

## مطالعه پارامتری رفتار لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای مهار نشده نفت با استفاده از تحلیل عددی

مهران سیدرزاقی<sup>۱</sup> و ساسان عشقی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، Email: mehran@iiees.ac.ir

۲- استادیار پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

**چکیده:** مخازن استوانه‌ای روزمینی، بخش مهمی از بسیاری از مجتمع‌های صنعتی از جمله پالایشگاه‌های نفت را تشکیل می‌دهند. رفتار لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای مهار نشده محتوی مایع تا حد زیادی متأثر از نسبت ارتفاع به قطر ( $H/D$ ) و پرشدگی مخزن می‌باشد. بر این اساس، در این تحقیق بر مبنای تفاوت عملکرد لرزه‌ای مخازن با نسبت‌های ارتفاع به قطر گوناگون، یک نسبت ارتفاع به قطر مخزن به عنوان مرز بین مخازن پهن و باریک انتخاب گردید. همچنین اثر در صد محتویات درون مخزن بر عملکرد لرزه‌ای آن مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، نسبت ارتفاع به قطر  $H/D=0.6$  را می‌توان به عنوان مرز بین مخازن بلند (باریک) و پهن قلمداد نمود؛ به گونه‌ای که در صورتی که  $H/D < 0.6$  باشد، مخزن را می‌توان از نوع پهن در نظر گرفت و در غیر این صورت مخزن از نوع بلند (باریک) می‌باشد. تراز سطح آزاد مایع درون مخزن، تأثیر قابل توجهی بر عملکرد لرزه‌ای مخازن می‌گذارد. مقدار این تأثیر در مخازن مختلف بسته به مقدار نسبت  $H/D$  متغیر است. در مخازن پهن با کاهش محتویات درون مخزن تنش‌های داخلی پوسته به طور پیوسته کاهش می‌یابد؛ لیکن مخازن بلند و باریک با تغییر سطح تراز آزاد مایع رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهند.

**کلید واژه‌ها:** مخازن استوانه‌ای فولادی، مخازن مهار نشده، بلندشدگی مخزن، کمانش پوسته، عملکرد لرزه‌ای، تحلیل غیرخطی

### A Parametric Study on Seismic Behavior of Un-Anchored Oil Storage Tanks Using Numerical Analysis

**Abstract:** On-grade cylindrical tanks are important components of many industrial complexes such as oil refineries. The seismic behavior of un-anchored cylindrical liquid storage tanks is highly dependent on height to diameter ratio ( $H/D$ ) and volume of contained liquid. Hence, in this study based on the differences in seismic performance of tanks of various aspect ratios, a certain aspect ratio is selected as a margin of broad and tall tanks. Furthermore, the contribution of volume of contained liquid in seismic performance of the tanks was investigated. Results of this study revealed that the aspect ratio of  $H/D=0.6$  can be considered as a marginal value of aspect ratios of broad and tall tanks. In other words, a tank can be considered as a broad tank if the aspect ratio is greater than 0.6; otherwise it should be considered as a tall tank. The freeboard level of the contained liquid, plays a major role in the seismic performance of liquid storage tanks. The significance of such effects is dependent to the  $H/D$  ratio of the tank. Although in broad tanks the shell stresses decrease gradually by decreasing the volume of the liquid, but tall tanks behave in various manners by changing the volume of the fluid.

#### ۱- مقدمه

بخش مهم بسیاری از مجتمع‌های صنعتی خصوصاً پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی اختصاص به مخازن استوانه‌ای روزمینی نگهدارنده مایع دارد. این گونه مخازن از لحاظ سیستم سقف به دو گروه مخازن با سقف ثابت و مخازن با سقف شناور تقسیم‌بندی می‌گردند. سقف‌های ثابت بر اساس شکل هندسی دارای انواع مختلفی چون مخروطی و کروی می‌باشند. بسیاری از مخازن استوانه‌ای روزمینی موجود، بنا به علل اقتصادی از نوع مهارنشده

طراحی و اجرا شده‌اند. در این مخازن هیچگونه قید و مهاری میان مخزن و شالوده وجود ندارد. با توجه به اینکه مایعات ذخیره شده در مخازن موجود در مجتمع‌های مرتبط با صنعت نفت اغلب مواد خطرناک (سمی یا قابل اشتعال) می‌باشند، آسیب‌دیدگی این مخازن علاوه بر ایجاد خسارات فیزیکی مستقیم، ممکن است سبب ایجاد خسارات غیرمستقیمی چون آلودگی‌های زیست محیطی و نیز آتش‌سوزی گردد. این در حالی است که تجربه عملکرد مخازن

در زلزله‌های گذشته از جمله آنکوراز، آلاسکا (۱۹۶۴) و از میت، ترکیه (۱۹۹۹) نشان دهنده آسیب‌پذیری لرزه‌ای قابل توجه مخازن استوانه‌ای فلزی و خصوصاً مخازن مهار نشده می‌باشد. مخازن استوانه‌ای مهار نشده نگهدارنده مایعات با توجه به اندرکنش موجود بین سازه، مایع و خاک دارای رفتار دینامیکی نسبتاً پیچیده‌ای می‌باشند. عوامل متعددی از جمله نسبت ارتفاع به قطر مخزن ( $H/D$ )، درصد پرشدگی یا نسبت ارتفاع مایع داخل مخزن به ارتفاع کل مخزن ( $\frac{h}{H}$ ) و بیشینه شتاب زلزله ورودی نیز می‌توانند بر رفتار لرزه‌ای این مخازن تأثیر گذار باشند.

