

M. S. Sobhan *

Faculty of Engineering,
Mahallat Institute of Higher
Education, Mahallat.

e-mail: sobhan@mahallat.ac.ir

P. Hosseini

Faculty of Engineering,
Mahallat Institute of Higher
Education, Mahallat.

e-mail:
p.hosseini@mahallat.ac.ir

A Study of the Buckling Behavior of Aboveground Cylindrical Steel Tank under Seismic Loading

In this study, the seismic response and buckling of aboveground cylindrical steel liquid storage tanks subjected to horizontal components of earthquake ground motions is investigated using incremental dynamic analyses (IDA). A broad steel tank with diameter of 30 m and height to diameter (H/D) ratio of 0.40 was designed using API 650 standard. The incremental dynamic analyses of liquid storage tank were performed for seven real seismic ground motions, which were scaled for PGAs of 0.05g to 0.50g. To verify the accuracy of the propose finite element model of the tank-liquid system, natural periods of the tank-liquid system vibration modes computed from finite element analysis compared to those obtained by analytical solutions and other numerical study. Small difference between natural periods indicates the acceptance accuracy of the finite element model. The mean peak base shear and overturning moment of the steel tank are estimated using mass spring model and compared with those obtained by finite element model. The mean peak base shear and overturning moment from finite element model greater than those obtained by mass spring model for PGA less equal 0.20g and vice versa for PGA from 0.30g to 0.50g. The incremental dynamic analysis results show that buckling of tank shell occurred at a height of 2.8 m above the tank base. Also mean critical horizontal peak ground acceleration (critical PGA) and mean critical dynamic base shear force, which induces buckling at the bottom of the cylindrical shell, are estimated.

Keywords: Steel Tank, Incremental Dynamic Buckling, Fluid-Structure Interaction, Dynamic Buckling, Elephant Foot Buckling, Shell Buckling.

* Corresponding author

Received 07 November 2021, Revised 28 December 2021, Accepted 28 December 2021.

DOI: 10.22091/cer.2021.7560.1324

بررسی رفتار کمانشی مخزن فولادی استوانه‌ای زمینی تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای

در این پژوهش، پاسخ لرزه‌ای و کمانش دینامیکی مخزن فولادی استوانه‌ای زمینی ذخیره سیال، تحت اثر مجموعه‌ای از مؤلفه‌های افقی زلزله با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی مطالعه شده است. یک مخزن ذخیره سیال عریض به قطر ۳۰ متر و با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۴۰ براساس استاندارد API 650 طراحی شده است. تحلیل‌های دینامیکی افزایشی برای هفت رکورد زلزله، که هر رکورد برای PGAهای مختلف از 0.05g تا 0.50g مقیاس شده، انجام شده است. برای صحت‌سنجی مدل‌سازی اجزای محدود سیستم مخزن-سیال، نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج تحلیلی و نتایج عددی موجود در ادبیات فنی، مقایسه شده است. مقادیر پیرو مودهای ضربانی و نوسانی حاصل از تحلیل مودال، تطابق نزدیکی با نتایج تحلیلی و نتایج عددی دارد. با استفاده از مدل مکانیکی جرم و فنر مخزن، پاسخ لرزه‌ای مخزن شامل حداکثر برش پایه و حداکثر لنگر واژگونی تخمین زده شده و با نتایج تحلیل‌های دینامیکی مقایسه شده است. نتایج نشان داد که به ازای تحریک افقی با PGA کوچکتر مساوی 0.20g، متوسط حداکثر برش پایه و متوسط حداکثر لنگر واژگونی مخزن ناشی از تحلیل اجزای محدود بیشتر از نتایج مدل جرم و فنر و برعکس برای PGA بزرگتر مساوی 0.30g تا 0.50g، کمتر است. نتایج تحلیل‌های دینامیکی مخزن نشان داد که کمانش در پایین ارتفاع جداره (در ارتفاع ۲/۸ متر بالای کف مخزن) ایجاد شده است. همچنین با استفاده از معیار کمانش دینامیکی، متوسط حداکثر شتاب افقی زمین و متوسط نیروی برش پایه دینامیکی بحرانی که باعث وقوع کمانش پوسته مخزن شده، تخمین زده شده است.

واژگان کلیدی: مخزن فولادی، تحلیل دینامیکی افزایشی، اندرکنش سیال-سازه، کمانش دینامیکی، کمانش پافیلی، کمانش پوسته.

محمد سعید سبحان*
دانشکده مهندسی، مرکز آموزش
عالی محلات، محلات، ایران.
پست الکترونیک:
sobhan@mahallat.ac.ir

پدرام حسینی
استادیار، دانشکده مهندسی،
مرکز آموزش عالی محلات،
محلات، ایران.
پست الکترونیک:
p.hosseini@mahallat.ac.ir

۱- مقدمه

صورت گسترده‌ای در صنایع گوناگون به ویژه در تأسیسات پالایشگاهی و انبارهای نفت به کار می‌روند. آسیب دیدگی مخازن فولادی در اثر وقوع زلزله و آسیب‌های جانی و مالی ناشی از آن، بسیاری از محققین را بر آن داشت که در زمینه رفتار دینامیکی و عملکرد لرزه‌ای مخازن فولادی تحقیقات گسترده‌ای انجام دهند.

مشاهدات ناشی از بازدیدهای میدانی درباره عملکرد سازه‌ای مخازن طی زلزله‌های گذشته، نشان داد که مخازن فولادی بیش از مخازن بتنی، مستعد آسیب و خرابی هستند [۱]. مودهای مختلف خرابی و آسیب لرزه‌ای مخازن فولادی در زلزله‌های گذشته، شامل کمانش

خازن فولادی و یا بتنی، سازه‌هایی حیاتی هستند که برای ذخیره سازی سیالات نظیر آب، نفت، فراورده‌های پتروشیمی، میعانات گازی، مواد شیمیایی و فاضلاب‌های شهری استفاده می‌شوند. مخازن فولادی استوانه‌ای به دلیل سهولت طراحی، ساخت و اجرای آن و همچنین مناسب بودن جهت تحمل فشار هیدرواستاتیکی سیال، به

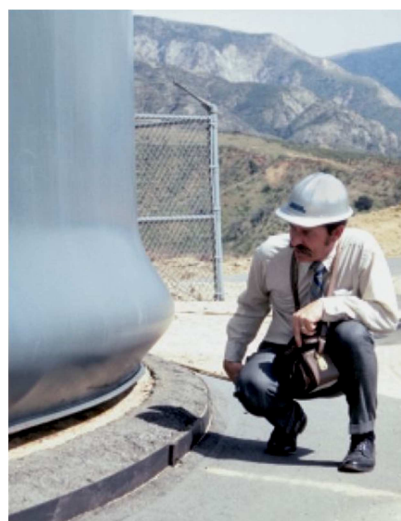
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۰۷/۱۶، بازنگری ۱۴۰۰/۱۰/۰۷، پذیرش ۱۴۰۰/۱۰/۰۷.
DOI: 10.22091/cer.2021.7560.1324 شناسه دیجیتال

مخازن ذخیره سیال، با فرض صلب بودن جداره و اتصال گیردار مخزن به فونداسیون صلب انجام شده است. هاوزنر^۳ با استفاده از یک روش تقریبی، مدلی ساده برای تخمین اثرات دینامیکی سیال در یک مخزن صلب استوانه‌ای و یا مستطیلی تحت شتاب افقی لرزه‌ای ارائه نمود. او فشار هیدرودینامیک سیال را به دو بخش فشار ضربانی^۴ و فشار نوسانی^۵ تقسیم کرد. فشار ضربانی توسط حرکت هماهنگ بخشی از سیال با جداره مخزن ایجاد می‌شود و فشار نوسانی از حرکت بخش دیگر سیال در سطح آزاد آن به وجود می‌آید. سپس با ارائه یک مدل مکانیکی دو جرمی معادل به صورت جرم و فنر، پاسخ هیدرودینامیکی سیستم مخزن- مایع را با در نظر گرفتن مود ضربانی و مود نوسانی مایع، ارزیابی کرد [۷ و ۸]. نتایج تحقیقات انجام شده توسط محققین، نشان داد که اثر انعطاف‌پذیری جداره روی رفتار دینامیکی مخزن قابل چشم‌پوشی نیست [۹-۱۲]. انعطاف‌پذیری جداره مخزن ممکن است باعث شود که شتاب بخش ضربانی مایع، بزرگتر از شتاب حداکثر زمین‌گردد [۱۰]. در شکل ۲ شکل موده‌های ارتعاشی مخزن تحت اثر زلزله نشان داده شده است [۱۳].

