



بررسی رفتار کمانشی مخازن استوانه ای فولادی روزمینی مهارنشده تحت اثر توأم سه مؤلفه زلزله نزدیک گسل

مطهره نیاز^{۱*}، علی نیکخو^۲، نادر خواجه احمد عطاری^۳

^۱ دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران.

^۲ استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران. ^۳ استاد، بخش سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

چکیده

حفظ سلامت مخازن ذخیره سوخت و سایر سیالات پس از وقوع زلزله از نکات بسیار مهم برای هر کشور زلزله خیز است؛ بنابراین مطالعه رفتار دینامیکی آنها حین زلزله مورد اهمیت است. در این مطالعه شبیه‌سازی مخزن و سیال درون آن با یافتن بهترین حالت برای مدل‌سازی اندرکنش سازه-سیال در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS صورت گرفته است که به بررسی رفتار کمانشی یک مخزن استوانه ای فولادی روزمینی مهارنشده، ساخته شده در انبار نفت ملایر تحت اثر هفت رکورد حوزه نزدیک زلزله پرداخته است؛ همچنین علیرغم مطالعات گذشته برای نخستین بار، هر سه مولفه رکوردهای زلزله یعنی دو مولفه افقی و یک مولفه قائم توأما به مخزن حاوی سیال اعمال شده‌اند. نکته حائز اهمیت دیگر، تفاوت رفتار کمانشی الماسی شکل مخزن مهارنشده در این مطالعه با رفتار کمانشی مخازن مهارشده در مطالعات گذشته است، که معمولاً پافیلی و زانوفیلی گزارش شده‌است. در بررسی نتایج تحلیل‌ها مشاهده می‌شود که بیشتر تغییرشکل‌های شعاعی روی جداره در ارتفاع حدوداً ۱۰/۵ متری از سطح زمین به علت اثر تلاطم امواج و ضخامت کمتر جداره در این ناحیه رخ می‌دهد که می‌توان با تقویت این محدوده از نشت محتویات درون مخزن در زلزله جلوگیری کرد.

کلمات کلیدی: رفتار لرزه‌ای مخازن؛ مخازن روزمینی؛ کمانش مخازن فولادی؛ مخازن مهارنشده.

Investigation of the buckling behavior of cylindrical unanchored steel storage tank under near field 3-D seismic loading

M.Niaz^{1,*}, A.Nikkhoo², N.K.A. Attari³

¹ Ph.D. Student of Structural Engineering in University of Science and Culture, Tehran, Iran.

² Prof., Faculty of Civil Engineering of University of Science and Culture, Tehran, Iran.

³ Prof., Road, Housing and Urban Development Research Center.

Abstract

Maintaining the health of oil and other fluid storage tanks after an earthquake is one of the most important points for any earthquake-prone country. By examining the dynamic response of storage tanks in past earthquakes, it can be seen that steel storage tanks are more vulnerable than concrete tanks. Therefore, it is more important to investigate the seismic behavior of steel tanks. In this study, tank and the fluid inside it and interaction between fluid and structure in the ABAQUS software is simulated, to investigate the buckling behavior of an unanchored broad cylindrical steel storage tank built in Malayer. some near field earthquakes records are applied to storage tank. and all three components of these records, have been considered. the radial displacement of wall of the tank after the earthquake indicate the diamond-shaped buckling mode due to the significant effects of slashing. It should also be mentioned that the most deformations are observed at a height of 10.5 meters from the ground level on the wall of the tank, which due to the lower thickness of the sheet in the upper courses of the wall it can be strengthened in order to prevent the leaking of fluid inside the tank.

Keywords: Steel storage tanks; unanchored tanks; seismic behavior of storage tanks; buckling of storage tanks.

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

یکی از مسائل مهم در کاهش تلفات ناشی از زلزله و سرویس دهی بعد از آن تامین مقاومت و عملکرد مناسب شریان های حیاتی هنگام زلزله است. از مهم ترین شریان های حیاتی، می توان به مخازن روزمینی فلزی ذخیره آب و سوخت و فرآورده های نفتی و پتروشیمی اشاره کرد؛ همچنین جهت حفظ سلامت مخازن و بهره برداری از آن ها پس از وقوع زلزله، می بایست اطمینان از عملکرد مناسب مخازن، خطوط لوله و اتصالات خطوط لوله ملحق به مخازن حاصل شود. با بررسی اثرات جابجایی های افقی و قائم ناشی از زلزله روی این سازه ها، این امکان فراهم می شود که با طراحی مناسب تر و اندیشیدن تمهیدات لازم، از اثرات مخرب جابجایی ها که منجر به نشت محتویات درون مخازن می شود، جلوگیری بعمل آید.

در خصوص تقسیم بندی و معرفی انواع مخازن از نظر نوع سازه می توان به زمینی، هوایی و تحت فشار، متکی بر پی یا ساز ای دیگر تقسیم کرد. مخزن زمینی می تواند کاملاً روی زمین، نیمه مدفون یا کاملاً مدفون باشد. مخزن هوایی روی • تنش های فشاری محوری که از حد تنش بحرانی تجاوز کرده اند با تنش کششی حلقوی نزدیک به حد تسلیم حاصل می شود)

- تخریب سقف مخزن و ناحیه ی بالایی دیواره بر اثر امواج حاصل از حرکت نوسانی سیال
- گسیختگی جداره و تمرکز تنش در اطراف مهارهای مخزن به پی یا پایه
- لغزش مخزن زمینی ناشی از غلبه نیروی افقی زلزله بر مقاومت اصطکاکی
- آسیب به اتصالات غیر انعطاف پذیر لوله ها و دیگر تجهیزات متصل به مخزن، کنده شدن جوش بین کف و جداره، نشست نسبی پی، بدلیل برکنش کف از زمین در مخازن مهار نشده یا با مهار نسبی
- آتش سوزی پس از زلزله، غالباً به دلیل شکست اتصالات یا خروج سیال قابل اشتعال از محل سقف به ویژه در مخازن با سقف شناور

سازه ی نگهدارنده ای در ارتفاعی بالاتر از سطح زمین استقرار می یابد. مخزن تحت فشار، معمولاً با حجم کوچکتری، روی پی، پایه ویژه خود یا سازه دیگری نصب می شود. مخزن می تواند از فلز، بتن مسلح، بتن پیش تنیده، مصالح بنایی یا از دیگر مصالح مناسب ساخته شود. مخازن زمینی فلزی به دو دسته مهار نشده و با مهار مکانیکی تقسیم می شوند. اگر مخزن فلزی متکی بر زمین به کمک وزن خود و مایع داخل آن مقابله با واژگونی را تامین نماید، مهار نشده و اگر توسط میل مهار، تسمه و یا سایر ادوات مکانیکی به پی مهار شده باشد، مخزن با مهار مکانیکی نامیده می شود.

اصولاً در طراحی لرزه ای مخازن، انواع آسیب های محتمل ناشی از زلزله مانند موارد زیر منظور می شود:

- کمانش پافیلی ناشی از تنش فشاری در جداره مخزن (مود کمانش پافیلی غالباً در خارج از جداره مخزن و پیرامون کف مخزن بروز پیدا می کند. این حالت کمانش در مخازن با نسبت ارتفاع به قطر کم رخ می دهد و مطالعات نشان می دهند که کمانش پافیلی از ترکیب

امروزه به کمک تجربه عملکرد سازه ها در گذشته و پیشرفت ابزار محاسباتی تلاش بر این است تا با کمترین هزینه در سریعترین زمان ممکن دقیقترین تحلیل از رفتار لرزای سازه با در نظر گرفتن همه پارامترهای موثر انجام و پیرو این تحلی ، طراحی بهینه انجام گیرد.

بررسی و محاسبه فشار هیدرودینامیکی ناشی از زلزله روی سازه از اوایل دهه ۱۹۳۰ در رابطه با طراحی سدهای بلند در مناطق زلزله خیز شکل گرفت. در سال ۱۹۳۳ اولین پیشنهاد توسط وسترگارد^۱ [۱] ارائه شد. وی فشار هیدرودینامیکی روی دیواره صلب یک سد بامخزن بینهایت را تحت اثر تحریک هارمونیک بدست آورد. پس از آن در سال ۱۹۳۴ ژاکوبسن^۲ و هاسکینز^۳ [۲] چگونگی رفتار لرزه ای مخازن مستطیلی با جداره صلب بر بستر غیر انعطاف پذیر را به روش تحلیلی و آزمایشگاهی انجام دادند، با توجه به صلب بودن دیواره و کف مخزن توجه صرفاً به پاسخ دینامیکی مایع داخل مخزن معطوف شد .

¹ westergard

² Jacobsen

³ Hoskins

تحریک ورودی به سیستم باشد. بر این اساس برش پایه و لنگر واژگونی محاسبه شده در مخازن با فرض صلبیت جداره مخزن در جهت اطمینان نیست، آنها از روش رایلی-ریتز^۷ برای بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی پوسته پر از مایع استفاده کردند. لیو^۸ [۸] در ۱۹۸۱ اثرات غیرخطی تغییرشکلهای بزرگ و کمانش دینامیکی جداره مخازن را تعیین کرد. هارون^۹ و هاوزنر^{۱۰} [۹] در ۱۹۸۲ از تئوری انتگرال مرزی برای یافتن ماتریس جرم افزوده سیال استفاده کردند و نتیجه این روش منجر به توسعه یک فرایند طراحی لرزه‌ای پیشرفته برای مخازن شد. در ادامه بالندرا^{۱۱} [۱۰] از روش اجزا محدود مستقیم برای بررسی مخازن انعطاف پذیر با این تفاوت استفاده کرد که متغیر مستقل در سیال دامنه فشار دینامیکی بود. افرادی نظیر ملهوترا^{۱۲} [۱۱] [۱۲] و همدان^{۱۳} [۱۳] در توسعه تحقیقات کوشیدند.