در این تحقیق، به بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای فلزی نگهدارنده مایعات پرداخته می‌شود. برای این منظور، مخازن موجود در یکی از پالایشگاه‌های کشور انتخاب شدند. کلیه مخازنی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند از نوع روزمینی و مهار نشده با سقف ثابت مخروطی می‌باشند. یکی از مسائل پیچیده در زمینه رفتار مخازن مهار نشده تحت اثر زلزله، بلندشدگی این گونه مخازن می‌باشد. وجود نقص‌های هندسی و سیستماتیک در ورق کف مخزن، وجود نیروهای غشایی در ورق کف و اثر انعطاف‌پذیری بستر مخزن از جمله عواملی هستند که باید در حل مسائل بلندشدگی مخزن در نظر گرفته شوند [۹]. این در حالی است که غالب روابط تحلیلی ارائه شده در زمینه بلندشدگی مخازن مهار نشده بر اساس روش استاتیکی معادل پایه‌گذاری شده‌اند. مالهوترا و ولتسوس تحقیقات گسترده‌ای را بر روی بلندشدگی مخازن استوانه‌ای قرار گرفته بر روی بستر صلب و اثر آن بر روی رفتار دینامیکی این گونه مخازن انجام دادند [۱۰-۱۳]. این بررسی‌ها نشان دادند که بلندشدگی باعث کاهش نیروهای هیدرودینامیکی وارده بر دیواره مخزن می‌گردند؛ اما تنش‌های محوری فشاری دیواره مخزن در اثر بلندشدگی افزایش می‌یابد. بلندشدگی مخازن قرار گرفته بر روی بستر انعطاف‌پذیر توسط مالهوترا [۱۴-۱۵] مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که بلندشدگی در چنین مخازنی در مقایسه با مخازن قرار گرفته بر روی بستر صلب، سبب افزایش کمتری در تنش‌های محوری فشاری می‌گردد.

در حال حاضر تعریف مشخصی به عنوان مرز بین مخازن باریک و پهن وجود ندارد. اورورک و سو [۱۶] براساس عملکرد مخازن در زلزله‌های گذشته نشان دادند که نسبت ارتفاع به قطر مخزن ( $H/D$ ) بر روی آسیب‌پذیری لرزه‌ای مخازن تأثیر گذار است. براساس نتایج این بررسی، منحنی‌های شکنندگی مخازن با نسبت  $\frac{H}{D} \geq 0.7$  نسبت به مخازن با نسبت  $\frac{H}{D} < 0.7$  با یکدیگر متفاوت است. این در حالی است که مالهوترا [۱۷] نسبت  $\frac{H}{D} = 0.5$  را به عنوان مرز بین مخازن باریک و پهن معرفی می‌نماید.

نکته‌ای که در مورد اغلب تحقیقات انجام شده بر روی مخازن مهار نشده محتوی مایع مطرح است این است که این تحقیقات عمدتاً بر اساس مدل‌های ساده شده و مبتنی بر روش‌های استاتیکی معادل و یا بر اساس مطالعات تجربی بر روی عملکرد واقعی مخازن در زلزله‌های گذشته می‌باشند. این در حالی است که مدل‌های ساده شده غالباً تقریبی هستند [۱۸] و قادر به نشان

در زلزله‌های گذشته از جمله آنکوراز، آلاسکا (۱۹۶۴) و از میت، ترکیه (۱۹۹۹) نشان دهنده آسیب‌پذیری لرزه‌ای قابل توجه مخازن استوانه‌ای فلزی و خصوصاً مخازن مهار نشده می‌باشد. مخازن استوانه‌ای نگهدارنده مایعات با توجه به اندرکنش موجود بین سازه، مایع و خاک دارای رفتار دینامیکی نسبتاً پیچیده‌ای می‌باشند. عوامل متعددی از جمله نسبت ارتفاع به قطر مخزن ( $H/D$ )، درصد پرشدگی یا نسبت ارتفاع مایع داخل مخزن به ارتفاع کل مخزن ( $\frac{h}{H}$ ) و بیشینه شتاب زلزله ورودی نیز می‌توانند بر رفتار لرزه‌ای این مخازن تأثیر گذار باشند. در این تحقیق، به بررسی عوامل مؤثر بر عملکرد لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای فلزی نگهدارنده مایعات پرداخته می‌شود. برای این منظور، مخازن موجود در یکی از پالایشگاه‌های کشور انتخاب شدند. کلیه مخازنی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند از نوع روزمینی و مهار نشده با سقف ثابت مخروطی می‌باشند.

## ۲- تاریخچه مطالعات انجام شده در زمینه رفتار دینامیکی مخازن استوانه‌ای نگهدارنده مایع

مطالعات اولیه تحلیلی در زمینه هیدرودینامیک مخازن توسط ژاکوبسن [۱] و هاوونز [۲] صورت گرفت. در این تحلیل‌ها جداره مخزن استوانه‌ای بصورت صلب در نظر گرفته شد و مخزن به صورت مهار شده بر روی یک بستر صلب فرض شد. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که تحت اثر تحریکات ورودی، بخشی از مایع درون مخزن که به بخش موج موسوم است دچار نوسانات پرپود بلند می‌گردد، در حالی که مابقی مایع که به بخش سخت موسوم است، شتابی مشابه تحریکات وارده به مخزن را تجربه کرده و به صورت صلب گونه و با دیواره مخزن در حرکت می‌باشد. ولتسوس [۳]، ولتسوس و یانگ [۴] و هارون و هاوونز [۵] مسئله هیدرو-دینامیک را در مخازن با جداره انعطاف‌پذیر مهار شده قرار گرفته بر روی بستر صلب بررسی نمودند. نتیجه بررسی‌های اخیر نشان داد که انعطاف‌پذیری جداره مخزن سبب می‌گردد که بخش سخت مایع تحت شتابی که ممکن است تا چندین مرتبه از بیشینه شتاب تحریک ورودی بیشتر باشد، نوسان نماید. بررسی‌ها همچنین نشان داد برش پایه و لنگر واژگونی محاسبه شده با فرض صلب بودن جداره مخزن به مراتب کمتر از مقادیر به دست آمده از تحلیل‌ها با فرض انعطاف‌پذیری دیواره مخزن می‌باشند.

