



## بررسی همزمان اثرات پدیده‌ی خوردگی و ارتفاع سیال روی خصوصیات دینامیکی مخزن کوتاه استوانه‌ای مایعات

میلاذ جعفریان دهکردی<sup>۱\*</sup>، سید هادی دهقان منشادی<sup>۲</sup>، سعید پیروزبخت<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد

۳- مربی گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یزد

\*miladjafarian12@yahoo.com

ارسال: بهمن ماه ۹۵ پذیرش: اسفند ماه ۹۵

### خلاصه

در تمام شاخه‌های صنعت به‌ویژه در صنایع نفت و پتروشیمی، سازه‌های فلزی جدار نازک به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. مخازن استوانه‌ای نمونه‌ای از چنین سازه‌هایی هستند که در روند ساخت‌وساز و هم‌چنین در طول مدت‌زمانی که از عمر چنین سازه‌هایی می‌گذرد معمولاً نقایصی به وجود آمده که آن‌ها را از فرم ایده آل خارج می‌کند. پدیده‌ی خوردگی مخازن یکی از این نقایص هندسی است که از مهم‌ترین عوامل گسیختگی مخازن به شمار می‌آید. بر اساس مطالعات انجام‌شده، نرخ تغییرات خوردگی در بخش فوقانی مخازن ۰/۴ میلی‌متر در سال و در بخش تحتانی مخازن بین ۰/۴ تا ۰/۶ میلی‌متر در سال برآورد می‌شود. در این پژوهش اثر درازمدت پدیده خوردگی و تغییرات ارتفاع سیال روی خصوصیات دینامیکی مخزن کوتاه استوانه‌ای مایعات مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای انجام تحقیق از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. سازه‌ی مورد بررسی مخزن کوتاهی با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۴ می‌باشند. مخزن کوتاه در چهار حالت سالم، ۵ سال پس از ساخت، ۱۰ سال پس از ساخت و ۱۵ سال پس از ساخت، شبیه‌سازی شده است. برای ساخت مخزن کوتاه از المان‌های پوسته‌ای و برای ساخت سیال از المان‌های مکعبی سه‌بعدی استفاده شده است. تحلیل مودال و هارمونیک بر روی مدل اجزای محدود انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل مودال نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی غالب مخزن کوتاه تابعی از عمر مخزن است. به گونه‌ای که با گذشت عمر مخزن کوتاه و پیدایش پدیده خوردگی فرکانس غالب مخزن کاهش می‌یابد. از سوی دیگر نتایج حاصل از تحلیل هارمونیک بیانگر تغییرات فشار هیدرودینامیکی در طول عمر مخزن است.

کلمات کلیدی: مخازن ذخیره، خوردگی درازمدت جداره، روش اجزای محدود، تحلیل مودال، تحلیل هارمونیک.

### ۱. مقدمه

در صنایع شیمیایی مواد ارزشمند مانند بنزین یا گاز مایع طی فرایندهای مختلفی از مواد شیمیایی مانند نفت خام جدا می‌شوند و یا از آن‌ها به وجود می‌آیند. به دلایل زیادی از جمله یکسان کردن کیفیت محصول، اندازه‌گیری حجم محصول جهت فروش، امکان بارگیری و انتقال به تانکر یا کشتی در حداقل زمان ممکن سبب می‌شود تا مواد محصول را بعد از تولید در مخازن یا تانک‌های مناسب ذخیره نمایند.

مخزن موردنظر این پژوهش، مخزن کوتاه جدار نازک استوانه‌ای قائم فولادی است که برای نگهداری سیالات در درجه حرارت محیط بکار می‌رود. سازه‌ی موردبررسی در طرح پیشنهادی، مخزنی با نسبت ارتفاع به قطر  $0/40$  (مخزن کوتاه)، است که در سه حالت (ارتفاع سیال به ارتفاع کل)  $0/3$ ،  $0/6$  و  $0/9$  در نظر گرفته شده است. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کارکرد مخازن که به آرامی و در گذر زمان تأثیر مخرب خود را آشکار می‌سازد، پدیده خوردگی است که شدت آن بسته به ماهیت سیال درون مخزن، شرایط آب و هوایی، لایه‌های خاک زیرین و ضربه‌های مکانیکی وارده به مخزن می‌تواند متفاوت باشد. طول عمر این گونه مخازن معمولاً بین ۲۰ تا ۴۰ سال است. به گونه‌ای که در تعدادی از آن‌ها بعد از  $1/5$  تا  $2/5$  سال پس از بهره‌برداری، پدیده‌ی خوردگی مشاهده می‌شود. بر اساس تحقیقات صورت گرفته روی مخازن موجود در صنایع نفت و پتروشیمی، وقوع خوردگی در بخش فوقانی دیواره مخازن به دلیل تغییر مداوم سطح سیال و همچنین بخارهای تشکیل شده در این قسمت و در بخش تحتانی به دلیل اثر رسوبات هیدروکربنی انباشته شده در کف مخازن تشدید می‌شود.