بلند شدگی کف مخازن مهار نشده توسط ملهوترا و ولتسوس [۱۴] مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که بلندشدگی کف مخزن از نیروهای هیدرو دینامیک وارد بر جداره مخزن می‌کاهد، اما موجب افزایش تنش‌های محوری دیواره مخزن می‌شود، ملهوترا [۱۱] بلند شدگی مخزن قرار گرفته روی بستر انعطاف‌پذیر را مورد توجه قرار داد. منظور از مخازن با بستر انعطاف‌پذیر در این تحقیقات، مخازنی هستند که مستقیماً روی خاک واقع شده‌اند. نتایج این بررسی نشان داد که در مخازن قرار گرفته روی بستر انعطاف پذیر بلند شدگی موجب افزایش چندان‌ی در تنش‌های محوری دیواره مخزن نمی‌گردد. از این رو این گونه مخازن کمتر به مساله کمانش پافیلی حساس می‌باشند؛ لیکن تغییر مکان‌های شالوده مخزن در این سیستم قابل توجه می‌گردد و تغییر شکل‌های پلاستیک ایجاد شده در لبه‌های ورق کف چنین مخزنی قابل توجه است. بالا بودن دامنه تغییر شکل‌ها در این موضع می‌تواند منجر به ایجاد خستگی در اتصال ورق کف به پوسته دیواره گردد. بارتون^{۱۴} و پارکر^{۱۵} [۱۵] در ۱۹۸۷ از روش المان محدود برای تحلیل پاسخ لرزه‌ای مخازن مهار نشده استفاده کردند. آنها از

بعدها ژاکوبسن [۳] در سال ۱۹۴۹ مساله هیدرو دینامیک را در مخازن توسعه داد؛ همچنین هاوزنر^۱ [۴] در سال ۱۹۵۴ نشان داد که بخشی از مایع داخل مخزن تحت اثر تحریکات دینامیکی دارای حرکتی با دوره تناوب بلند است که به آن بخش نوسانی سیال می‌گویند و بخش دیگر از مایع دارای حرکتی صلب گونه همراه با دیواره مخزن است که به آن بخش ضربانی می‌گویند؛ بخش سخت مایع که با شتابی همانند با شتاب تحریکات ورودی نوسان میکند، بیشتر بر روی برش پایه و لنگر واژگونی تاثیر دارد و بخش موج مایع مشخصکننده ارتفاع آزاد مخزن در بالای سطح مایع می‌است وی همچنین روابط تحلیلی مناسبی برای محاسبه جرمهای سخت و موج سیال و همچنین ارتفاعی از کف مخزن ارائه کرد که این جرم‌ها عمل می‌کنند.

در این مرحله به نظر می‌رسید که موضوع خاتمه یافته باشد که زلزله سال ۱۹۶۴ میلادی آلاسکا موجب تخریب تعداد زیادی از مخازن مایع گردید و همین مساله منشا مطالعات گسترده‌ای در زمینه رفتار و خصوصیات دینامیکی مخازن با جداره ی انعطاف پذیر شد. نخستین تحلیل رایانه‌ای مخازن مایع در سال ۱۹۶۹ توسط ادواردز^۴ [۵] با استفاده از روش اجزا محدود صورت گرفت. این تحلیل روی یک مخزن استوانه‌ای مهار شده محتوی مایع با نسبت ارتفاع به قطر کمتر از یک انجام گرفت. در این تحلیل مساله اندر کنش مایع و دیواره الاستیک پوسته مخزن لحاظ گردید. در تحقیقات فوق الذکر مخازن بصورت الاستیک خطی و کاملاً مهار شده در نظر گرفته شدند. به این ترتیب با توسعه روش اجزا محدود و محاسبات کامپیوتری تحلیل مخازن که در گذشته عمدتاً بصورت آزمایشگاهی و تحلیلی انجام می‌گرفت، سرعت و وسعت بیشتری گرفت.

ولتسوس^۵ [۶] در ۱۹۷۴ یک رویکرد طراحی بر مبنای فرض مد تعیین شده دیواره مخزن و استفاده از مفهوم جرم افزوده (مجازی) برای اینرسی سیال استفاده کرد. در ۱۹۷۷ ولتسوس و یانگ^۶ [۷] نشان دادند، انعطاف پذیری جداره سبب می‌شود شتاب وارده بر بخش سخت مایع چندین بار بیشتر از شتاب

⁹ Haroun¹⁰ Housner¹¹ Balendra¹² Malhotra¹³ Hamdan¹⁴ Barton¹⁵ Parker¹ Housner² Convective³ Impulsive⁴ Edwards⁵ Veletsos⁶ Yang⁷ Rayleigh-Ritz⁸ Liu

شرایط درز برای در نظر گیری بلندشدگی کف مخزن استفاده کرده و نشان دادند مهارنشدهگی کف مخزن تاثیر بسزایی بر روی نتایج میگذارد.

مدلهای مشهور مکانیکی در تحلیل مخازن عبارتند از: مدل دو جرمی معادل هاووزنر، مدل سه جرمی هارون و روش ساده ملهوترا که جزء روشهای تحلیلی بوده و عمدتاً برای بدست آوردن جوابهای اولیه و کنترل صحت نتایج مدلهای عددی کاربرد دارد؛ همچنین در خلال این تحقیقات جداول طراحی مختلفی برای تعیین فرکانسهای ضربانی و نوسانی، برش ماکزیمم، ممان واژگونی روی پی و برآیندهای تنش روی پوسته ارائه شد. آییننامههایی نظیر ضمیمه E آییننامه ای پی ۷^۱ و بخش چهار یوروکد ۸۸ به ترتیب بر اساس تحقیقات وزنیاک^۲ و میشل^۳ [۱۶] و ملهوترا و ونک^۴ و ویلند^۵ [۱۷] شکل گرفت.

با بررسی پاسخ دینامیکی مخازن ذخیره نفت و فرآورده های نفتی در زلزلههای گذشته مشاهده میشود که مخازن ذخیره فولادی نسبت به مخازن بتنی آسیب پذیرترند؛ لذا اهمیت بررسی رفتار لرزه های مخازن فولادی بیشتر است. این مخازن عموماً براساس استاندارد ای پی ای ۶۵۰ طراحی م شوند که توصیه های این آییننامه [۱۸] در بیشتر حالات محافظه کارانه و برای طراحی مخازن جدید مناسب است.

در بررسی مطالعات مرتبط با رفتار دینامیکی مخازن فولادی مشاهده م شود که نخستین گزارش درباره مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل مخازن صلب استوانه های و مستطیلی تحت اثر شتاب افقی لرزه های توسط هاسکینز و ژاکوبسن^۶ [۱۹] منتشر شده است که پس از آن هاووزنر [۲۰] با استفاده از یک روش تقریبی، مدلی ساده برای تخمین اثرات دینامیکی سیال در یک مخزن صلب استوانه های و یا مستطیلی تحت شتاب افقی لرزه های ارائه نمود. او فشار هیدرو دینامیک سیال را به دو بخش فشار ضربانی و فشار نوسانی تقسیم کرد. فشار ضربانی توسط حرکت هماهنگ بخشی از سیال با جداره مخزن ایجاد م شود و فشار نوسانی از حرکت بخش دیگر سیال در سطح آزاد آن به وجود میآید. هاووزنر [۲۱] همچنین در ادامه با ارائه یک مدل مکانیکی دو جرمی معادل به صورت جرم و فنر پاسخ

هیدرو دینامیکی مخزن- مایع را با در نظر گرفتن مود ضربانی و مود نوسانی مایع ارزیابی کرد.

در پژوهش دیگری توسط ملهوترا [۲۲] یک مدل لرزه های تقریبی ساده برای سیستم مخزن- مایع با در نظر گرفتن دو شکل مود مایع که با دو نوسانگر یک درجه آزادی تعمیم یافته توصیف شد و همانطور که از شکل زیر مشاهده م شود سیستم یک درجه آزادی واقع در ارتفاع h_i از کف مخزن، نشان دهنده مود ضربانی و سیستم یک درجه آزادی واقع در ارتفاع h_c از کف مخزن، مود نوسانی حرکت مایع را توصیف مینماید.

اسپریتزر^۷ [۲۳] مطالعات عددی را با استفاده از مدل سازی اجزا محدود یک مخزن فولادی مهار نشده بدون سقف روزمینی انجام داد که تحت اثر نیروی افقی زلزله قرار گرفته است او در مطالعات خود اثرات غیرخطی مصالح و هندسه مسئله را نیز در نظر گرفت و همچنین اندرکنش خاک و سازه را نیز در مدلسازی بوسیله فنرهای ارتجاعی در نظر گرفته است. نتایج این پژوهش سازگاری خوبی با روابطی که در ای پی ای ۶۵۰ ارائه شده دارد. او در مطالعات خود در مدلسازی اجزای محدود یک نمونه مخزن میزان تنشهای حلقوی و تغییرشکلها تحت اثر بار ثقلی هیدرو دینامیک و هیدرواستاتیک بررسی کرده است.

همچنین نتایج بدست آمده از تحقیقات پژوهشگران نشان دهنده مودهای مختلف خرابی مخزن مانند کمانش پوسته مخزن (سه حالت کمانش پافیلی، زانوفیلی و الماسی شکل)، آسیب دیدگی سقف مخزن، بلند شدگی کف مخزن و ... است [۲۴].

