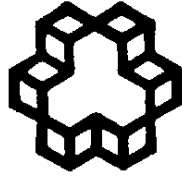


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

رساله دوره دکتری در گرایش سازه

عنوان رساله:

بررسی رفتار مخازن فلزی سقف ثابت مهارشده برای ارائه روش‌های پیشگیری از

کمانش جداره تحت تاثیر تحریکات زلزله

استاد راهنما:

دکتر سعیدرضا صباغ یزدی

استاد مشاور:

دکتر ساسان عشقی

پژوهشگر:

مسلم امیری

زمستان ۱۳۹۰

در تحقیق حاضر به بررسی مشخصات دینامیکی و رفتار مخازن ذخیره مایعات تحت بار زلزله پرداخته شده است. موارد فوق الذکر به چند مبحث مجزای زیر تقسیم‌بندی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

(۱) انجام آزمایش ارتعاش محیطی و صحت‌سنجی مدل‌های عددی تهیه شده از مخازن در محدوده خطی

(۲) بررسی فرکانس‌ها و شکل مودهای ارتعاشی مخازن

(۳) بررسی رفتار مخازن تحت بار زلزله

مطالعه هر کدام از موارد بیان شده در فصول مختلف این نوشتار انجام گردیده است.

در مورد موضوع اول، از روش اجزای محدود برای مدلسازی مخازن مورد نظر استفاده شده است. مخازن در نظر گرفته شده شامل ۳ مخزن از نوع مهار شده با سقف ثابت گنبدی هستند که دارای ارتفاع یکسان ۱۲/۱۹ متر و قطرهای متفاوت ۱۲/۱۹، ۱۶/۰۰ و ۱۸/۲۹ متر می‌باشند. سپس، برای صحت‌سنجی نتایج مدلسازی عددی در محدوده خطی، از نتایج آزمایشات ارتعاش محیطی بهره‌گیری شده است. این آزمایشات تحت بارهای محیطی مانند باد و ریزلرزه‌های خاک زیر مخازن و در ۲ عمق مایع که تقریباً برابر با ۰/۴۰ و ۰/۹۰ ارتفاع مخازن در نظر گرفته شده بود، بر روی آنها انجام گردیده است.

در خصوص موضوع دوم، تاثیر سقف و همچنین عمق مایع در فرکانس‌ها و شکل مودهای ارتعاشی محوری، محیطی و قائم مخازن مورد نظر بررسی شده است. به این منظور، مدل عددی مخازن در ۲ حالت روباز و سقف ثابت و در ۴ عمق مایع که برابر ۱/۸۰، ۴/۸۰، ۸/۵۰ و ۱۰/۹۰ متر در نظر گرفته شد، تهیه شده است. در پایان این قسمت، روابطی برای بررسی میزان تاثیر سقف در مشخصات دینامیکی مخازن ارائه شده است. در موضوع سوم از تحقیق رفتار دینامیکی و کمانش جداره مخازن تحت زلزله افقی بررسی شده است. بدین منظور، مدل عددی مخازن با استفاده از روش اجزای محدود تهیه شده و با در نظر گرفتن اثرات غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی تحلیل‌های تاریخچه زمانی بر روی آنها انجام شده است. علاوه بر ویژگی‌های هندسی، چند پارامتر بیان شده زیر هم در پاسخ دینامیکی مخازن تاثیرگذار هستند که مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- عمق مایع: ۲ عمق ۸/۵۰ و ۱۰/۹۰ متر در نظر گرفته شده است.
 - شتاب ورودی به سیستم: ۳ رکورد زلزله ال‌سنتر، نورث‌ریچ و طبس با بیشینه شتابها و پریودهای غالب متفاوت در نظر گرفته شدند.
 - شرایط سقف: مخازن در ۲ حالت روباز و با سقف ثابت مدلسازی شده‌اند.
- تاثیر موارد فوق در برش پایه، تنش‌ها و تغییرشکل‌های جداره و همچنین کمانش‌های الاستیک و الاستوپلاستیک ایجاد شده در جداره مخازن بررسی شده است.

کلمات کلیدی: مخازن ذخیره مایعات، آزمایش ارتعاش محیطی، اجزای محدود، فرکانس‌ها و شکل مودهای ارتعاشی، تاثیر سقف، رفتار دینامیکی، کمانش الاستیک و الاستوپلاستیک

فصل اول: کلیات.....	۱
(۱-۱) مقدمه.....	۱
(۲-۱) گستره تحقیق.....	۳
(۳-۱) روش انجام رساله.....	۳
(۱-۳-۱) آزمایشات میدانی.....	۳
(۲-۳-۱) مدلسازی عددی.....	۴
(۴-۱) ساختار کلی رساله.....	۵
فصل دوم: مروری بر ادبیات فنی موجود.....	۸
(۱-۲) مقدمه.....	۸
(۲-۲) انواع آسیب‌های مشاهده شده در مخازن فلزی ذخیره مایعات در زلزله‌های گذشته.....	۹
(۱-۲-۲) کمانش جداره مخزن.....	۹
(۱-۱-۲-۲) کمانش پافیلی.....	۹
(۲-۱-۲-۲) کمانش الماسی شکل.....	۱۰
(۲-۲-۲) آسیب‌های حاصل از برخورد مایع موج به جداره و سقف مخزن.....	۱۲
(۳-۲-۲) بلندشدگی مخزن.....	۱۵
(۴-۲-۲) سایر خرابیها.....	۱۷
(۳-۲) مطالعات انجام شده در زمینه تحلیل دینامیکی مخازن ذخیره مایعات.....	۱۸
(۱-۳-۲) مطالعات عددی.....	۱۸
(۲-۳-۲) مطالعات آزمایشگاهی.....	۲۹
(۳-۳-۲) مطالعات تحلیلی.....	۳۸
(۴-۲) مروری بر قوانین آیین‌نامه‌ای مربوط به تحلیل لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای.....	۴۷
منابع و مراجع.....	۵۱