کلاف و همکاران [۶] از مدل‌های کوچک مقیاس، جهت برآورد آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای مهار شده و مهار نشده استفاده نمودند. این تحقیقات آزمایشگاهی نیز مؤید وجود دو بخش موج و سخت در مایع در خلال حرکت دینامیکی بود.

روی یک مخزن باریک و یک مخزن پهن با نسبت‌های ارتفاع به قطر ثابت و درصد پرشدگی متفاوت (نسبت ارتفاع مایع به ارتفاع مخزن گوناگون) تحت تأثیر تحریکاتی با بیشینه شتاب ثابت (0.4g) انجام شد.

نهایتاً جهت بررسی اثر تغییرات بیشینه شتاب زلزله ورودی بر عملکرد لرزه‌ای مخازن، تحلیل‌های دینامیکی بر روی مخازن با نسبت‌های ابعادی و پرشدگی ثابت با زلزله‌هایی با بیشینه شتاب‌های مختلف (0.2g-1.0g) انجام گرفت.

#### ۴- انجام تحلیل‌های دینامیکی بر روی مخازن

##### ۴-۱- مدلسازی مخازن

جهت انجام تحلیل‌های عددی بر روی مخازن استوانه‌ای مهارنشده، گروهی از مخازن موجود در یکی از مجتمع‌های پالایشگاهی ایران انتخاب شد. سقف کلیه مخازن انتخاب شده از نوع ثابت مخروطی است. مشخصات هندسی این مخازن در جدول (۱) ارائه شده است. نرم‌افزار ANSYS9.0 [۲۳] جهت مدلسازی مخازن، مورد استفاده قرار گرفت. مدلسازی پوسته دیواره، سقف و کف مخزن با استفاده از المان‌های Shell181 صورت گرفت. المان Shell181 از نوع چهار گرهی است و در هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی است. این المان قابلیت لحاظ نمودن رفتار غیرخطی برای مصالح سازه را دارد و برای حل مسائل مربوط به کمناش نیز مناسب می‌باشد. مایع درون مخزن با استفاده از المان‌های Fluid80 مدلسازی شد. این المان از نوع شش وجهی هشت گرهی و دارای سه درجه آزادی انتقالی در هر گره است و برای حل مسائل اندرکنش مایع-سازه مناسب می‌باشد. به منظور لحاظ نمودن امکان بلندشدگی مخزن تحت اثر تحریکات ورودی از المان‌های Contact استفاده شد که قابلیت لحاظ نمودن سختی فشاری بدون وجود سختی کششی را دارا هستند. برای این منظور المان Conta178 مورد استفاده قرار گرفت. این المان از نوع دو گرهی با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره است و قابلیت لحاظ نمودن تماس و لغزش را میان دو سطح با در نظر گرفتن اصطکاک کولمب بین دو سطح را دارا می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات هندسی مخازن انتخاب شده.

نام مخزن	قطر مخزن (m)	ارتفاع مخزن (m)	محدوده ضخامت پوسته دیواره (mm)	ضخامت ورق (mm)
T34	۴۳/۸	۱۴/۷۵	۸-۲۵	۶
T44	۳۳/۵	۱۴/۷۵	۶-۱۸	۶
T53	۲۷/۵	۱۴/۷۵	۶-۱۲	۶
T62	۱۹/۵	۱۲/۲۵	۶-۱۲	۶
T96	۷/۶	۷/۳۵	۶	۶

دادن رفتار واقعی سازه پیچیده‌ای نظیر مخزن در زمان زلزله نیستند. مطالعات تجربی نیز با توجه به محدود بودن تعداد مخازن قرار گرفته در معرض زلزله اغلب دارای عدم قطعیت‌های قابل توجهی می‌باشند [۱۹] و انجام مطالعات پارامتری بر روی این گونه داده‌ها عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد. در این میان در مطالعات انجام شده با استفاده از مدل‌های دینامیکی دقیق‌تر نیز به دلیل وقت گیر بودن تحلیل‌ها و پیچیدگی مدل، رفتار مخزن تحت یک تحریک ورودی خاص مد نظر قرار گرفته [۲۰]، یا تنها بر روی یک پارامتر مطالعه نموده‌اند [۲۱] و یا در جهت سهولت برخی ساده‌سازی‌ها در مدل دینامیکی در نظر گرفته شده و از مسائلی چون لمبرزدگی مایع صرف نظر شده است [۲۲]. بر این اساس در محدوده مطالعات صورت گرفته توسط مؤلفین، انجام مطالعات پارامتری بر روی مدل‌های دقیق‌تر مخازن مهار نشده نگهداری مایعات ضروری می‌نماید.

