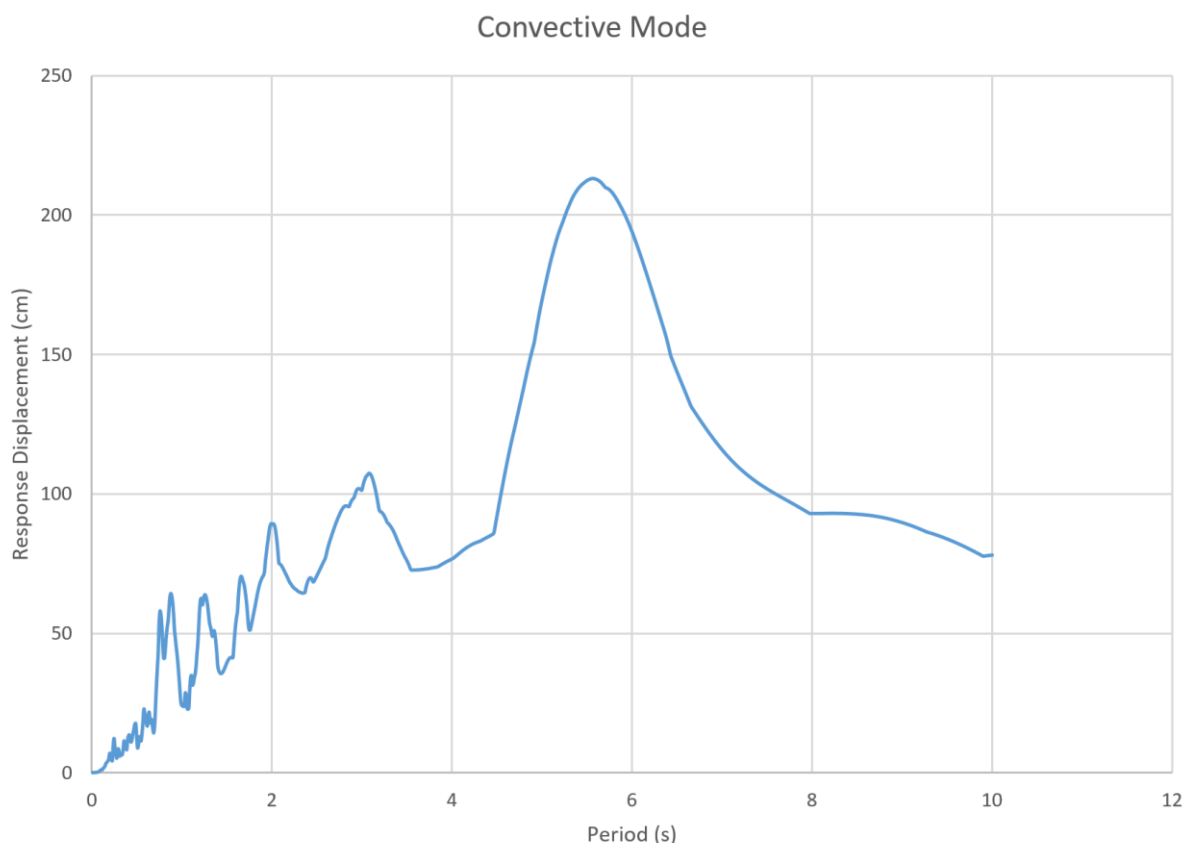
نام زلزله	شتاب بیشینه (متر بر مجذور ثانیه)	سرعت بیشینه (متر بر ثانیه)	جابه‌جایی بیشینه (متر)	زمان تداوم (ثانیه)
کیپ X	۱۴/۹۷۳	۱/۲۵۱	۰/۳۹۷	۲۹/۹۸
چیچی X	۹/۶۷۵	۱/۰۷۶	۰/۱۸۶	۸۹/۹۹۵
طیس X	۸/۳۵۸	۰/۹۷۸	۰/۳۸۷	۳۲/۸۲
کوبه X	۶/۹۳۴	۰/۶۸۳	۰/۲۶۷	۴۰/۹۵
لوما X	۵/۲۸۵	۰/۳۵	۰/۰۹۱	۳۹/۹۵
منجیل X	۵/۱۴۶	۰/۴۲۵	۰/۱۴۹	۵۳/۵
امپریال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

شایان ذکر است که مشخصات زلزله‌های جدول ۴ به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که زلزله‌های متعارف گوناگونی شامل زلزله‌های قوی و متوسط و ضعیف در برازش آماری گنجانده شوند. پارامتر شتاب معادل آب، جهت محاسبه پارامترهای مود ارتعاش ضربه‌ای آب به کار می‌رود. بنابراین در هنگام استخراج شتاب طیفی ضربه‌ای باید از نسبت میرایی بحرانی ۵ درصد استفاده کرد. به عنوان مثال، طیف پاسخ شتاب ضربه‌ای مولفه طولی زلزله طیس در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.