فصل سوم: مدل‌سازی عددی و آنالیز مودال مخازن.....	۵۵
(۱-۳) مقدمه.....	۵۵
(۲-۳) مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه تعیین مشخصات دینامیکی مخازن ذخیره مایعات.....	۵۶
(۳-۳) مدل‌سازی مخازن.....	۶۱
(۱-۳-۳) انتخاب المانها.....	۶۱
(۱-۱-۳-۳) المانهای مناسب جهت مدل‌سازی سازه و سقف مخزن.....	۶۲
(۲-۱-۳-۳) المانهای مناسب جهت مدل‌سازی سیال.....	۶۴
(۲-۳-۳) شرایط مرزی اعمال شده.....	۶۶
(۱-۲-۳-۳) فصل مشترک سیال و جداره مخزن.....	۶۶
(۲-۲-۳-۳) کف مخزن.....	۶۶
(۴-۳) کنترل شبکه‌بندی بکار رفته در مدل اجزاء محدود.....	۶۷
(۵-۳) انواع مودهای ارتعاشی مخازن استوانه‌ای.....	۶۷
(۶-۳) معرفی مخازن مورد نظر.....	۶۸
(۷-۳) آنالیز مودال مخازن.....	۷۳
(۸-۳) جمع بندی و نتیجه‌گیری.....	۷۹
منابع و مراجع.....	۸۰
فصل چهارم: آزمایش ارتعاش محیطی.....	۸۳
(۱-۴) مقدمه.....	۸۳
(۲-۴) انواع آزمایش‌های دینامیکی.....	۸۵
(۱-۲-۴) آزمایش به وسیله میز لرزان.....	۸۵
(۲-۲-۴) آزمایش‌های ارتعاش آزاد.....	۸۵
(۱-۲-۲-۴) ارتعاش آزاد با تغییر مکان اولیه.....	۸۵
(۲-۲-۲-۴) ارتعاش آزاد با سرعت اولیه.....	۸۶

۳-۲-۴) آزمایش‌های ارتعاش اجباری.....	۸۶
۱-۳-۲-۴) تحریکات سینوسی پایا.....	۸۶
۲-۳-۲-۴) تحریکات سینوسی با فرکانس متغیر.....	۸۷
۴-۲-۴) آزمایش ارتعاش محیطی.....	۸۷
۱-۴-۲-۴) تحریکات ناشی از ارتعاشات خفیف زمین (ریز لرزه‌ها).....	۸۸
۲-۴-۲-۴) ارتعاشات ناشی از باد.....	۸۸
۵-۲-۴) مقایسه روشهای ارتعاش اجباری و ارتعاش محیطی.....	۸۹
۳-۴) مرور کوتاهی بر تحقیقات انجام شده در زمینه ارتعاش محیطی.....	۸۹
۴-۴) آزمایش ارتعاش محیطی بر روی مخازن مورد نظر.....	۹۴
۱-۴-۴) دستگاههای اندازه‌گیری و ثبت ارتعاش.....	۹۴
۲-۴-۴) مشکلات و محدودیتهای انجام آزمایش ارتعاش محیطی بر روی مخازن نفتی.....	۹۷
۱-۲-۴-۴) محدودیت‌های ناشی از هندسه سازه.....	۹۷
۲-۲-۴-۴) محدودیت‌های ناشی از مسائل ایمنی.....	۹۸
۳-۲-۴-۴) محدودیت‌های ناشی از کاربری مخازن.....	۹۹
۳-۴-۴) انجام آزمایش ارتعاش محیطی.....	۹۹
۱-۳-۴-۴) شناسایی و انتخاب مخازن.....	۱۰۰
۲-۳-۴-۴) بررسی امکان انجام آزمایش بر روی مخازن.....	۱۰۱
۳-۳-۴-۴) تعیین آرایش تجهیزات.....	۱۰۱
۴-۳-۴-۴) کالیبراسیون تجهیزات و دستگاههای آزمایش.....	۱۰۲
۵-۳-۴-۴) نصب تجهیزات در محل‌های تعیین شده.....	۱۰۳
۶-۳-۴-۴) راه‌اندازی دستگاهها و ثبت ارتعاشات محیطی.....	۱۰۵
۴-۴-۴) پردازش رکوردها و نتایج آزمایشات ارتعاش محیطی.....	۱۰۶
۵-۴) جمع بندی و نتیجه‌گیری.....	۱۱۷
منابع و مراجع.....	۱۱۹

فصل پنجم: بررسی مشخصات دینامیکی مخازن.....	۱۲۲
(۱-۵) مقدمه.....	۱۲۲
(۲-۵) مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه تاثیر سقف در مشخصات دینامیکی مخازن.....	۱۲۳
(۳-۵) بررسی تاثیر سقف در مشخصات دینامیکی مخازن مورد نظر.....	۱۲۶
(۱-۳-۵) مودهای محوری.....	۱۲۷
(۲-۳-۵) مودهای محیطی.....	۱۳۳
(۳-۳-۵) مودهای قائم.....	۱۳۹
(۴-۵) تعریف پارامترهای ضریب تاثیر سقف در فرکانسها و شکل مودهای ارتعاشی مخازن.....	۱۴۱
(۵-۵) استفاده از روابط تحلیلی برای تعیین فرکانس ارتعاش مخازن دارای سقف.....	۱۴۶
(۶-۵) جمع بندی و نتیجه گیری.....	۱۴۸
منابع و مراجع.....	۱۵۱

فصل ششم: بررسی رفتار دینامیکی مخازن تحت بار زلزله.....