##### ۳- روش تحقیق

با توجه به کاستی‌های موجود در ادبیات فنی که در بخش ۲ ذکر شد، هدف از این تحقیق بررسی اثر نسبت‌های ابعادی، درصد محتویات درون مخزن و بیشینه شتاب افقی زلزله بر رفتار لرزه‌ای مخازن مهار نشده می‌باشد. برای این منظور از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی با استفاده از شتابنگاشت‌های زلزله‌های مختلف استفاده شده است. در این تحقیق از دو پارامتر میزان بلندشدگی و تنش‌های فشاری پوسته دیواره جهت بیان رفتار کلی سازه مخزن استفاده شده است. جهت مقایسه بهتر این دو کمیت در مخازن مختلف از کمیت‌های بدون بعد شده استفاده می‌گردد؛ لذا از نسبت بلند شدگی حداکثر به قطر مخزن و نسبت تنش فشاری حداکثر پوسته به تنش بحرانی کمناش پوسته به ترتیب به عنوان کمیت‌های بدون بعد بلندشدگی و تنش فشاری پوسته استفاده می‌شود.

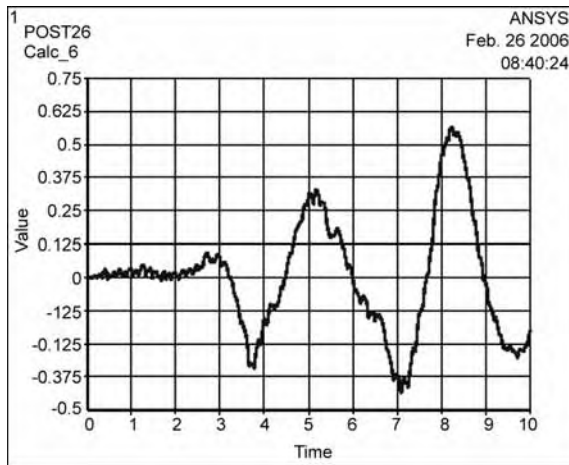
در این تحقیق، ابتدا اثر نسبت‌های ابعادی مد نظر قرار گرفته است. به منظور بررسی اثر نسبت ارتفاع به قطر مخازن بر رفتار لرزه‌ای آنها تحلیل‌های دینامیکی بر روی مخازن با نسبت‌های ابعادی مختلف با درصد محتویات ثابت (۸۰٪) تحت اثر تحریکات با بیشینه شتاب ثابت (0.4g) صورت گرفت. با ترسیم منحنی‌های بلندشدگی و تنش فشاری بیشینه بر حسب نسبت ارتفاع به قطر و مقایسه تغییرات پاسخ مخازن با نسبت‌های ابعادی گوناگون به زلزله سعی در تعریف مرز مشخصی بین مخازن باریک و پهن شد. با مشخص شدن مرز بین مخازن باریک و پهن، در مرحله بعدی اثر درصد پرشدگی مخزن بر عملکرد لرزه‌ای مخازن باریک و پهن بطور مجزا بررسی گردید. برای این منظور تحلیل‌های عددی بر

جدول ۲: مشخصات نگاشت‌های انتخاب شده.

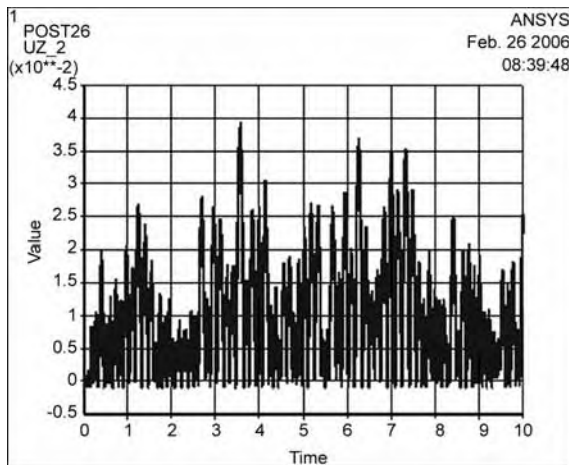
فاصله رومرکزی (Km)	بزرگی	سال وقوع	نام زلزله	ردیف
۳/۹	۶/۷	۱۹۹۴	نورتریج	E1
۵/۱	۶/۹	۱۹۸۹	لوما پریتا	E2
۳	۷/۴	۱۹۷۹	طیس	E3
۲۴/۰۶	۷/۶	۱۹۹۹	چی چی	E4
۲۴/۲	۶/۶	۱۹۷۱	سن فرناندو	E5
۴۲	۷/۴	۱۹۵۲	کرن کانتی	E6
۴۹	۷/۴	۱۹۹۰	منجیل	E7

### ۴-۳- نتایج تحلیل‌های دینامیکی

نمونه‌ای از نتایج تحلیل‌های دینامیکی در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) به ترتیب نشان‌دهنده تاریخچه زمانی پاسخ بخش فوقانی مایع و بلندشدگی یکی از گره‌های لبه کف مخزن T96 به عنوان نمونه می‌باشد.



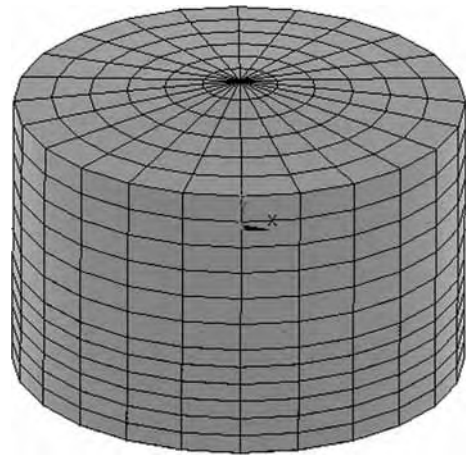
الف) لمبرزدگی مایع



ب) بلندشدگی مخزن

شکل ۲. نمونه‌ای از تاریخچه زمانی پاسخ مخزن و مایع به تحریک ورودی.