برای ارزیابی پاسخ لرزه‌ای مخازن فولادی، استفاده از روش‌های تحلیل عددی ضروری به نظر می‌رسد زیرا با استفاده از این ابزار می‌توان با هزینه کم و دقت مطلوب، رفتارهای غیرخطی مخازن را شبیه‌سازی کرد. در بسیاری از پژوهش‌ها برای بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن و اثر اندرکنش دینامیکی جداره انعطاف‌پذیر مخزن و سیال، از روش اجزای محدود استفاده شده است. در بیشتر این مطالعات، مخزن به صورت مهارشده مدل‌سازی شده و تحلیل‌ها با فرضیات ساده‌کننده‌ای نظیر صرف‌نظر کردن از اثرات امواج سطحی انجام شده است.

پوسته مخزن، آسیب دیدگی سقف مخزن، آسیب ناشی از بلندشدگی کف مخزن و گسیختگی میل مهار است. کمانش دینامیکی جداره مخزن، از جمله آسیب‌های رایج و خطرناک در مخازن فولادی است. کمانش پوسته مخازن فولادی معمولاً به صورت کمانش پافیلی^۱ و یا کمانش الماسی شکل^۲ رخ داده است [۲ و ۳]. مود کمانش پافیلی، نوعی ناپایداری الاستو-پلاستیک جداره مخزن است که به صورت برآمدگی به سمت خارج جداره مخزن، در نزدیکی کف مخزن رخ می‌دهد. کمانش پافیلی معمولاً در مخازن فولادی عریض (با نسبت ارتفاع به قطر کم) رخ می‌دهد. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط محققین نشان داد که ترکیب تنش‌های فشاری محوری (قائم) که از حد تنش بحرانی تجاوز کرده‌اند با تنش کششی حلقوی نزدیک به حد تسلیم باعث ایجاد کمانش پافیلی می‌شود [۴]. در شکل ۱، کمانش پافیلی جداره مخزن فولادی در اثر وقوع زلزله نشان داده شده است.



شکل ۱- کمانش پافیلی پوسته مخزن فولادی [۵]

تحقیقات اولیه بر روی رفتار دینامیکی مخازن ذخیره سیال، برای یافتن اثر اندرکنش هیدرودینامیکی سیال- سازه روی پاسخ دینامیکی سیستم مخزن- سیال بود [۶]. مطالعات تحلیلی اولیه در مورد رفتار دینامیکی

³- Housner

⁴- Impulsive

⁵- Convective

¹- Elephant foot buckling

²- Diamond shape buckling



شکل ۲- شکل مودهای ارتعاشی مخزن تحت اثر زلزله، (الف) مود ضربانی و (ب) مود نوسانی [۱۳]

آیین‌نامه‌ای و روش عددی تحقیق کردند. آنها با مقایسه نتایج عددی به دست آمده با ضوابط لرزه‌ای آیین‌نامه‌ای نشان دادند که ضوابط لرزه‌ای برای مخازن کوتاه مورد تأیید است ولی برای مخازن بلند نیاز به اصلاح دارد [۱۷].

کیلدشتی و همکاران، عملکرد لرزه‌ای و آسیب‌پذیری مخازن فولادی استوانه‌ای را با در نظر گرفتن گیرداری و همچنین انعطاف‌پذیری تکیه‌گاه مخزن ارزیابی کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که مدل‌سازی انعطاف‌پذیری تکیه‌گاه مخزن باعث می‌شود که مخزن نسبت به کماتش دینامیکی جداره، آسیب‌پذیرتر باشد [۱۸]. شریفی و همکاران، در مورد آسیب‌پذیری لرزه‌ای مخازن فولادی متکی بر شمع تحقیق شده است. منحنی شکنندگی مخازن فقط با توجه به رفتار سازه‌ای فونداسیون تعیین شده است. نتایج به دست آمده نشان داد که خرابی‌های اجزای مکانیکی پیش از خرابی‌های سازه فونداسیون رخ می‌دهد و حاکم بر رفتار لرزه‌ای مخازن است [۱۹].

بررسی رفتار لرزه‌ای و کماتشی مخازن فولادی با استفاده از تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی، پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه است و هنوز لازم است تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود. در این پژوهش، پاسخ لرزه‌ای و کماتش دینامیکی یک مخزن فولادی استوانه‌ای زمینی ذخیره سیال، تحت اثر مجموعه‌ای از مؤلفه‌های افقی زلزله با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی مطالعه شده است.

۲- مدل مکانیکی ساده‌سازی شده مخزن

الزینی^۶ روشی کاربردی برای تحلیل مخازن ذخیره مایع ارائه کرد. در این روش، جداره، سقف و ورق کف مخزن با المان‌های پوسته و محیط مایع به وسیله المان‌های مایع اوپلری و متصل به جداره مخزن مدل‌سازی شده است [۱۴]. پژوهشگران مشخصات دینامیکی و رفتار لرزه‌ای مخازن مهارشده را با انجام تحلیل‌های اجزای محدود بررسی کردند. آنها با در نظر گرفتن تنها مود ضربانی سیستم مخزن-مایع، مایع درون مخزن را با روش جرم‌های متمرکز افزوده و یا المان‌های آکوستیک اجزای محدود و جداره مخزن را توسط المان‌های پوسته مدل‌سازی کردند [۱۵]. اُزدمیر^۷ و همکاران تحلیل‌های اجزای محدودی برای بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن مهارشده و مهارنشده با در نظر گرفتن اندرکنش سیال-سازه و همچنین خاک-سازه انجام دادند [۱۶].

ویرلا^۸ و همکاران، کماتش دینامیکی مخازن فولادی استوانه‌ای زمینی^۹ با سقف ثابت مخروطی و مهارشده را تحت دو مؤلفه افقی زلزله‌های واقعی بررسی کردند. به دلیل زمان بر بودن تحلیل‌های کامپیوتری، فقط از دو شتاب نگاشت استفاده شده است. هدف این پژوهشگران به دست آوردن حداکثر شتاب افقی بحرانی که باعث وقوع کماتش الاستیک در بالای پوسته استوانه‌ای می‌گردد، بوده است [۶]. دی جرمین^{۱۰} و همکاران، کماتش دینامیکی مخازن فولادی مهارشده را با استفاده از ضوابط

^۶- El-Zeiny

^۷- Ozdemir

^۸- Virella

^۹- Aboveground steel tank

^{۱۰}- Djermane

در مدل ملهوترا، پریود مود ضربانی، T_{imp} ، و پریود مود نوسانی، T_{con} ، به ترتیب از روابط (۱) و (۲) تعیین می‌شود:

$$T_{imp} = C_i \frac{\sqrt{\rho} H}{\sqrt{h} / R \sqrt{E}} \quad (1)$$

$$T_{con} = C_c \sqrt{R} \quad (2)$$

که، H ارتفاع سیال (متر)، R شعاع مخزن (متر)، h ضخامت یکنواخت معادل جداره مخزن (متر)، ρ چگالی جرمی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب) و E مدول یانگ مصالح مخزن (پاسکال) می باشد. ضرایب C_i و C_c از جدول ۱ به دست می‌آیند.