(۱-۶) مقدمه.....	۱۵۲
(۲-۶) جزئیات مدلسازی با استفاده از روش جرم افزوده.....	۱۵۳
(۳-۶) مدلسازی مخازن.....	۱۵۴
(۱-۳-۶) انتخاب المانها.....	۱۵۴
(۱-۱-۳-۶) المانهای مناسب جهت مدلسازی سازه و سقف مخزن.....	۱۵۴
(۲-۱-۳-۶) المانهای مناسب جهت مدلسازی جرم افزوده ناشی از سیال داخل مخزن.....	۱۵۵
(۲-۳-۶) شرایط مرزی اعمال شده.....	۱۵۶
(۱-۲-۳-۶) کف مخزن.....	۱۵۶
(۲-۲-۳-۶) المانهای جرم.....	۱۵۶
(۳-۲-۳-۶) اتصال المانهای جرم و جداره مخزن.....	۱۵۶
(۴-۶) کنترل شبکه بندی بکار رفته در مدل اجزاء محدود.....	۱۵۷

۵-۶	صحت‌سنجی مشخصات و رفتار دینامیکی مدلسازی عددی.....	۱۶۰
۶-۶	معرفی رکوردهای انتخاب شده.....	۱۶۰
۷-۶	انتخاب روش تحلیل و گام زمانی آنالیز تاریخچه زمانی.....	۱۶۲
۸-۶	صحت‌سنجی مدلسازی عددی تحت بار زلزله.....	۱۶۵
۹-۶	تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی.....	۱۶۶
۱۰-۶	مقایسه نتایج تحلیل تاریخچه زمانی با مدل ملهوترا.....	۱۶۹
۱۱-۶	بررسی تاثیر نسبت ارتفاع به شعاع و عمق مایع در رفتار دینامیکی مخازن.....	۱۷۳
۱-۱۱-۶	تاثیر در برش پایه.....	۱۷۳
۲-۱۱-۶	تاثیر در تغییرشکل‌های ایجاد شده در جداره مخازن.....	۱۷۴
۳-۱۱-۶	تاثیر در تنش‌های ایجاد شده در جداره مخازن.....	۱۷۸
۱۲-۶	بررسی کمانش جداره مخازن.....	۱۸۴
۱-۱۲-۶	مبانی مقدماتی در زمینه کمانش.....	۱۸۵
۱-۱-۱۲-۶	نقطه دوگانگی جواب.....	۱۸۴
۲-۱-۱۲-۶	نقطه مشخصه.....	۱۸۷
۲-۱۲-۶	عوامل موثر در کمانش.....	۱۸۹
۳-۱۲-۶	مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه کمانش.....	۱۸۹
۱-۳-۱۲-۶	مکش در مخزن.....	۱۹۱
۲-۳-۱۲-۶	فشار ناشی از باد.....	۱۹۱
۳-۳-۱۲-۶	بارهای ناشی از زلزله.....	۱۹۲
۴-۱۲-۶	تعیین نقاط کمانش جداره مخازن مورد نظر.....	۱۹۴
۱۳-۶	بررسی تاثیر سقف در رفتار دینامیکی مخازن.....	۲۰۳
۱-۱۳-۶	تاثیر در برش پایه.....	۲۰۳
۲-۱۳-۶	تاثیر در تغییرشکل‌های ایجاد شده در جداره مخازن.....	۲۰۴
۳-۱۳-۶	تاثیر در تنش‌های ایجاد شده در جداره مخازن.....	۲۱۰

۲۱۱.....	تأثیر در کماتنش ایجاد شده در جداره مخازن..... (۴-۱۳-۶)
۲۱۳.....	بررسی تأثیر اندرکنش سیال-سازه در رفتار دینامیکی مخازن تحت بار زلزله..... (۱۴-۶)
۲۱۳.....	حداکثر ارتفاع امواج سطحی..... (۱-۱۴-۶)
۲۱۴.....	تأثیر در برش پایه..... (۲-۱۴-۶)
۲۱۵.....	تأثیر در تغییرشکل‌های ایجاد شده در جداره مخزن..... (۳-۱۴-۶)
۲۱۶.....	تأثیر در تنش‌های ایجاد شده در جداره مخزن..... (۴-۱۴-۶)
۲۱۷.....	زمان تحلیل..... (۵-۱۴-۶)
۲۱۸.....	تأثیر مولفه قائم بار زلزله در رفتار دینامیکی مخازن..... (۱۵-۶)
۲۲۰.....	تأثیر در برش پایه..... (۱-۱۵-۶)
۲۲۱.....	تأثیر در ارتفاع امواج سطحی..... (۲-۱۵-۶)
۲۲۲.....	تأثیر در تنش‌های ایجاد شده در جداره مخزن..... (۳-۱۵-۶)
۲۲۳.....	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری..... (۱۶-۶)
۲۲۹.....	منابع و مراجع.....
۲۳۲.....	فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادهای ادامه کار.....
۲۳۲.....	جمع بندی و نتیجه‌گیری..... (۱-۷)
۲۴۴.....	پیشنهاد‌های ادامه کار..... (۲-۷)