نمایی از یکی از مدل‌های اجزاء محدود مخازن در شکل (۱) نشان داده شده است. به منظور بررسی رفتار لرزه‌ای مخازن مهارنشده از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شد. برای این منظور مدل رفتاری فولاد به صورت دو خطی کینماتیک با حد جاری شدن  $F_y = 240\text{Mpa}$  و شیب منحنی رفتاری تنش- کرنش فولاد پس از جاری شدن به میزان دو درصد مدول الاستیسیته خطی فولاد در نظر گرفته شد [۲۴-۲۵]. چگالی مایع درون مخزن برابر با ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد که متوسط چگالی مواد نفتی معمول نگهداری شده در مخازن می‌باشد. در انجام تحلیل‌ها صرفاً اثر مؤلفه افقی شتاب زلزله لحاظ گردید.

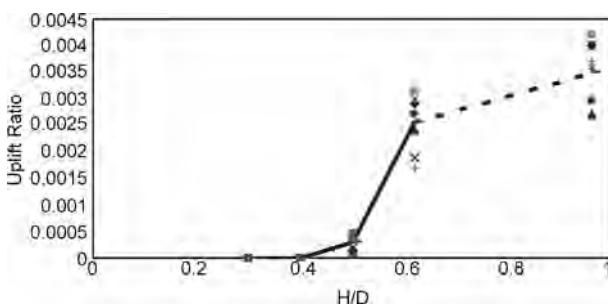


شکل ۱. نمایی از سازه واقعی و مدل اجزا محدود مخزن T62.

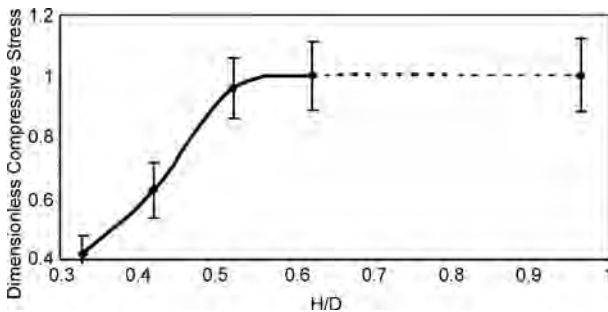
### ۴-۲- انتخاب شتابنگاشت‌ها

تحلیل‌های تاریخچه زمانی با استفاده از ۷ شتابنگاشت ثبت شده از زلزله‌های واقعی انجام شد. با توجه به اینکه مخازن قرار گرفته بر روی بستر صلب فرض شدند؛ در انتخاب شتابنگاشت‌ها دقت شد تا تمامی آنها بر روی بستر سنگی یا ساختمانی دارای خاک سخت ثبت شده باشد. همچنین شتابنگاشت‌ها با فواصل ساختمانی تا گسل گوناگون در نظر گرفته شدند. مشخصات شتابنگاشت‌های استفاده شده در جدول شماره (۲) خلاصه شده است.

ارتفاع به قطر بزرگتر از  $0/6$  قابل توجه است. همچنین همان گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، تنش‌های محوری فشاری پوسته دیواره در  $1/6$  پائین پوسته در مخازن با نسبت ارتفاع به قطر بزرگتر از  $0/6$  به مراتب بیشتر از مخازن پهن‌تر است. براین اساس، با توجه به تغییر عملکرد مخازن با نسبت ارتفاع به قطر بزرگتر از  $0/6$  در مقایسه با مخازن با نسبت‌های ابعادی کوچکتر، می‌توان نسبت  $H/D = 0/6$  را مرز بین مخازن مهارنشده باریک (بلند) و پهن دانست. توجه به این نکته لازم است که با توجه به عدم وجود داده در فاصله نسبت ارتفاع به قطر بین  $0/6$  تا  $0/9$ ، حد فاصل این نقاط در نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۴) و (۵) با خط چین نمایش داده شده است.