جرم مؤثر ضربانی، m_i ، و جرم مؤثر نوسانی، m_c ، به صورت نسبتی از جرم کل سیال، m_l ، و همچنین ارتفاع مؤثر جرم‌های ضربانی و نوسانی، h_i و h_c ، در جدول ۱ داده شده است. برش پایه کل مخزن از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$Q = (m_i + m_w + m_r) SA (T_{imp}) + m_c SA (T_{con}) \quad (3)$$

که m_w جرم جداره مخزن، m_r جرم سقف مخزن، $SA(T_{imp})$ شتاب طیفی ضربانی، حاصل از طیف پاسخ الاستیک با میرایی ۲ درصد برای مخازن فولادی و پیش تنیده و با میرایی ۵ درصد برای مخازن بتنی، و $SA(T_{con})$ شتاب طیفی نوسانی، حاصل از طیف پاسخ الاستیک با میرایی ۰/۵ درصد است.

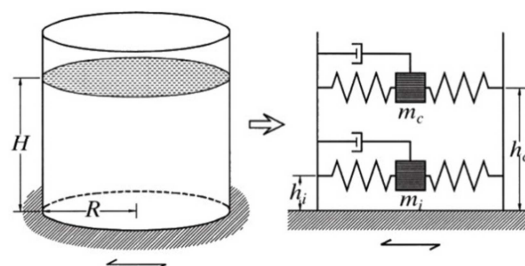
لنگر واژگونی زیر ورق کف مخزن، M' ، از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$M' = (m_i h_i + m_w h_w + m_r h_r) SA (T_{imp}) + m_c h_c SA (T_{con}) \quad (4)$$

h_w و h_r به ترتیب ارتفاع‌های مرکز ثقل جداره و سقف مخزن هستند. ارتفاع‌های h_i و h_c از جدول ۱ به دست می‌آیند.

برای کاربردهای عملی و طراحی مخزن، همواره نمی‌توان از مدل‌سازی و تحلیل‌های اجزای محدود که پرهزینه و زمان‌بر هستند، استفاده کرد. بنابراین استفاده از روش‌های تقریبی و ساده‌سازی شده، اجتناب‌ناپذیر است. در تحقیقات گذشته مدل‌های مکانیکی ساده‌سازی شده به صورت مدل جرم و فنر (MSM^{11}) برای تخمین پاسخ لرزه‌ای مخازن مهارشده معرفی شده است.

در تحقیقات اولیه، هاووزنر برای تخمین پاسخ دینامیکی مخزن استوانه‌ای و یا مستطیلی شکل با جداره صلب تحت اثر شتاب افقی زمین، مدل مکانیکی ساده‌سازی شده به صورت مدل جرم و فنر ارائه کرد. در مدل مکانیکی هاووزنر دو جرم و فنر معادل برای مود ضربانی و مود نوسانی سیال در نظر گرفته شده است. تحقیقات بعدی نشان داد که انعطاف پذیری جداره مخزن تاثیر قابل توجهی در پاسخ لرزه‌ای مثل برش پایه دارد. ملهوترا^{۱۲} روش ساده و مدل مکانیکی کاربردی به صورت جرم و فنر برای تحلیل لرزه‌ای مخازن ذخیره سیال توسعه داد. در مدل مکانیکی ملهوترا، مود ضربانی و مود نوسانی سیال و اثر انعطاف‌پذیری جداره مخزن در نظر گرفته شده است. در روش ملهوترا، پاسخ‌های سیستم مخزن-سیال در مود ضربانی و مود نوسانی به جای ترکیب به روش جذر مجموع مربعات، به طور مستقیم با هم جمع می‌شوند [۲۰]. مدل ساده‌سازی شده جرم و فنر در روش ملهوترا، در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- مدل ساده‌سازی شده جرم و فنر برای مخزن ذخیره سیال در روش ملهوترا [۲۰]

¹¹- Mass Spring Model

¹²- Malhotra

جدول ۱- مقادیر پیشنهادی برای مودهای ضربانی و نوسانی در مدل ملهوترا [۲۰]

H/R	C _i	C _c	m _i /m _l	m _c /m _l	h _i /H	h _c /H
۰/۳	۹/۲۸	۲/۰۹	۰/۱۷۶	۰/۸۲۴	۰/۴۰۰	۰/۵۲۱
۰/۵	۷/۷۴	۱/۷۴	۰/۳۰۰	۰/۷۰۰	۰/۴۰۰	۰/۵۴۳
۰/۷	۶/۹۷	۱/۶۰	۰/۴۱۴	۰/۵۸۶	۰/۴۰۱	۰/۵۷۱
۱/۰	۶/۳۶	۱/۵۲	۰/۵۴۸	۰/۴۵۲	۰/۴۱۹	۰/۶۱۶
۱/۵	۶/۰۶	۱/۴۸	۰/۶۸۶	۰/۳۱۴	۰/۴۳۹	۰/۶۹۰
۲/۰	۶/۲۱	۱/۴۸	۰/۷۶۳	۰/۲۳۷	۰/۴۴۸	۰/۷۵۱

میرایی ۲ درصد برای مود اساسی ارتعاش سیستم مخزن- سیال، میرایی رایلی متناسب با جرم برای مخازن فولادی در نظر گرفته شده است [۶ و ۱۵]. در تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی، برای کاهش هزینه و زمان محاسبات، نیمی از سیستم مخزن- سیال مدل‌سازی شده است و شرایط مرزی مربوط به تقارن، در صفحه تقارن سیستم مخزن- سیال در نظر گرفته شده است.

۳-۱- صحت‌سنجی مدل‌سازی اجزای محدود

برای صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، پرپود طبیعی مودهای ارتعاش سیستم مخزن- سیال ناشی از تحلیل مودال با نتایج حاصل از روابط تحلیلی برای پرپود طبیعی مودهای ارتعاش و همچنین نتایج عددی گزارش شده توسط ویرلا و همکاران مقایسه شده است [۶ و ۱۵]. ابعاد مخزن A که در تحقیق ویرلا به کار گرفته شده به ابعاد مخزن طراحی شده در این تحقیق نزدیک است. مدل اجزای محدود مخزن A در شکل ۴ نشان داده شده است. ابتدا مخزن تحت اثر وزن خود و فشار هیدرواستاتیک سیال قرار گرفته و سپس تحلیل مودال سیستم مخزن- سیال با استفاده از روش حل مقادیر ویژه Lanczos انجام شده است. در راهنمای نرم افزار اجزای محدود، استفاده از این روش تحلیل مودال برای مسائل سازه‌ای توصیه شده است [۲۱].

