

پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

رساله دکتری

مهندسی عمران-مهندسی زلزله

**تحلیل بلند شدگی مخازن استوانه ای مهار نشده فولادی تحت اثر
مولفه های افقی و قائم زلزله**

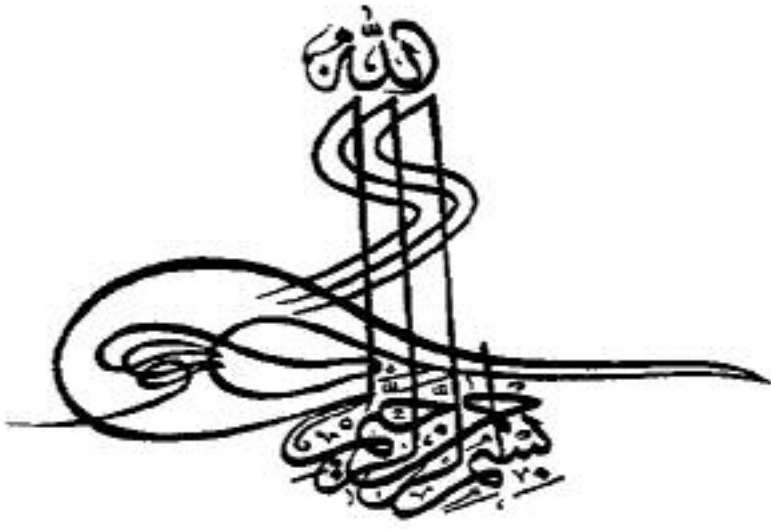
دانشجو: مسعود نورعلی آهاری

استاد راهنما:

آقای دکتر ساسان عشقی

آقای دکتر محسن غفوری آشتیانی

۱۳۸۷



استاد راهنما: جناب آقای دکتر ساسان عشقی

استاد راهنما: جناب آقای دکتر محسن غفوری آشتیانی

استاد ممتحن: جناب آقای دکتر محمود رضا ماهری

استاد ممتحن: جناب آقای دکتر محمد تقی احمدی

استاد ممتحن: جناب آقای دکتر عبدالرضا سروقد مقدم

استاد ممتحن: جناب آقای دکتر منصور ضیایی فر

نماینده تحصیلات تکمیلی: جناب آقای دکتر محمود حسینی

تقدیم به

همسر عزیزم

که یار و همراه من در انجام این پایان نامه بود

موضوع این پایان نامه تحلیل بلند شدگی مخازن مهار نشده فولادی می باشد. بدین منظور مدل مکانیکی ساده‌ای متشکل از سیستم جرم-فنر-میراگر و فنر پیچشی معرف بلندشدگی ورق کف مخزن استفاده شده است. فنر پیچشی مذکور دارای رفتار غیر خطی مصالح و رفتار غیر خطی هندسی ناشی از وجود نیروی محوری و تغییر مداوم سطح تماس آن با تکیه‌گاه است. به منظور تعیین منحنی رفتاری، ورق کف با استفاده از تعدادی تیر مثلثی شکل مدل شده است. تیرهای مورد نظر در امتداد شعاعهای مختلف ورق کف بوده و از اندرکنش تیرهای مجاور صرف‌نظر شده است. تاثیر دیوار مخزن بر بلند شدگی ورق کف با استفاده از قیود انتهایی محوری و پیچشی متصل به تیرها در نظر گرفته شده است. رفتار غیر خطی مصالح در تیرها تنها به ایجاد مفصل پلاستیک در محل اتصالشان با دیوار مخزن محدود شده است. در ادامه با استفاده از منحنی نیرو-بلندشدگی تیرها و با فرض دوران صلب دیوار مخزن، منحنی لنگر مقاوم در برابر واژگونی-دوران ورق کف مخزن حاصل گردیده است. بدین منظور برای مقادیر مختلف بلندشدگی تعادل دورانی کل مخزن نوشته شده و لنگر مقاوم در برابر واژگونی بدست آمده است. سپس معادلات حرکت دینامیکی مخزن شامل سه درجه آزادی مودهای ضربه‌ای و موج مایع و مود گهواره‌ای مخزن-مایع نوشته شده است. به منظور حل معادلات حرکت از روشهای نیومارک- β و رانگ-کوتا مرتبه ۴ استفاده گردید. پس از حل معادلات حرکت، تاثیر پارامترهایی نظیر نسبت ابعادی مخزن، مود موج نوسانات مایع، ضریب ضربه، شتابنگاشتهای مختلف، وجود مولفه قائم و انعطاف‌پذیری خاک زیر شالوده بر بلند شدگی مخزن مهار نشده مورد بررسی واقع شد.

به منظور حصول اطمینان از صحت روابط تحلیلی حاکم بر بلند شدگی، مدل آزمایشگاهی مخزنی عریض ساخته شده و در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله مورد آزمایش قرار گرفت. بدین منظور در ابتدا مدل مذکور بر روی سطحی شیبدار قرار داده شد تا در اثر لنگر واژگونی ناشی از اختلاف فشار هیدرواستاتیکی دیوار مخزن دچار بلند شدگی گردد. در این آزمایش میزان بلند شدگی نقاط مختلف ورق کف مخزن اندازه گیری شد. سپس مخزن مورد نظر تحت آزمایش ارتعاش آزاد بلندشدگی قرار گرفت تا برآوردی از ضریب ضربه کف مخزن و تکیه‌گاه آن حاصل شود.