- شکل ۲-۱: کمانش پافیلی جداره مخزن..... ۱۰
- شکل ۲-۲: کمانش الماسی شکل جداره مخزن..... ۱۱
- شکل ۲-۳: آتش‌سوزی در مخازن ذخیره مایعات..... ۱۴
- شکل ۲-۴: نشت سیال از مخازن ذخیره مایعات..... ۱۴
- شکل ۲-۵: آسیب دیدگی سقف و قسمت بالای مخزن در اثر برخورد سیال موج..... ۱۵
- شکل ۲-۶: خرابی مهاربندی‌های مخزن..... ۱۶
- شکل ۲-۷: واژگونی مخزن در اثر شکست فونداسیون..... ۱۷
- شکل ۲-۸: مخازن در نظر گرفته شده توسط ویرلا و همکاران..... ۱۹
- شکل ۲-۹: مسیرهای تعادل مجازی برای یک نقطه از محل کمانش در مخزن با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۴۰..... ۲۰
- شکل ۲-۱۰: شکل مود اول ارتعاش مخزن با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۴۰..... ۲۲
- شکل ۲-۱۱: شکل مود اول ارتعاش مخزن با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۶۳..... ۲۲
- شکل ۲-۱۲: شکل مود اول ارتعاش مخزن با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۹۵..... ۲۲
- شکل ۲-۱۳: مخزن آزمایش شده توسط سویدان و ال داماتی..... ۲۳
- شکل ۲-۱۴: نمودار بار- تغییر مکان برای یک نقطه نزدیک کف مخزن با نسبت ارتفاع به شعاع برابر با ۲ و ۰/۵۰..... ۲۷
- شکل ۲-۱۵: تغییرات مقاومت کمانشی نسبت به دامنه فرورفتگی محل جوش و فشار داخلی مخزن..... ۲۸
- شکل ۲-۱۶: ناحیه‌ای از مخزن که در آن احتمال کمانش موضعی وجود دارد..... ۲۹
- شکل ۲-۱۷: مخازن آزمایش شده توسط کلاف و همکاران..... ۳۰
- شکل ۲-۱۸: آزمایش کج‌شدگی استاتیکی مخزن با ابعاد $۴/۵۸ * ۲/۳۶$ ۳۱
- شکل ۲-۱۹: مخزن آزمایش شده توسط مایکاو و همکاران..... ۳۵
- شکل ۲-۲۰: ابعاد مخزن و موقعیت تجهیزات نصب شدن بر روی آن..... ۳۵
- شکل ۲-۲۱: نمودار شتاب ارتعاش مخزن نسبت به فرکانس ارتعاش آن..... ۳۶
- شکل ۲-۲۲: توزیع کرنش‌های محیطی در ارتفاع ۷۰۰ میلیمتر در فرکانس‌های ۵۳ و ۱۰۶ هرتز..... ۳۶

- شکل ۲-۲۳: ارتباط بین فشار هیدرودینامیکی و شتاب مخزن در فرکانس ۱۰۶ هرتز..... ۳۷
- شکل ۲-۲۴: تاثیر موقعیت و ابعاد رینگ در تغییر شکل های شعاعی پوسته..... ۳۹
- شکل ۲-۲۵: تاثیر موقعیت و ابعاد FRP در تغییر شکل های شعاعی پوسته: الف) انتهای مفصلی ب) انتهای گیردار..... ۴۰
- شکل ۲-۲۶: مخزن مستطیلی به همراه بافل های افقی و قائم..... ۴۲
- شکل ۲-۲۷: آزمایشات انجام شده توسط گودرزی و صباغ یزدی: الف) بافل های قائم ب) بافل های افقی..... ۴۴
- شکل ۲-۲۸: قاب یک درجه آزادی در نظر گرفته شده توسط عطاری و رحیمزاده..... ۴۶
- شکل ۳-۱: مدل مکانیکی ارائه شده توسط هازنر..... ۵۷
- شکل ۳-۲: مدل اصلاح شده هارون و هازنر..... ۵۹
- شکل ۳-۳: مدل یک درجه آزادی ارائه شده توسط ملهوترا..... ۶۰
- شکل ۳-۴: المان SHELL43..... ۶۲
- شکل ۳-۵: المان SHELL181..... ۶۳
- شکل ۳-۶: المان FLUID30..... ۶۴
- شکل ۳-۷: المان FLUID80..... ۶۵
- شکل ۳-۸: نمونه ای از شبکه بندی اجزای محدود مخازن مورد بررسی..... ۶۶
- شکل ۳-۹: مودهای ارتعاشی مخازن استوانه ای..... ۶۸
- شکل ۳-۱۰: نمای کلی و هندسه مخزن ۱..... ۷۰
- شکل ۳-۱۱: نمای کلی و هندسه مخزن ۲..... ۷۱
- شکل ۳-۱۲: نمای کلی و هندسه مخزن ۳..... ۷۲
- شکل ۳-۱۳: مودهای محوری مخزن ۱ در آزمایش ۲..... ۷۵
- شکل ۳-۱۴: مودهای محیطی مخزن ۱ در آزمایش ۲..... ۷۵
- شکل ۳-۱۵: مودهای قائم مخزن ۱ در آزمایش ۲..... ۷۶
- شکل ۳-۱۶: مودهای ارتعاشی محوری مخازن مورد نظر..... ۷۶

- شکل ۳-۱۷: مودهای محیطی مخزن ۱ ۷۷
- شکل ۳-۱۸: مودهای محیطی مخزن ۲ ۷۷
- شکل ۳-۱۹: مودهای محیطی مخزن ۳ ۷۸
- شکل ۴-۱: (الف) مخزن در نظر گرفته شده توسط شکیب، (ب) برج تلویزیونی نانجینگ ۹۰
- شکل ۴-۲: (الف) پل آزمایش شده توسط جنتیل و گالینو، (ب) کلیسای آزمایش شده توسط جایشی و همکاران ۹۲
- شکل ۴-۳: مخازن آزمایش شده توسط هارون ۹۳
- شکل ۴-۴: دستگاه ثبت ارتعاشات ۹۶
- شکل ۴-۵: شتابسنج بکار رفته جهت ثبت ارتعاشات در آزمایش ارتعاش محیطی ۹۷
- شکل ۴-۶: آرایش کلی شتابسنجها ۱۰۱
- شکل ۴-۷: کالیبراسیون نسبی شتابسنجها ۱۰۲
- شکل ۴-۸: نصب شتابسنج در محیط سقف مخزن ۱۰۳
- شکل ۴-۹: ثبت ارتعاشات سقف مخزن ۱۰۳
- شکل ۴-۱۰: نصب شتابسنج بر روی پله‌های دسترسی به سقف مخزن ۱۰۴
- شکل ۴-۱۱: ثبت ارتعاشات کف مخزن ۱۰۴
- شکل ۴-۱۲: گیج کنترل ارتفاع سیال داخل مخزن ۱۰۵
- شکل ۴-۱۳: نمونه‌ای از ارتعاشات ثبت شده در طول آزمایش ۱۰۷
- شکل ۴-۱۴: مدل یک درجه آزادی ارائه شده توسط ملهوترا و همکاران ۱۰۹
- شکل ۴-۱۵: تبدیل سریع فوریه آزمایش ۱ مخزن ۱ ($H/R=2/0$) ۱۱۱
- شکل ۴-۱۶: تبدیل سریع فوریه آزمایش ۲ مخزن ۱ ($H/R=2/0$) ۱۱۲
- شکل ۴-۱۷: تبدیل سریع فوریه آزمایش ۱ مخزن ۲ ($H/R=1/52$) ۱۱۳
- شکل ۴-۱۸: تبدیل سریع فوریه آزمایش ۲ مخزن ۲ ($H/R=1/52$) ۱۱۴
- شکل ۴-۱۹: تبدیل سریع فوریه آزمایش ۱ مخزن ۳ ($H/R=1/33$) ۱۱۵
- شکل ۴-۲۰: تبدیل سریع فوریه آزمایش ۲ مخزن ۳ ($H/R=1/33$) ۱۱۶