بر اساس این مطالعات نرخ تغییرات خوردگی در بخش فوقانی مخزن  $0/4$  میلی‌متر در سال و در بخش تحتانی مخزن بین  $0/4$  تا  $0/6$  میلی‌متر در سال برآورد می‌شود؛ بنابراین ارزیابی دقیق این گونه سازه‌ها با استفاده از مدل‌های تحلیلی و عددی امری ضروری به نظر می‌رسد. هدف اصلی از طرح پیشنهادی بررسی اثر درازمدت پدیده خوردگی و تغییرات ارتفاع سیال روی خصوصیات دینامیکی مخزن کوتاه استوانه‌ای مایعات است که به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس بررسی می‌گردد. هدف کاربردی تحقیق حاضر را می‌توان این گونه بیان کرد که نتایج حاصل می‌تواند در طراحی‌های مخازن لحاظ شده و بحرانی‌ترین وضعیت موجود با توجه به نتایج به دست آمده به عنوان مبنای طراحی در نظر گرفته شود. با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی تأثیر خوردگی و ارتفاع سیال بر خصوصیات دینامیکی مخزن کوتاه موردبررسی قرار خواهد گرفت و نتایج با استفاده از تحلیل‌های مودال و هارمونیک استخراج خواهد شد.

#### ۲.۱. مروری بر سایر مطالعات پیشین انجام گرفته توسط محققین

تاجداران و صداق، (۱۳۹۵) به بررسی تنش‌های کششی فشاری و بوجود آمدن پدیده کمانش الاستو پلاستیک تحت اثر نیروی زلزله در سه منطقه بم، منجیل و طبس با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال با استفاده از مدل‌سازی مخازن در نرم افزار اجزای محدود و تحلیل دینامیکی غیر خطی پرداختند و دریافته‌اند؛ افزایش قطر و ارتفاع هردو باعث افزایش تنش در پوسته مخازن شده اما افزایش قطر تأثیر چشمگیرتری نسبت به ارتفاع داشته است [۱].

وکیلی و شوکتی (۱۳۹۴) به بررسی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار داخلی بالا به همراه فشار محوری پرداختند و دریافته‌اند این حالت از بارگذاری در پوسته‌های استوانه‌ای منجر به ناپایداری الاستو - پلاستیک پوسته در نزدیکی تکیه گاه تحت عنوان کمانش پافیلی می‌شود [۲]. صادقی، ماهری و برهمند (۱۳۹۴) به بررسی تأثیر خوردگی بر بلند شدگی سه نوع مخزن فولادی عریض، متوسط و بلند تحت اثر مولفه افقی زلزله با استفاده از نرم افزار اجزای محدود پرداختند [۳]. زنوزی مرند، بهنمیری، پورچاری و رستمی (۱۳۹۴) به بررسی عملکرد سازه‌ای مخازن فولادی استوانه‌ای با حجم مناسب برای انبارهای سوخت تاسیسات صنعتی با استفاده از مدل‌های دقیق بادر نظر گرفتن اندرکنش دینامیکی سازه و سیال در برابر بار انفجار سطحی در سطوح ارتفاعی متفاوت سیال پرداختند و دریافته‌اند سطح انفجار سیال باعث می‌شود تا اثر ضربه و مقدار فشار بیشتر شود [۴].

#### ۲. مواد و روش‌ها

روش‌های آنالیز مسائل برهمکنش سیال و سازه بسیار مختلف و متنوع می‌باشند؛ که در تحقیق حاضر از روش لاگرانژی استفاده شده است. در این روش سیال و سازه باهم مدل می‌شوند که حاصل آن کاهش عملیات محاسباتی است. مهم‌ترین مزیت این روش، استفاده از فرمولاسیون واحد در محیط سازه و سیال است. به طوری که سازگاری در گره‌های مرز مشترک سیال و سازه،

به آسانی قابل اعمال است. در روش لاگراژی سیال مانند جامدی با سختی برشی صفر فرض می شود. اثر امواج سطحی، به صورت مستقیم در روابط وارد می شود. مزیت روش لاگراژی این است که عنصرهای سیال به راحتی می توانند در یک نرم افزار کامپیوتری گنجانده شوند. به این ترتیب با ساختن عنصر سیال و قرار دادن آن در برنامه ها، با استفاده از تکنیک های عددی می توان مسائل اندرکنشی سیال-سازه را به راحتی حل کرد. در ضمن این روند به ما اجازه می دهد با در نظر گرفتن اثرات اینرسی حرکتی سیستم، مسئله امواج هیدرودینامیکی را نیز حل کنیم.