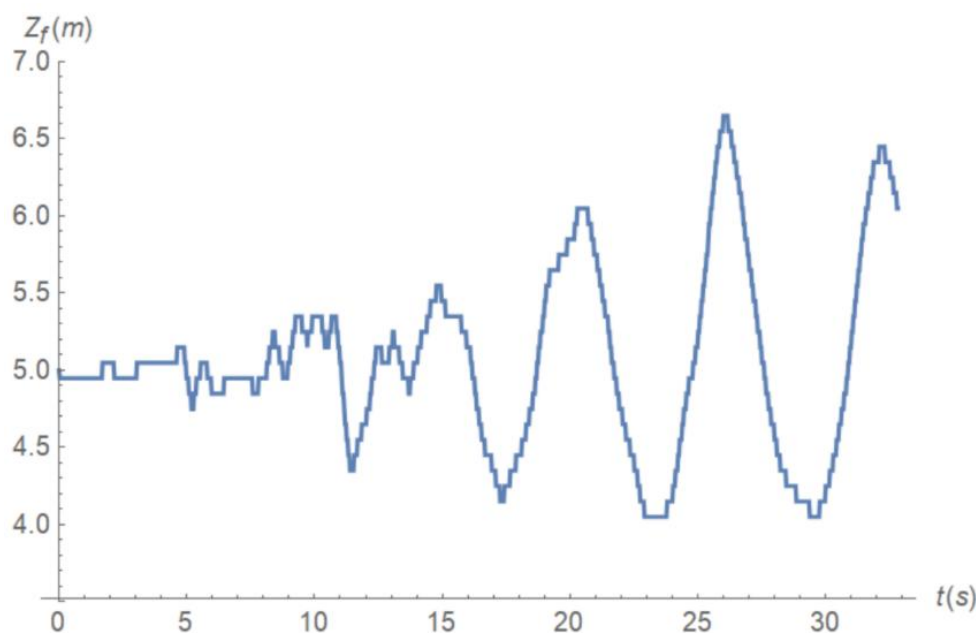
شکل ۱۴: نمودار طیف پاسخ شتاب ضربه‌ای مولفه طولی زلزله طبس.

برای هر مخزن، پس از محاسبه دوره تناوب ضربه‌ای آب با استفاده از رابطه ۱۹، می‌توان از شکل ۱۴ شتاب طیفی ضربه‌ای را به دست آورد. همچنین پارامتر جابه‌جایی معادل آب، جهت محاسبه پارامترهای مود ارتعاش موج آب به کار می‌رود. بنابراین در هنگام استخراج جابه‌جایی طیفی موج باید از نسبت میرایی بحرانی ۰/۵ درصد استفاده نمود. به عنوان نمونه، طیف پاسخ جابه‌جایی موج مولفه طولی زلزله طبس در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: نمودار طیف پاسخ جابه‌جایی موج مولفه طولی زلزله طیس.

همچنین برای هر مخزن، پس از محاسبه دوره تناوب موج آب با استفاده از رابطه ۷، می‌توان از شکل ۱۵ جابه‌جایی طیفی موج را به دست آورد. تحلیل دینامیکی گذرای مخزن آب بیضوی تحت هر یک از زلزله‌های اعمالی در هر یک از جهات طولی و عرضی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت انجام شده است. لازم به ذکر است که ارتفاع ماکزیمم موج آب تحت زلزله طولی در سطح آزاد آن و در انتهای قطر بزرگ مخزن و تحت زلزله عرضی در سطح آزاد آن و در انتهای قطر کوچک مخزن اتفاق می‌افتد. به عنوان نمونه، نمودار تاریخچه زمانی تراز سطح آزاد آب تحت زلزله طیس X در جهت طولی برای مخزن D در شکل ۱۶ نمایش داده شده است.