- شکل ۵-۱: حالت‌های مختلف سقف در مخازن سقف ثابت در نظر گرفته شده توسط ویرلا و همکاران: (a) مخزن با سقف گنبدی، (b) مخزن با سقف مخروطی، (c) مخزن با سقف مخروطی با ارتفاع کم و (d) مخزن با سقف صاف..... ۱۲۴
- شکل ۵-۲: تاثیر نسبت ارتفاع به قطر در پریود ارتعاش مودهای سقف و جداره مخازن در نظر گرفته شده توسط ویرلا و همکاران..... ۱۲۵
- شکل ۵-۳: شکل مودهای ارتعاشی محوری مخزن ۱ در حالت‌های دارای سقف و روباز..... ۱۳۰
- شکل ۵-۴: شکل مودهای ارتعاشی محوری مخزن ۲ در حالت‌های دارای سقف و روباز..... ۱۳۱
- شکل ۵-۵: شکل مودهای ارتعاشی محوری مخزن ۳ در حالت‌های دارای سقف و روباز..... ۱۳۲
- شکل ۵-۶: شکل مودهای ارتعاشی محیطی مخزن ۱ در حالت‌های سقف ثابت و روباز..... ۱۳۶
- شکل ۵-۷: شکل مودهای ارتعاشی محیطی مخزن ۲ در حالت‌های سقف ثابت و روباز..... ۱۳۷
- شکل ۵-۸: شکل مودهای ارتعاشی محیطی مخزن ۳ در حالت‌های سقف ثابت و روباز..... ۱۳۸
- شکل ۵-۹: تاثیر نسبت ارتفاع به شعاع در دامنه تغییرمکانهای مودال مودهای محیطی مخازن روباز..... ۱۴۴
- شکل ۵-۱۰: تاثیر ارتفاع سیال در دامنه تغییرمکانهای مودال مودهای محیطی مخازن روباز..... ۱۴۵
- شکل ۶-۱: شرایط مرزی المانهای جرم و اتصال آنها با جداره مخزن..... ۱۵۶
- شکل ۶-۲: مقادیر مختلف برش پایه بر اساس تعداد المانهای بکار رفته در مدل اجزای محدود..... ۱۵۷
- شکل ۶-۳: مقایسه نمودار برش پایه بر اساس تعداد المانهای بکار رفته در مدل اجزای محدود..... ۱۵۸
- شکل ۶-۴: تغییر شکل‌های شعاعی جداره مخزن بر اساس تعداد المانهای بکار رفته در مدل اجزای محدود..... ۱۵۹
- شکل ۶-۵: تاریخچه زمانی شتاب رکوردهای زلزله انتخاب شده: (الف) ال سنتر، (ب) نورث ریچ و (ج) طبس..... ۱۶۲
- شکل ۶-۶: مقایسه نمودار تاریخچه زمانی تنش ایجاد شده در نقطه‌ای موازی با جهت زلزله اعمال شده در فاصله ۱۲/۷۰ سانتیمتر از کف مخزن با نتایج حاصل از مدل اجزای محدود..... ۱۶۶