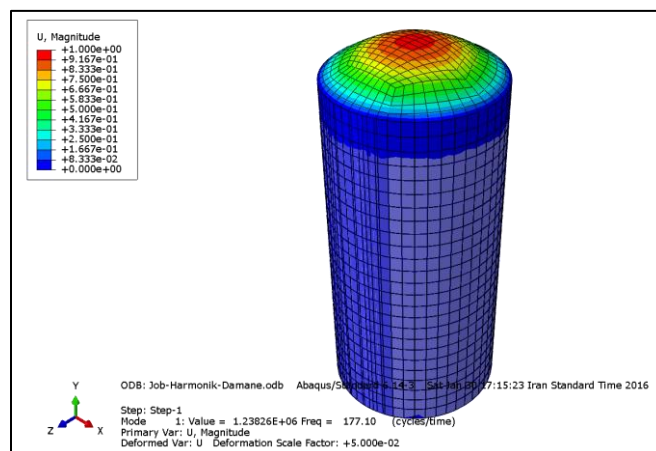
در آنالیزهای مورد نظر از نرم افزار المان محدود آباکوس (ABAQUS) به منظور شبیه سازی عددی استفاده شده است. در بخش صحت سنجی مدل از Abaqus/CAE جهت شبیه سازی و از Abaqus/Standard جهت آنالیز غیرخطی استفاده شده است. شبیه سازی رفتار مخازن استوانه ای در نرم افزار شامل تعریف هندسه مدل، ویژگی مصالح مصرفی، شرایط مرزی، نوع و سازه مش بندی است. در پایان پس از تکمیل مرحله پردازش مدل نتایج به صورت گرافیکی در مدول Visualization قابل مشاهده است. با توجه به هدف انجام این مطالعه، نوع تحلیل مشخص می گردد. در این مطالعه هدف بررسی چگونگی تغییرات شکل مود، زمان تناوب مود حاکم و بررسی فشارهای هیدرودینامیکی مخزن کوتاه تحت اثر پدیده خوردگی است؛ بنابراین با توجه به هدف های تحقیق دو نوع تحلیل مورد نیاز است. مرحله اول، شامل تحلیل مودال است که از آن جهت تعیین مقدار فرکانس های طبیعی و شکل مود آن، در فرکانس مزبور استفاده می گردد. مرحله دوم، شامل تحلیل هارمونیک است که از آن به منظور تعیین فشارهای هیدرودینامیکی مخزن کوتاه استفاده می شود.

## ۱.۲. صحت سنجی مدل اجزای محدود

در گام اول برای اطمینان از دقت و صحت پیش بینی مدل های اجزای محدود، مدل های ارائه شده در مراجع [۵]، [۶] و [۷] با استفاده از نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده و نتایج حاصله با نتایج مراجع ذکر شده مقایسه گردید.

### ۱.۱.۲ مقایسه نتایج با آزمایش های Maheri and Severn

Maheri and Severn (۱۹۸۶) با آزمایش مخازن روی میز لرزان تأثیر تغییر ناهمگونی دیواره مخازن روی نیروهای هیدرودینامیکی مایع را بررسی نمودند. آن ها در ادامه ی تحقیقات خود، فرکانس های طبیعی و شکل مودهای متناظر آن را به دست آوردند و در راستای مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که عدم تقارن اولیه و غیریکساخت بودن ضخامت در دیواره مخازن باعث می شود که مودهای جانبی کوچک تر تحریک نشوند [۵]. به منظور اطمینان از صحت مدل های ساخته شده مخزنی با ارتفاع ۰/۵ و شعاع ۰/۱۳ متر مطابق آزمایش های انجام شده توسط Maheri and Severn در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده (شکل ۱) و تحلیل مودال بر روی آن انجام گرفت [۵].



شکل ۱- مدل سه بعدی ساخته شده در برنامه آباکوس

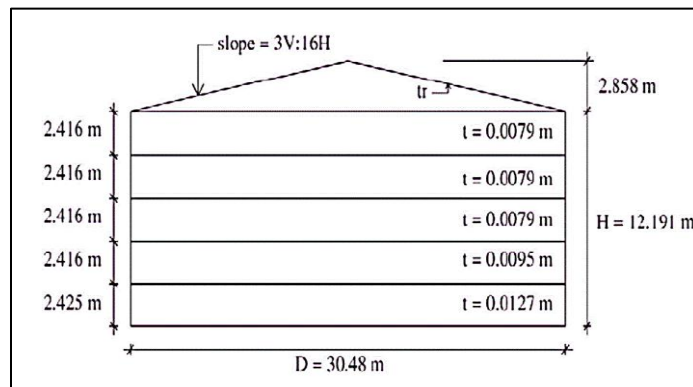
در جدول ۱ نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه شده است که حکایت از انطباق نتایج دارد.