همچنین مدل مخازن مهار شده و مهار نشده در محیط نرم افزار *ANSYS* ساخته شده و مورد تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی قرار گرفت. به منظور انجام آزمایشهای استاتیکی، مایع داخل مخزن با فشار هیدرواستاتیکی معادل آن جایگزین شد. در آزمایشهای دینامیکی از المانهای مایع در مدلسازی استفاده گردید.

فهرست مندرجات

| | | |
|----|---|--------|
| ۲ | مقدمه | -۱ |
| ۲ | مقدمه | -۱-۱ |
| ۳ | معرفی مخازن فولادی مورد استفاده در صنایع نفت و پتروشیمی | -۲-۱ |
| ۳ | رفتار مخازن فولادی در زلزله‌های گذشته | -۳-۱ |
| ۶ | دلایل اهمیت تحقیق حاضر | -۴-۱ |
| ۷ | بیان مساله و هدف از تحقیق | -۵-۱ |
| ۸ | روش و مراحل انجام تحقیق | -۶-۱ |
| ۱۰ | فرضیات تحقیق | -۷-۱ |
| ۱۲ | مروری بر ادبیات فنی موجود | -۲ |
| ۱۲ | مقدمه | -۱-۲ |
| ۱۲ | مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه تحلیل لرزه ای مخازن مهار شده | -۲-۲ |
| ۱۶ | مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه تحلیل لرزه ای مخازن مهار نشده | -۳-۲ |
| ۲۲ | نتیجه گیری | -۴-۲ |
| ۲۶ | تحلیل بلندشدگی مخازن در آیین نامه‌های طراحی | -۳ |
| ۲۶ | مقدمه | -۱-۳ |
| ۲۶ | مبانی تحلیل بلندشدگی در پیوست <i>E</i> آیین نامه <i>API 650</i> و توصیه‌های طراحی نیوزلند | -۲-۳ |
| ۲۶ | روش مورد استفاده در پیوست <i>E</i> آیین نامه <i>API 650</i> | -۱-۲-۳ |
| ۲۸ | روش مورد استفاده در توصیه‌های طراحی نیوزلند | -۲-۲-۳ |
| ۲۹ | تحلیل بلند شدگی دینامیکی | -۳-۲-۳ |

| | | |
|----|--|-------|
| ۳۱ | مروری بر پیوست E آیین نامه API650 و توصیه‌های طراحی نیوزلند | ۳-۳ |
| ۳۱ | پیوست E آیین نامه API 650 | ۱-۳-۳ |
| ۳۵ | توصیه‌های طراحی نیوزلند | ۲-۳-۳ |
| ۳۸ | نتیجه‌گیری | ۴-۳ |
| ۴۱ | مدلسازی و تحلیل بلندشدگی استاتیکی مخازن فولادی مهار نشده | 4- |
| ۴۱ | مقدمه | 4-1- |
| ۴۲ | نحوه مدلسازی بلند شدگی استاتیکی ورق کف مخازن فولادی مهار نشده | ۲-۴ |
| ۴۲ | تحلیل بلندشدگی تیر مثلثی | ۱-۲-۴ |
| ۴۸ | مدلسازی ورق کف با استفاده از تیر یکنواخت | ۲-۲-۴ |
| ۵۶ | تأثیر فشار هیدرو استاتیکی دیوار بر میزان بلند شدگی اولیه | ۳-۲-۴ |
| ۶۱ | روشی دیگر برای محاسبه بلند شدگی در محدوده تغییر شکلهای کوچک | ۴-۲-۴ |
| ۶۹ | محاسبه نیروی قائم متقارن-تغییر مکان بلند شدگی | ۵-۲-۴ |
| ۶۹ | محاسبه لنگر مقاوم در برابر واژگونی | ۶-۲-۴ |
| ۷۰ | مخازن مورد استفاده در تحلیل بلندشدگی | ۳-۴ |
| ۷۲ | تحلیل بلند شدگی تیر مثلثی | ۴-۴ |
| ۷۲ | مقایسه نیروی قائم بلندشدگی و نیروی محوری تیر یکنواخت و تیر مثلثی | ۱-۴-۴ |
| ۷۳ | تأثیر کرنش محوری مرتبه دوم ناشی از تغییر شکل قائم تیر | ۲-۴-۴ |
| ۷۴ | رفتار تیر در یک سیکل بلندشدگی | ۳-۴-۴ |
| ۷۶ | سهم عکس‌العمل قائم هر انتهای تیر در حمل بار | ۴-۴-۴ |
| ۷۷ | تأثیر ضخامت دیوار و کف مخزن در بلند شدگی | ۵-۴-۴ |