- شکل ۶-۷: نمودار تاریخچه زمانی برش پایه مخازن (کیلو نیوتن): الف) مخزن ۱، ب) مخزن ۲ و ج) مخزن ۳ ۱۶۸
- شکل ۶-۸: تاثیر نسبت ارتفاع به شعاع و عمق مایع در حداکثر برش پایه مخازن ۱۷۳
- شکل ۶-۹: نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل‌های بالای مخازن در جهت زلزله (سانتیمتر) الف) مخزن ۱، ب) مخزن ۲ و ج) مخزن ۳ ۱۷۵
- شکل ۶-۱۰: نمودار تاریخچه زمانی تغییر شکل‌های بالای مخازن در جهت عمود بر زلزله (سانتیمتر) الف) مخزن ۱، ب) مخزن ۲ و ج) مخزن ۳ ۱۷۶
- شکل ۶-۱۱: تاثیر نسبت ارتفاع به شعاع و عمق مایع در: الف) حداکثر تغییر شکل‌های بالای مخازن در جهت زلزله، ب) بیشترین تغییر شکل‌های ایجاد شده در جداره مخازن در جهت زلزله و ج) حداکثر تغییر شکل‌های بالای مخازن در عمود بر جهت زلزله که بیشترین تغییر شکل ایجاد شده در جداره هم می‌باشد ۱۷۷
- شکل ۶-۱۲: مقایسه اثر نسبت ارتفاع به شعاع و عمق مایع در تنش‌های شعاعی ایجاد شده در پایین‌ترین نقطه کف مخازن در جهت زلزله (مگا پاسکال): الف) مخزن ۱، ب) مخزن ۲ و ج) مخزن ۳ ۱۸۰
- شکل ۶-۱۳: مقایسه اثر نسبت ارتفاع به شعاع و عمق مایع در تنش‌های محیطی ایجاد شده در پایین‌ترین نقطه کف مخازن در جهت زلزله (مگا پاسکال): الف) مخزن ۱، ب) مخزن ۲ و ج) مخزن ۳ ۱۸۱
- شکل ۶-۱۴: مقایسه اثر نسبت ارتفاع به شعاع و عمق مایع در تنش‌های شعاعی ایجاد شده در پایین‌ترین نقطه کف مخازن در جهت عمود بر زلزله (مگا پاسکال): الف) مخزن ۱، ب) مخزن ۲ و ج) مخزن ۳ ۱۸۲
- شکل ۶-۱۵: مقایسه اثر نسبت ارتفاع به شعاع و عمق مایع در تنش‌های محیطی ایجاد شده در پایین‌ترین نقطه کف مخازن در جهت عمود بر زلزله (مگا پاسکال): الف) مخزن ۱، ب) مخزن ۲ و ج) مخزن ۳ ۱۸۳
- شکل ۶-۱۶: کمانش با نقطه دوگانگی جواب ۱۸۵
- شکل ۶-۱۷: حالت‌های کمانش با نقطه دوگانگی جواب ۱۸۶
- شکل ۶-۱۸: نمونه‌هایی از کمانش با نقطه دوگانگی متقارن الف) پایدار و ب) ناپایدار ۱۸۷
- شکل ۶-۱۹: کمانش با نقطه مشخصه ۱۸۸
- شکل ۶-۲۰: کمانش پوسته‌های تحت فشار ۱۸۸

- شکل ۶-۲۱: تاثیر تنش‌های محیطی و نسبت ضخامت به شعاع در مقاومت کمانشی الاستیک و الاستوپلاستیک جداره مخازن فلزی مهارشده بر اساس روابط آیین‌نامه Eurocode 8..... ۱۹۳
- شکل ۶-۲۲: مود کمانش جداره مخزن ۱..... ۱۹۷
- شکل ۶-۲۳: حداکثر تنش‌های فشاری مخزن ۱ تحت زلزله طبس: الف) حالت ۱ ب) حالت ۲..... ۲۰۰
- شکل ۶-۲۴: حداکثر تنش‌های فشاری مخزن ۲ تحت زلزله طبس: الف) حالت ۱ ب) حالت ۲..... ۲۰۱
- شکل ۶-۲۵: حداکثر تنش‌های فشاری مخزن ۳ تحت زلزله طبس: الف) حالت ۱ ب) حالت ۲..... ۲۰۲
- شکل ۶-۲۶: تاثیر نسبت ارتفاع به شعاع و عمق مایع در: الف) حداکثر تغییرشکل‌های بالای مخازن روباز در جهت زلزله، ب) بیشترین تغییرشکل‌های ایجاد شده در جداره مخازن روباز در جهت زلزله و ج) حداکثر تغییرشکل‌های بالای مخازن روباز در عمود بر جهت زلزله که بیشترین تغییرشکل ایجاد شده در جداره هم می‌باشد..... ۲۰۶
- شکل ۶-۲۷: تغییرشکل‌های جداره مخازن سقف ثابت تحت زلزله طبس: الف) مخزن ۱، ب) مخزن ۲ و ج) مخزن ۳..... ۲۰۸
- شکل ۶-۲۸: تغییرشکل‌های جداره مخازن روباز تحت زلزله طبس: الف) مخزن ۱، ب) مخزن ۲ و ج) مخزن ۳..... ۲۰۹
- شکل ۶-۲۹: نمودار تاریخچه زمانی ارتفاع امواج سطحی ایجاد شده در نزدیکی جداره مخزن ۱..... ۲۱۳
- شکل ۶-۳۰: حداکثر ارتفاع امواج سطحی حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی مخزن ۱ تحت زلزله طبس..... ۲۱۴
- شکل ۶-۳۱: مقایسه برش پایه حاصل از مدلسازی با روش جرم افزوده و اندرکنش سیال-سازه..... ۲۱۵
- شکل ۶-۳۲: بیشترین تغییرشکل بالای مخزن: الف) در جهت زلزله و ب) در جهت عمود بر زلزله..... ۲۱۶
- شکل ۶-۳۳: حداکثر تنش فشاری جداره مخزن ۱ تحت زلزله طبس..... ۲۱۷
- شکل ۶-۳۴: مقادیر C_p برای تعیین فرکانس مود قائم مخازن فولادی و بتنی..... ۲۱۹
- شکل ۶-۳۵: نمودار تاریخچه زمانی شتاب قائم زلزله طبس..... ۲۲۱
- شکل ۶-۳۶: نمودار تاریخچه زمانی برش پایه مخزن ۱..... ۲۲۱
- شکل ۶-۳۷: نمودار تاریخچه زمانی ارتفاع امواج سطحی در نزدیکی جداره مخزن ۱..... ۲۲۲

