

## بررسی عملکرد شکل مخازن بر رفتار نوسانات آب در زمان وقوع زلزله در حالت پر و نیمه پر به کمک مدل عددی

سینا ارجمندنیا

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-مهندسی آب، پردیس دانشکده‌های فنی،

دانشگاه تهران، تهران، ایران

s.arjomandnia@ut.ac.ir

سید تقی امید نائینی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

stnaeeni@ut.ac.ir

کلید واژه‌ها: مخزن آب، نوسان آب، مقایسه شکل، مدل عددی، پر و نیمه پر

### چکیده

مخازن ذخیره آب از جمله سازه‌های مهم و ضروری می‌باشند که لازم است در زمان‌های بحرانی مانند زمان پس از وقوع زلزله، قابل بهره‌برداری باشند. با توجه به اینکه در این سازه‌ها قسمت اعظم جرم در فاصله قابل ملاحظه‌ای از فونداسیون قرار می‌گیرد، شناخت عملکرد این سازه‌ها تحت اثر نیروهای جانبی وارده جهت تأمین کارایی در زمان زلزله مهم است. در مخازن ذخیره آب علاوه بر نیروهای اینرسی، لازم است فشارهای هیدرودینامیکی آب را مد نظر قرارداد. هنگام وقوع زلزله، آب موجود در مخازن دچار نوسان شده و نیروهای هیدرودینامیکی قابل توجهی به جداره آن‌ها وارد می‌کند. در صورتی که این نیروها در طراحی به درستی لحاظ نشوند، باعث تخریب جداره مخزن می‌شوند. در این تحقیق با استفاده نرم‌افزار Flow3D ابتدا واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی محققین دیگر انجام شده است. پس از مشاهده دقت مدل عددی و انتخاب اندازه سلول‌های حل، سه مخزن با هندسه مکعبی و کروی و استوانه‌ای، در حالت پر و نیمه پر شبیه‌سازی شده و عملکرد آن‌ها از لحاظ ارتفاع امواج سطحی به وجود آمده در اثر تغییر مکان هارمونیک بررسی شده است. همچنین میزان میرایی هر مخزن محاسبه شده و فشار هیدرودینامیک ناشی از این ارتعاش نیز مورد بحث قرار گرفته شده است.

### مقدمه

یکی از مسائل مهم در هنگام وقوع زلزله و بعد از آن، سالم ماندن تأسیسات سرویس‌دهی به خسارت دیدگان است. مخازن ذخیره آب و ذخیره سوخت پس از بحران باید پابرجا بوده و به عملکرد ایمن خود ادامه دهند. به این دلیل مخازن فوق از گذشته مورد توجه آیین‌نامه‌ها و محققین بوده‌اند. آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران (۱۳۸۴) ضریب اهمیت ۱/۴ را برای مخازن ذخیره آب ارائه کرده که نشان‌دهنده اهمیت بالای این مخازن است. امروزه مخازن ذخیره آب با اشکال هندسی مختلفی اجرا و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در این تحقیق سه مخزن با هندسه مکعبی و کروی و استوانه‌ای که از متداول‌ترین اشکال اجرا شده هستند، به صورت عددی مدل شده‌اند. عملکرد هر یک تحت تغییر مکان هارمونیک بررسی شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات متعددی در زمینه تحلیل و بررسی دینامیکی مخازن ذخیره مایعات صورت گرفته که در ادامه به طور مختصر شرح داده شده‌اند.

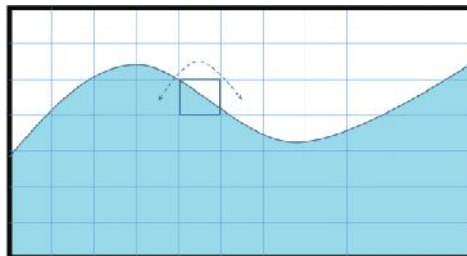
ایده در نظر گرفتن فشار هیدرودینامیکی ناشی از وقوع زلزله، از اوایل دهه ۱۹۳۰ در رابطه با طرح تعدادی از سدهای بلند در مناطق زلزله خیز شکل گرفت. اولین راه حل برای این مساله توسط (Westergard 1933) ارائه شد. او با صرف نظر از اثرات تراکم‌پذیری آب و تاثیر امواج سطحی (به دلیل عمق نسبی زیاد مخزن)، فشار هیدرودینامیک ایجاد شده روی وجه قائم دیواره صلب یک سد با مخزن بینهایت را در اثر تحریک هارمونیک به دست آورد. حاصل این مطالعه، رابطه معروف وسترگارد می‌باشد که برای مدت طولانی به صورت گسترده در طرح سازه‌های هیدرولیکی مختلف بکار گرفته شده است. اولین جمع‌بندی مناسب و کاربردی برای تحلیل دینامیکی مخازن توسط (Housner 1957) ارائه شد.