مود کمانش پافیلی غالباً در خارج از جداره مخزن و پیرامون کف مخزن بروز پیدا میکند. این مود کمانش در مخازن با نسبت ارتفاع به قطر کم رخ میدهد و مطالعات نشان میدهند که کمانش پافیلی از ترکیب تنشهای فشاری محوری که از حد تنش بحرانی تجاوز کرده اند با تنش کششی حلقوی نزدیک به حد تسلیم حاصل میشود [۲۵]؛ اما برخی از محققین این مود کمانشی را ناشی از ترکیب سه نوع تنش فشاری محوری و کششی حلقوی و تنش خمشی محلی ناشی از گیرداری و محصورشدگی جداره مخزن میدانند. [۲۶] کمانش پافیلی

⁵ Wieland

⁶ Jacobsen

⁷ Spritzer

¹ API

² Wozniac

³ Mitchell

⁴ Wenk

با استفاده از یک مدل تجربی به بررسی بلندشدگی ورق کف مخزن با استفاده از رکوردهای شتابنگاری زلزله‌های ۱۹۴۰ ال سنتر و ۱۹۹۴ نورتریج پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان داده که مهاربندی نکردن مخازن ذخیره‌سازی باعث بلندشدگی کف مخزن شده است؛ همچنین در این مطالعه تنش‌های محوری بیشینه جداره مخزن با مقادیر مجاز آیین‌نامه‌ای مقایسه شده‌است.

در بین تحقیقات داخلی صورت گرفته در این حوزه در پژوهشی که توسط تارینژاد و حسین‌جانی [۳۲] انجام شده، رفتار دینامیکی مخازن استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری لرزه‌ای ناشی از زلزله‌های دور و نزدیک گسل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تفاوت‌های زمانی و طیفی زلزله‌های نزدیک نسبت به زلزله‌های دور، تأثیر قابل توجهی بر پاسخ سازه‌ای مخازن دارد. این مطالعه بر اهمیت در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص بارگذاری لرزه‌ای در طراحی مقاوم در برابر زلزله مخازن فولادی تأکید می‌کند.

در مطالعه‌ای به وسیله هوآنگ نام فان^۵ و همکاران [۳۳]، آسیب‌پذیری لرزه‌ای مخازن ذخیره‌سازی فولادی بدون مهار بررسی شد. در این تحقیق با استفاده از رگرسیون فرآیند گاوسی و مدل‌های اجزای محدود سه‌بعدی، رفتار مخازن در برابر زلزله‌های ناشی از حوادث تحلیل گردید. نتایج این تحقیقات نشان داد که مدل‌های ساده‌شده می‌توانند ارزیابی محافظه‌کارانه و قابل اعتمادی از پاسخ لرزه‌ای این مخازن ارائه دهند که در طراحی و بهینه‌سازی مقاوم‌سازی آن‌ها کاربرد دارد.

با توجه به مطالعات گذشته و با استفاده از روابط پایه حاصل از تحقیقات ابتدایی درباره رفتار لرزه‌ای مخازن روزمینی، این پژوهش گامی نوآورانه برداشته است. برخلاف تحقیقات پیشین که بر تحلیل مخازن مهارشده متمرکز بودند، در این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی همزمان سازه و سیال در نرم‌افزار اجزای ABAQUS، رفتار لرزه‌ای و نوع کمانش مخازن مهارنشده بررسی شده است؛ همچنین، از ویژگی منحصربه‌فرد اعمال زلزله در سه جهت بهره گرفته شده تا تأثیر تمامی مؤلفه‌های زلزله بر رفتار مخازن به‌صورت جامع تحلیل شود. این رویکرد، نیاز به مطالعه‌ای جامع‌تر در این حوزه را پاسخ داده و به فهم

اغلب دور تا دور محیط مخزن گسترش می‌یابد. این نوع کمانش در حقیقت یک نوع کمانش الاستو-پلاستیک است و در این پدیده فشار داخلی مایع درون مخزن اثر کاهنده بر روی مقاومت کمانشی مخزن دارد [۲۷] [۱۳].

حرکت قائم کف مخازن یا به اصطلاح بلندشدگی کف مخزن می‌تواند باعث آسیب‌های جدی به لوله‌ها، سیستم‌های مهاری و سایر تجهیزات متصل به مخزن بشود که مانع حرکت آزادانه مخزن هستند. ملهوترا و ولوتسوس^۱ [۲۷] در پژوهش خود با استفاده از مدل یک تیر منشوری نیمه بی نهایت تحت اثر بار گسترده که بر روی یک بستر صلب قرار گرفته است به تحلیل بلندشدگی کف مخازن استوانه‌ای پرداختند. آن‌ها در نتایج خود دریافتند که نیروی محوری نقش بسیار مهمی در مقاومت در برابر بلندشدگی ایفا می‌کند و تشکیل مفصل پلاستیک در تیر مقاومت در برابر بلندشدگی را محدود نمی‌کند.

در مطالعه دیگری و تهی^۲ و همکاران [۲۹] به طراحی لرزه‌ای مخازن ذخیره نفت به همراه خطوط لوله در چارچوب طراحی بر اساس عملکرد پرداختند. آن‌ها ابتدا مودهای خرابی اصلی مخزن ذخیره نظیر مود کمانش پافیلی، آسیب دیدگی سقف خرابی تکیه‌گاه و خرابی شیر متصل به مخزن را بررسی کردند سپس محدودی‌های سیستم خطوط لوله در نواحی معینی از خط لوله نظیر زانوپیچ، سه راه ها و شیرها در برابر ظرفیت کرنشی نهایی بررسی نمودند. در مطالعه آن‌ها یک مدل‌سازی ساده از تحلیل لرزه‌ای مخزن تحت بار جانبی زلزله برای دو حالت بدون بلندشدگی و با بلندشدگی کف مخزن صورت گرفته است.

در پژوهش دیگری سبحان و همکاران [۳۰] به بررسی کمانش استاتیکی و دینامیکی مخازن استوانه‌ای فولادی مهار شده تحت شتاب قائم و افقی زمین پرداخته‌اند. در این پژوهش ظرفیت کمانشی مخزن مورد توجه قرار گرفته است و نمودارهای ظرفیت کمانشی بر حسب بار بحرانی در دو حالت تحلیل بارافزون استاتیکی^۳ و تحلیل دینامیکی افزایشی^۴ با یکدیگر مقایسه شده است.

همچنین در مطالعه‌ای جلال اکبری و همکاران [۳۱] به بررسی عددی رفتار لرزه‌ای مخازن فولادی مهار نشده با تأکید بر پدیده بلندشدگی پرداختند، در این مطالعه پس از اعتبارسنجی

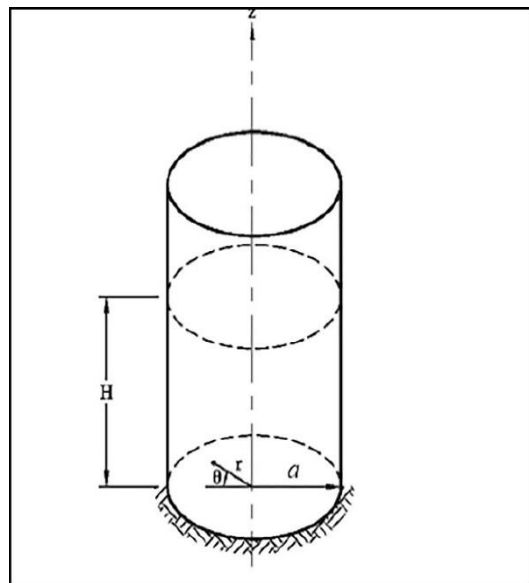
^۴ IDA^۵Hoang Nam Phan^۱ Veletsos^۲ Vathi^۳ SPO

بهتر رفتار مخازن مهارنشده تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک کمک کرده است.

۲- روابط تحلیلی سیستم مخزن-سیال

حل معادلات حاکم بر حرکت یک سیال درون مخزن استوانه ای با دیواره صلب می‌تواند از مجموع مشارکت بخش ضربانی و نوسانی حاصل شود. مولفه ضربانی صلب دقیقاً شرایط مرزی مربوط به دیواره و کف مخزن را ارضا می‌کند، اما این باعث بوجود آمدن مقادیر صفر در سطح آزاد میشود که به علت وجود داشتن موج‌ها درست نیست؛ بنابراین قسمت نوسانی به حل قسمت ضربانی صلب اضافه میشود تا شرایط تعادل را در سطح آزاد برقرار نماید.

سیستم شکل ۱ یک مخزن استونهای صلب با شعاع a می باشد، مرکز مختصات استوانه ای (r, z, θ) نشان داده شده در شکل در مرکز کف مخزن قرار دارد که z محور قائم X جهت افقی زمین و $\dot{X}$ شتاب زلزله که سیستم مخزن-سیال را تحت اثر قرار می‌دهد.