در مود ضربانی، قسمت پایین سیال همراه با جداره مخزن ارتعاش می‌کند اما در مود نوسانی، بخش بالای سیال در حال ارتعاش است. پرپود طبیعی ارتعاش مود

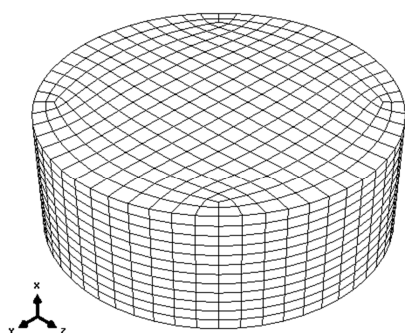
۳- مدل‌سازی اجزای محدود سیستم مخزن- مایع

مدل‌سازی و تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی سیستم مخزن- مایع با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS انجام شده است [۲۱]. در مدل اجزای محدود، از المان پوسته چهار-گره‌ای، چهارضلعی با نام S4R برای مدل‌سازی جداره و ورق کف مخزن استفاده شده است. این المان پوسته مرتبه اول و از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته^{۱۳} برای آن استفاده شده است. هر گره المان پوسته، سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی دارد. سیال با استفاده از المان آکوستیک^{۱۴} هشت گره‌ای با نام AC3D8R مدل‌سازی شده است. این المان آکوستیک مرتبه اول و از روش انتگرال‌گیری کاهش‌یافته برای آن استفاده شده است. هر گره المان آکوستیک دارای یک درجه آزادی از نوع فشار است. اندرکنش بین سیال و مخزن با تعریف کردن قید تماسی نرمال با نام Tie constraint بین سطوح جانبی و زیرین سیال با جداره مخزن، شبیه‌سازی شده است. در مدل‌های اجزای محدود، اثرات غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی، هر دو در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم و مدول الاستیسیته فولاد به ترتیب ۲۵۰ مگاپاسکال و ۲۰۰ گیگاپاسکال فرض شده است. مخزن از آب با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب پر شده است. با فرض نسبت

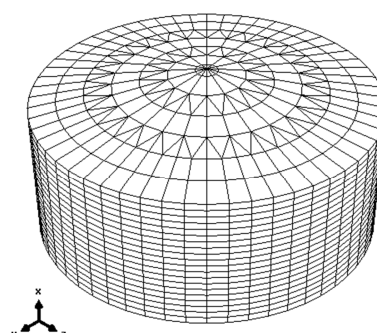
¹³- Reduced integration

¹⁴- Acoustic

۱۵]. پریرود طبیعی ارتعاش مود نوسانی خیلی بالاست.



(ب)



(الف)

شکل ۴- مدل سه بعدی اجزای محدود مخزن A، (الف) سازه مخزن و (ب) سیال

$$T_n = \frac{2\pi}{\sqrt{g \frac{\lambda_n}{R} \tanh\left(\lambda_n \frac{H_L}{R}\right)}} \quad (۶)$$

که در آن T_n پریرود طبیعی مود n ام نوسانی (هرتز)، R شعاع مخزن (متر)، λ_n ریشه مثبت n ام معادله بسل مرتبه اول، $J_1(\lambda) = 0$ است. ریشه‌های مثبت اول و دوم معادله بسل مرتبه اول به ترتیب برابر با $\lambda_1 = 1.841$ و $\lambda_2 = 5.311$ است. در جدول ۲، پریرودهای مود اصلی ضربانی، مودهای اول و دوم نوسانی مخزن A که با انجام تحلیل اجزای محدود تعیین شده است با نتایج حاصل از روابط تحلیلی و مقادیر متناظر گزارش شده توسط ویرلا و همکاران [۶]، مقایسه شده است. اختلاف بین مقادیر پریرودهای مود اصلی ضربانی، مودهای اول و دوم نوسانی حاصل از تحلیل مودال، با نتایج تحلیلی و نتایج گزارش شده توسط ویرلا و همکاران کمتر از ۴/۰ درصد است که بیانگر دقت قابل قبول نتایج مدل اجزای محدود به کار گرفته شده در این پژوهش است.

۳-۲- تحلیل حساسیت اندازه مش بندی مدل اجزای محدود

برای دستیابی به نتایج با دقت قابل قبول در تحلیل کمانشی دینامیکی، تحلیل حساسیت، بر روی اندازه مش بندی مدل اجزای محدود، انجام شده است.

ضربانی مخازن فولادی زمینی معمولاً پایین است (در تحقیقات ویرلا و همکاران کمتر از ۰/۳ ثانیه است [۶ و

در شکل ۲، شکل شماتیک مودهای ضربانی و نوسانی مخزن نشان داده است. با توجه به مشخصات مدل‌سازی اجزای محدود به کار گرفته شده، شکل مود ضربانی تغییر شکل جداره سیستم به صورت خمشی است. چون درجه آزادی المان آکوستیک از نوع فشار است بنابراین در شکل مود نوسانی، از مرکز مخزن به سمت جداره، فشار سیال در سطح سیال افزایش می‌یابد. در نتایج تحلیل مودال سیستم مخزن سیال، مودهای ضربانی و نوسانی که دارای بزرگترین ضریب مشارکت مودی هستند به عنوان مودهای اساسی مخزن انتخاب شده‌اند. پریرود طبیعی مود اساسی ضربانی مخزن استوانه‌ای زمینی براساس استاندارد API 650 برابر است با [۲۲]:

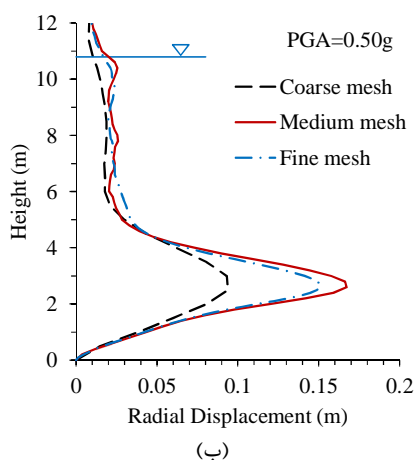
$$T_i = C_i H \sqrt{\frac{\rho D}{2 \times 10^3 E t_u}} \quad (۵)$$

که در آن T_i پریرود مود اصلی ضربانی (ثانیه)، H ارتفاع مایع (متر)، t_u ضخامت یکنواخت معادل پوسته مخزن (متر) که برای مخزن A، ۱۰/۲ میلی‌متر محاسبه شده است، D قطر مخزن (متر)، ρ چگالی سیال (کیلوگرم بر مترمکعب)، E مدول الاستیسیته مصالح مخزن (گیگاپاسکال) و ضریب بدون بعد C_i به نسبت H/D بستگی دارد و برای مخزن A، برابر با ۶/۹ است. ولتسوس، پریرود طبیعی مودهای اول و دوم نوسانی مخازن استوانه‌ای را به صورت رابطه زیر تخمین زد [۱۶]:

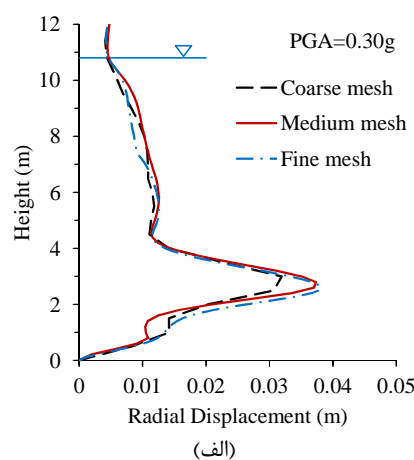
جدول ۲- پریود طبیعی موده‌های ارتعاش مخزن A (ثانیه)

مود ارتعاشی	تحلیل اجزای محدود (ABAQUS)	ویرلا و همکاران	روابط تحلیلی
ضربانی	۰/۲۱۳	۰/۲۱۲	۰/۲۰۵
اول نوسانی	۶/۰۹	-	۶/۱۴
دوم نوسانی	۳/۳۷	-	۳/۳۷

حالت شبکه‌بندی درشت به دست آمده است در حالی که تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن عریض برای حالت شبکه‌بندی ریز ۱/۹ درصد بیشتر از حالت شبکه‌بندی متوسط می‌باشد. برای زلزله با $PGA=0.50g$. تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن، برای حالت‌های شبکه‌بندی درشت، متوسط و ریز به ترتیب 0.0940 ، 0.1673 و 0.1510 متر محاسبه شده است. بنابراین تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن برای حالت شبکه‌بندی متوسط، 78 درصد بیشتر از حالت شبکه‌بندی درشت به دست آمده است در حالی که تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن عریض برای حالت شبکه‌بندی ریز $9/7$ درصد کمتر از حالت شبکه‌بندی متوسط می‌باشد. پس مدل اجزای محدود با حالت شبکه‌بندی متوسط مش‌بندی شده است. ابعاد المان‌های مخزن و سیال در امتدادهای طولی و پیرامونی به ترتیب 0.2 و 0.50 متر انتخاب شده است. بدین ترتیب تحلیل‌های اجزای محدود با هزینه و دقت مناسب انجام شده است.