این محقق با یک روش تقریبی و با استفاده از مشتقات جزئی و سری‌های نامتناهی، یک مدل ساده، برای بررسی اثرات دینامیکی سیال در مخازن صلب استوانه‌ای و مستطیلی تحت اثر حرکت افقی زلزله ارائه نمود. او فشار هیدرودینامیک سیال را به دو قسمت فشار نوسانی و فشار انتقالی تقسیم کرد و با هدف ساده سازی رفتار مایع، نسبت به ارائه یک مدل دینامیکی معادل به صورت سیستم جرم- فنر اقدام کرد. استفاده از مدل جرم و فنر او، به منظور تخمین پاسخ دینامیکی مخازن استوانه‌ای و مستطیلی بسیار رایج می‌باشد. او همچنین با به‌کارگیری مدل جرم- فنر مذکور، یک آنالیز دینامیکی ساده بر اساس طیف پاسخ برای مخازن هوایی ارائه کرد. در تحقیقات بعدی (Chalhoub 1987) روابطی را برای اندازه‌گیری فشار هیدرودینامیک و ارتفاع امواج سطحی در مخازن استوانه‌ای پیشنهاد کرد. (Chen and Kianush 2004) یک روش برای محاسبه فشار هیدرودینامیک در مخازن مستطیلی دوبعدی پیشنهاد دادند که اثر انعطاف‌پذیری جداره را نیز لحاظ می‌کند. همچنین میزان تأثیر مؤلفه قائم زلزله در پاسخ دینامیکی مخازن مستطیلی بتنی توسط همین محققین مورد بررسی قرار گرفته است.

## مدل‌سازی

در نرم‌افزار Flow3D از روش‌های  $VOF^1$  و  $FAVOR^2$  به منظور مدل‌سازی مایع در محیط صلب استفاده شده است. این روش‌ها زیرمجموعه روش عددی جزء حجمی است و در آن‌ها ناحیه‌ای که باید مدل شود، به شبکه‌ای از المان‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود. برای هر یک از المان‌های سیال، مقادیر میانگین حجمی از متغیرهای جریان، نظیر فشار و سرعت ذخیره می‌شود. برای جریان‌های با سطح آزاد، سلول‌های پیکره مدل شده که در زیر سطح آزاد قرار گرفته‌اند پر و تعدادی از سلول‌هایی که در سطح جریان قرار دارند، نیمه پر هستند. برای نشان دادن وضعیت سلول‌ها از کمیتی به نام  $f$ ، که بیانگر نسبت حجمی از سیال که از مایع پر شده بر حجم سلول، استفاده می‌شود. این کمیت تابع حجم سیال یا  $VOF$  نامیده می‌شود. مقدار  $f$  برای سلول‌های پر برابر با ۱ و برای سلول‌های خالی مقدار صفر و برای سلول‌های نیمه پر سطح آزاد دارای مقداری بین صفر و ۱ می‌باشد. تعیین زاویه سطح آزاد نیز با کنترل کردن مقادیر سیال در سلول‌های مجاور انجام‌پذیر است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بخش عمده سیال در داخل یک سلول سطحی به سلول مجاور با سیال بیشتر نزدیک است. مزیت بزرگ روش  $VOF$  این است که سیال در داخل یک شبکه ثابت جریان دارد و هیچ‌گونه تغییر شکل و جابجایی شبکه وجود ندارد. همچنین برای تعیین هندسه صلب روش  $FAVOR$  بکار برده می‌شود. زمانی که در هر سلول، حجم اشغال‌شده توسط بدنه صلب مشخص باشد با این روش می‌توان مرز صلب را در داخل شبکه ثابت مشخص کرد. این مرز برای تعیین شرایط مرزی دیواره که جریان باید از آن تبعیت کند، بکار برده می‌شود. در مدل‌سازی مخازن مورد مطالعه از شرط مرزی دیواره<sup>۳</sup> برای جداره مخزن استفاده شده است. همچنین در واسنجی از مدل آشفتگی RNG به جهت نزدیک‌تر شدن نتایج به داده‌های آزمایشگاهی، استفاده شده است.



شکل ۱: نحوه مشخص شدن محل و زاویه سطح آزاد با روش  $VOF$

## نحوه بارگذاری

تغییر مکان جانبی اعمال‌شده به مخزن به صورت هارمونیک بوده و در رابطه (۱) نشان داده شده است.