شکل ۱- شکل هندسی مخزن با مختصات استوانه ای

معادله سیال باتوجه به مختصات استوانه ای (r, z, θ) برابر است با:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (۱)$$

که در آن ϕ تابع پتانسیل سرعت است و مولفه‌های سرعت سیال برابر است با:

$$v_r = -\frac{\partial \phi}{\partial r}, v_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta}, v_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (۲)$$

و فشار هیدرودینامیک p متناسب است با تابع سرعت پتانسیل از طریق معادله زیر است:

$$p = \rho_l \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (۳)$$

شرایط مرزی مسئله به صورت زیر است:

در $z = 0$ مولفه قائم سرعت سیال v_z باید صفر باشد.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (۴)$$

در $r = a$ مولفه سرعت شعاعی باید برابر با مولفه مرتبط حرکت زمین باشد بنابراین:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial r} \Big|_{r=a} = \dot{X}(t) \cos \theta \quad (۵)$$

اگر میزان جابجایی قائم سیال را به صورت جزئی $d(t)$ در نظر بگیریم، میزان فشار $z = H$ به صورت تقریبی برابر است با:

$$P = \rho_L g d(t) \quad (۶)$$

با معادل قرار دادن رابطه ۶ و ۳ و مشتقگیری نسبت به زمان معادله دیفرانسیل زیر حاصل میشود:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (۷)$$

حل معادله ۷ می‌تواند از جمع دو حل جزئی زیر حاصل شود:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (۸)$$

که در آن تابع ϕ_1 شرایط مرزی زیر را ارضا می‌کند:

$$\begin{aligned} z = 0 &\rightarrow \frac{\partial \phi_1}{\partial z} = 0 \\ r = a &\rightarrow \frac{\partial \phi_1}{\partial r} = -\dot{X}(t) \cos \theta \end{aligned} \quad (۹)$$

$$z = H \rightarrow \frac{\partial \phi_1}{\partial t} = 0$$

و تابع ϕ_2 شرایط مرزی زیر را دارد

$$Q_{0,l} = \int_0^H \int_0^{2\pi} P|_{r=a} \cos \theta a d\theta dz$$

$$Q_{0,l} = -\ddot{x}(t) m_l \frac{H}{a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{16}{[(2n-1)\pi]^3} \times$$

$$\frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{a}{H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{a}{H} \right]} \quad (13)$$

برای حل نوسانی در حرکت دلخواه زمین اولین گام ارزیابی حل برای شتاب هارمونیک زمین است.

اگر فرض کنیم شتاب هارمونیک زمین $\ddot{x} = \ddot{x}_0 e^{i\alpha t}$ باشد، تابع ϕ_2 معادله ۱ را ارضا مینماید و همچنین در شرایط مرزی تعریف شده در رابطه ۱۰ صدق میکند.

$$\phi_2 = -\frac{1}{i\omega} \ddot{x}_0 e^{i\alpha t} H \frac{a}{H} \cos \theta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \times$$

$$\frac{2}{\lambda_n^2 - 1} \times \frac{J_1 \left(\lambda_n \left(\frac{r}{a} \right) \right)}{J_1(\lambda_n)} \times \frac{\cosh(\lambda_n \left(\frac{z}{a} \right))}{\cosh(\lambda_n \left(\frac{H}{a} \right))} \quad (14)$$

به علت شتاب افقی زمین $a(t)$ جرمی از سیال که در نزدیکی سطح آزاد سیال است به صورت صلب و هماهنگ با خود مخزن حرکت نمی‌کند. به همین علت آن قسمت از سیال که در تماس با جداره مخزن است مجبور است در جهت قائم حرکت کند که باعث بوجود آمدن موجهای نوسانی می‌شود. دوره تناوب این حرکت نوسانی معمولاً بالا و به میزان ۲ تا ۶ الی ۱۰ ثانیه است که به شکل مخزن و ویژگی‌های دینامیکی تحریک بستگی دارد [۳۴].

در مجاورت کف مخزن، سیال حرکت پیوسته و هماهنگی با جداره مخزن دارد که باعث افزایش اینرسی سازه می‌شود. درصدی از جرم سیال که در حرکت نوسانی مشارکت دارد به نسبت H/D یعنی ارتفاع سطح آزاد آب به قطر مخزن بستگی دارد، هرچه این نسبت کمتر باشد، جرم نوسانی بزرگتر می‌شود. برای مقادیر خیلی کم نسبت H/D تنها ۳۰ درصد از سیال هماهنگ با جداره حرکت میکند، در حالی که مقدار باقی مانده در حرکت اسلاشینگ یا نوسانی مشارکت دارند [۳۵].

$$z = 0 \rightarrow \frac{\partial \phi_2}{\partial z} = 0$$

$$r = a \rightarrow \frac{\partial \phi_2}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

$$z = H \rightarrow \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_2}{\partial z} = -g \frac{\partial \phi_1}{\partial z}$$

باید این نکته را در نظر گرفت که قسمت سوم معادله ۹ بیان میدارد که فشار در $z = H$ صفر است، به دلیل اینکه ϕ_1 حل معادله را برای اثرات ضربانی لحاظ میکند. تابع ϕ_2 که شرایط مرزی را اصلاح می‌کند، توسط سومین بخش معادله ۹ این اصلاح را انجام میدهد و اثرات نوسانی را لحاظ میکند. حل برای اثرات ضربانی به شکل زیر داده شده است:

$$\phi_1 = -\dot{x}(t) H \cos \theta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8(-1)^{n+1}}{[(2n-1)\pi]^2}$$

$$\times \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{r}{H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{a}{H} \right]} \cos \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{z}{H} \right] \quad (11)$$

که در آن I_1 و I_1' به ترتیب تابع بسل اصلاح شده نوع اول و مشتق آن است. فشار ناشی از حرکت ضربانی از معادل قرار دادن رابطه ۱۱ در ۳ بدست می‌آید:

$$P = -\ddot{x}(t) \rho_L H \cos \theta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8(-1)^{n+1}}{[(2n-1)\pi]^2}$$

$$\times \frac{I_1 \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{r}{H} \right]}{I_1' \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{a}{H} \right]} \cos \left[(2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{z}{H} \right] \quad (12)$$

مجموع نیروی هیدرو دینامیک ناشی از فشار سیال وارد بر جداره مخزن برابر است با نیروی برشی وارد بر پایه مخزن و از انتگرال زیر بدست می‌آید:

۳- نحوه مدل سازی

در این مطالعه از نرم افزار ABAQUS استفاده شده و در مدل سازی اجزا محدود سیستم مخزن-مایع موارد زیر بکار گرفته شده است:

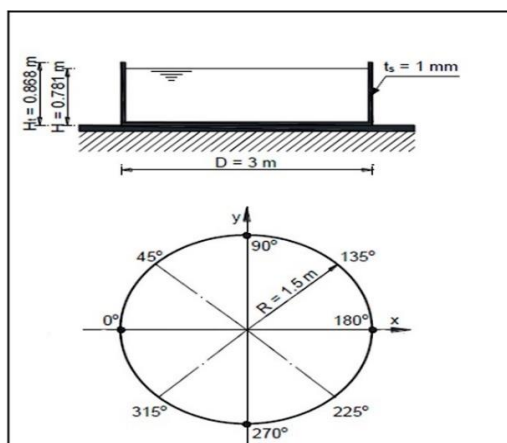
- سازه مخزن متشکل از ورق کف مخزن و پوسته استوانه ای با المان های پوسته های S4R مدل سازی شده است. این نوع المان یک المان پوسته ای چهارگره ای است که برای مدل سازی سازه های نازک و پوسته ای طراحی شده است. این المان در هر گره شش درجه آزادی دارد که شامل سه انتقال و سه دوران است.
- مایع درون مخزن توسط المان های مکعبی یا شش وجهی آکوستیک AC3D8R مدل سازی شده است. این المان هشت گره ای بوده و به صورت یک مکعب با هشت رأس مدل سازی می شود. برخلاف المان های مکانیکی معمول، این المان تنها یک درجه آزادی در هر گره دارد که مربوط به فشار آکوستیک است. فشار آکوستیک به عنوان متغیر اصلی، انتشار امواج صوتی را در محیط های فشرده پذیر مدل سازی می کند
- مدل سازی بستر صلب با المان C3D8R انجام شده است. یک المان حجمی با هشت گره است که از روش انتگرال گیری کاهش یافته استفاده می کند. این المان در دسته المان های پیوسته قرار دارد.
- اندرکنش سازه و سیال که توسط روش تماسی با قید Tie برقرار شده است.
- اندرکنش بین صفحه کف مخزن و بستر صلب از طریق تماس عمومی^۱ زیرمجموعه تماس سطح با سطح^۲ تعریف شده است.
- هنگام بارگذاری ابتدا نیروی وزن به همراه فشار هیدرو استاتیک به سازه اعمال میشود، سپس در مرحله بعدی از طریق شرایط مرزی شتاب زلزله در سه جهت اعمال می شود.

۴- صحت سنجی

به منظور اطمینان خاطر از صحت شیوه مدل سازی در این مطالعه در چند حوزه مختلف صحت سنجی صورت می گیرد:

- صحت سنجی پاسخ لرزه ای مخزن با مقاله ارائه شده توسط نام فان^۳ [۳۳] در بخش های:
- فرکانس ضربانی مخزن
- فشار هیدرواستاتیک جداره مخزن در یک نقطه مشخص پس از اعمال زلزله
- ارتفاع اسلاشینگ سیال درون مخزن پس از اعمال زلزله

به منظور صحت سنجی رفتار لرزه ای مخزن، مقاله رفتار لرزه ای مخازن روزمینی مهارنشده در مخاطرات طبیعی نوشته شده توسط نام فان^۳ [۳۳] به دلیل تشابه خیلی زیاد در شیوه مدل سازی المان های سیال و پوسته انتخاب شده و مخزن عریض مطابق شکل ۲ با مشخصات گفته شده مدل سازی می شود.