شکل ۱۶: نمودار تاریخچه زمانی تراز سطح آزاد آب تحت زلزله طبس x در جهت طولی.

مطابق شکل ۱۶، حداکثر ارتفاع موج آب برابر با $1/65$ متر به دست می‌آید که در زمان ۲۶ ثانیه رخ می‌دهد. با استفاده از روابط ۷ و ۳۵ جابه‌جایی معادل مایع از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d_e = \frac{3g^2 T_c^4}{2\pi^4 \left(\sqrt{12} - \frac{b}{l} \right) \left(\sqrt{12} + b \right) \left(1 + \frac{\lambda l^2}{18h_w \tanh(\lambda h)} \right)} \quad (39)$$

مقادیر دقیق جابه‌جایی معادل آب که با استفاده از رابطه ۳۹ برای مخازن مختلف و زلزله‌های گوناگون محاسبه شده‌اند در جدول ۵ درج گردیده‌اند.

جدول ۵: مقادیر دقیق جابه‌جایی معادل آب

نام زلزله	مخزن A	مخزن B	مخزن C	مخزن D	مخزن E	مخزن F	مخزن G	مخزن H
کیپ x	۱/۱۳۸	۰/۹۹۱	۰/۶۹۲	۱/۲۰۲	۱/۲۳۷	۱/۰۰۵	۰/۳۰۲	۰/۱۸۸
کیپ y	۲/۰۶۳	۱/۵۷۴	۲/۲۶۸	۱/۴۳۵	۱/۳۴۴	۰/۹۴۲	۰/۲۸۲	۰/۵۳۸
چیچی x	۱/۱۳۸	۰/۹۹۱	۰/۶۹۲	۰/۵۵۴	۰/۷۲۵	۰/۵۹۷	۰/۳۰۲	۰/۲۷۴
چیچی y	۱/۳۳۸	۰/۹۸۴	۱/۱۷۸	۰/۶۰۸	۰/۷۰۹	۰/۷۴۴	۰/۳۷۴	۰/۶۵۴
طبس x	۱/۱۳۸	۰/۹۹۱	۱/۱۲۷	۱/۹۷۷	۲/۳۰۹	۱/۸۲۳	۰/۴۸۵	۰/۲۷۴
طبس y	۳/۷۰۹	۲/۱۱۹	۲/۶۸۲	۱/۶۳۷	۱/۶۷۷	۱/۳۵۷	۰/۳۷۴	۰/۶۰۷
کوبه x	۰/۳۸۹	۰/۹۹۱	۰/۶۹۲	۰/۵۵۴	۰/۷۲۵	۰/۵۹۷	۰/۳۰۲	۰/۲۷۴
کوبه y	۱/۳۳۸	۰/۹۸۴	۱/۱۷۸	۰/۶۰۸	۰/۷۰۹	۰/۷۴۴	۰/۳۷۴	۰/۵۳۸
لوما x	۰/۳۸۹	۰/۳۳۸	۰/۲۳۶	۰/۱۹۲	۰/۱۵۴	۰/۳۷۱	۰/۱۹۲	۰/۰۹۹
لوما y	۰/۴۸۵	۰/۳۴۲	۰/۴۳۹	۰/۲۲۳	۰/۱۵۹	۰/۵	۰/۲۸۲	۰/۴۲۴
منجیل x	۰/۳۸۹	۰/۳۳۸	۰/۶۹۲	۰/۸۹	۰/۷۲۵	۰/۳۷۱	۰/۲۵۱	۰/۰۹۹
منجیل y	۱/۳۳۸	۰/۹۸۴	۱/۱۷۸	۰/۶۰۸	۰/۴۵	۰/۵	۰/۱۶۵	۰/۲۰۶
السنتر و x	۰/۳۸۹	۰/۳۳۸	۰/۲۳۶	۰/۱۹۲	۰/۱۵۴	۰/۱۲۹	۰/۱۹۲	۰/۱۴۸
السنتر و y	۰/۴۸۵	۰/۹۸۴	۰/۴۳۹	۰/۲۲۳	۰/۱۵۹	۰/۵	۰/۱۶۵	۰/۲۰۶
نورتریج x	۰/۳۸۹	۰/۲۳۶	۰/۱۹۲	۰/۱۵۴	۰/۳۷۱	۰/۱۹۲	۰/۰۹۹	۰/۳۸۹
نورتریج y	۰/۴۸۵	۰/۳۴۲	۱/۱۷۸	۰/۲۲۳	۰/۴۵	۰/۷۴۴	۰/۱۶۵	۰/۲۰۶