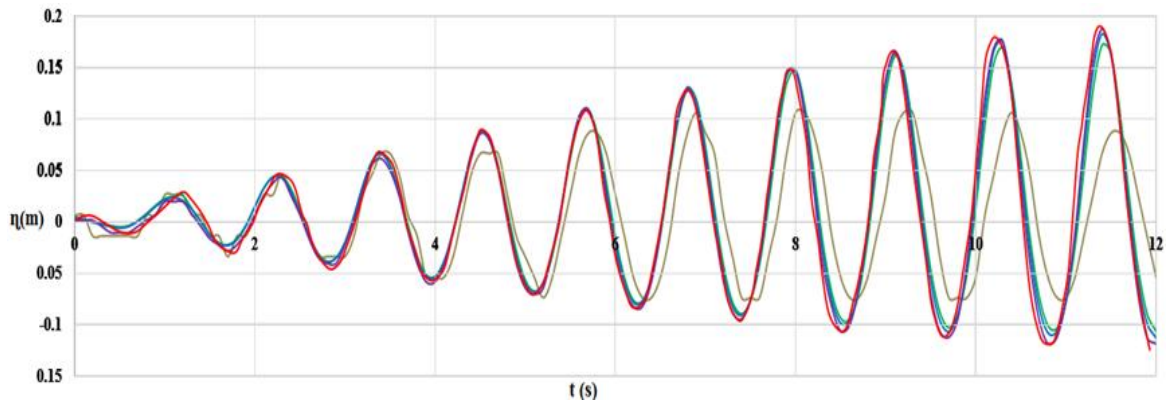
$$X(t) = D \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

در این رابطه  $D$  دامنه تغییر مکان،  $X(t)$  بار اعمال‌شده در زمان  $t$ ،  $\omega$  بیانگر فرکانس آن و  $\phi$  مقدار فاز اولیه حرکت نوسانی می‌باشد.

- 1- Volume Of Fluid
- 2- Fractional Area-Volume Obstacle Representation
- 3- Mesh
- 4- Wall boundary condition



برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل از داده‌های آزمایشگاهی (Goudarzi and Sabbagh-Yazdi 2012) استفاده شده است. در تحقیق آن‌ها از یک مخزن مستطیلی با ابعاد داخلی  $1 \times 0.44 \times 0.96$  (طول  $\times$  عرض  $\times$  ارتفاع) متر و ضخامت  $0.02$  متر استفاده شده است. این مخزن تحت بارگذاری هارمونیک، آزمایش شده و چگونگی نوسان آب در آن توسط این محققین مورد بررسی قرار گرفته شده است. در ادامه به جهت واسنجی مطمئن، مخزن مدل‌سازی شده در این تحقیق نیز، با همین ابعاد و شرایط تغییر مکان جانبی، در نرم‌افزار مدل شده و با حالت‌های مختلف فرکانس و عمق، صحت‌سنجی شده است. در شکل ۱ نمودار تغییرات ارتفاع امواج سطحی طی مدت ۱۲ ثانیه در لبه جداره مخزن با عمق  $0.624$  متر، تحت تغییر مکان جانبی  $5$  میلی‌متر با فرکانس  $5/615$  رادیان بر ثانیه رسم شده است. همچنین مدل‌سازی عددی انجام شده با ابعاد مختلف شبکه حل نیز در این شکل بررسی شده است.



شکل ۲: بررسی دقت مش محاسباتی برای تغییرات ارتفاع امواج سطحی طی ۱۲ ثانیه

بر اساس نتایج دست آمده در شکل ۱ ملاحظه می‌گردد که در مسئله حاضر برای مش‌های محاسباتی مدل‌سازی، جواب‌ها بسیار نزدیک شده و با کوچک‌تر کردن ابعاد مش، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در جواب‌ها ایجاد نمی‌شود. جدول ۱ به ازای اندازه‌های مختلف مش، بیش‌ترین مقادیر خطای نتایج مدل عددی با آزمایشگاهی را طی مدت شبیه‌سازی نشان می‌دهد. با توجه به این مطلب و افزایش شدید زمان محاسبات، در ادامه این مطالعه، شبیه‌سازی‌های ارائه شده با ابعاد مش  $8$  میلی‌متر با در نظر قرار دادن  $3/8$ ٪ خطا مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱: نمایش مقدار خطای محاسباتی داده‌های عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی




اندازه مش	۲۰ میلی‌متر	۱۰ میلی‌متر	۸ میلی‌متر	۶ میلی‌متر
بیش‌ترین مقدار خطا٪	۵۴/۳	۱۲/۱	۳/۸	۲/۹

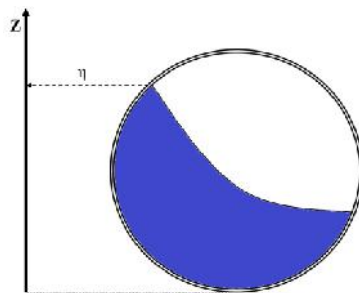
### بررسی اثرات هندسه مخزن بر ارتفاع امواج سطحی

در این تحقیق به منظور بررسی اثرات هندسه مخزن، از سه مخزن با ابعاد منتظم مکعبی، استوانه‌ای و کروی استفاده شده است. هر سه مخزن با حجم یک متر مکعب در نظر گرفته شده‌اند و مقادیر قطر و ارتفاع در نظر گرفته شده برای آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. به منظور بررسی ارتفاع امواج سطحی در مخازن ذکر شده، هر سه مخزن در حالت نیمه پر با حجم آب  $0.5$  متر مکعب در نظر گرفته شده‌اند. در این حالت تراز اولیه آب برای سه مخزن متفاوت است و مقادیر آن در جدول ۲ نشان داده شده است. در ادامه به منظور محاسبه ارتفاع امواج سطحی، مقادیر اولیه تراز آب در حالت نیمه پر از عمق امواج کسر شده و مقادیر به دست آمده با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در مخازن مکعبی و استوانه‌ای ارتفاع امواج سطحی در لبه جداره مخازن بررسی شده است. اما در مخزن کروی به دلیل انحنای جداره مخزن بررسی این امواج امکان‌پذیر نبوده، لذا همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است برای مقایسه ارتفاع امواج به وجود آمده در مخزن کروی، از تصویر ارتفاع تر شدگی جداره روی محور  $Z$  استفاده شده است.

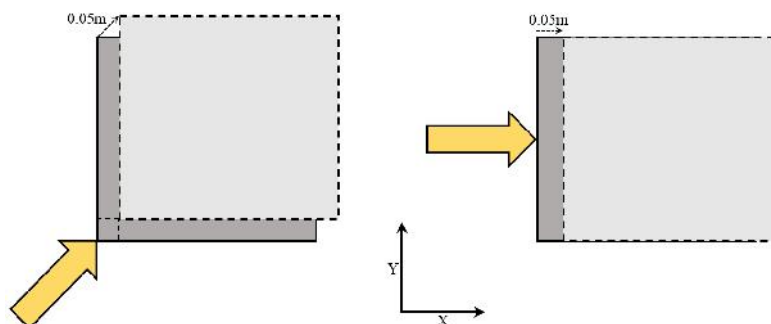
جدول ۲: مشخصات هندسی مخازن مورد بررسی

شکل ۱ (مکعبی)	شکل ۲ (کروی)	شکل ۳ (استوانه‌ای)	نمای سه بعدی
			
۱	۱	۱	حجم (m <sup>3</sup> )
۱	---	۱/۰۹	ارتفاع (m)
---	۱/۲۴	۱/۰۸	قطر (m)
۰/۵	۰/۶۲	۰/۵۴۵	تراز اولیه آب در مخزن (m)



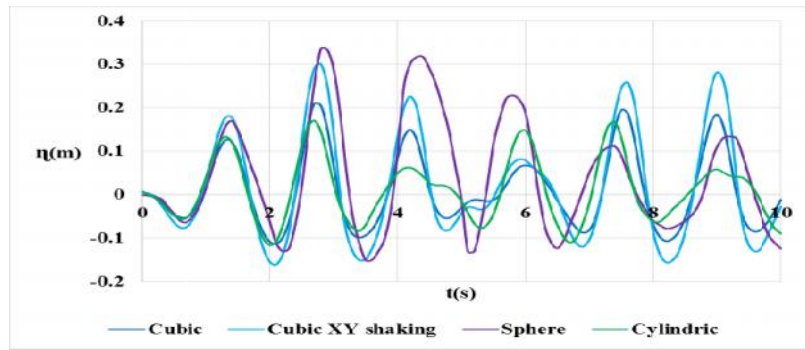
شکل ۳: نحوه تصویر کردن ارتفاع جداره تر شده بر محور Z در مخزن کروی شکل