- جدول ۱-۲: واژگونی و کماتش جداره مخازن ذخیره مایعات در زلزله‌های گذشته..... ۱۳
- جدول ۲-۲: بلندشدگی و آسیب‌دیدگی سیستم مهاری مخازن ذخیره مایعات در زلزله‌های گذشته..... ۱۶
- جدول ۳-۲: مقایسه نتایج ماکزیمم تنش‌های محوری برای مخزن با ابعاد $1/83 * 3/66$ (پوند بر اینچ مربع)..... ۳۳
- جدول ۴-۲: مقایسه نتایج ماکزیمم تنش‌های محوری برای مخزن با ابعاد $4/58 * 2/36$ (پوند بر اینچ مربع)..... ۳۳
- جدول ۵-۲: مقایسه دیدگاه‌های تحلیل لرزه‌ای مخازن ذخیره مایعات در آیین‌نامه‌های مختلف..... ۵۰
- جدول ۱-۳: مشخصات مخازن و مایعات درون آنها..... ۶۹
- جدول ۲-۳: فرکانس مودهای محوری مخازن مورد نظر (هرتز)..... ۷۳
- جدول ۳-۳: فرکانس مودهای محیطی مخازن مورد نظر (هرتز)..... ۷۴
- جدول ۴-۳: فرکانس مودهای قائم مخازن مورد نظر (هرتز)..... ۷۴
- جدول ۱-۴: فرکانس ارتعاش مودهای محوری مخازن مورد نظر (هرتز)..... ۱۰۸
- جدول ۲-۴: تفاوت بین فرکانس مودهای محوری حاصل از مدلسازی عددی و آزمایش ارتعاش محیطی..... ۱۰۸
- جدول ۳-۴: ضرایب پیشنهادی ملهوترا و همکاران..... ۱۰۹
- جدول ۴-۴: فرکانس ارتعاش مخازن مورد نظر بر اساس مدل ملهوترا (هرتز)..... ۱۱۰
- جدول ۵-۴: تفاوت فرکانس حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی و مدل ملهوترا..... ۱۱۰
- جدول ۱-۵: فرکانس مودهای محوری مخازن با سقف ثابت (هرتز)..... ۱۲۷
- جدول ۲-۵: فرکانس مودهای محوری مخازن با انتهای باز (هرتز)..... ۱۲۸
- جدول ۳-۵: تفاوت فرکانس مودهای محوری مخازن با سقف ثابت و با انتهای باز..... ۱۲۹
- جدول ۴-۵: فرکانس مودهای محیطی مخازن با سقف ثابت (هرتز)..... ۱۳۳
- جدول ۵-۵: فرکانس مودهای محیطی مخازن با انتهای باز (هرتز)..... ۱۳۴
- جدول ۶-۵: تفاوت فرکانس مودهای محیطی مخازن با سقف ثابت و با انتهای باز..... ۱۳۵
- جدول ۷-۵: فرکانس مودهای قائم مخازن با سقف ثابت (هرتز)..... ۱۳۹

- جدول ۵-۸: فرکانس مودهای قائم مخازن با انتهای باز (هرتز)..... ۱۳۹
- جدول ۵-۹: تفاوت فرکانس مودهای قائم مخازن با سقف ثابت و با انتهای باز..... ۱۴۰
- جدول ۵-۱۰: مقدار ضرایب تاثیر سقف α و β ۱۴۱
- جدول ۵-۱۱: فرکانس ارتعاش مخازن سقف ثابت بر اساس رابطه تحلیلی (۵-۳)..... ۱۴۷
- جدول ۶-۱: فرکانس ارتعاش مخزن ۳ (هرتز)..... ۱۶۰
- جدول ۶-۲: مشخصات زلزله‌های انتخاب شده..... ۱۶۱
- جدول ۶-۳: حداکثر برش پایه حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی مخازن (کیلو نیوتن)..... ۱۶۷
- جدول ۶-۴: ضرایب پیشنهادی ملهوترا و همکاران..... ۱۶۹
- جدول ۶-۵: مقادیر برش پایه بر اساس روش ملهوترا (کیلو نیوتن)..... ۱۷۰
- جدول ۶-۶: مقادیر لنگر واژگونی بر اساس روش ملهوترا (کیلو نیوتن- متر)..... ۱۷۱
- جدول ۶-۷: تفاوت برش پایه حاصل از تحلیل اجزای محدود (FE) و مدل ملهوترا (MM)..... ۱۷۲
- جدول ۶-۸: حداکثر تغییرشکل ایجاد شده در بالای مخازن در جهت زلزله (سانتیمتر)..... ۱۷۴
- جدول ۶-۹: حداکثر تغییرشکل ایجاد شده در بالای مخازن در جهت عمود بر زلزله (سانتیمتر)..... ۱۷۴
- جدول ۶-۱۰: حداکثر تغییرشکل ایجاد شده در جداره مخازن در جهت زلزله (سانتیمتر)..... ۱۷۸
- جدول ۶-۱۱: حداکثر تنش شعاعی ایجاد شده در پایین‌ترین نقطه کف مخازن در جهت زلزله (مگا پاسکال)..... ۱۷۹
- جدول ۶-۱۲: حداکثر تنش محیطی ایجاد شده در پایین‌ترین نقطه کف مخازن در جهت زلزله (مگا پاسکال)..... ۱۷۹
- جدول ۶-۱۳: تنش بحرانی کمانش جداره مخازن (مگا پاسکال)..... ۱۹۸
- جدول ۶-۱۴: بررسی کمانش جداره مخازن مورد بررسی..... ۱۹۹
- جدول ۶-۱۵: حداکثر برش پایه حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی مخازن روباز (کیلو نیوتن)..... ۲۰۴
- جدول ۶-۱۶: تفاوت برش پایه مخازن سقف ثابت (WR) و روباز (OT)..... ۲۰۴
- جدول ۶-۱۷: حداکثر تغییرشکل بالای مخازن روباز در جهت زلزله (سانتیمتر)..... ۲۰۵
- جدول ۶-۱۸: حداکثر تغییرشکل بالای مخازن روباز در جهت عمود بر زلزله (سانتیمتر)..... ۲۰۵