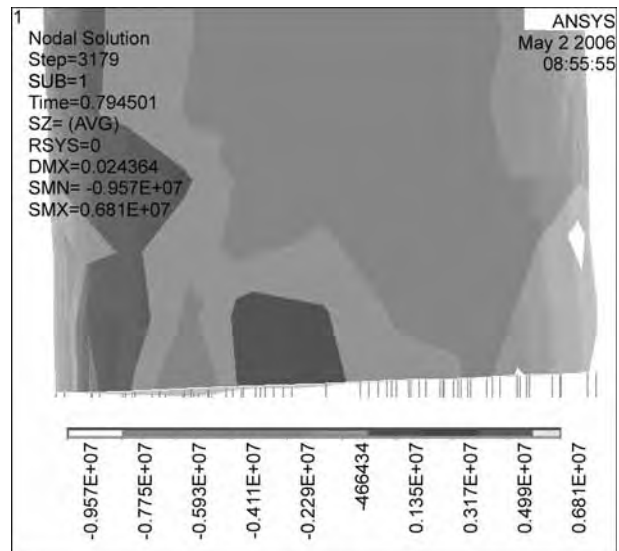


شکل ۴. تغییرات میزان بلندشدگی مخزن برحسب نسبت  $H/D$

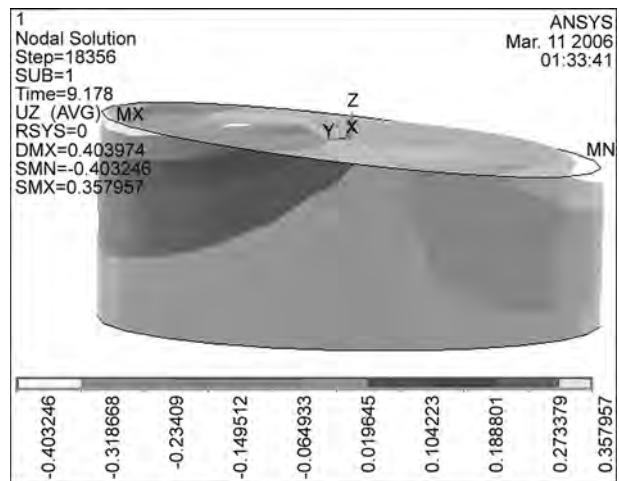


شکل ۵. تغییرات تنش فشاری محوری بدون بعد پوسته برحسب نسبت  $H/D$

به منظور بررسی اثر درصد محتویات بر عملکرد دینامیکی مخزن، هر یک از مخازن پهن گروه  $T44$  و مخازن بلند و باریک  $T62$  و  $T96$  با نسبت‌های مختلف  $h/H$  برابر با  $0/20$ ،  $0/50$ ،  $0/60$  و  $0/80$  مورد بررسی قرار گرفتند. برای این منظور از شتابنگاشت‌های هفت گانه  $E1$  تا  $E7$  هم‌پایه شده به بیشینه شتاب  $0.4g$  استفاده شد و هر مخزن با  $h/H$  متفاوت تحت اثر زلزله‌های ورودی مختلف مورد تحلیل قرار گرفت و در هر مورد بلندشدگی مخزن و نیز تنش‌های محوری پوسته دیواره تعیین گردید. اثر نسبت ارتفاع مایع داخل مخزن به ارتفاع دیواره بر عملکرد لرزه‌ای مخزن  $T44$  به عنوان نماینده مخازن پهن بررسی شد. نتایج این



الف) بلندشدگی پوسته



ب) لمبرزدگی مایع

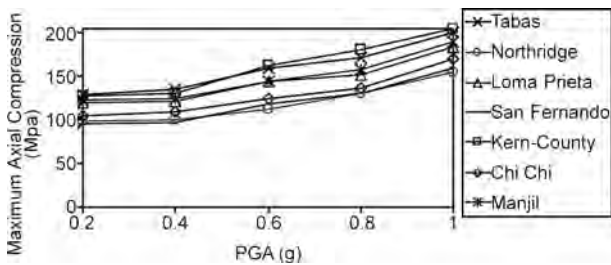
شکل ۳. نمونه‌ای از نتایج گرافیکی پاسخ مخزن به تحریک ورودی.

همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، حرکت مایع درون مخزن، یک حرکت پرپود بلند می‌باشد در حالی که بلندشدگی پوسته، نوسانی با فرکانس بالا است. نمایش تصویری بلندشدگی و لمبرزدگی مایع درون مخزن به ترتیب در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) نشان داده شده‌اند.

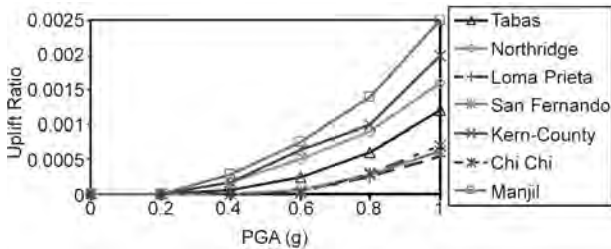
## ۵- مطالعات پارامتریک

به منظور بررسی اثر افزایش نسبت ارتفاع به قطر بر عملکرد لرزه‌ای مخازن مهار نشده مدل‌های با  $H/D$  متفاوت ( $0/96$ ،  $0/63$ ،  $0/53$ ،  $0/44$ ،  $0/34$ ) با درصد پرشدگی ثابت مورد تحلیل قرار گرفتند. نمودار شکل (۴) نشان‌دهنده تغییرات بلندشدگی مخازن برحسب  $H/D$  تحت اثر زلزله‌های ورودی هفت‌گانه هم‌پایه شده به  $0.4g$  می‌باشد. همان‌گونه که در این تصویر مشاهده می‌شود، به ازای بیشینه شتاب  $0.4g$ ، بلندشدگی پوسته تنها در مخازن با نسبت

اثر تغییرات بیشینه شتاب زلزله بر عملکرد لرزه‌ای مخازن گروه T44 بررسی شد. برای این منظور شتابنگاشت‌های E1 تا E7 به بیشینه شتاب‌های 0.2g-1.0g با گام 0.2g هم‌پایه شدند و تحلیل‌ها بر روی مخازن مذکور با استفاده از این شتابنگاشت‌ها انجام گرفت. اثر تغییرات بیشینه شتاب بر تغییرات تنش فشاری پوسته و بلندشدگی به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، با افزایش بیشینه شتاب تحریک ورودی میزان تنش‌های فشاری پوسته و بلندشدگی افزایش می‌یابد. نکته‌ای که در این شکل‌ها قابل توجه است، افزایش پراکندگی نتایج خروجی خصوصاً بلندشدگی مخزن تحت اثر افزایش بیشینه شتاب می‌باشد که این امر را می‌توان به توسعه رفتار غیرخطی تحت اثر تحریکات قوی‌تر نسبت داد.



شکل ۸. تغییرات میزان تنش فشاری پوسته بر حسب بیشینه شتاب تحریک ورودی.

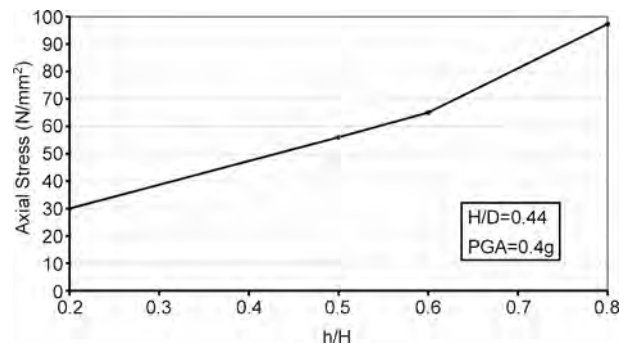


شکل ۹. تغییرات میزان بلندشدگی پوسته بر حسب بیشینه شتاب تحریک ورودی.