| | | |
|---|-----|--------|
| تأثیر فشار هیدرو استاتیکی وارد بر دیوار بر بلند شدگی تیر..... | ۷۷ | ۶-۴-۴ |
| روشی ساده برای تهیه منحنی نیروی قائم-بلند شدگی تیر..... | ۷۸ | ۵-۴ |
| حل خمشی تیر..... | ۷۹ | ۱-۵-۴ |
| حل محوری تیر..... | ۸۰ | ۲-۵-۴ |
| مقایسه نتایج حاصل از تحلیلی دقیق و تحلیل‌های ساده شده..... | ۸۱ | ۳-۵-۴ |
| مراحل گام به گام بدست آوردن منحنی نیروی قائم-بلند شدگی تیر..... | ۸۲ | ۴-۵-۴ |
| مقایسه نتایج تحلیل‌های دقیق و ساده شده..... | ۸۳ | ۵-۵-۴ |
| بلند شدگی متقارن مخازن مهار نشده-روش اجزاءمحدود..... | ۸۶ | ۶-۴ |
| تأثیر نحوه مش بندی دیوار و کف مخزن بر روی بلند شدگی..... | ۸۷ | ۱-۶-۴ |
| مقایسه نتایج تحلیلی و اجزاء محدود..... | ۸۹ | ۲-۶-۴ |
| تأثیر تغییر شکل‌های بزرگ ورق کف بر رفتار بلند شدگی..... | ۹۰ | ۳-۶-۴ |
| تأثیر فشار هیدرواستاتیکی دیوار بر بلند شدگی..... | ۹۱ | 4-6-4- |
| تأثیر پارامترهای ضخامت دیوار و کف مخزن بر بلند شدگی..... | ۹۱ | ۵-۶-۴ |
| بلند شدگی نامتقارن مخازن مهار نشده..... | ۹۳ | ۷-۴ |
| مقایسه نتایج تحلیلی و اجزاء محدود..... | ۹۳ | ۱-۷-۴ |
| تأثیر فشار هیدرو استاتیکی دیوار مخزن..... | ۹۴ | ۲-۷-۴ |
| تأثیر پارامترهای ضخامت دیوار و کف مخزن بر بلند شدگی..... | ۹۵ | ۳-۷-۴ |
| تأثیر الگوی بارگذاری بر بلند شدگی..... | ۹۶ | 4-7-4- |
| تأثیر وجود سخت کننده در بالای دیوار بر بلند شدگی..... | ۹۹ | ۵-۷-۴ |
| رفتار بلندشدگی مخزن تحت اثر یک سیکل لنگر واژگونی..... | ۱۰۲ | ۶-۷-۴ |

| | | |
|----------|---|--------|
| ۱۰۴..... | نتیجه‌گیری | ۸-۴ |
| ۱۰۷..... | مطالعه آزمایشگاهی بلندشدگی مدل مخزنی عریض | ۵- |
| ۱۰۷..... | مقدمه | ۱-۵ |
| ۱۰۷..... | مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی | ۲-۵ |
| ۱۱۰..... | مشخصات هندسی تکیه گاه | ۱-۲-۵ |
| ۱۱۲..... | روش ساخت مخزن | ۳-۵ |
| ۱۱۳..... | محل نصب تغییر مکان سنجها | ۴-۵ |
| ۱۱۴..... | آزمایش استاتیکی بلند شدگی | ۵-۵ |
| ۱۱۵..... | مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی | 5-5-1- |
| ۱۲۱..... | آزمایش ارتعاش آزاد-بررسی ضریب ضربه | ۶-۵ |
| ۱۲۴..... | نتیجه‌گیری | ۱-۶-۵ |
| ۱۲۷..... | تحلیل لرزه ای مخازن فولادی مهار شده | ۶- |
| ۱۲۷..... | مقدمه | ۱-۶ |
| ۱۲۷..... | زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل‌های تاریخچه-زمانی | ۲-۶ |
| ۱۳۰..... | مقایسه مشخصات موده‌های نوسان مخزن-مایع | ۳-۶ |
| ۱۳۱..... | تاثیر طول گام زمانی در تحلیل اجزاء محدود مخازن مهار شده | ۴-۶ |
| ۱۳۱..... | مقایسه تحلیل لرزه ای حاصل از روش اجزاء محدود و روش های تحلیلی موجود | ۵-۶ |
| ۱۳۳..... | نتیجه‌گیری | ۶-۶ |
| ۱۳۵..... | تحلیل لرزه‌ای مخازن فولادی مهار نشده | ۷- |
| ۱۳۵..... | مقدمه | ۱-۷ |

| | | |
|----------|---|--------|
| ۱۳۵..... | معادلات حاکم بر رفتار دینامیکی مخازن مهار نشده..... | ۲-۷- |
| ۱۳۸..... | حل معادلات دینامیکی پاسخ با استفاده از روش نیومارک..... | ۱-۲-۷- |
| ۱۳۸..... | حل معادلات دینامیکی پاسخ با استفاده از روش رانگ-کوتا..... | ۲-۲-۷- |
| ۱۴۰..... | روابط حاکم بر بلند شدگی تحت تاثیر همزمان مولفه های افقی و قائم زلزله..... | ۳-۷- |
| ۱۴۱..... | نتایج تحلیل لرزه ای مخازن مهار نشده..... | ۴-۷- |
| ۱۴۲..... | مطالعه پایداری پاسخهای حاصل از روشهای تحلیلی مختلف..... | ۱-۴-۷- |
| ۱۴۴..... | مقایسه نتایج حاصل از روش تحلیلی و روش اجزاء محدود..... | ۲-۴-۷- |
| ۱۴۵..... | تاثیر ضرب و بازگشت بر پاسخ بلند شدگی..... | 7-4-3- |
| ۱۴۷..... | تاریخچه زمانی تغییرات دوره تناوب مودهای سازه..... | ۴-۴-۷- |
| ۱۴۹..... | تاثیر تاریخچه زمانی شتاب زلزله بر حداکثر مقادیر پاسخ مخزن..... | ۵-۴-۷- |
| ۱۵۰..... | تاثیر مود موج نوسانات مایع بر پاسخ بلند شدگی..... | ۶-۴-۷- |
| ۱۵۲..... | تاثیر مؤلفه قائم زلزله بر پاسخ بلند شدگی..... | ۵-۷- |
| ۱۵۳..... | تحلیل بلند شدگی مخزن مهار نشده دارای شالوده صلب و قرار گرفته بر روی بستر انعطاف پذیر..... | ۶-۷- |
| ۱۵۴..... | محاسبه سختی و میرایی خاک..... | ۷-۷- |
| ۱۵۵..... | تاثیر نوع خاک بر پاسخ بلند شدگی مخزن مهار نشده..... | ۸-۷- |
| ۱۵۷..... | تاثیر نوع خاک در تغییرات دوره تناوب مودهای مختلف نوسان..... | ۹-۷- |
| ۱۶۰..... | نتیجه گیری..... | ۱۰-۷- |
| ۱۶۳..... | نتیجه گیری و پیشنهاد مطالعات آینده..... | ۸- |
| ۱۶۳..... | نتیجه گیری..... | ۱-۸- |
| ۱۶۴..... | پیشنهادات مطالعات آینده..... | ۲-۸- |