در رابطه با مخزن کروی و استوانه‌ای، راستای تغییر مکان جانبی وارد شده به مخزن به دلیل تقارن مرکزی هندسه این مخازن در صفحه XY، تأثیری در نتایج نخواهد داشت. اما در رابطه با مخزن مکعبی این موضوع حائز اهمیت بوده و در نتایج و میزان ارتفاع امواج سطحی تأثیر قابل توجهی دارد. بنابراین در این تحقیق همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده، تغییر مکان جانبی مخزن مکعبی در دو حالت یک جهته در راستای محور X و دو جهته در راستای ناحیه XY در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است تغییر مکان جانبی دو جهته XY به گونه‌ای لحاظ شده که فرکانس ارتعاش در هر دو جهت X و Y برابر با ۴ رادیان بر ثانیه و تغییر مکان در هر دو جهت برابر با ۰/۳۵۳۶ متر در نظر گرفته شده که برآیند آن برابر با ۰/۰۵ متر می‌شود.



شکل ۴: نحوه اعمال تغییر مکان یک جهته و دو جهته در پلان مخزن مکعبی شکل

در ادامه مخازن با اعمال شرایط بارگذاری هارمونیک ذکر شده با فرکانس ۴ رادیان بر ثانیه و دامنه ۵۰ میلی‌متر، طی مدت ۱۰ ثانیه ارتعاش داده شده‌اند. این فرکانس و دامنه تغییر مکان جانبی به گونه‌ای فرض شده‌اند که مشابه مقادیر واقعی پدیده ارتعاش مخازن بوده و همچنین همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، این فرکانس به جهت قابلیت مقایسه بین مخازن و پیش‌گیری از پدیده رزونانس، برابر با فرکانس طبیعی هیچ‌کدام از مخازن نمی‌باشد. جهت نمایش اثرات هندسه مخزن بر امواج سطحی (η)، در شکل ۵ نمودار تغییرات ارتفاع امواج سطحی در لبه جداره مخزن برای مخزن استوانه‌ای و مکعبی با ارتعاش یک جهته، همچنین در محل تلاقی جداره‌ها در گوشه مخزن برای مخزن مکعبی تحت ارتعاش دو جهته و همان طور که قبلاً ذکر شد تصویر ارتفاع مربوط به جداره تر شده برای مخزن کروی، رسم شده است.



شکل ۵: نمودار تغییرات ارتفاع امواج سطحی در مخازن مکعبی و کرووی و استوانه‌ای طی مدت ۱۰ ثانیه

در شکل ۵ با مقایسه ارتفاع امواج سطحی ملاحظه می‌شود که به طور کلی عملکرد مخزن استوانه‌ای نسبت به دیگر مخازن بهتر بوده و در مخزن کرووی نسبت به سایر مخازن امواج سطحی بلندتری تشکیل شده است. شایان ذکر است که از نظر فیزیکی در مخزن کرووی به علت انحنای جداره مخزن، امواج با زاویه به جداره برخورد کرده و عملاً هرچه ارتفاع موج بیشتر شود زاویه برخورد آن با جداره و مؤلفه عمود بر جداره نیروی وارد شده کمتر می‌شود. همین امر سبب کاهش اثرات برخورد ضربه ناشی از امواج سطحی به جداره‌ها می‌شود.