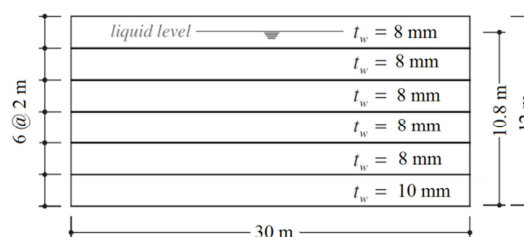
برای بررسی اثر اندازه مش‌بندی بر روی پاسخ لرزه‌ای مخزن، سه نوع شبکه‌بندی درشت، متوسط و ریز در نظر گرفته شده است. ابعاد المان‌های مخزن و سیال در امتدادهای طولی و پیرامونی در مش‌بندی درشت، متوسط و ریز به ترتیب 0.5×0.5 ، 0.25×0.25 و 0.125×0.125 متر است. برای تعیین محل وقوع کماتش جداره مخزن، ابعاد المان‌های پوسته در امتداد طولی کوچکتر از امتداد پیرامونی در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه، توزیع تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن در ارتفاع، ناشی از مؤلفه افقی زلزله Friuli با $PGA=0.30g$ و $PGA=0.50g$ ، برای حالت‌های شبکه‌بندی درشت، متوسط و ریز، در شکل ۵ نشان داده شده است. برای زلزله با $PGA=0.30g$ ، تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن، برای حالت‌های شبکه‌بندی درشت، متوسط و ریز به ترتیب 0.0319 ، 0.0374 و 0.0381 متر محاسبه شده است. بنابراین تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن برای حالت شبکه‌بندی متوسط، $17/2$ درصد بیشتر از

شکل ۵- توزیع تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن در ارتفاع، ناشی از مؤلفه افقی زلزله Friuli با $PGA=0.30g$ (الف) و $PGA=0.50g$ (ب)

$PGA=0.50g$ ، برای حالت‌های شبکه‌بندی درشت، متوسط و ریز

۴- تحلیل غیرخطی دینامیکی مخزن

در این تحقیق، مشابه تحقیقات انجام شده توسط ویرلا و همکاران، مخزن عریض (بدون سقف) با قطر ۳۰ متر، ارتفاع پوسته ۱۲ متر، نسبت ارتفاع به قطر ۰/۴۰ در نظر گرفته شده است [۶ و ۱۵]. مخازن فولادی با چنین ابعادی، کاربرد وسیعی در صنایع دارد. از آنجا که بیشترین آسیب لرزه‌ای در مخازن نسبتاً پر مشاهده شده است، ۹۰ درصد حجم داخل مخزن با سیال آب پر شده است [۶]. همچنین ضخامت پوسته مخازن با فرض شتاب افقی حداکثر زمین برابر با 0.35g و براساس الزامات طراحی لرزه‌ای استاندارد API 650 طراحی شده است [۲۲]. مشخصات مخزن عریض در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- ابعاد و ضخامت جداره مخزن

رفتار لرزه‌ای و کمانش پوسته مخزن فولادی با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزایشی، IDA^{۱۵} بررسی شده است. تحلیل دینامیکی افزایشی، یک روش تحلیل پارامتریکی است که برای تخمین تقاضای لرزه‌ای^{۱۶} سازه‌ها در ترازهای مختلف شدت لرزه‌ای^{۱۷} و با استفاده از یک سری از رکوردهای زلزله بنا نهاده شده است [۲۳]. در تحلیل دینامیکی افزایشی، سازه تحت اثر یک سری رکوردهای زلزله با شدت‌های مختلف افزایشی قرار گرفته، رفتار سازه از حالت خطی به غیرخطی تغییر کرده و سرانجام دچار فروریزش خواهد شد. در این تحقیق تحلیل‌های دینامیکی افزایشی مخزن تحت اثر تحریک تک مؤلفه‌ای زلزله، با استفاده از رکوردهای زلزله که به

ازای PGAهای مختلف از 0.05g تا 0.50g مقیاس شده، انجام شده است.

در این مقاله از روش تحلیل دینامیک افزایشی (IDA) برای محاسبه ظرفیت کمانشی مخزن و شتاب حداکثر بحرانی مؤلفه افقی زلزله که منجر به کمانش جداره مخزن می‌شود، استفاده شده است. مشابه تحقیقات قبلی در مراجع،^{۱۸} IM به کار گرفته شده در IDA، PGA است [۶ و ۱۷]. تحلیل حساسیت در مورد اینکه آیا PGA مناسب‌ترین معیار برای IM است انجام نشده است و می‌تواند زمینه‌ای برای تحقیقات آینده باشد.

۴-۱- رکوردهای زلزله

برای کاربرد نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی افزایشی، ضروری است که این روش برای مجموعه مختلفی از رکوردهای زلزله انجام شود. برای بررسی عملکرد لرزه‌ای و رفتار کمانشی مخزن فولادی، تحلیل‌های غیرخطی دینامیکی با استفاده از هفت شتاب‌نگاشت زلزله واقعی دور از گسل انجام شده است. شتاب‌نگاشت‌ها از مجموعه شتاب‌نگاشت‌های مؤسسه PEER انتخاب شده است [۲۴]. رکوردهای انتخاب شده، روی خاک متراکم یا سنگ و در فاصله روکانونی بیش از ۲۰ کیلومتر ثبت شده‌اند. مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده، در جدول ۳ داده شده است.

۴-۲- معیار کمانش دینامیکی

در اغلب مطالعات انجام شده برای تخمین بار کمانشی دینامیکی سازه‌ها، از معیار بودیانسکی-روث^{۱۹} استفاده شده است [۶ و ۲۵]. در معیار بودیانسکی-روث، سازه تحت اثر شدت‌های مختلف از بار دینامیکی اعمالی، تحلیل می‌شود. پاسخ تغییرمکان سازه برحسب زمان، برای شدت‌های مختلف بار رسم می‌شود. مقدار بار مشخصی که به ازای افزایش کوچک بار دینامیکی، جهش محسوسی در

¹⁵- Incremental dynamic analysis (IDA)

¹⁶- Seismic demand

¹⁷- Seismic intensity

¹⁸- Intensity measure

¹⁹- Budiansky-Roth criterion

۵- نتایج تحلیل دینامیکی مخزن

۵-۱- مقایسه نتایج مدل اجزای محدود و مدل جرم و فنر

در این بخش پاسخ لرزه‌ای مخزن تحت اثر رکوردهای مختلف، نظیر حداکثر برش پایه و حداکثر لنگر واژگونی ناشی از تحلیل مدل اجزای محدود (FEM) با نتایج مدل جرم و فنر (MSM) مقایسه شده است. حداکثر برش پایه مخزن به وزن سیال درون مخزن مقیاس شده است. در جدول ۴ و جدول ۵ به ترتیب نتایج متوسط پاسخ لرزه‌ای مخزن شامل حداکثر برش پایه و حداکثر لنگر واژگونی برای مجموعه رکوردهای زلزله با PGA از 0.05g تا 0.50g داده شده است.