با بررسی مقادیر جابه‌جایی‌های معادل طولی و عرضی آب در مخازن تحت مطالعه، نتیجه می‌شود که مقدار جابه‌جایی معادل آب به متغیرهای زیر بستگی دارد:

(۱) جابه‌جایی طیفی موج

(۲) دوره تناوب ارتعاش موج

(۳) میزان کشیدگی مخزن بیضوی

شایان ذکر است که کشیدگی مخزن بیضوی با رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$\varepsilon = \frac{l}{b} \quad (40)$$

بنابراین سه پارامتر فوق برای گنجاندن در رابطه به دست آمده توسط برازش آماری غیرخطی انتخاب گردیده‌اند.

۶- برازش نتایج

به طور 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 به صورت تابع مناسبی از متغیرهای طراحی x و y و غیره و ضرایب مجهول α و β و غیره به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$r = f(x, y, \dots, \alpha, \beta, \dots) \quad (41)$$

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

$$e_i = r_i - f(x_i, y_i, \dots, \alpha, \beta, \dots) \quad (42)$$

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 برازش به وسیله معادله زیر تعیین می‌گردد:

$$\chi = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (43)$$

در رابطه فوق e_i ها مانده‌هایی هستند که تفاوت میان هر نقطه اطلاعات اصلی و مقدار برازش‌یافته 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:

$$\begin{cases} g(\alpha, \beta, \dots) = 0 \\ h(\alpha, \beta, \dots) = 0 \\ \dots \end{cases} \quad (44)$$

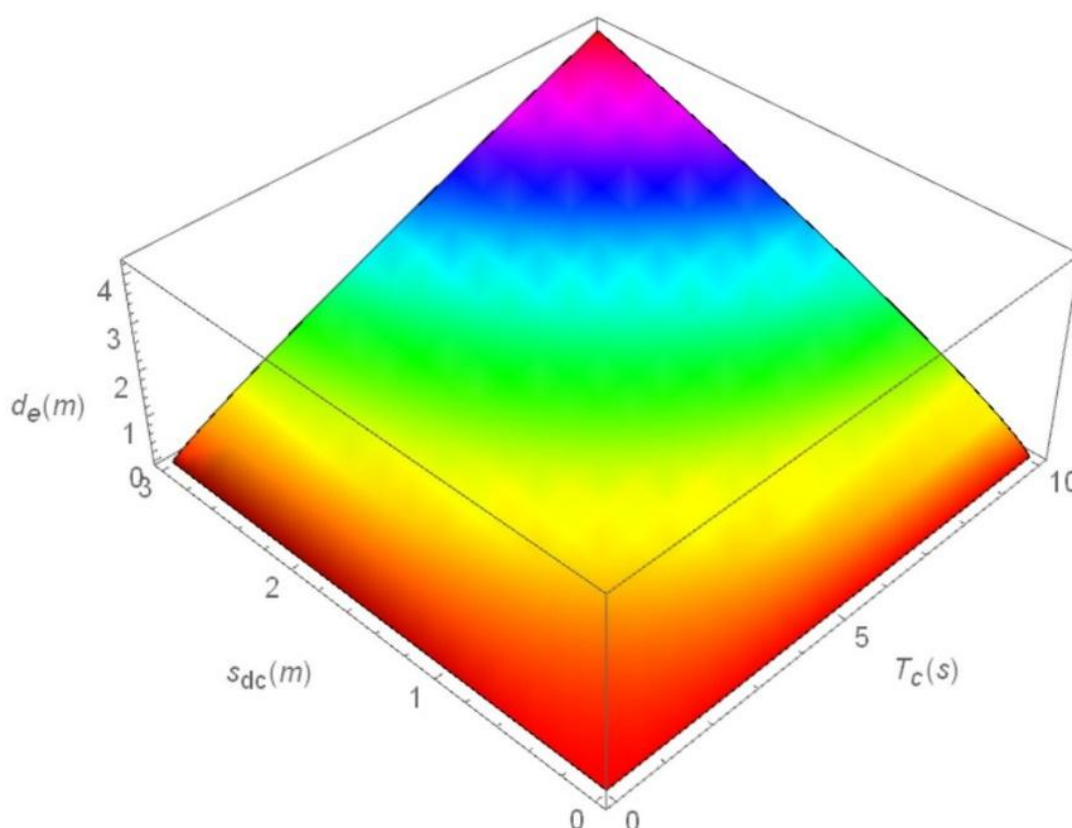
در دستگاه فوق g و h و ... توابع ریاضیاتی غیرخطی می‌باشند. با حل دستگاه معادلات ۴۴، ضرایب مجهول α و β و غیره به دست می‌آیند. سپس با قرار دادن مقادیر ضرایب α و β و غیره در رابطه ۴۱، رابطه ریاضی متغیر هدف مشخص می‌شود [۳۱].