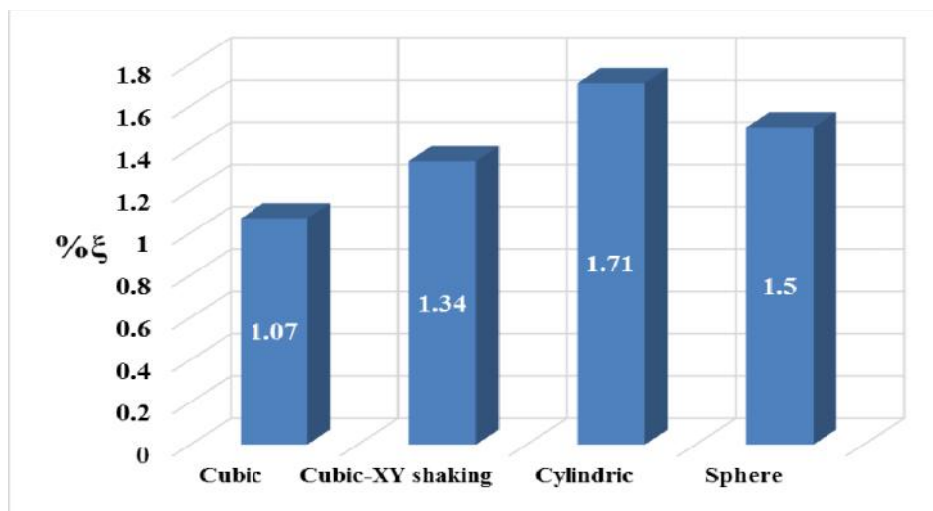
### بررسی اثرات هندسه مخزن بر میرایی

برای دست آوردن ضریب میرایی مخازن در هندسه‌های مکعبی، استوانه‌ای و کرووی از روش کاهش دامنه لگاریتمی که (Ibrahim R.A., 2005) در تحقیقات خود ارائه کرده، استفاده شده است. برای این منظور در تحقیق فوق ابتدا مخزن نیمه پر با عمق آب اولیه ذکر شده در جدول ۲ را تحت فرکانس ۴ رادیان بر ثانیه تغییر مکان ۰/۵ متر ارتعاش داده و پس از طی ۱۰ ثانیه ناگهان بارگذاری را متوقف کرده تا امواج به وجود آمده در مخزن روند نزولی به خود بگیرند. سپس با استفاده از رابطه ۲ و با داشتن حداکثر ارتفاع امواج در نوسانات متوالی پس از توقف بارگذاری، ضریب میرایی مربوط به هر مخزن محاسبه شده است.

$$\frac{2\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{1}{n} \ln \frac{D_i}{D_{i+n}} \quad (2)$$

در رابطه ۲،  $\xi$  ضریب میرایی،  $n$  تعداد نوسان‌های در نظر گرفته شده برای محاسبه میرایی،  $D_i$  بیشینه ارتفاع امواج سطحی در نوسان  $i$  ام و  $D_{i+n}$  بیشینه ارتفاع امواج سطحی در نوسان  $i+n$  ام، می‌باشد.

در شکل ۶ ضریب میرایی مخازن جهت مقایسه و تأثیر هندسه مخازن در ضریب میرایی برای حالت‌های مختلف هندسه مخزن، ترسیم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مخزن استوانه‌ای نسبت به سایر هندسه‌های مخزن دارای درصد میرایی بالاتری می‌باشد. هرچقدر مقدار این ضریب بیشتر باشد، به معنی کاهش سریع‌تر دامنه نوسانات و به دنبال آن کاهش صدمات وارد شده به مخزن در زمان وقوع زلزله می‌باشد.



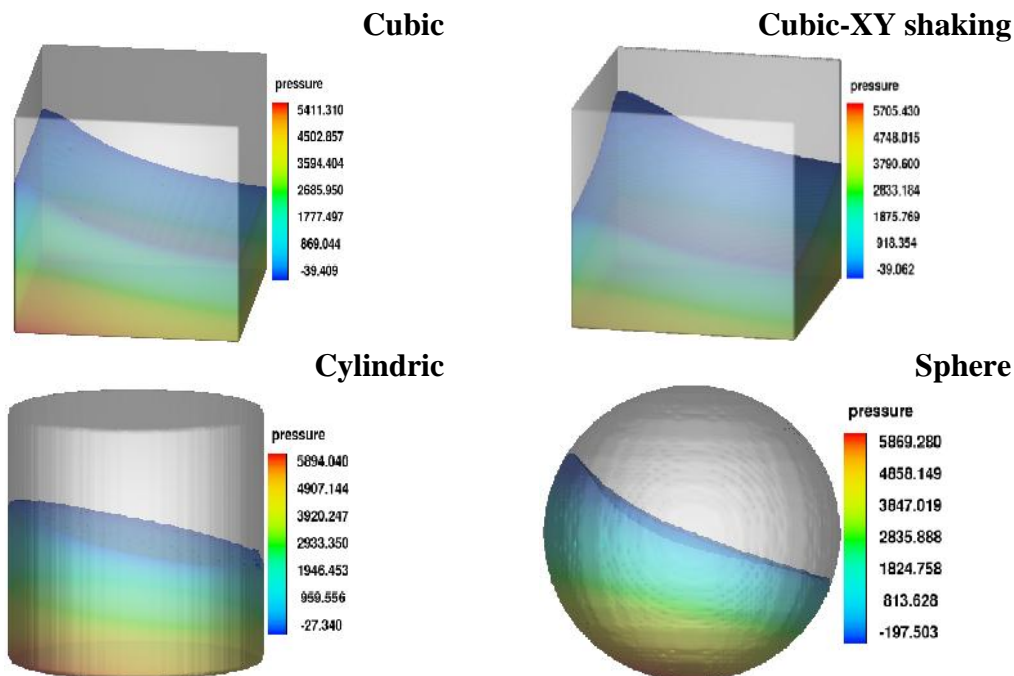
شکل ۶: نمایش درصد میرایی مربوط به هندسه‌های مختلف مخزن