| | |
|--|-----|
| پیوست الف: معرفی اصطلاحات مورد استفاده..... | ۱۶۶ |
| پیوست ب: المانها و فرضیات مورد استفاده در نرم افزار ANSYS..... | ۱۶۷ |
| پیوست ج: معرفی مشخصات ارتعاشی مخزن مهار نشده..... | ۱۷۳ |
| پیوست د: شتابنگاشتهای مورد استفاده..... | ۱۷۵ |
| مراجع..... | ۱۷۸ |

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱)- بلند شدگی مخزن تحت اثر زلزله ۳
- شکل (۲-۱)- بلند شدگی متقارن و نامتقارن مخزن مهار نشده ۸
- شکل (۳-۱)- فلوچارت مراحل انجام پایان نامه ۹
- شکل (۱-۳)- مدل مورد استفاده توسط وازنیاک و میشل (۱۹۷۸) برای تحلیل بلند شدگی ۲۶
- شکل (۲-۳)- بلند شدگی استاتیکی (کلاف، ۱۹۷۸) ۲۹
- شکل (۳-۳)- تحلیل بلند شدگی تیر نیمه بی نهایت (ملهوترا و ولتسوز، 1994a) ۲۹
- شکل (۴-۳)- مدل سیستم مخزن-مایع مهار نشده (ملهوترا و ولتسوز، 1994c) ۳۱
- شکل (۵-۳)- سیستم معین استاتیکی مورد استفاده در *API 650* برای تعیین حداکثر بلند شدگی ۳۶
- شکل (۱-۴)- مدل تیر مثلثی شکل ۴۳
- شکل (۲-۴)- جزء تیر انتخاب شده ۴۳
- شکل (۳-۴)- لنگر و برش وارد بر انتهای پایین دیوار ۵۲
- شکل (۴-۴)- بلند شدگی اولیه ورق کف مخزن تحت اثر فشار هیدرو استاتیکی وارد بر دیوار ۵۷
- شکل (۵-۴)- دیاگرام آزاد ناحیه بلند شده ۶۰
- شکل (۶-۴)- دیوار مخزن متشکل از قسمت‌های دارای ضخامت متفاوت ۶۲
- شکل (۷-۴)- دیاگرام آزاد مخزن بلند شده ۷۰
- شکل (۸-۴)- پارامترهای هندسی مورد استفاده در تعیین لنگر مقاوم ۷۰
- شکل (۹-۴)- مخازن مورد مطالعه ۷۱
- شکل (۱۰-۴)- مقایسه نیروهای قائم و محوری در تیرهای مثلثی و یکنواخت ۷۳
- شکل (۱۱-۴)- تاثیر کوتاه شدگیهای مرتبه دوم در نیروهای قائم و محوری تیر ۷۴
- شکل (۱۲-۴)- برگشت نیروهای قائم و محوری ۷۶
- شکل (۱۳-۴)- سهم هر یک از نیروهای قائم در دو انتهای تیر در تحمل بار تیر ۷۶