شکل ۲- مشخصات هندسی و ابعاد مخزن مورد مطالعه در مقاله نام فان [۳۳]

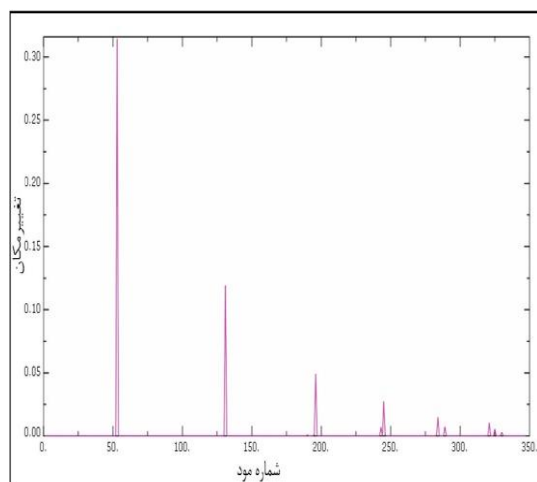
۴-۱- صحت سنجی فرکانس ضربانی

پس از مدل سازی با تعریف دو مرحله استاتیکی و فرکانسی در نرم افزار، فرکانس ضربانی مخزن با استفاده از پیدا کردن مود اصلی با آنچه در مقاله گزارش شده مقایسه می شود.

³ Nam Phan

¹ general contact

² Surface to surface

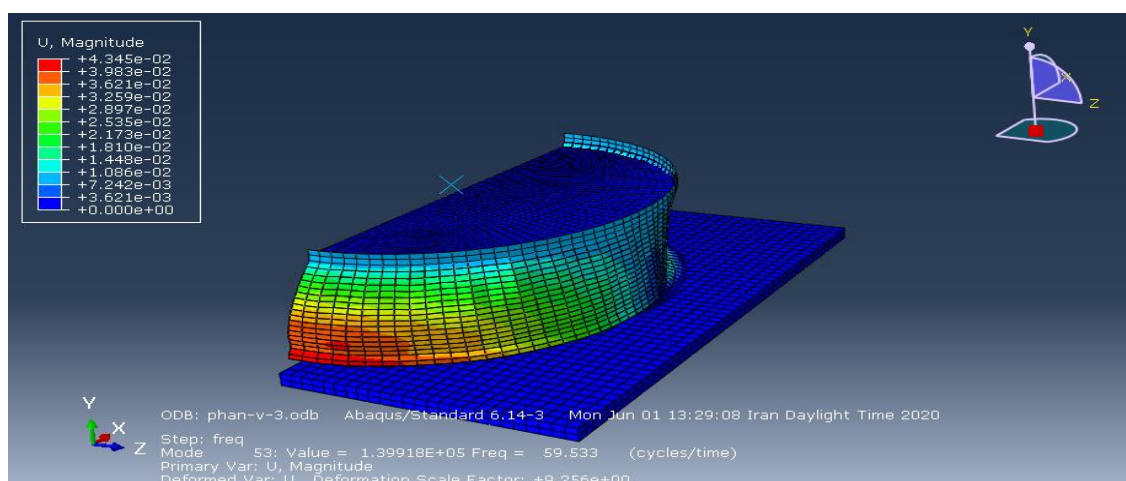


شکل ۳- پیدا کردن شماره مود اصلی مخزن در نرم افزار ABAQUS

همانطور که از شکل ۳ مشخص است، مود اصلی در شماره ۵۳ اتفاق می افتد که فرکانس آن باتوجه به شکل ۴ و مقدار دوره تناوب آن از رابطه ۱۵ بدست می آید.

$$T_i = \frac{1}{freq} = \frac{1}{59.533} = 0.016797 \quad (۱۵)$$

با مقایسه عدد دوره تناوب با مقدار دوره تناوب ضربانی ارائه شده در جدول نتایج تحلیل مودال در مقاله نام فان [۳۳] که عدد ۰/۰۱۶ گزارش شده تطابق خوبی در این پارامتر مشاهده می شود.

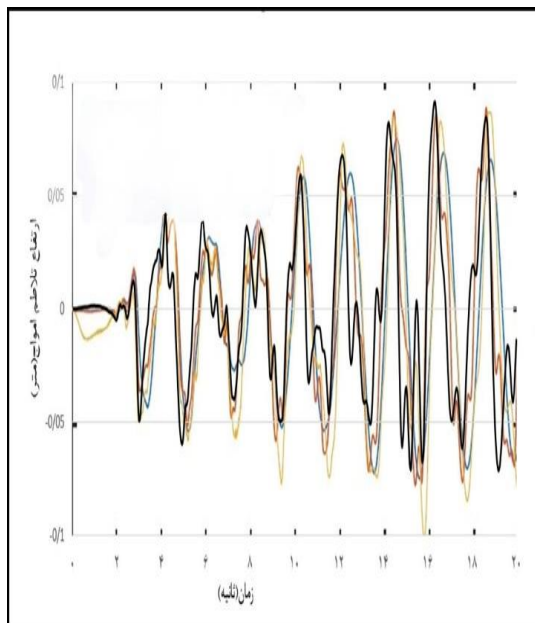


شکل ۴- نمایش پوسته تغییر شکل یافته و فرکانس در مد اصلی

سیگنال ورودی به نرم افزار داده شود. برای این منظور از نرم افزار get data استفاده شده است. در مرحله بعد پس از مرحله استاتیکی یک مرحله دینامیکی جهت اعمال زلزله تعریف می شود و در شرایط مرزی داده های زلزله چی چی در جهت افق اعمال می گردد و تحلیل انجام می شود سپس در قسمت نتایج داده های مربوط به تاریخچه زمانی فشار هیدرو دینامیک وارد بر نقطه انتهایی سمت چپ صفحه

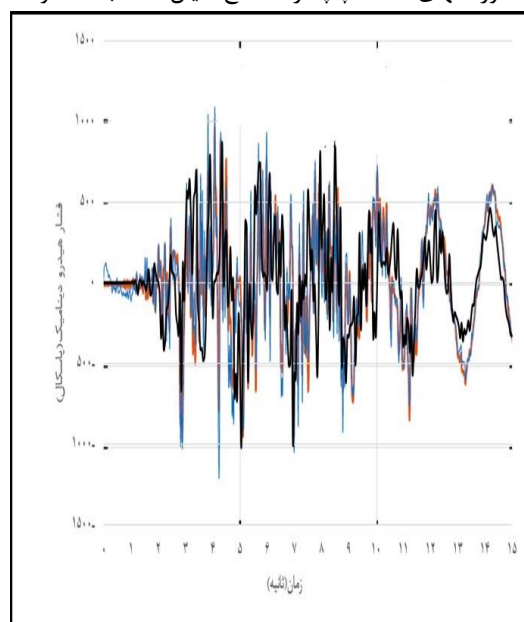
۲-۴- صحت سنجی رفتار لرزه ای مخزن در مقاله نام فان [۳۳] سیگنال زلزله چی چی به مخزن داده شده و فشار هیدرو دینامیک نقطه ای از کف مخزن در طول زمان زلزله ثبت شده است؛ همچنین ارتفاع اسلاشینگ سیال درون مخزن نیز بررسی می شود. جهت صحت سنجی ابتدا باید نمودار سیگنال زلزله اسکیل شده را به دیتا تبدیل کرده که در مقاله نام فان [۳۳] ارائه شده است و دیتاها به عنوان

نمودار تاریخچه زمانی برای آن ترسیم گردیده و با نتایج مقاله مقایسه شده است، همانطور که در شکل ۶ مشخص است، تغییرات ارتفاع اسلاشینگ سیال در طول زلزله ناشی از خروجیهای نرم افزار ABAQUS با خط مشکی پررنگ نشان داده شده و به آنچه در مقاله نام فان [۳۳] ارائه شده شباهت نزدیکی دارد.



شکل ۶- تطبیق نمودار تاریخچه زمانی ارتفاع اسلاشینگ در انتهای سمت چپ سطح آزاد سیال- خط مشکی نتایج حاصل از مدلسازی می باشد.

کف مخزن استخراج شده و نمودار آن ترسیم می گردد و سپس با نمودارهای مقاله نام فان [۳۳] مقایسه می شود. همانطور که در شکل ۵ دیده می شود، نمودار خط مشکی پررنگ به لحاظ رفتاری تشابه قابل قبولی با نمودار حاصل از نتایج آزمایشگاهی زمان (ثانیه) و مدلسازی مقاله نام فان [۳۳] دارد. پارامتر بعدی که جهت صحت سنجی انتخاب شده ارتفاع اسلاشینگ سیال درون مخزن است، برای این منظور انتهای سمت چپ آزاد سطح سیال انتخاب شده و



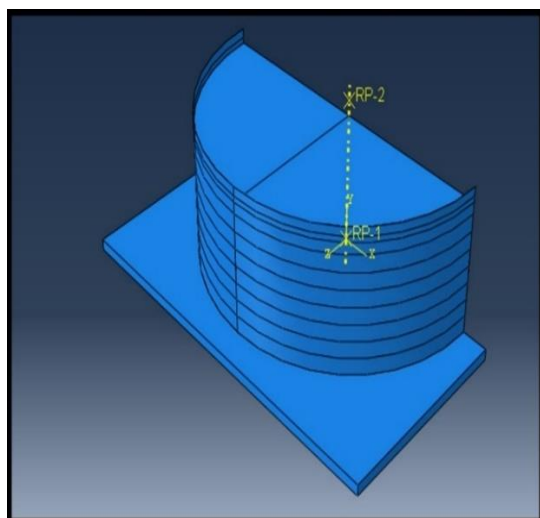
شکل ۵- تطبیق نمودار تاریخچه زمانی فشار هیدروودینامیک در نقطه انتهایی سمت چپ صفحه کف مخزن- خط مشکی نتایج حاصل از مدلسازی می باشد

آب با چگالی $\rho = 998.21 \frac{kg}{m^3}$ و مدول بالک $k = 2.15 Gpa$ می باشد.