## بررسی اثرات هندسه مخزن بر مقادیر فشار هیدرودینامیک در حالت مخزن نیمه پر

در این بخش به منظور بررسی هندسه مخزن بر مقادیر فشار هیدرودینامیک، مخازن در حالت نیمه پر و با مقادیر اولیه عمق ذکر شده در جدول ۲ و شرایط تغییر مکان جانبی  $0.05$  متر و فرکانس  $4$  رادیان بر ثانیه، تحت ارتعاش قرار داده شدند. در شکل ۷ نمای سه بعدی از مدل عددی انجام شده پس از  $2/8$  ثانیه ارتعاش با شرایط مذکور، نمایش داده شده است.

در این شکل مقادیر فشار هیدرودینامیک به صورت نسبی (نسبت به فشار اتمسفر) بر حسب پاسکال توسط کانتورهای رنگی نمایش داده شده است. همچنین مخازن به صورت صلب و با حجمی بسته فرض شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود مقادیر فشار منفی ایجاد شده در مخزن در حالت کروی دارای بیشینه مقدار و بیش از  $7$  برابر کمترین مقدار خود در حالت استوانه‌ای می‌باشد. همچنین فشار منفی ایجاد شده توسط امواج سطحی ناشی از نیروی زلزله می‌تواند باعث آسیب‌دیدگی سقف مخزن و در مواردی موجب ریزش سقف مخزن شود. نتایج نشان می‌دهد، فشار منفی ایجاد شده در بالای سطح آزاد آب در حالت استوانه‌ای، از سایر حالات کمتر می‌باشد که این خود نشان‌دهنده میزان کمتر مکش در مخزن و آسیب وارده کمتری به سقف مخزن در حالت زلزله می‌شود. در رابطه با مقادیر فشار مثبت ایجاد شده در مخازن، در حالت استوانه‌ای مقدار این فشار اندکی بیش از سایر حالات می‌باشد و مشاهده می‌شود که این مقادیر تفاوت قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر ندارند. لازم به ذکر است تنها در حالت مکعبی با ارتعاش یک جهته این مقدار کاهش محسوسی داشته، اما باید توجه داشت که احتمال هم راستا شدن جهت ارتعاش با راستای قرارگیری مخزن مکعبی در واقعیت ضعیف می‌باشد.

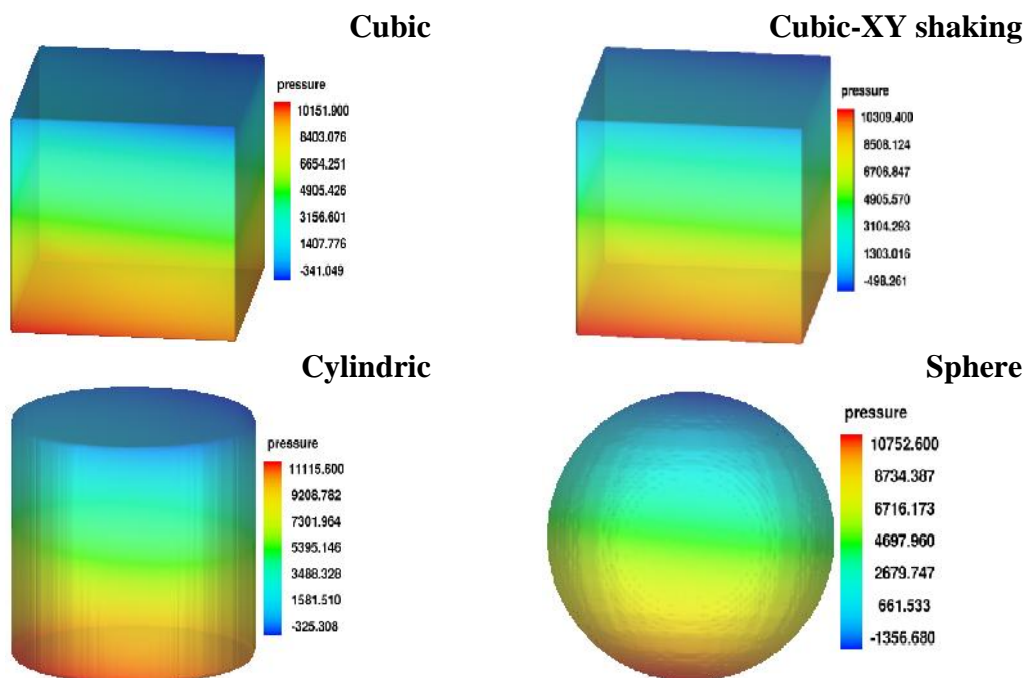


شکل ۷: مقادیر فشار هیدرودینامیک بر حسب پاسکال در مخزن نیمه پر طی  $2/8$  ثانیه ارتعاش