- ۷۷ شکل (۴-۱۴)-تاثیر پارامتر ضخامت دیوار و کف مخزن بر روی نیرو و تغییر مکان بلند شدگی
- ۷۸ شکل (۴-۱۵)- بلند شدگی ورق کف در اثر فشار هیدرو استاتیکی وارد بر دیوار مخزن
- ۷۸ شکل (۴-۱۶)- تاثیر فشار هیدرو استاتیکی دیوار بر روی پاسخ بلند شدگی
- ۸۱ شکل (۴-۱۷)- بلند شدگی تیر یکنواخت- مقایسه بین نتایج دقیق و ساده شده
- ۸۲ شکل (۴-۱۸)- میزان مشارکت کنش محوری در باربری تیر (پس از جاری شدن مصالح)
- ۸۳ شکل (۴-۱۹)- مقایسه نتایج تحلیل دقیق و ساده در مخزن بلند. $t_b = 0.0015R$ ، $t_s = 0.002R$ و $t_s = 0.003R$
- ۸۴ شکل (۴-۲۰)- مقایسه نتایج تحلیل دقیق و ساده در مخزن بلند. $t_b = 0.0015R$ ، $t_s = 0.005R$
- ۸۴ شکل (۴-۲۱)- مقایسه نتایج تحلیل دقیق و ساده در مخزن عریض. $t_b = 0.0008R$ ، $t_s = 0.002R$ و $t_b = 0.001R$
- ۸۵ شکل (۴-۲۲)- مقایسه نتایج تحلیل دقیق و ساده در مخزن عریض. $t_b = 0.0015R$ ، $t_s = 0.002R$
- ۸۵ شکل (۴-۲۳)- مقایسه نتایج تحلیل دقیق و ساده در مخزن عریض. $t_b = 0.001R$ ، $t_s = 0.0015R$ و $t_s = 0.0025R$
- ۸۷ شکل (۴-۲۴)- بلند شدگی متقارن کف مخزن
- ۸۸ شکل (۴-۲۵)- تاثیر تعداد المانها و نحوه چیدمان آنها در مدلسازی
- ۸۹ شکل (۴-۲۶)- تاثیر تعداد المانهای کف مخزن و نحوه چیدمان آنها در پاسخ بلندشدگی متقارن
- ۸۹ شکل (۴-۲۷)- نحوه المان بندی دیوار مخزن
- ۹۰ شکل (۴-۲۸)- مقایسه نتایج حاصل از روش اجزاء محدود و روشهای تحلیلی- بلند شدگی متقارن
- ۹۰ شکل (۴-۲۹)- تاثیر لحاظ کردن تغییر شکلهای بزرگ ورق کف در پاسخ بلند شدگی
- ۹۱ شکل (۴-۳۰)- تاثیر فشار هیدرو استاتیکی وارد بر دیوار بر روی پاسخ بلند شدگی متقارن
- ۹۲ شکل (۴-۳۱)- تاثیر ضخامت دیوار و کف مخزن در بلند شدگی متقارن-مخزن لاغر
- ۹۲ شکل (۴-۳۲)- تاثیر ضخامت دیوار و کف مخزن در بلند شدگی متقارن-مخزن عریض
- ۹۴ شکل (۴-۳۳)- مقایسه منحنی لنگر واژگونی-دوران حاصل از روشهای اجزاء محدود و تحلیلی
- ۹۴ شکل (۴-۳۴)- تاثیر فشار هیدرواستاتیکی دیوار بر منحنی لنگر واژگونی دوران
- ۹۵ شکل (۴-۳۵)- تاثیر پارامترهای ضخامت دیوار مخزن بر بلند شدگی
- ۹۵ شکل (۴-۳۶)- تاثیر پارامترهای ضخامت کف مخزن بر بلندشدگی
- ۹۶ شکل (۴-۳۷)- تغییرات توزیع فشار در ارتفاع در الگوهای مختلف
- ۹۷ شکل (۴-۳۸)- تغییرات توزیع فشار در پلان مخزن در الگوهای مختلف
- ۹۸ شکل (۴-۳۹)- مقایسه بلندشدگی مخزن تحت اثر الگوهای مختلف بارگذاری

- شکل (۴-۴۰)- تاثیر وجود سخت کننده بالای دیوار بر بلند شدگی مخزن لاغر ۹۹
- شکل (۴-۴۱)- تغییر شکل مخزن در حالت عدم وجود سخت کننده بالای دیوار مخزن ۱۰۰
- شکل (۴-۴۲)- تغییر شکل مخزن در حالت وجود سخت کننده بالای دیوار مخزن ۱۰۰
- شکل (۴-۴۳)- تغییر شکل انتهای پایین دیوار مخزن در حالت وجود تغییر شکل‌های اعوجاجی دیوار-مخزن بلند ۱۰۱
- شکل (۴-۴۴)- تغییر شکل انتهای پایین دیوار مخزن در حالت حذف تغییر شکل‌های اعوجاجی دیوار-مخزن بلند ۱۰۱
- شکل (۴-۴۵)- تغییر شکل انتهای پایین دیوار مخزن در حالت حذف تغییر شکل‌های اعوجاجی دیوار-مخزن عریض ۱۰۲
- شکل (۴-۴۶)- تغییر شکل ناشی از بلند شدگی نا متقارن در مخزن بلند ۱۰۲
- شکل (۴-۴۷)- لنگر واژگونی در برابر دوران و طول بلند شدگی-بار گذاری رفت و برگشتی ۱۰۳
- شکل (۴-۴۸)- نیروی قائم ایجاد شده در انتهای تیرهای مختلف ۱۰۴
- شکل (۴-۴۹)- لنگر خمشی و نیروی محوری ایجاد شده در تیرهای مختلف ۱۰۴
- شکل (۵-۱)- مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه ۱۰۷
- شکل (۵-۲)- نقشه ساخت مخزن عریض ۱۰۹
- شکل (۵-۳)- مدل تحلیلی تکیه گاه مخزن ۱۱۰
- شکل (۵-۴)- تکیه گاه مخزن مورد آزمایش ۱۱۱
- شکل (۵-۵)- محل تعبیه تغییر مکان سنجها در آزمایشهای استاتیکی ۱۱۳
- شکل (۵-۶)- محل تعبیه تغییر مکان سنجها در آزمایشهای دینامیکی ۱۱۴
- شکل (۵-۷الف)- بلندشدگی آزمایشی و تحلیلی در حالت حداکثر شیب تکیه‌گاه برابر ۲۰ درجه- تغییر مکان سنج در $\theta = 0^\circ$ ۱۱۶
- شکل (۵-۷ب)- بلندشدگی آزمایشی و تحلیلی در حالت حداکثر شیب تکیه‌گاه برابر ۲۰ درجه- تغییر مکان سنج در $\theta = 45^\circ$ ۱۱۷
- شکل (۵-۷ج)- بلندشدگی آزمایشی و تحلیلی در حالت حداکثر شیب تکیه‌گاه برابر ۲۰ درجه- تغییر مکان سنج در $\theta = 90^\circ$ ۱۱۷
- شکل (۵-۸الف)- بلندشدگی آزمایشی و تحلیلی در حالت حداکثر شیب تکیه‌گاه برابر ۲۵ درجه- تغییر مکان سنج در $\theta = 0^\circ$ ۱۱۸
- شکل (۵-۸ب)- بلندشدگی آزمایشی و تحلیلی در حالت حداکثر شیب تکیه‌گاه برابر ۲۵ درجه- تغییر مکان سنج در $\theta = 45^\circ$ ۱۱۸