همچنین در این مدلسازی شیوه تقسیم بندی تغییرات ضخامت پوسته در طول ارتفاع آن در شکل ۷ نشان داده شده است. در این مدلسازی به علت تقارن و به جهت صرفه جویی در زمان تنها نیمی از مخزن مدلسازی شده که در شکل ۸ نشان داده شده است. ابعاد بهینه دانه بندی در جهت طولی و شعاعی با توجه به ابعاد مخزن ۰/۵ متر لحاظ شده است.

۵- مطالعه موردی، مخزن ذخیره فولادی ۱۱۷۲۰ متر مکعبی انبار نفت ملایر

در این بخش یک مخزن فولادی روزمینی مهار نشده موجود در انبار نفت ملایر را انتخاب کرده و با توجه به مشخصات فیزیکی آن از جمله ابعاد هندسی ارائه شده در جدول ۱ و جنس فولاد پوسته و کف مخزن (A283) با چگالی $\rho = 8000 \frac{kg}{m^3}$ مدول الاستیسیته $E = 200 Gpa$ و ضریب پواسون $\nu = 0.29$ در نظر گرفته شده و زمین بستر به صورت سخت و صلب فرض شده و سیال درون مخزن،



شکل ۸- مدلسازی پوسته مخزن به همراه سیال درون آن
بر روی یک بستر صلب

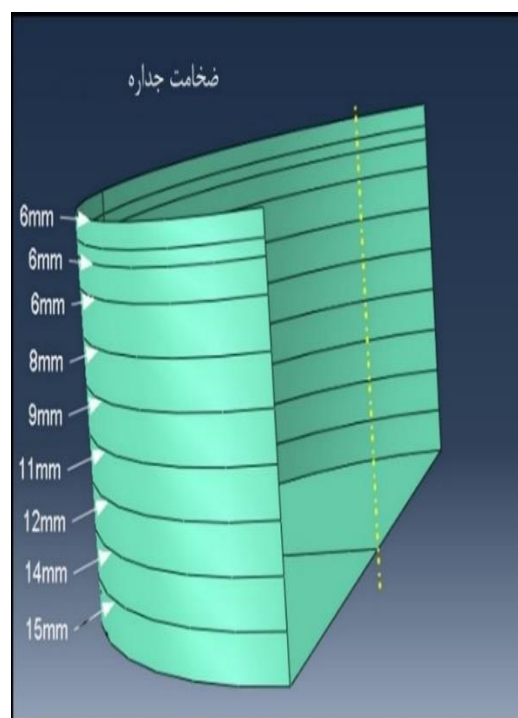
۵-۱- صحت سنجی فرکانس مخزن با روابط ارائه

شده در آیین نامه API650 [۳۶]

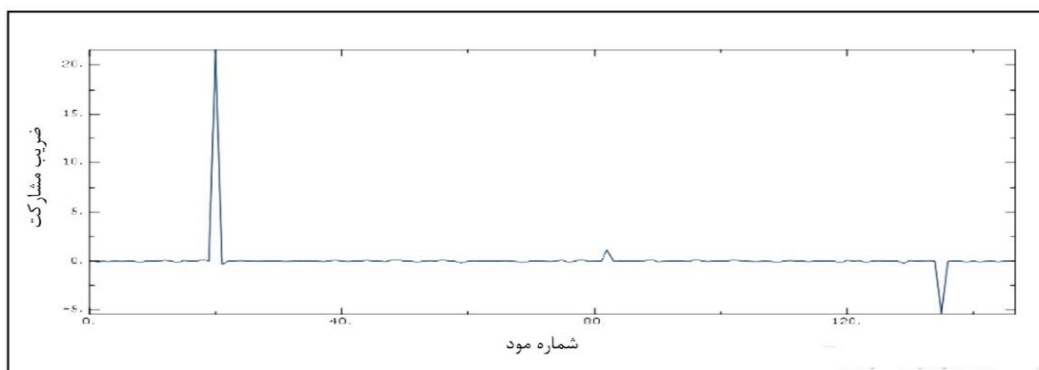
در این بخش به منظور صحت سنجی اولیه این مخزن پس از مدلسازی ابتدا یک مرحله تحلیل استاتیکی و پس از آن یک مرحله تحلیل فرکانسی تعریف شده و در ادامه، در قسمت خروجی با ترسیم نمودار ضریب مشارکت مودی بر حسب شماره مود میتوان مودی که بیشترین ضریب مشارکت را داشته یافت و بر اساس فرکانس آن مود دوره تناوب آن را بدست آورد که در اینجا طبق شکل ۹ مود شماره ۲۰ مود اصلی است. فرکانس ضربانی مخزن با وارد کردن شماره مود در خروجی مطابق شکل ۱۰ مشخص شده است.

جدول ۱- مشخصات هندسی مخزن

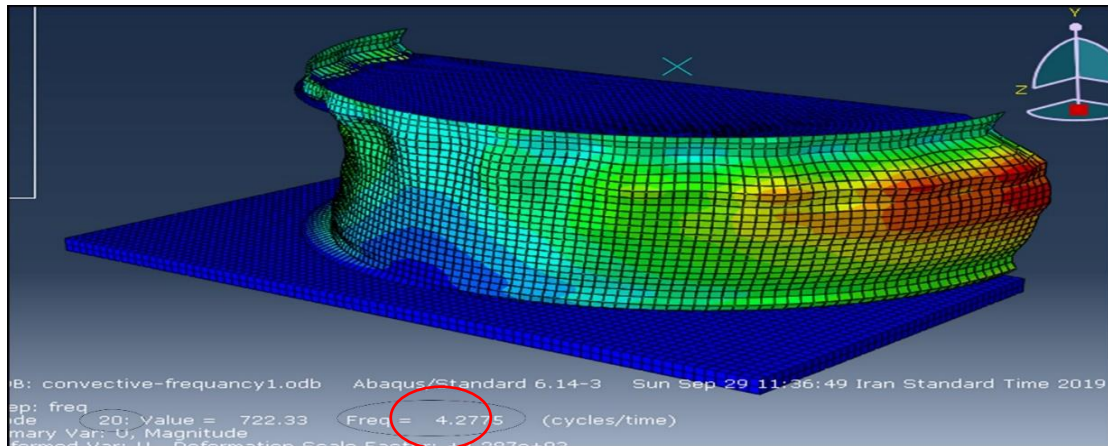
مشخصه	قطر D	ارتفاع H	ارتفاع آب H_L	نسبت ارتفاع به قطر H/D
اندازه (متر)	۳۴/۱۳۸	۱۲/۷۸۳	۱۱/۵	۰/۳۷۴۴



شکل ۷- مدلسازی پوسته مخزن و شیوه تقسیم بندی
جداره بر حسب ضخامت



شکل ۹- نمودار ضریب مشارکت مودی در جهت X بر حسب شماره مود



شکل ۱۰- نمایش تغییر شکل پوسته مخزن و فرکانس آن در مد اصلی

۵-۲- رفتار دینامیکی مخزن

در این مطالعه به منظور بررسی رفتار دینامیکی مخزن مورد نظر ۷ عدد رکورد زلزله حوزه نزدیک، با شرایط خاک تیپ II انتخاب شده که مشخصات آنها در جدول ۲ آمده است. برای هر زلزله دو مولفه افقی و یک مولفه قائم لحاظ شده است و به منظور مقیاس کردن این رکوردها در هر زلزله، هر سه مولفه برر سی شده و پس از یافتن بیشینه شتاب، مقادیر شتابها بر مقدار بیشینه تقسیم شده است. این شتابها برای هر زلزله با افزایش تدریجی دینامیکی از ضریب ۱g تا ۱/۵g با گامهای یک دهم هر کدام به صورت جداگانه در قسمت شرایط مرزی نرم افزار بخش شتاب اعمال شده است.

جهت مطالعه رفتار دینامیکی، بررسی اصلترین مود کمانشی مخازن یعنی تغییر شکل در جداره مخزن مورد مطالعه قرار گرفته است. فشار هیدرو دینامیک ناشی از اعمال زلزله به اضافه فشار هیدرواستاتیک باعث می شود که ورق جداره دچار تغییر شکل شود.

به این منظور میزان بیشینه تغییر شکل شعاعی جداره قسمت مشخصی از مخزن در طول ارتفاع آن در مدت تاریخچه زمانی اعمال زلزله ثبت شده و نمودار تغییر شکل شعاعی برحسب ارتفاع برای هر زلزله در ۶ حالت ۱g تا ۱/۵g ترسیم شده است، در نهایت میانگین این ۷ رکورد در شکل ۱۲، میانگین + انحراف معیار این رکوردها در شکل ۱۳ و میانگین - انحراف معیار در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

برای صحت سنجی فرکانس ضربانی بدست آمده در مدلسازی با رابطه ۱۶ ارائه شده در پیوست E آیین نامه API650 [۳۶] مقایسه میشود که در این رابطه T_i دوره تناوب ضربانی، C_i

$$T_i = \left(\frac{1}{\sqrt{2000}} \right) \left(\frac{C_i H}{\sqrt{t_u}} \right) \left(\frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}} \right) \quad (16)$$

ضربانی که با استفاده از شکل ۱۱ محاسبه می شود، t_u ضخامت میانگین پوسته که از رابطه ۱۷ محاسبه می شود و ρ چگالی سیال داخل مخزن است.

$$t_u = \frac{\sum t_i d_i x_i}{\sum d_i x_i} \quad (17)$$

$$= \frac{15 \times 1500(11500 - 750) + \dots}{1500[(11500 - 750)(11500 - (1500 + 750)) + \dots]} = 12.1542 \text{ mm}$$

$$T_i = \frac{1}{\sqrt{2000}} \left(\frac{6.87 \times 12.783 \text{ m}}{\sqrt{\frac{12.15 \text{ mm}}{34.138}}} \right) \left(\frac{\sqrt{1000 \text{ kg/m}^3}}{\sqrt{19 \times 10^4 \text{ Mpa}}} \right) = 0.23878 \quad (18)$$

$$\text{freq} = \frac{1}{T_i} = 4.2 \quad (19)$$

قابل توجهی بر شکل گیری تغییر شکل شعاعی و رفتار مود کمانشی دارند.