پس از استخراج مقادیر جابه‌جایی طیفی موج از نرم‌افزار سیموسینگنال و تعیین مقادیر جابه‌جایی معادل آب با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، نرم‌افزار متمتیکا برای انجام برازش آماری غیرخطی مورد استفاده قرار گرفته است. نرم‌افزار متمتیکا ثابت‌های مجهول تابع

ریاضیاتی را به گونه‌ای می‌یابد که شاخص خطای برازش کمینه گردد. بنابراین با استفاده از روش رگرسیون آماری، با توجه به شکل روابط ۳۷ و ۳۸، رابطه زیر برای جابه‌جایی معادل آب بر حسب متر پیشنهاد گردیده است:

$$d_e = \frac{0.677 c_c^{0.884} S_{dc}^{0.802}}{\left(\sqrt{12} - \frac{b}{l}\right)^{0.987}} \quad (45)$$

در رابطه ۴۵ مقدار جابه‌جایی طیفی موج از ۰/۰۸۶ متر تا ۲/۰۶۲ متر تغییر می‌کند. همچنین مقدار دوره تناوب ارتعاش موج از ۱/۱۵ ثانیه تا ۹/۷۸۷ ثانیه تغییر می‌نماید. مقادیر طول و عرض مخزن بیضوی نیز از ۱ متر تا ۴۰ متر تغییر می‌نمایند. نمودار رابطه ۴۵ با فرض میزان کشیدگی مخزن برابر با ۲، در شکل ۱۷ نمایش داده شده است.



شکل ۱۷: نمودار جابه‌جایی معادل آب.

با بررسی شکل ۱۷ مشخص می‌گردد که هم با افزایش جابه‌جایی طیفی موج و هم با افزایش دوره تناوب موج آب، جابه‌جایی معادل آب افزایش می‌یابد. به منظور ارائه نمونه‌ای از کاربرد رابطه ۴۵، زلزله بم X به عنوان زلزله‌ای جدید در جهات طولی و عرضی به مخزن بیضوی با ابعاد ۳*۹*۱۸ متر به عنوان مخزنی جدید اعمال شده است و نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی و روابط جابه‌جایی معادل آب در جدول ۶ درج گردیده‌اند.

جدول ۶: نتایج تحلیل دینامیکی و روابط جابه‌جایی معادل آب

نام متغیر	واحد	نتیجه تحلیل دینامیکی	رابطه آیین‌نامه نیروگاه‌های اتمی	رابطه پیشنهادی تحقیق حاضر	درصد خطای نسبی رابطه	درصد خطای نسبی رابطه
جابه‌جایی معادل طولی	متر	۰/۶۸۴	۰/۴۳۲	۰/۵۵۶	-۱۸/۷	-۳۶/۸
جابه‌جایی معادل عرضی	متر	۰/۹۵۸	۰/۵۹۵	۰/۹۴۱	-۱/۸	-۳۷/۹

بررسی جدول ۶ نشان می‌دهد که نتایج عددی رابطه جابه‌جایی معادل آب پیشنهادی این تحقیق نسبت به رابطه متناظر آیین‌نامه نیروگاه‌های اتمی آمریکا، تطابق بیشتری با نتایج دقیق تحلیل دینامیکی دارند. در تحلیل آماری، ضریب تعیین به عنوان شاخصی از دقت برازش مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار ضریب مذکور بین ۰ درصد و ۱۰۰ درصد تغییر می‌کند. هرچه مقدار ضریب تعیین، بزرگ‌تر باشد دقت برازش بیشتر خواهد بود. ضریب تعیین برازش بر حسب درصد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{ave})^2} \right) \quad (46)$$

در رابطه فوق، n تعداد نقاط آماری، i متغیر جمع‌بندی، y_i مقدار دقیق تابع موردنظر در نقطه i ام و z_i مقدار برازشی تابع موردنظر در نقطه i ام است. همچنین میانگین مقادیر دقیق تابع موردنظر می‌باشد [۳۱]. در این تحقیق برای ۱۲۸ نقطه آماری تحت مطالعه، با استفاده از رابطه ۴۶ مقدار ضریب تعیین برای روابط ۳۸ و ۴۵ به ترتیب برابر با ۳۹/۶ درصد و ۸۴/۴ درصد به دست آمده است.