- شکل (۵-۸ج)- بلندشدگی آزمایشی و تحلیلی در حالت حداکثر شیب تکیه‌گاه برابر ۲۵ درجه- تغییر مکان‌سنج
 در $\theta = 90^\circ$ ۱۱۹
- شکل (۵-۹الف)- بلندشدگی آزمایشی و تحلیلی در حالت حداکثر شیب تکیه‌گاه برابر ۲۵ درجه- تغییر مکان‌سنج در $\theta = 0^\circ$ -
 با حذف حلقه داخلی در بالای مخزن ۱۱۹
- شکل (۵-۹ب)- بلندشدگی آزمایشی و تحلیلی در حالت حداکثر شیب تکیه‌گاه برابر ۲۵ درجه- تغییر مکان‌سنج
 در $\theta = 45^\circ$ - با حذف حلقه داخلی در بالای مخزن ۱۲۰
- شکل (۵-۹ج)- بلندشدگی آزمایشی و تحلیلی در حالت حداکثر شیب تکیه‌گاه برابر ۲۵ درجه- تغییر مکان‌سنج در $\theta = 90^\circ$ -
 با حذف حلقه داخلی در بالای مخزن ۱۲۰
- شکل (۵-۱۰)- پاسخ تغییر مکان بلند شدگی نقاط $\theta = 0^\circ$ و $\theta = 180^\circ$ - آزمایش شماره ۳ ۱۲۲
- شکل (۵-۱۱)- پاسخ تغییر مکان بلند شدگی نقاط $\theta = 90^\circ$ و $\theta = -90^\circ$ - آزمایش شماره ۳ ۱۲۲
- شکل (۵-۱۲)- پاسخ تغییر مکان بلند شدگی نقاط $\theta = 0^\circ$ و $\theta = 180^\circ$ - آزمایش شماره ۴ ۱۲۳
- شکل (۵-۱۳)- پاسخ تغییر مکان بلند شدگی نقاط $\theta = 90^\circ$ و $\theta = -90^\circ$ - آزمایش شماره ۴ ۱۲۳
- شکل (۵-۱۴)- پاسخ تغییر مکان بلند شدگی نقاط $\theta = 0^\circ$ و $\theta = 180^\circ$ - آزمایش شماره ۵ ۱۲۴
- شکل (۵-۱۵)- پاسخ تغییر مکان بلند شدگی نقاط $\theta = 90^\circ$ و $\theta = -90^\circ$ - آزمایش شماره ۵ ۱۲۴
- شکل (۶-۱)- نحوه انتخاب زلزله‌های مورد استفاده در تحلیل های تاریخچه زمانی ۱۲۸
- شکل (۶-۲الف)- طیف شتاب زلزله‌های ۵۰ درصد احتمال برای ضریب میرایی ۵ درصد (شتاب نگاشتها طوری همپایه شده‌اند
 که شتاب طیفی در دوره تناوب 0.09 Sec برابر $0.3g$ می‌باشند) ۱۲۸
- شکل (۶-۲ب)- طیف شتاب زلزله‌های ۸۴ درصد احتمال برای ضریب میرایی ۵ درصد (شتاب نگاشتها طوری همپایه شده‌اند
 که شتاب طیفی در دوره تناوب 0.09 Sec برابر $0.3g$ می‌باشند) ۱۲۹
- شکل (۶-۲ج)- طیف شتاب زلزله‌های ۱۶ درصد احتمال برای ضریب میرایی ۵ درصد (شتاب نگاشتها طوری همپایه شده‌اند
 که شتاب طیفی در دوره تناوب 0.09 Sec برابر $0.3g$ می‌باشند) ۱۲۹
- شکل (۶-۳)- تاثیر طول گام زمانی در پاسخ برش پایه مخزن بلند مهار شده ۱۳۱
- شکل (۶-۴)- مقایسه برش پایه حاصل از روشهای هاوسنر، ولتسوز و اجزاء محدود در مخزن مهار شده بلند ۱۳۲
- شکل (۶-۵)- مقایسه برش پایه حاصل از روشهای ملهوترا، $API 650$ و اجزاء محدود در مخزن مهار شده بلند ۱۳۲
- شکل (۶-۶)- مقایسه برش پایه حاصل از روشهای هارون و هاوسنر و اجزاء محدود در مخزن بلند مهار شده ۱۳۳
- شکل (۶-۷)- مقایسه برش پایه حاصل از روشهای هارون و هاوسنر و اجزاء محدود در مخزن عریض مهار شده ۱۳۳