پاسخ تغییرمکان سازه ایجاد کند، بار بحرانی کماتش دینامیکی سازه به حساب می‌آید. با رسم نمودار شدت بار دینامیکی برحسب پاسخ تغییرمکان حداکثر سازه، مشخص می‌شود که برای بارهای بزرگتر از بار بحرانی کماتش دینامیکی، شیب نمودار بار- تغییرمکان یا سختی به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در این پژوهش برای بررسی رفتار لرزه‌ای و تخمین بار کماتشی دینامیکی مخازن فولادی، از معیار بودیانسکی- روث استفاده شده است. پاسخ تغییرمکان جداره مخزن، برای شدت‌های مختلف شتاب زلزله محاسبه شده است. مقدار شتاب مشخصی که به ازای افزایش کوچک تحریک دینامیکی، جهش محسوسی در پاسخ تغییرمکان جداره مخزن ایجاد کند، شتاب بحرانی کماتش دینامیکی مخزن به حساب می‌آید.

جدول ۳- مشخصات رکوردهای زلزله

رکورد	نام زلزله	سال	ایستگاه	بزرگا	PGA (g)
EQ1	San Fernando	۱۹۷۱	Lake Hughes #4	۶/۶۱	۰/۱۹۸
EQ2	Friuli	۱۹۷۶	Tolmezzo	۶/۵۰	۰/۳۵۷
EQ3	Irpinia	۱۹۸۰	Brienza	۶/۹۰	۰/۲۲۰
EQ4	Morgan Hill	۱۹۸۴	Gilroy-Gavilan Coll.	۶/۱۹	۰/۱۱۵
EQ5	Nahanni	۱۹۸۵	Site 3	۶/۷۶	۰/۱۸۲
EQ6	Northridge	۱۹۹۴	Big Tujunga, Ang.	۶/۶۹	۰/۲۵۳
EQ7	Kocaeli	۱۹۹۹	Gebze	۷/۵۱	۰/۲۶۱

جدول ۴- متوسط نسبت حداکثر برش پایه به وزن مایع درون مخزن در مدل اجزای محدود و مدل جرم و فنر

Difference (%)	Q_{max}/W_l		PGA (g)
	FEM	MSM	
+۲۴	۰/۰۷۳	۰/۰۵۹	۰/۰۵
+۱۷	۰/۱۳۸	۰/۱۱۸	۰/۱۰
+۹	۰/۱۹۲	۰/۱۷۶	۰/۱۵
+۲	۰/۲۳۹	۰/۲۳۵	۰/۲۰
-۱۳	۰/۳۰۷	۰/۳۵۳	۰/۳۰
-۲۴	۰/۳۵۵	۰/۴۷۰	۰/۴۰
-۳۴	۰/۳۹۰	۰/۵۸۸	۰/۵۰

با افزایش شتاب حداکثر زلزله (PGA)، پاسخ برش پایه و لنگر واژگونی مخزن هم به همان نسبت افزایش خواهد

تحلیل دینامیکی مدل جرم و فنر با فرض رفتار الاستیک سیستم مخزن- سیال انجام شده است. بنابراین

محدوده الاستیک قرار دارد، متوسط حداکثر برش پایه و متوسط حداکثر لنگر واژگونی مخزن ناشی از تحلیل اجزای محدود به ترتیب ۲۴ و ۳۲ درصد بیشتر از نتایج مدل جرم و فنر است.

یافت. نتایج نشان می‌دهد که به ازای زلزله‌های با PGA کوچکتر مساوی 0.20g، متوسط حداکثر برش پایه و متوسط حداکثر لنگر واژگونی مخزن به دست آمده از تحلیل اجزای محدود بیشتر از نتایج مدل جرم و فنر است. در $PGA=0.05g$ که تنش جداره مخزن در

جدول ۵- متوسط نسبت حداکثر لنگر واژگونی به حاصلضرب وزن مایع در شعاع مخزن برای مدل اجزای محدود و مدل جرم و فنر

Difference (%)	$M_{max}^i/(W_iR)$		PGA (g)
	FEM	MSM	
+۳۲	۰/۰۱۷	۰/۰۴۲	۰/۰۵
+۲۱	۰/۰۳۵	۰/۰۸۳	۰/۱۰
+۱۴	۰/۰۵۲	۰/۱۲۵	۰/۱۵
+۷	۰/۰۷۰	۰/۱۶۶	۰/۲۰
-۶	۰/۱۰۴	۰/۲۴۹	۰/۳۰
-۲۱	۰/۱۳۹	۰/۳۳۲	۰/۴۰
-۳۲	۰/۱۷۴	۰/۴۱۵	۰/۵۰

مخزن، در راستای تحریک افقی، ایجاد می‌شود. توزیع متوسط تغییرشکل حداکثر پوسته مخزن در ارتفاع، ناشی از تحریک مؤلفه افقی زلزله، برای مقادیر مختلف شتاب حداکثر زمین، در شکل ۷ داده شده است. نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی نشان می‌دهد که بیشترین مقدار متوسط تغییرمکان حداکثر پوسته مخزن تحت اثر مؤلفه افقی زلزله در ارتفاع ۲/۸ متر بالای کف مخزن (ردیف دوم پوسته با ضخامت ۸ میلی‌متر) رخ داده است. با توجه به شکل ۷، به ازای PGA بزرگتر مساوی 0.30g، افزایش ناگهانی یا جهش در تغییرمکان پوسته مخزن ایجاد شده است. در شکل ۸، دامنه تغییرشکل پوسته مخزن تحت اثر شتاب نگاشت زلزله Northridge با $PGA=0.50g$ ، در انتهای تحلیل دینامیکی، نشان داده شده است.

از نتایج حاصل از تحلیل‌های دینامیکی افزایشی، منحنی ظرفیت کمانشی مخزن تحت اثر مؤلفه افقی برای شتاب نگاشت‌های مختلف به دست آمده است. منحنی‌های برش پایه حداکثر برحسب تغییرمکان حداکثر جداره مخزن (در گره بحرانی که کمانش رخ داده است)،

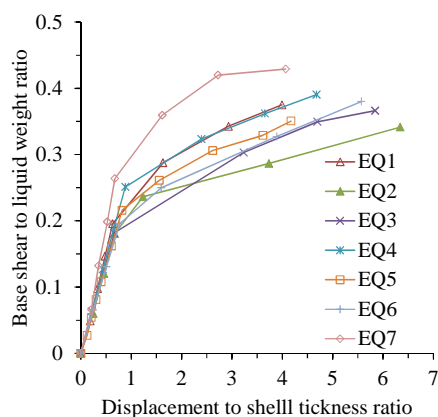
با افزایش PGA از 0.05g تا 0.20g که تنش پوسته مخزن افزایش می‌یابد و ممکن است به تنش تسلیم و یا نزدیکی آن برسد، اختلاف بین نتایج کاهش می‌یابد.

به ازای زلزله‌های با PGA بزرگتر مساوی 0.30g تا 0.50g که بخشی از جداره فولادی مخزن تسلیم شده است، متوسط حداکثر برش پایه و متوسط حداکثر لنگر واژگونی مخزن ناشی از تحلیل اجزای محدود کمتر از نتایج مدل جرم و فنر است. با افزایش PGA از 0.30g تا 0.50g اختلاف بین نتایج افزایش می‌یابد به طوری که در $PGA=0.5g$ متوسط حداکثر برش پایه و متوسط حداکثر لنگر واژگونی مخزن ناشی از تحلیل اجزای محدود به ترتیب ۳۴ و ۳۲ درصد کمتر از نتایج مدل جرم و فنر است.