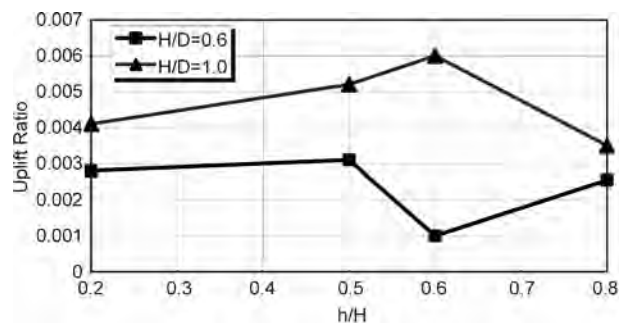
## ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

جهت رفع برخی از کاستی‌های موجود در مطالعات گذشته، به منظور بررسی اثر عوامل مختلف مؤثر بر آسیب‌پذیری لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای روزمینی مهار نشده با سقف ثابت، تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی بر روی پنج گروه از مخازن موجود در یک پالایشگاه با نسبت ارتفاع به قطر مختلف (۰/۹۶، ۰/۶۲، ۰/۵۳، ۰/۴۴، ۰/۳۴) و با درصد محتویات گوناگون (۰/۱۸، ۰/۱۶، ۰/۱۵، ۰/۱۲) صورت گرفت. برای این منظور از شتابنگاشت‌های ۷ زلزله واقعی ثبت شده بر روی ساختگاه با

بررسی‌ها نشان می‌دهد، درصد محتویات مخزن در مخازن پهن تأثیری بر میزان بلندشدگی مخزن نخواهد داشت. شکل (۶) نشان‌دهنده میانگین مقادیر تنش فشاری پوسته بر حسب نسبت ارتفاع مایع به ارتفاع پوسته می‌باشد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، میزان تنش محوری فشاری پوسته در این مخازن با کاهش درصد محتویات مخزن بطور پیوسته کاهش می‌یابد. نتایج این تحلیل‌ها همچنین نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری لرزه‌ای این دسته از مخازن با کاهش درصد محتویات از ۵۰٪ ظرفیت بسیار ناچیز می‌باشد. این در حالی است که در مخازن با نسبت ارتفاع به قطر بزرگتر از ۰/۶ عملکرد لرزه‌ای مخزن تا حد زیادی تحت تأثیر ارتفاع مایع درون مخزن قرار دارد. نکته‌ای که در این‌گونه مخازن قابل توجه است این است که این مخازن برخلاف مخازن پهن کاهش نسبت  $\frac{h}{H}$  لزوماً منجر به کاهش بلندشدگی در مخزن نمی‌گردد، شکل (۷). تجربه عملکرد لرزه‌ای مخازن در زلزله‌های گذشته نیز مؤید این مطلب است. نمونه‌ای از بلندشدگی قابل توجه در مخازن باریک با نسبت  $h/H$  کمتر از ۰/۳ در یک مخزن مهار نشده محتوی گازوئیل در خلال زلزله پنجم دیماه ۱۳۸۲ بم به وقوع پیوست [۲۶]. بلندشدگی در این مخزن، موجب آسیب‌دیدگی شالوده و گسستگی در اتصال لوله‌های متصل به مخزن گردید.



شکل ۶. تغییرات تنش محوری فشاری در ۱/۶ پائین پوسته دیواره بر حسب درصد محتویات درون مخزن.



شکل ۷. تغییرات میزان بلندشدگی پوسته بر حسب درصد محتویات درون مخزن.