- شکل (۷-۱)- وضعیت تغییر شکل یافته مخزن مهار نشده ۱۳۷
- شکل (۷-۲)- جرمی از مایع که دارای حرکت گهواره ای است (پلان و مقطع) ۱۳۷
- شکل (۷-۳)- بلند شدگی مخزن مهار نشده تحت اثر مولفه های افقی و قائم زلزله ۱۴۰
- شکل (۷-۴)- بررسی پایداری پاسخ حاصل از روش نیومارک-مخزن بلند مهار نشده ۱۴۱
- شکل (۷-۵الف)- تاثیر گامهای زمانی برابر با ۸ و ۱۶ عدد بر پاسخ مخزن بلند (روش رانگ-کوتا مرتبه ۴) ۱۴۲
- شکل (۷-۵ب)- تاثیر گامهای زمانی برابر با ۱۶ و ۳۲ عدد بر پاسخ مخزن بلند (روش رانگ-کوتا مرتبه ۴) ۱۴۲
- شکل (۷-۵ج)- تاثیر گامهای زمانی برابر با ۳۲ و ۶۴ عدد بر پاسخ مخزن بلند (روش رانگ-کوتا مرتبه ۴) ۱۴۳
- شکل (۷-۶)- مقایسه نتایج بلندشدگی حاصل از روش تحلیلی و اجزاء محدود-مخزن بلند ۱۴۴
- شکل (۷-۷)- مقایسه نتایج بلندشدگی حاصل از روش تحلیلی و اجزاء محدود-مخزن عریض ۱۴۴
- شکل (۷-۸الف)- تاثیر میزان ضریب بازگشت بر پاسخ بلند شدگی-مخزن بلند ۱۴۵
- شکل (۷-۸ب)- تاثیر میزان ضریب بازگشت بر پاسخ بلند شدگی-مخزن بلند ۱۴۵
- شکل (۷-۹الف)- تغییرات دوره تناوب موده‌های ضربه ای و موج تحت اثر زلزله *FOR090* ۱۴۷
- شکل (۷-۹ب)- تغییرات دوره تناوب موده‌های ضربه ای و موج تحت اثر زلزله *1062 - E* ۱۴۷
- شکل (۷-۱۰الف)- تغییرات دوره تناوب مود گهواره ای نوسانات مخزن-مایع تحت اثر زلزله *FOR090* ۱۴۸
- شکل (۷-۱۰ب)- تغییرات دوره تناوب مود گهواره ای نوسانات مخزن-مایع تحت اثر زلزله *1062 - E* ۱۴۸
- شکل (۷-۱۱)- تاثیر مود موج بر پاسخ بلند شدگی مخزن بلند ۱۵۰
- شکل (۷-۱۲)- تاثیر مود موج بر پاسخ بلند شدگی مخزن عریض ۱۵۰
- شکل (۷-۱۳)- مدل جرم-فنر-میراگر مخزن قرار گرفته بر روی شالوده صلب قرار گرفته بر روی خاک ۱۵۳
- شکل (۷-۱۴)- بلند شدگی مخزن بلند قرار گرفته بر روی خاکهای مختلف تحت شتابنگاشت *FOR090* ۱۵۵
- شکل (۷-۱۵)- بلند شدگی مخزن عریض قرار گرفته بر روی خاکهای مختلف تحت شتابنگاشت *FOR090* ۱۵۶
- شکل (۷-۱۶)- بلند شدگی مخزن بلند قرار گرفته بر روی خاکهای مختلف تحت شتابنگاشت *1062 - E* ۱۵۶
- شکل (۷-۱۷)- تاثیر وزن شالوده بر روی پاسخ بلند شدگی مخزن بلند قرار گرفته بر روی خاک نوع III ۱۵۷

| | |
|-----|--|
| ۱۵۷ | شکل (۷-۱۸) - تغییرات دوره تناوب مود موج مایع در مخزن بلند تحت اثر شتابنگاشت FOR090 |
| ۱۵۸ | شکل (۷-۱۹) - تغییرات دوره تناوب مود ضربه‌ای مایع در مخزن بلند تحت اثر شتابنگاشت FOR090 |
| ۱۵۸ | شکل (۷-۲۰) - تغییرات دوره تناوب مود گهواره‌ای مخزن بلند تحت اثر شتابنگاشت FOR090 |
| ۱۵۹ | شکل (۷-۲۱) - تغییرات دوره تناوب مود موج مایع در مخزن عریض تحت اثر شتابنگاشت FOR090 |
| ۱۵۹ | شکل (۷-۲۲) - تغییرات دوره تناوب مود ضربه‌ای مایع در مخزن عریض تحت اثر شتابنگاشت FOR090 |
| ۱۶۰ | شکل (۷-۲۳) - تغییرات دوره تناوب مود گهواره‌ای مخزن عریض تحت اثر شتابنگاشت FOR090 |
| ۱۶۹ | شکل (ب-۱) - المان مایع مورد استفاده در تحلیل اجزاء محدود (ANSYS user manual) |
| ۱۶۹ | شکل (ب-۲) - المان مورد استفاده در دیوار و کف مخزن (ANSYS user manual) |
| ۱۷۱ | شکل (ب-۳) - مقایسه کرنش مهندسی و کرنش لگاریتمی با یکدیگر |
| ۱۷۲ | شکل (ب-۴) - تغییرات حداکثر کرنش الاستیک، حداکثر کرنش پلاستیک و مجموعشان نسبت به میزان بلندشدگی در ورق کف مخزن بلند |
| ۱۷۵ | شکل (د-۱) - شتابنگاشت CPM000 |
| ۱۷۵ | شکل (د-۲) - شتابنگاشت G01090 |
| ۱۷۶ | شکل (د-۳) - شتابنگاشت 1062 - E |
| ۱۷۶ | شکل (د-۴) - شتابنگاشت CAP000 |
| ۱۷۷ | شکل (د-۵) - شتابنگاشت CLS090 |
| ۱۷۷ | شکل (د-۶) - شتابنگاشت FOR090 |