## بررسی اثرات هندسه مخزن در حالت مخزن پر

در بررسی مخازن در حالت پر، عملاً امواج سطحی در مخزن تشکیل نمی‌شود، به همین جهت در این بخش اثر هندسه مخزن بر مقادیر فشار هیدرودینامیک بررسی شده است. همانند حالت نیمه پر مخازن با تغییر مکان جانبی  $0.05$  متر و فرکانس  $4$  رادیان بر ثانیه، تحت ارتعاش قرار داده شدند. در شکل ۸ نمای سه بعدی از مدل عددی انجام شده پس از  $2/8$  ثانیه ارتعاش با شرایط مذکور، نمایش داده شده است.

ملاحظه می‌شود مقادیر فشار منفی در مخزن در حالت کروی دارای بیشینه مقدار و بیش از  $4$  برابر کمترین مقدار خود در حالت استوانه‌ای می‌باشد. در بررسی مقادیر فشار مثبت ایجاد شده در مخازن، در حالت استوانه‌ای مقدار این فشار اندکی بیش از سایر حالات می‌باشد و مشاهده می‌شود که این مقادیر تفاوت قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر ندارند.



شکل ۸: مقادیر فشار هیدرودینامیک بر حسب پاسکال در مخازن پر طی ۲/۸ ثانیه ارتعاش

## نتیجه گیری

- در بررسی اثرات شکل مخزن بر مقادیر ارتفاع امواج سطحی و میزان میرایی و فشار هیدرودینامیک مربوط به آن‌ها نتایج به شرح زیر حاصل می‌شود:
- در رابطه با اثر شکل مخزن بر ارتفاع امواج سطحی نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد عملکرد مخازن استوانه‌ای نسبت به سایر مخازن مناسب بوده و امواج با ارتفاع کمتری مشاهده شده است. همچنین همان طور که ذکر شد، در مخازن کروی به علت انحنای جداره مخزن، امواج با زاویه به جداره برخورد کرده و همین امر سبب کاهش اثرات برخورد ضربه ناشی از امواج سطحی به جداره‌ها می‌شود.
  - در زمینه بررسی میرایی حاصل از مخازن، نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد ضریب میراییمخزن استوانه‌ای نسبت به سایر مخازن مقدار بیشتری داشته است. میرایی بیشتر سبب کاهش سریع‌تر ارتفاع امواج سطحی و در نهایت کاهش میزان خسارت‌های وارده به مخزن می‌شود.
  - نتایج حاصل از فشار هیدرودینامیک به وجود آمده به واسطه ارتعاش در مخازن نیمه پر نشان می‌دهد در مخزن استوانه‌ای کمترین میزان فشار منفی به وجود آمده است. در زمینه فشار مثبت مخزن مکعبی عملکرد بهتری داشته اما به طور کلی مقادیر فشار مثبت در مخازن تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشته است.
  - در زمینه مخازن پر همان طور که ذکر شد، عملاً امواج سطحی در مخزن تشکیل نمی‌شود، به همین جهت اثر هندسه مخازن بر مقادیر فشار هیدرودینامیک بررسی شده است. در بررسی نتایج مشاهده می‌شود در مخزن استوانه‌ای مقادیر فشار منفی کمتری نسبت به سایر مخازن به وجود آمده است. همچنین در بررسی مقادیر فشار مثبت، در مخزن مکعبی فشار کمتری ایجاد شده اما همانند حالت نیمه پر مقادیر فشار مثبت در مخازن تفاوت قابل ملاحظه‌ای نداشته است.

## مراجع

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (۱۳۸۴) آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۸۴-۲۸۰۰، تهران، ایران

Chalhoub MS(1987)Theoretical and experimental studies on earthquake isolation and fluidContainers, Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, US

GoudarziAliandSabbagh-Yazdi Reza (2012)Investigation of nonlinear sloshing effects in seismically excited tanks,*Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, pp 355-365

Housner G (1957) Dynamic pressure on accelerated containers, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47, pp15-35

Ibrahim RA (2005)Liquid sloshing dynamics, Theory and Applications, Cambridge University Press, Cambridge, UK

KianoushMR and Chen JZ (2004) Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks,*Journal of Engineering Structures*

Westergard HM (1933) Water pressure on dams during earthquakes, *transactions ASCE*, Vol.98:418-472