۵-۲- کمانش دینامیکی پوسته مخزن

فشار هیدرو دینامیک ناشی از تحریک لرزه‌ای به علاوه فشار هیدرو استاتیک سیال، باعث تغییرمکان پوسته مخزن می‌شود. در صورتی که مخزن تحت اثر فقط یک مؤلفه افقی زلزله قرار بگیرد، تغییرشکل حداکثر جداره

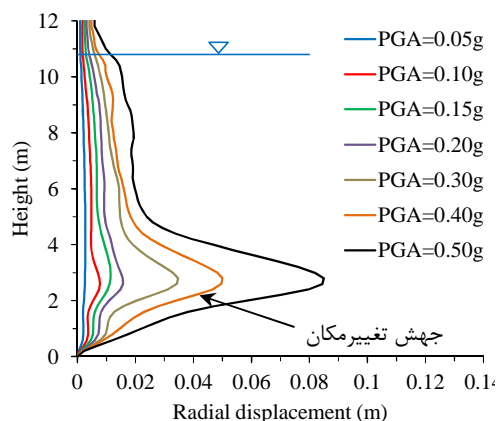
چنانچه در شکل ۱۰ نشان داده شده است، برای تعیین برش پایه بحرانی کمانش، متوسط منحنی IDA به صورت یک منحنی دوخطی، معادل سازی شده است. با استفاده از تحلیل رگرسیون خطی بر روی داده‌های متوسط منحنی IDA، منطبق‌ترین منحنی دوخطی برش پایه برحسب تغییر مکان حداکثر جداره مخزن به دست آمده است. روش به کار گرفته شده در این پژوهش برای دوخطی سازی منحنی متوسط IDA، توسط ویرلا و همکاران برای تخمین تراز بحرانی شتاب حداکثر زمین (PGA) برای مخازن فولادی تحت اثر زلزله، معرفی شد [۶]. در تحقیقات بعدی نیز توسط ماهری و عبداللهی، بوراتی و تاونو^{۲۰} و دی جرمین^{۲۱} و همکاران به کار گرفته شده است [۲۶، ۲۷ و ۱۷]. در منحنی دوخطی IDA، نقطه تقاطع دو خط، نشان دهنده ناحیه انتقال از یک حالت پایدار به حالت ناپایدار و یا برش پایه بحرانی کمانش است. با توجه به شکل ۱۱، نیروی برش پایه بحرانی کمانش دینامیکی مخزن تحت اثر مؤلفه افقی زلزله برابر با ۱۹/۱۹ مگانیوتن (نسبت برش پایه به وزن سیال برابر با ۰/۲۵۶) است.



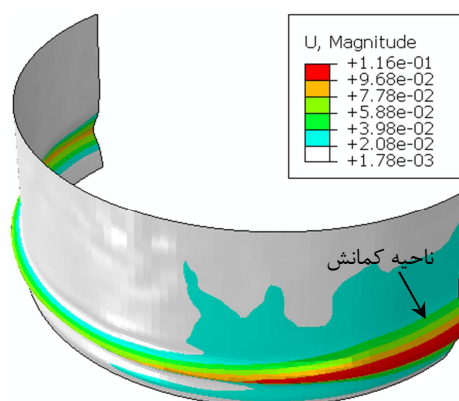
شکل ۹- منحنی‌های ظرفیت کمانش مخزن تحت اثر تک مؤلفه افقی زلزله برای شتاب نگاشت‌های مختلف

۳-۵- شتاب بحرانی کمانش دینامیکی مخزن

در شکل ۹ رسم شده است. متوسط منحنی‌های IDA در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۷- توزیع متوسط تغییر مکان حداکثر پوسته مخزن در ارتفاع تحت اثر مؤلفه افقی زلزله با PGAهای مختلف



شکل ۸- توزیع دامنه تغییر شکل پوسته مخزن تحت اثر شتاب نگاشت زلزله Northridge با PGA=0.50g

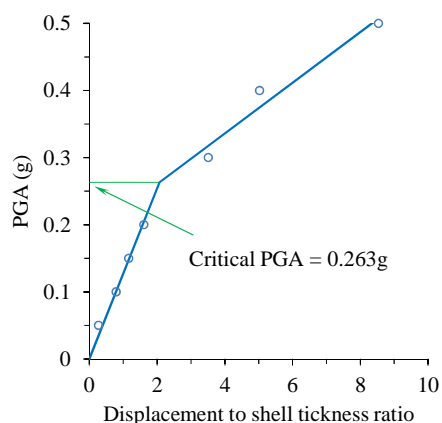
در این شکل‌ها مقدار نیروی برش پایه به وزن استاتیکی سیال و تغییر شکل جداره به ضخامت حداکثر پوسته مخزن نرمال شده است.

منحنی‌های تحلیل دینامیکی افزایشی یا منحنی‌های ظرفیت کمانش در شکل ۸، نشان می‌دهد که در تغییر مکان‌های کوچک، شیب اولیه منحنی منطبق با سختی الاستیک مخزن است. در مقادیر بزرگ برش پایه، شیب منحنی کاهش می‌یابد که این نشان دهنده افزایش رفتار غیرخطی جداره مخزن است. با شتاب زلزله وارد بر مخزن و پس از تسلیم اولیه پوسته مخزن در گره بحرانی کمانش، با عبور از یک مقدار برش پایه بحرانی، سختی به اندازه قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

²⁰- Buratti and Tavano

²¹- Djermane

ویرلا و همکاران، روش معادل‌سازی دوخطی برای محاسبه شتاب بحرانی کمانش دینامیکی مخازن فولادی مهار شده تحت اثر مؤلفه افقی شتاب زمین، استفاده شد [۶]. در تحقیقات پیشین، این منحنی دوخطی، مسیر شبه‌تعادلی^{۲۲} در نقطه بحرانی کمانش نامیده شده‌اند. شیب اولیه منحنی دوخطی برابر با سختی الاستیک سازه است. چنانچه شتاب حداکثر زمین از مقدار شتاب بحرانی، PGA_{cr} ، بیشتر شود، شیب منحنی دوخطی کاهش محسوسی خواهد یافت. با توجه به منحنی دوخطی، شتاب و یا PGA بحرانی کمانش الاستو-پلاستیک پوسته مخزن تحت اثر مؤلفه افقی زلزله برابر با $0.263g$ است.

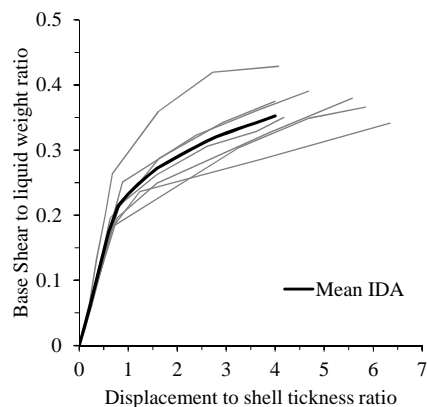


شکل ۱۰- منحنی دوخطی سازی شده PGA برحسب متوسط تغییرمکان شعاعی حداکثر جداره مخزن تحت اثر مؤلفه افقی زلزله

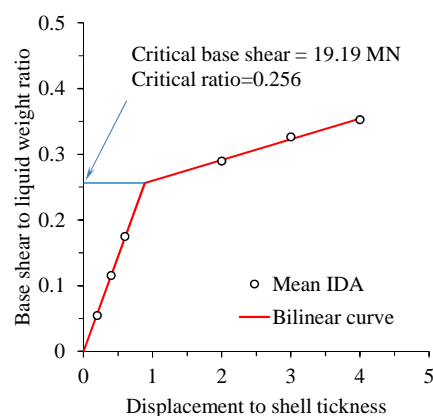
۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پاسخ لرزه‌ای و کمانش دینامیکی مخازن فولادی استوانه‌ای زمینی تحت اثر شتاب افقی زلزله با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) بررسی شده است. نتایج مدل‌سازی اجزای محدود سیستم مخزن-سیال با نتایج تحلیلی و عددی موجود در ادبیات فنی تطابق نزدیکی دارد. تحلیل‌های دینامیکی افزایشی مخزن برای هفت شتاب‌نگاشت افقی زلزله با PGA از $0.05g$ تا $0.50g$ انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که

متوسط PGA بحرانی رکوردهای زلزله که باعث ایجاد جهش ناگهانی در تغییرمکان حداکثر و یا کمانش دینامیکی پوسته مخزن فولادی می‌شود، محاسبه شده است.