۷- نتیجه گیری

با استفاده از رابطه به دست آمده در این تحقیق، می‌توان پارامتر جابه‌جایی معادل آب را در مخازن بیضوی زمینی با دقت بالاتری محاسبه نمود. با داشتن مقدار جابه‌جایی معادل آب، می‌توان از روابط نظریه هازنر، فشار ماکزیمم موج و ارتفاع ماکزیمم موج را جهت بارگذاری لرزه‌ای آن تعیین کرد. بدین ترتیب استفاده از رابطه مذکور در کاربردهای طراحی، با توجه به عدم نیاز به انجام تحلیل‌های پیچیده و زمان‌بر اجزای محدود، سهولت و سرعت مناسبی را فراهم می‌نماید.

براساس مطالعات انجام‌شده در این تحقیق، نتایج زیر به دست آمده‌اند:

- ۱) جابه‌جایی معادل آب، مستقیماً به جابه‌جایی طیفی موج بستگی دارد.
- ۲) جابه‌جایی معادل آب، مستقیماً به دوره تناوب ارتعاش موج بستگی دارد.
- ۳) جابه‌جایی معادل آب، معکوساً به میزان کشیدگی مخزن بیضوی بستگی دارد.

در این تحقیق برای ۱۲۸ نقطه آماری تحت مطالعه، با استفاده از رابطه ۴۶ مقدار ضریب تعیین برای روابط ۳۸ و ۴۵ به ترتیب برابر با ۳۹/۶ درصد و ۸۴/۴ درصد به دست آمده است. بنابراین، دقت رابطه جابه‌جایی معادل آب پیشنهادی این تحقیق، به میزان ۴۴/۸ درصد، بیشتر از دقت رابطه متناظر آیین‌نامه نیروگاه‌های اتمی آمریکا می‌باشد.

مراجع

- [1] Kalani, L., Navayineya, B., Tavakoli, H. and Vaseghi, J., (2014). "Dynamic analysis of elevated water storage tanks due to ground motions rotational and translational components". *Journal of science and engineering*, Volume 39 (), Pages. 4391-4403.
- [2] Kotrasova, K., Grajciar, I. and Kormanikova, E., (2014). "Dynamic time history response of cylindrical tank considering fluid structure interaction due to earthquake". *Applied mechanics and materials journal*, Volume 617 (), Pages. 66-69.
- [3] Tiwari, N. and Hora, M., (2015). "Interaction analysis of intze tank fluid layered soil system". *Journal of engineering and applied sciences*, Volume 10 (2), Pages. 940-953.
- [4] Tiwari, N. and Hora, M., (2015). "Transient analysis of elevated intze water tank fluid soil system". *Journal of engineering and applied sciences*, Volume 10 (2), Pages. 869-882.
- [5] Alemzade, H. and Shakib, H., (2016). "Numerical study of the response of ground steel tanks with free rocking motion under effect of horizontal excitation of earthquake". *Structure and steel journal*, Volume 13 (), Pages. 71-79.
- [6] Musa, A. and Eldamatty, A., (2017). "Design procedure for liquid storage steel conical tanks under seismic loading". *Journal of civil engineering*, Volume (), Pages. 1-53.
- [7] Sensebastian, N., Thomas, A. and Kurian, J., (2017). "Seismic analysis of elevated water tank in a framed building". *Journal of engineering and technology*, Volume 4 (6), Pages. 1629-1632.