به عنوان یک نمونه از نتایج به دست آمده از ۴۲ تحلیل دینامیکی انجام شده بر پایه ۷ زلزله مختلف در ۶ سطح شتاب اوج زمین (PGA)، در شکل ۱۵، شکل کمانش یافته جداره مخزن و همچنین کانتور تنش های فون مایسس تحت تأثیر زلزله حوزه نزدیک طبس در سطح شتاب $1/5 g$ نمایش داده شده است. این شکل به خوبی رفتار تغییر شکل شعاعی جداره مخزن و نحوه توزیع تنش های ایجاد شده در ساختار را نشان می دهد. مقادیر بالای شتاب اوج زمین در این تحلیل موجب تحریک مودهای پایین تر کمانشی و افزایش محسوس تغییر شکل ها و تنش ها در نقاط بحرانی سازه شده است. نتایج به وضوح نشان می دهند که در زلزله طبس، به دلیل انرژی بالا و مدت زمان قابل توجه، رفتار سازه به صورت بحرانی تری در مقایسه با سایر زلزله ها ظاهر می شود.

همچنین مقادیر بیشینه تغییر شکل شعاعی هر رکورد زلزله در شتاب های مشخص از $1g$ تا $1/5g$ و مقدار میانگین این بیشینه های تغییر شکل و انحراف معیار آنها در جدول ۳ ارائه شده است.

بررسی داده های جدول نشان می دهد که در اکثر زلزله ها با افزایش شتاب اوج زمین (PGA)، میزان تغییر شکل شعاعی افزایش می یابد که مطابق انتظار ناشی از انتقال انرژی بیشتر به سازه است. با این حال، در برخی زلزله ها، این روند به طور قابل توجهی متفاوت است. برای مثال، در زلزله طبس به دلیل ویژگی هایی مانند محتوای انرژی بالا در فرکانس های پایین و مدت زمان طولانی تر، افزایش تغییر شکل شعاعی با افزایش PGA بسیار برجسته تر است. در مقابل، در زلزله لوماپریتا، به دلیل خواصی نظیر محتوای فرکانسی بالا یا مدت زمان کوتاه تر، این قاعده به طور کامل رعایت نشده و رفتار شکل مود کمانشی متفاوتی مشاهده می شود. این نتایج نشان می دهد که علاوه بر میزان شتاب اوج زمین، ویژگی های خاص زلزله ها نیز تأثیر

جدول ۲ - مشخصات رکوردهای زلزله استفاده شده در تحلیل دینامیکی

شماره زلزله	نام زلزله	سال وقوع	کشور	ایستگاه	بزرگا	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)	فاصله از گسل (کیلومتر)
۱	بم	۲۰۰۳	ایران	بم	۶/۶	۴۸۷/۴	۰/۰۵
۲	طبس	۱۹۷۸	ایران	دیپوک	۷/۳۵	۴۷۱/۵۳	۰
۳	چی چی - ۰۶	۱۹۹۹	تایوان	تی سی یو ۰۷۸	۶/۳	۴۴۳/۰۴	۵/۷۲
۴	نورت ریج - ۰۶	۱۹۹۴	امریکا	سیلمار - اولیو	۵/۲۸	۴۴۰/۵۴	۹/۱۵
۵	لوماپریتا	۱۹۸۹	امریکا	سراتوگا - آلوها	۶/۹۳	۳۸۰/۸۹	۷/۵۸
۶	ناهانی	۱۹۸۵	کانادا	سایت ۱	۶/۷۶	۶۰۵/۰۴	۲/۴۸
۷	کیپ مندوسینو	۱۹۹۲	امریکا	کیپ مندوسینو	۷/۰۱	۵۶۷/۷۸	۰

جدول ۳ - مقادیر بیشینه تغییر شکل شعاعی (متر)

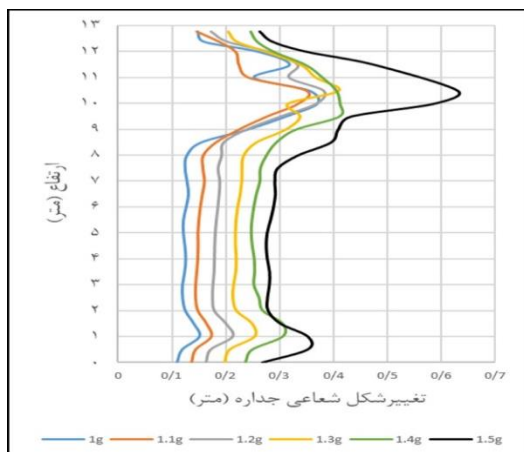
PGA	شماره زلزله								میانگین	انحراف معیار
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷			
۱g	۰/۳۹	۰/۲۸	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۵۱	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۱۳	
۱/۱g	۰/۴۶	۰/۳۰	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۳۳	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۱۲	
۱/۲g	۰/۴۷	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۲۶	۰/۱۲	
۱/۳g	۰/۴۸	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۴۸	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۲۸	۰/۱۴	
۱/۴g	۰/۴۸	۰/۳۵	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۴۸	۰/۱۲	۰/۱۶	۰/۲۸	۰/۱۴	
۱/۵g	۰/۴۹	۰/۹۳	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۳۸	۰/۲۵	

۶- نتیجه گیری

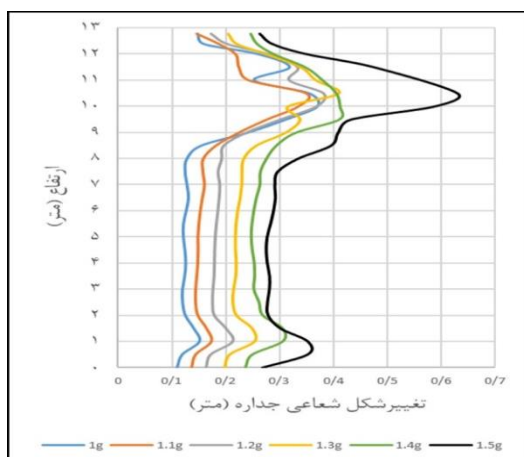
بر اساس مشاهدات ارائه شده در اشکال ۱۲ تا ۱۴، رفتار مخازن مهار نشده تحت تأثیر سه مؤلفه زلزله به وقوع دو مود کمانشی متمایز، پافیلی و الماسی شکل منجر شده است. نتایج نشان می‌دهند که بیشینه تغییر شکل شعاعی جداره در مود الماسی شکل در ارتفاع ۱۰.۵ متری از سطح زمین رخ می‌دهد. این یافته بر اهمیت توزیع ارتفاعی تنش‌ها و نحوه اثرگذاری مودهای کمانشی بر پایداری مخازن تأکید دارد.

تحلیل دقیق نمودارها نشان‌دهنده حساسیت بالای مخازن به افزایش شتاب زمین است. به‌طور خاص، با افزایش بیشینه شتاب از $1/4g$ به $1/5g$ ، میزان تغییر شکل شعاعی جداره به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ این افزایش برابر با $35/7\%$ درصد در نمودار میانگین تغییر شکل (شکل ۱۲) و 50% درصد در نمودار میانگین + انحراف معیار (شکل ۱۳) است. چنین تغییرات ناگهانی، نقاط بحرانی رفتار دینامیکی مخازن را برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که مخازن در این محدوده شتاب، وارد ناحیه‌ای از رفتار غیرخطی یا ناپایدار می‌شوند.

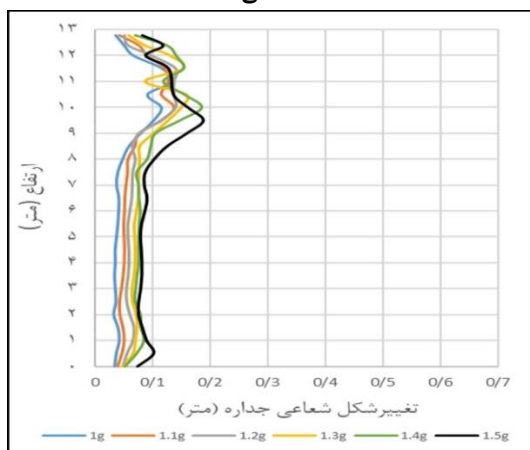
علاوه بر این، تغییر شکل‌ها از ارتفاع ۷.۵ متری آغاز شده و تا بالای جداره ادامه پیدا می‌کنند. این توزیع نشان‌دهنده اثر تجمعی تغییر شکل‌ها در ارتفاعات بالاتر جداره است که ممکن است خطر گسیختگی یا کاهش کارایی مخزن را افزایش دهد. در بخش‌های پایین‌تر جداره، شواهد حاکی از آن است که مود کمانشی پافیلی در همان کورس اول و در ارتفاع ۱ متری از سطح زمین شکل می‌گیرد. این رفتار نشان‌دهنده تمرکز تنش‌های فشاری در این ناحیه است که می‌تواند به عنوان نقطه‌ای بحرانی برای طراحی مجدد یا تقویت جداره‌های مخازن مورد توجه قرار گیرد.