شکل ۱۱- متوسط منحنی‌های IDA



شکل ۱۲- منحنی دوخطی متوسط IDA

در شکل ۱۲، بیشترین مقدار متوسط جابه‌جایی حداکثر جداره مخزن در گره بحرانی، به فاصله $2/8$ متر بالای کف مخزن، برحسب مقادیر متناظر شتاب حداکثر زمین، رسم شده است. با توجه به شکل ۱۲، مشخص است که افزایش ناگهانی و یا جهش در تغییرمکان شعاعی جداره مخزن تحت اثر تحریک تک مؤلفه افقی زلزله برای PGA بالاتر از $0.20g$ رخ داده است.

با انجام تحلیل رگرسیون بر روی این داده‌ها، مناسب‌ترین منحنی دوخطی در شکل ۱۲ رسم شده است. ارائه این نوع منحنی رفتاری دوخطی برای بررسی کمانش دینامیکی پوسته‌ها اولین مرتبه توسط بودیانسکی و روث انجام شده است [۲۵]. پس از آن در تحقیقات

²²- Pseudo equilibrium path

نتایج تحلیل دینامیکی نشان داد که کمانش پوسته در ارتفاع ۲/۸ متر بالای کف مخزن رخ داده است. با استفاده معیار کمانش دینامیکی، شتاب بحرانی کمانش الاستو-پلاستیک پوسته مخزن تحت اثر مؤلفه افقی زلزله برابر با 0.263g محاسبه شد. همچنین نیروی برش پایه بحرانی کمانش دینامیکی مخزن تحت اثر تک مؤلفه افقی زلزله برابر با ۱۹/۱۹ مگانیوتن (نسبت برش پایه به وزن سیال برابر با ۰/۲۵۶) تخمین زده شده است.

به‌ازای زلزله‌های با PGA کوچکتر مساوی 0.20g، متوسط حداکثر برش پایه و متوسط حداکثر لنگر واژگونی مخزن به دست آمده از تحلیل اجزای محدود بیشتر از نتایج مدل جرم و فنر است. به‌ازای زلزله‌های با PGA بزرگتر مساوی 0.30g تا 0.50g که بخشی از جداره فولادی مخزن تسلیم شده است، متوسط حداکثر برش پایه و متوسط حداکثر لنگر واژگونی مخزن ناشی از تحلیل اجزای محدود کمتر از نتایج مدل جرم و فنر است.

مراجع

- [1] Hamdan, F. H. (2000). "Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks", *Journal of Constructional Steel Research*, 53(3), 307-333.
- [2] Alliance, A. L. (2001). "Seismic fragility formulations for water systems", Washington, DC., FEMA and ASCE.
- [3] Batikha, M., Chen, J.-F., & Rotter, J. M. (2018). "Fibre reinforced polymer for strengthening cylindrical metal shells against elephant's foot buckling: An elasto-plastic analysis", *Advances in Structural Engineering*, 21(16), 2483-2498.
- [4] Niwa, A., & Clough, R. W. (1982). "Buckling of cylindrical liquid storage tanks under earthquake loading", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 10(1), 107-122.
- [5] Steinbrugge, K. V. (1940). *Earthquakes and Earthquake Engineering*.
- [6] Virella, J. C., Godoy, L. A., & Suárez, L. E. (2006). "Dynamic buckling of anchored steel tanks subjected to horizontal earthquake excitation", *Journal of Constructional Steel Research*, 62(6), 521-531.
- [7] Housner, G. W. (1957). "Dynamic pressures on accelerated fluid containers", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 47(1), 15-35.
- [8] Housner, G. W. (1963). "The dynamic behavior of water tanks", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 381-387.
- [9] Veletsos, A. S. (1974). "Seismic effects in flexible liquid storage tanks", *Proceedings of the 5th world conference on earthquake engineering*, 1, 630-639.
- [10] Veletsos, A. S., & Auyang, J. (1977). "Earthquake response of liquid storage tanks", *Advances in Civil Engineering through Engineering Mechanics*, 24.
- [11] Haroun, M. A., & Housner, G. W. (1981). "Seismic design of liquid storage tanks", *Journal of the Technical Councils of ASCE*, 107(1), 191-207.
- [12] Haroun, M. A., & Housner, G. W. (1981). "Earthquake response of deformable liquid storage tanks", *Journal of Applied Mechanics*, 48(2), 411-418.
- [13] Yoshida, S. (2014). "Review of earthquake damages of aboveground storage tanks in japan and taiwan", *ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference*.
- [14] El-Zeiny, A. A. (1995). "Nonlinear time-dependent seismic response of unanchored liquid storage tanks", *Ph.D. dissertation*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Irvine.
- [15] Virella, J. C., Godoy, L. A., & Suárez, L. E. (2006). "Fundamental modes of tank-liquid systems under horizontal motions", *Engineering Structures*, 28(10), 1450-1461.
- [16] Ozdemir, Z., Souli, M., & Fahjan, Y. M. (2010). "Application of nonlinear fluid-structure interaction methods to seismic analysis of anchored and unanchored tanks", *Engineering Structures*, 32(2), 409-423.
- [17] Djermane, M., Zaoui, D., Labbaci, B., & Hammadi, F. (2014). "Dynamic buckling of steel tanks under seismic excitation: Numerical evaluation of code provisions", *Engineering Structures*, 70, 181-196.
- [18] Kildashti, K., Mirzadeh, N., & Samali, B. (2018). "Seismic vulnerability assessment of a case study anchored liquid storage tank by considering fixed and flexible base restraints", *Thin-Walled Structures*, 123, 382-394.
- [19] Sharifi, M., Moezi, A., & Sobati, N. (2019). "The Seismic Fragility Curve of Atmospheric Steel Storage Tanks on a Pile", *Journal of Civil Infrastructure Researches*, 5(1), 51-60.
- [20] Hernandez-Hernandez, D., Larkin, T., & Chou, N. (2021). "Shake table investigation of nonlinear soil-structure-fluid interaction of a thin-walled storage tank under earthquake load", *Thin-Walled Structures*, 167, 108143.
- [21] ABAQUS 6.10. (2010). *Abaqus analysis user's manual*, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI.

- [22] American Petroleum Institute (API). (2013). *Welded steel tanks for oil storage*, API 650, 12th ed, Washington, DC.
- [23] Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). "Incremental dynamic analysis", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(3), 491-514.
- [24] Bozorgnia, Y., Abrahamson, N. A., Atik, L. Al, Ancheta, T. D., Atkinson, G. M., Baker, J. W., Chiou, B. S.-J. (2014). "NGA-West2 research project", *Earthquake Spectra*, 30(3), 973-987.
- [25] Budiansky, B., & Roth, R. S. (1962). "Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shells", *NASA Collected Papers on Stability of Shell Structures*, TN-1510, 597-606.
- [26] Maheri, M. R., & Abdollahi, A. (2013). "The effects of long term uniform corrosion on the buckling of ground based steel tanks under seismic loading", *Thin-Walled Structures*, 62, 1-9.
- [27] Buratti, N., & Tavano, M. (2014). "Dynamic buckling and seismic fragility of anchored steel tanks by the added mass method", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(1), 1-21.