4. Veletsos, A.S. and Yang, J.Y. (1977). "Earthquake Response of Liquid Storage Tanks Advances in Civil Engineering through Mechanics", *Proc. 2<sup>nd</sup> Engineering Mechanics Specialty Conference*, Raleigh, NC, ASCE, 1-24.
  5. Haroun, M.A. and Housner, G.W. (1981). "Seismic Design of Liquid Storage Tanks", *Journal Technical Councils, ASCE*, **107**(1), 191-207.
  6. Clough, R.W., Niwa, A., and Clough, D.P. (1979). "Experimental Seismic Study of Cylindrical Tanks", *Journal Str. Div.*, **7**(ST12), 2565-2590.
  7. Veletsos, A.S. (1984). "Seismic Response and Design of Liquid Storage Tanks", *Guidelines for Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, TCLEE, ASCE*, New York, NY, 255-370, 443-461.
  8. Veletsos, A.S. and Tang, Y. (1990). "Soil-Structure Interaction Effects for Laterally Excited Liquid Storage Tanks", *Journal Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, **19**(4), 473-496.
  9. NZSEE (1986). "Seismic Design of Storage Tanks", *New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Wellington, New Zealand.
  10. Malhotra, P.K. and Veletsos, A.S. (1994a). "Beam Model for Uplifting Analysis of Cylindrical Tanks", *Journal Str. Engineering, ASCE*, **120**(12), 3471-3488.
  11. Malhotra, P.K. and Veletsos, A.S. (1994b). "Uplifting Analysis of Base Plates in Cylindrical Tanks", *Journal Str. Engineering, ASCE*, **120**(12), 3489-3505.
  12. Malhotra, P.K. and Veletsos, A.S. (1994c). "Uplifting Response of Un-Anchored Liquid-Storage Tanks", *Journal Str. Engineering, ASCE*, **120**(12), 3525-3547.
  13. Malhotra, P.K. and Veletsos A.S. (1995). "Seismic Response of Un-Anchored and Partially Anchored Liquid-Storage Tanks", *Pep. TR-105809, Electric Power Research Inst. Palo Alto, California*.
- خاک سخت و با فواصل ساختگاه از گسل متفاوت (۳ الی ۴۹ کیلومتر) استفاده شد. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد:
- با توجه به اینکه در حال حاضر در مراجع مختلف معیار ثابتی جهت تمییز مخازن بلند و پهن از یکدیگر ارائه نشده است، در این تحقیق سعی در یافتن معیاری مناسب به عنوان مرز بین مخازن پهن و باریک گردید. مخازن مهار نشده با نسبت ارتفاع به قطر کمتر از  $0.6$  تحت اثر تحریکات ورودی با بیشینه شتاب  $0.4g$  دچار بلندشدگی نشدند و بلندشدگی تنها در مخازن مهار نشده با نسبت ارتفاع به قطر بزرگتر از  $0.6$  به وقوع پیوست. همچنین نرخ افزایش تنش فشاری پیوسته به ازای مقادیر  $H/D \geq 0.6$  افزایش می‌یابد. به بیان دیگر عملکرد لرزه‌ای مخازن مهار نشده با نسبت ارتفاع به قطر بزرگتر از  $0.6$  با عملکرد لرزه‌ای مخازن مهار نشده با نسبت ارتفاع به قطر کوچکتر از  $0.6$  متفاوت است. بر این اساس نسبت  $H/D$  برابر با  $0.6$  را می‌توان به عنوان مرز بین مخازن مهار نشده بلند و پهن قلمداد نمود.
  - تغییرات ارتفاع آزاد مایع درون مخزن تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار لرزه‌ای مخازن مهار نشده بلند دارد. در این گونه مخازن کاهش نسبت  $\frac{h}{H}$  لزوماً منجر به کاهش بلندشدگی در مخزن نمی‌گردد. این در حالی است که در مخازن پهن تحت اثر زلزله‌های با  $PGA$  کمتر از  $0.4g$  تغییرات ارتفاع آزاد مایع تأثیری بر بلندشدگی مخزن ندارد، لیکن کاهش درصد محتویات مخزن بطور پیوسته موجب کاهش تنش محوری فشاری پیوسته می‌گردد.
  - با افزایش بیشینه شتاب تحریک ورودی میزان پراکندگی نتایج خروجی افزایش می‌یابد که این امر را می‌توان به توسعه رفتار غیرخطی تحت اثر تحریکات قوی‌تر نسبت داد.

## مراجع

1. Jacobsen, L.S. (1949). "Impulsive Hydrodynamics of Fluid Inside a Cylindrical Tank and of Fluid Surrounding a Cylindrical Pier", *Bull. Seismological Soc. of Am.*, **39**(3), 189-203.
2. Housner, G.W. (1954). "Earthquake Pressure on Fluid Containers", Project No. 081-095, California Institute of Technology, Pasadena, California.
3. Veletsos, A.S. (1974). "Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks", *Proceeding 5<sup>th</sup> WCEE*, Rome, Italy, 630-639.

- Tanks”, *Journal Earthquake Engineering and Str. Dyn.*, **15**, 299-322.
21. Mezaini, N. (2006). “Effects of Soil-Structure Interaction on Analysis of Cylindrical Tanks”, *Journal Practice Periodical on Str. Design and Const.*, *ASCE*, **11**(1), 50-57.
  22. Eshghi S. and Ahari, M.N. (2001). “Evaluation of Seismic Vulnerability of Oil Storage Tanks”, *Proc. SEE4 Int. Conf.*, Tehran, Iran (In Persian).
  23. ANSYS (2004). “ANSYS Release 9.0 Documentation”, ANSYS Inc., USA.
  24. Elneshai A. and Izzuddin, B.A. (1993). “Modeling of Material Non-Linearities in Steel Structures Subjected to Transient Dynamic Loading”, *Journal Earthquake Engineering Str. Dyn.*, **22**, 509-532
  25. Smith, W.F. (1981). “Structures and Properties of Engineering Allows”, McGraw Hill Publication Co.
  26. Eshghi, S. and Razzaghi, M.S. (2005). “Performance of Industrial Facilities in the 2003 Bam, Iran Earthquake”, *Earthquake Spectra*, **21**(S1), 395-410.
  14. Malhotra, P. (1995). “Base Uplifting Analysis of Flexibly Supported Liquid Storage Tanks”, *Journal Earthquake Engineering Str. Dyn.*, **24**(12), 1591-1607.
  15. Malhotra, P. (1997). “Seismic Response of Soil Supported Un-Anchored Liquid-Storage Tanks”, *Journal Str. Engineering, ASCE*, **123**(4), 440-450.
  16. O’Rourke, M. and So, P. (2000). “Seismic Fragility Curves for On-Grade Steel Tanks”, *Earthquake Spectra*, **16**(4).
  17. Malhotra, P. (2000). “Practical Nonlinear Seismic Analysis of Tanks”, *Earthquake Spectra*, 473-492.
  18. Nachtigal, I., Gebbeken, N., and Urrutia-Galicia, J. (2003). “On the Analysis of Vertical Cylindrical Tanks under Earthquake Excitation at Base”, *Journal Engineering Structures*, **25**, 201-213.
  19. ASCE (2001). Seismic Fragility Formulations for Water Systems: Part 1- Guidelines, American Lifeline Alliances, USA.
  20. Barton, D.C. and Parker, J.V. (1987). “Finite Element Analysis of the Seismic Response of Anchored and Un-Anchored Liquid Storage