فهرست جداول

| | |
|-----|--|
| ۳۳ | جدول (۱-۳)- ضرایب کاهش نیرو در پیوست E آیین نامه API650 |
| ۳۶ | جدول (۲-۳)- گروه بندی مخازن در توصیه‌های طراحی نیوزلند |
| ۵۶ | جدول (۱-۴)- روند تحلیل بلند شدگی تیر |
| ۷۱ | جدول (۲-۴)- مشخصات هندسی مخازن مورد مطالعه |
| ۷۴ | جدول (۳-۴)- یک گام از تحلیل برای یک طول بلندشدگی خاص |
| ۸۶ | جدول (۴-۴)- نسبت نیروی قائم حاصل از روش تقریبی به نیروی حاصل از روش دقیق در مخزن بلند |
| ۸۶ | جدول (۵-۴)- نسبت نیروی قائم حاصل از روش تقریبی به نیروی حاصل از روش دقیق در مخزن عریض |
| ۹۸ | جدول (۶-۴)- برش و لنگر واژگونی پایه، ناشی از الگوهای مختلف بارگذاری |
| ۱۰۸ | جدول (۱-۵)- مشخصات هندسی مخزن مورد آزمایش |
| ۱۲۱ | جدول (۲-۵)- نسبت بلند شدگی آزمایش به بلند شدگی تحلیلی در آزمایش (۴،۲(۶)) |
| ۱۲۱ | جدول (۳-۵)- نسبت بلند شدگی آزمایش به بلند شدگی تحلیلی در آزمایش (۴،۲(۸)) |
| ۱۳۱ | جدول (۱-۶)- ارتباط فاصله زمانی هر گام و تعداد گامهای مورد استفاده در تحلیل برای شتابنگاشتهای مختلف |
| ۱۳۰ | جدول (۲-۶)- مشخصات دینامیکی مخزن بلند مهار شده |
| ۱۳۰ | جدول (۳-۶)- مشخصات دینامیکی مخزن عریض مهار شده |
| ۱۴۶ | جدول (۱-۷)- تاثیر میزان ضریب بازگشت بر حداکثر پاسخ بلند شدگی مخزن بلند |
| ۱۴۶ | جدول (۲-۷)- تاثیر میزان ضریب بازگشت بر حداکثر پاسخ بلند شدگی مخزن عریض |
| ۱۴۹ | جدول (۳-۷)- حداکثر مقادیر پاسخ مخزن بلند تحت اثر زلزله های مختلف |
| ۱۵۱ | جدول (۴-۷)- تاثیر مود موج در مخزن بلند |
| ۱۵۱ | جدول (۵-۷)- تاثیر مود موج در مخزن عریض |
| ۱۵۲ | جدول (۶-۷)- تاثیر مولفه قائم زلزله بر حداکثر پاسخ بلند شدگی مخزن بلند |

- ۱۵۲ جدول (۷-۷) - تاثیر مولفه قائم زلزله بر حداکثر پاسخ بلند شدگی مخزن عریض
- ۱۵۴ جدول (۸-۷) - مشخصات فنر و میراگر معادل خاک-مخزن لاغر
- ۱۵۴ جدول (۹-۷) - مشخصات فنر و میراگر معادل خاک-مخزن عریض

فهرست علائم

A : مساحت سطح مقطع تیر یکنواخت

$A_h(T)$: مقدار طیف شتاب متناظر با دوره تناوب T که به PGA همپایه گردیده است

A_R : مساحت سطح مقطع انتهای تیر مثلثی

A_i ، A_c و A_v : شتاب طیفی مودهای ضربه‌ای، موج و شتاب قائم

b : عرض تیر یکنواخت

b_R : عرض مقطع انتهای تیر مثلثی

c : سرعت صوت در سیال

c_i : ضریب میرایی مود ضربه‌ای

c_c : ضریب میرایی مود موج

C_i : ضریب ثابت ارتباط دهنده ضخامت دیوار مخزن به دوره تناوب مود انعطاف پذیر ضربه‌ای مایع

D : قطر مخزن

D_s : پارامتر سختی دیوار مخزن

\bar{d} : فاصله افقی نقطه ثقل فشار مایع بر روی ناحیه بلندنشده ورق کف تا مرکز ثقل مایع داخل مخزن

d_i : کوتاهترین فاصله بین انتهای بلند شده تیر i و نقطه‌ای که بلندشدگی حول آن انجام می‌شود

d'_i : کوتاهترین فاصله بین نقطه آغاز بلندشدگی تیر i و نقطه‌ای که بلندشدگی حول آن انجام می‌شود

d''_i : کوتاهترین فاصله بین مرکز ثقل فشار هیدرواستاتیکی وارد بر تیر i و نقطه‌ای که بلندشدگی حول آن انجام می‌شود

$d_{\theta\theta}$ ، $d_{\theta u}$ و d_{uu} : المانهای تشکیل دهنده معکوس ماتریس سختی قیود انتهای تیر