- [8] Gurkalo, F., Du, Y., Poutos, K. and Bescos, C., (2017). "The nonlinear analysis of an innovative slit reinforced concrete water tower in seismic regions". *Engineering structures journal*, Volume 134 (), Pages. 138–149.
- [9] Kotrasova, K., Hegedusova, I., Harabinova, S., Panulinova, E. and Kormanikova, E., (2017). "The possible causes of damage to concrete tanks numerical experiment of fluid structure soil interaction". *Keyengineering materials journal*, Volume 738 (), Pages. 227–237.
- [10] Phan, H., Paolacci, F., Bursi, O. and Tondini, N., (2017). "Seismic fragility analysis of elevated steel storage tanks supported by reinforced concrete columns". *Journal of loss prevention in the process industries*, Volume (), Pages. 1–50.
- [11] Compagnoni, M. and Curadelli, O., (2017). "Experimental and numerical study of the response of cylindrical steel tanks under seismic excitation". *Journal of civil engineering*, Volume (), Pages. 1–13.
- [12] Naresh, K., (2019). "Seismic analysis of over head INTZE water tank subjected to sloshing effect". *International journal of innovative research in technology*, Volume 6(3), Pages. 105–112.
- [13] Joseph, A. and Joseph, G., (2019). "Fluid structure soil interaction effect on dynamic behaviour of circular water tanks". *International journal of structural engineering*, Volume 10(1).
- [14] Rawat, A., Mittal, V., Chakraborty, T. and Matsagar, V., (2019). "Earthquake induced sloshing and hydrodynamic pressures in rigid liquid storage tanks analyzed by coupled acoustic structural and Euler Lagrange methods". *Thin walled structures journal*, Volume 134(), Pages. 333–346.
- [15] Behnamfar, F., Moradi, R. and Hashemi, S., (2019). "Dynamic analysis of flexible concrete cylindrical storage tanks subjected to horizontal and vertical ground motion". *Journal of concrete research*, Volume 12(1), Pages. 39–57.
- [16] Uhlirva, L. and Jendzelovsky, N., (2019). "Dynamic analysis of rectangular tank using response spectra". *Vibroengineering procedia journal*, Volume 23(), Pages. 99–104.
- [17] Zhang, R., Chu, S., Sun, K., Zhang, Z. and Wang, H., (2020). "Effect of the directional components of earthquakes on the seismic behavior of an unanchored steel tank". *Applied sciences journal*, Volume 10(16).
- [18] Rawat, A., Matsagar, V. and Nagpal, A., (2020). "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*, Volume 25(1), Pages. 27–40.
- [19] Jani, B., Agrawal, V. and Patel, V., (2020). "Effects of soil condition on elevated water tank using time history analysis with different staging systems". *International journal of civil engineering*, Volume 7(6), Pages. 41–47.
- [20] Dubey, A., Maurya, M. and Tripathi, S., (2020). "Time history analysis of underground water tank for different seismic intensities". *International journal of science and research*, Volume 9(6), Pages. 963–967.
- [21] Pandit, A. and Biswal, K., (2020). "Evaluation of dynamic characteristics of liquid sloshing in sloped bottom tanks". *International journal of dynamics and control*, Volume 8(2), Pages. 162–177.
- [22] Management and planning organization, (2016). Design and analysis of ground concrete water reservoirs. *Office of deputy for technical and infrastructure development affairs*, Tehran, Iran.
- [23] Lotfi R. (2022). The mathematical solution of the hydrodynamic equations of the ground elliptical tanks. Qom: University of Qom.
- [24] Housner, G., (1957). "Dynamic pressures on accelerated fluid containers". *Bulletin of the seismological society of america*, Volume 47 (1), Pages. 15–35.
- [25] Moslemi M. (2011). Seismic response of ground cylindrical and elevated conical reinforced concrete tanks. Toronto: Ryerson university.
- [26] ACI Committee 350. (2006). Seismic design of liquid containing concrete structures and commentary, *American concrete institute*, Michigan, USA.
- [27] SAS IP Inc. (2016). ANSYS Documentation. South pointe.
- [28] Jamalvandi M, Amiri M, (2021). "Influence of seismic isolation systems on behavior of fluid inside thin-walled steel tanks". *Jordan journal of civil engineering*, Volume 15(4), Pages. 534-550.
- [29] Lockheed aircraft corporation and Holmes and Narver incorporation, (1963). Nuclear reactors and earthquakes. *Division of reactor development*, Washington, USA.
- [30] Pacific earthquake engineering research center, (2020). Ground motion database. Berkeley, USA.
- [31] Chatterjee S, Simonoff J. (2013). Handbook of regression analysis. Hoboken: John Wiley and sons inc.