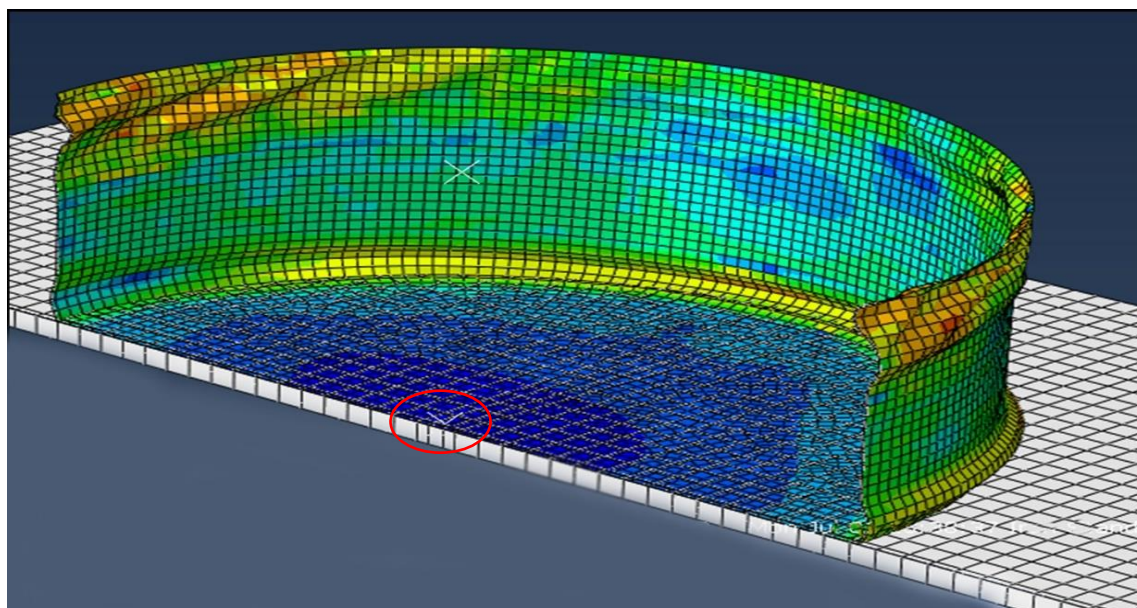
شکل ۱۲- نمودار میانگین بیشینه تغییر شکل شعاعی



شکل ۱۳- میانگین + انحراف معیار بیشینه تغییر شکل شعاعی



شکل ۱۴- میانگین - انحراف معیار بیشینه تغییر شکل شعاعی



شکل ۱۵- نمایش کمانش دیواره مخزن در اثر زلزله طبس با شتاب $g/5$

مراجع

- [9] Housner G.W. Seismic, 1982. Design of Liquid-Storage Tanks. Haroun M.A., New York: J. Technical Council, ASCE, Vol. 107. 191-207..
- [10] Balendra T., Ang K.K., Paramasivam P., Lee S.L. 1982. Seismic Design of Flexible Cylindrical Liquid Storage Tanks, Earthquake Engineering strct, pp 477-496.
DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.4290100310>
- [11] Malhotra P.K. Base, 1995. Uplifting Analysis of Flexibly Supported Liquid Storage Tanks. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 2. pp 1591-1607
DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.4290241204>
- [12] Malhotra P.K. 1997, Seismic Response of Soil Supported Un-anchored Liquid Storage Tanks, J. Engineering Structures, ASCE, Vol. 123. pp 440-450
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:4\(440\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:4(440))
- [13] F.H., Hamdan. 2000, Seismic Behaviour of Cylindrical Steel Liquid Storage Tanks. Construal Steel Research, Vol. 53. pp 307-333
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00039-5)
- [14] Malhotra P.K., Veletsos A.S., Palo Alto, 1995. Seismic Response of Unanchored and Partially Anchored Liquid Storage Tanks: Electric Power Research Institute.
- [15] Barton D.C., Parker J.V. 1987, Finite Element Analysis of the Seismic Response of Anchored and Unanchored Liquid Storage Tanks., s.l.:
- [1] H.M., westergard. 1933, Water Pressure on Dams During Earthquakes. Transac ons ASCE, pp. 418-472. DOI: <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0004496>
- [2] Hoskins L.M., Jacobsen L.S. 1934, Water pressure in a Tank Cause By Simulated Earthquake. Seismological Society of America, Vol. 24. DOI: <https://doi.org/10.1785/BSSA0240010001>
- [3] Jacobsen L.S. 1949, Impulsive Hydrodynamics of Fluid Inside a Cylindrical Tank and of Fluid Surrounding a Cylindrical Pier. Seismological Society of America, Vol. 39. pp 189-203. DOI: <https://doi.org/10.1785/BSSA0390030189>
- [4] Housner G.W. Earthquake, 1954. Pressure on Containers. California Institute of Technology, 081-095.
- [5] N.W., Edwards. 1969. A Procedure for Dynamic Analysis of Thin Walled Cylindrical Liquid Storage Tanks Subjected to Lateral Ground Motion. Michigan: Phd Thesis University of Michigan,
- [6] Veletsos A.S. Rome, 1974. Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks. Italy: 5th world conference earthquake engineering., 630-639.
- [7] A.S., Yang J.Y. 1977. Earthquake Response of Liquid Storage Tanks. Veletsos., second engineering mechanics specialty Conference, ASCE, pp 1-24.
- [8] Liu W.K. 1981. Finite Element Procedures for Fluid-Structure Interactions and Application to Liquid Storage Tanks. Nucl. Eng. Des, 211-238. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(81\)90091-1](https://doi.org/10.1016/0029-5493(81)90091-1)

- [27] Malhotra, P. K., and A. S. Veletsos . 1994. Beam model for base-uplifting analysis of cylindrical tanks.. s.l. : J. Structural Engineering, 3471-3488.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:12\(3471\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:12(3471))
- [28] Vathi, Maria, and Spyros A. Karamanos. , 2015 Simplified model for the seismic performance of unanchored liquid storage tanks. Boston, Massachusetts : Proceedings of ASME 2015 pressure vessels and piping conference.
DOI: <https://doi.org/10.1115/PVP2015-45695>
- [29] Vathi, Maria, et al. , 2017. Performance criteria for liquid storage tanks and piping systems subjected to seismic loading. J. Pressure Vessel Technology
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4036916>
- [30] Sobhan, M. S., F. R. Rofooei, and Nader KA Attari. , 2017. Buckling behavior of the anchored steel tanks under horizontal and vertical ground motions using static pushover and incremental dynamic analyses. s.l. : Thin-Walled Structures. 173-183.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.12.022>
- [31] Akbari, J., Salami, O., & Isari, M. (2020). Numerical investigation of the seismic behavior of unanchored steel tanks with an emphasis on the uplift phenomenon. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 14(53), 92-105.
DOI: <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.53.08>
- [32] Tarinajad R, Hosseinjani A (1400) Evaluation of dynamic behavior of cylindrical steel tanks under near and far-fault earthquake effects. In: *J. Structural Engineering and Construction*, vol 6, no 8.
DOI: 10.22065/jsce.2020.170063.1772
- [33] Hoang Nam Phan¹ · Fabrizio Paolacci² · Rocco Di Filippo · Oreste S. 2020. Seismic vulnerability of above-ground storage tanks with unanchored support conditions for Na-tech risks based on Gaussian process regression. *Bursi3*, s.l. : *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6883–6906.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00960-7>
- [34] P.K. Malhotra, Sloshing Loads in Liquid-Storage Tanks with Insufficient Freeboard, *Earthq. Spectra*. 21 (2005) 1185–1192.
DOI: <https://doi.org/10.1193/1.2085188>
- [35] R.A. Ibrahim, Liquid sloshing dynamics. Theory and applications, Cambridge University Press, 2005.
- [36] Leib, John M. , 2003. API 650 External pressure design appendix. Tank Industry Consultants.
Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vols. Vol.15, No. 3., pp 299-322.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.4290150303>
- [16] Wozniac R.C, Mitchell W.W., Washington, 1978. Basis of Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks. Sessions on Advances in Storage Tank Design, American Petroleum Institute (API),
- [17] Malhotra P.K., Wenk T., Wieland M. 2000, Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks,. *Structural Engineering and Internal*, Vols. Vol. 10, No. 3. pp 197-201.
DOI: <https://doi.org/10.2749/101686600780481509>
- [18] Lieb, John M. , 2003, API 650 External pressure design appendix. Tank Industry Consultants.
- [19] Hoskins, Leander M., and Lydik S. Jacobsen. 1934. Water pressure in a tank caused by a simulated earthquake. s.l. : seismological society of America, 1-32.
- [20] Housner, George W. 1957. Dynamic pressures on accelerated fluid containers. *Bulletin of the seismological society of America*, 15-35.
DOI: <https://doi.org/10.1785/BSSA0470010015>
- [21] Housner, George W, 1963. The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the seismological society of America*, 381-387. DOI: <https://doi.org/10.1785/BSSA0530020381>
- [22] Malhotra, Praveen. 2000. Practical nonlinear seismic analysis of tanks. *Earthquake Spectra*, 473-492.
- [23] Spritzer, J. M., and S. Guzey. Nonlinear 2017. numerical evaluation of large open-top aboveground steel welded liquid storage tanks excited by seismic loads. *Thin-Walled Structures*, 662-676.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2017.07.017>
- [24] Eidinger, J. , 2001. Seismic fragility formulations for water systems. American Lifelines Alliance.
- [25] Niwa, Akira, and Ray W. Clough. 1982. Buckling of cylindrical liquid-storage tanks under earthquake loading. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 107-122.
DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.4290100108>
- [26] Rammerstorfer, Franz G., Knut Scharf, and F. D. Fischer. 1990. Storage tanks under earthquake loading. *Appl. Mech. Rev* 43.11, 261-283.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3119154>