- جدول ۶-۱۹: بیشترین تغییرشکل جداره مخازن روباز در جهت زلزله (سانتیمتر)..... ۲۰۵
- جدول ۶-۲۰: تفاوت حداکثر تغییرشکل بالای مخازن سقف ثابت (WR) و روباز (OT) در جهت زلزله..... ۲۰۶
- جدول ۶-۲۱: تفاوت حداکثر تغییرشکل بالای مخازن سقف ثابت (WR) و روباز (OT) در جهت عمود بر زلزله..... ۲۰۷
- جدول ۶-۲۲: تفاوت بیشترین تغییرشکل ایجاد شده در جداره مخازن سقف ثابت (WR) و روباز (OT) در جهت زلزله..... ۲۰۷
- جدول ۶-۲۳: حداکثر تنش‌های شعاعی ایجاد شده در پایین‌ترین نقطه کف مخازن در جهت زلزله (مگا پاسکال)..... ۲۱۰
- جدول ۶-۲۴: حداکثر تنش‌های محیطی ایجاد شده در پایین‌ترین نقطه کف مخازن در جهت زلزله (مگا پاسکال)..... ۲۱۰
- جدول ۶-۲۵: تفاوت حداکثر تنش‌های شعاعی مخازن سقف ثابت (WR) و روباز (OT) در جهت زلزله..... ۲۱۱
- جدول ۶-۲۶: تفاوت حداکثر تنش‌های محیطی مخازن سقف ثابت (WR) و روباز (OT) در جهت زلزله..... ۲۱۱
- جدول ۶-۲۷: بررسی کمانش جداره مخازن روباز..... ۲۱۲
- جدول ۶-۲۸: تفاوت نتایج کمانش در مخازن سقف ثابت (WR) و روباز (OT)..... ۲۱۲
- جدول ۶-۲۹: حداکثر تنش‌های شعاعی، محیطی و قائم ایجاد شده در جداره مخزن ۱ تحت زلزله طبس..... ۲۱۶
- جدول ۶-۳۰: حداکثر تنش‌های شعاعی، محیطی و قائم ایجاد شده در جداره مخزن ۱ تحت اثر همزمان مولفه‌های افقی و قائم زلزله طبس..... ۲۲۲

فصل اول - کلیات

(۱-۱) مقدمه

مخازن استوانه‌ای بطور گسترده‌ای برای ذخیره مایعاتی مانند آب، ترکیبات شیمیایی و نفتی و همچنین میعانات گازی بکار می‌روند. این مخازن بصورت‌های بتنی یا فولادی و در حالت‌های هوایی، روزمینی یا زیرزمینی طراحی و اجرا می‌شوند. در یک دسته‌بندی دیگر، مخازن بتنی به دو گونه مسلح یا پیش‌تنیده و مخازن فلزی به دو صورت مهارشده یا مهارنشده مورد استفاده قرار می‌گیرند. مخازن فلزی مهارشده توسط پیچ‌های مهاری به پی وصل می‌گردند اما در مخازن مهارنشده این پیچ‌های مهاری وجود ندارند. سقف مخازن هم بصورت ثابت یا شناور و یا ترکیبی از آنها اجرا می‌شود.

تنوع قابل توجه مخازن ذخیره مایعات از یکسو و حضور پدیده‌هایی نظیر اندرکنش سیال - سازه، اندرکنش خاک - سازه، بلندشدگی مخزن، حرکات سطحی سیال و ... از سوی دیگر باعث شده است که مباحث مربوط به بررسی ویژگی‌ها و رفتار دینامیکی مخازن ذخیره مایعات طیف بسیار گسترده‌ای داشته باشند. در یک تقسیم‌بندی کلی، موضوعات مربوط به بررسی رفتار دینامیکی مخازن را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- تحلیل تنش در جداره مخزن به همراه راهکارهایی برای کاهش آن
- بررسی پدیده‌های اندرکنشی خاک - سازه و سیال - سازه

- بررسی نحوه تشکیل امواج سطحی و همچنین اثرات ناشی از آن به همراه روشهایی برای کاهش این اثرات

- ارائه مدل‌های ساده شده برای تحلیل دینامیکی مخازن

در رابطه با هر یک از موضوعات فوق‌الذکر، مطالعات متعددی انجام شده است. هر چند که این تحقیقات منجر به مشخص شدن بسیاری از مسائل مرتبط با تحلیل دینامیکی مخازن گردیده است، اما موضوعات زیادی نیز وجود دارد که هنوز جای کار دارند.

یکی از مباحث مطرح در زمینه بررسی مشخصات و رفتار دینامیکی مخازن نگهداری مایعات، تعیین میزان تاثیر سقف در آنها می‌باشد. لازم به ذکر است که در خصوص پدیده تاثیر سقف مخازن در فرکانس‌ها و شکل مودهای ارتعاشی، همچنین رفتار دینامیکی آنها تحقیقات بسیار کمی صورت گرفته و ابهامات زیادی در این زمینه وجود دارد. لذا، تمرکز اصلی تحقیق حاضر روی بررسی این پدیده اختصاص یافته است. البته مخازن در نظر گرفته شده در این تحقیق، از نوع فلزی مهار شده هستند و تمامی نتایج بدست آمده نیز در این نوع مخازن قابل استناد می‌باشد.

از نقطه نظر بهره‌برداری، مخازن فلزی در طول عمر خود تحت تاثیر عوامل زیادی از جمله باد، بارهای حرارتی، زلزله و ... ممکن است دچار آسیب‌هایی شوند. بر اساس بررسی‌های انجام شده، آسیب‌دیدگی مخازن تحت بار زلزله بیشتر از دیگر بارها بوده است. در حالت کلی، آسیب‌های لرزه‌ای مشاهده شده در مخازن فلزی را می‌توان به گروه‌های کمانش جداره مخزن، آسیب‌دیدگی سقف، بلندشدگی و سایر آسیب‌هایی مانند: لغزش افقی، آسیب‌دیدگی پی و منهول و ... تقسیم‌بندی کرد. با توجه به مطالعات میدانی انجام شده، بیشترین آسیب لرزه‌ای مشاهده شده در مخازن فلزی، کمانش جداره آنها تحت بار زلزله بوده است. لذا، بخش‌هایی از رساله به بررسی کمانش جداره مخازن و تاثیر سقف در تنش‌ها و تغییرشکل‌های ایجاد شده در مودهای کمانشی اختصاص یافته است.