جدول ۱- مقایسه فرکانس‌های به‌دست‌آمده در آباکوس با نتایج مرجع [۵]

| Mode | Frequency (Hz) |               |
|------|----------------|---------------|
|      | Maheri         | Present study |
| 1    | 172            | 174           |
| 4    | 324            | 311           |
| 5    | 854.6          | 804           |

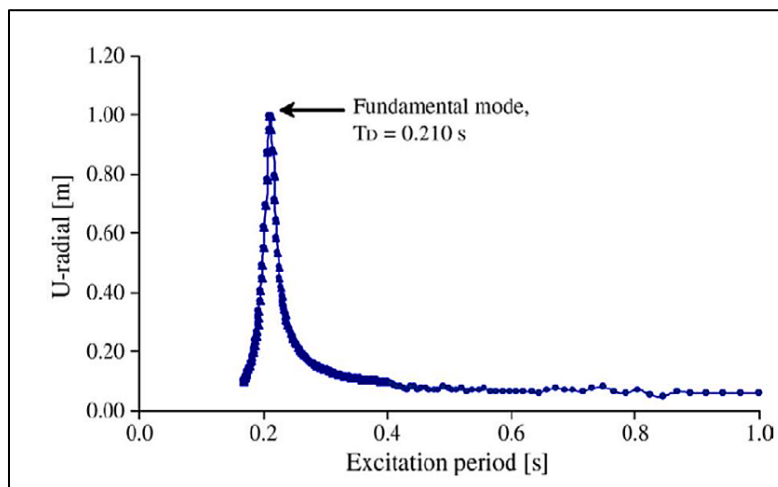
## ۲.۱.۲. صحت‌سنجی با نتایج عددی

دهقان منشادی و ماهری (۲۰۱۰) با در نظر گرفتن سه مخزن با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۴، ۰/۶۳ و ۰/۹۵ برای اولین بار اثرات خوردگی در دیواره مخازن را بر خصوصیات دینامیکی مخازن مورد مطالعه قراردادند [۶]. به‌منظور بررسی صحت مدل‌های ساخته‌شده، مخزنی با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۴۰ که توسط Dehghan Manshadi and Maheri در سال ۲۰۱۰ مورد مطالعه قرار گرفته بود شبیه‌سازی شد و تحت تحلیل مودال و هارمونیک قرار داده شد و نتایج به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار گرفت شکل ۲ [۶].



شکل ۲- هندسه مخزن مرجع با نسبت‌های ارتفاع کل به قطر مخزن ۰/۴ [۶]

شکل ۳ نتیجه کار انجام‌شده توسط Dehghan Manshadi and Maheri را نشان می‌دهد. فرکانس به‌دست‌آمده در نرم‌افزار آباکوس برابر ۴/۹۱۳۸ هرتز و پریود ارتعاشی برابر ۰/۲۰۳۵۰۸ ثانیه است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نتایج Manshadi and Maheri نشان می‌دهد که مدل اجزای محدود آباکوس دقت مناسبی در پیش‌بینی نتایج داشته است [۶].



شکل ۳- مقایسه تغییرات جابجایی نسبت به زمان تناوب برای مخزن ۰/۴ [۶]

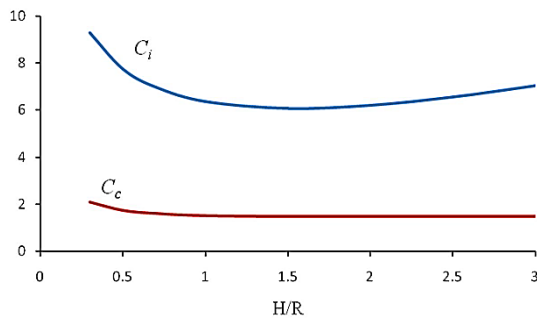
## ۳.۱.۲. کنترل صحت مدل‌سازی بر اساس روابط ارائه‌شده توسط Veletsos و همکاران

Veletsos and Tang (۱۹۸۷) پاسخ مخازن استوانه‌ای با دیواره صلب و شکل‌پذیر را تحت اثر حرکت گهواره‌ای کف مخزن مطالعه نمودند و رابطه میان پاسخ سیستم به حرکت گهواره‌ای کف و تحریک جانبی پایه را تشریح نمودند [۷]. زمان تناوب طبیعی مودهای ضربه‌ای و مود گهواره‌ای بر اساس رابطه ارائه‌شده توسط Veletsos و همکاران معادله **Error!**

**Reference source not found.** که اساس روابط موجود در آئین‌نامه‌ها است به دست می‌آید [۷].

$$T_{imp} = C_i \times \frac{H\sqrt{\rho}}{\sqrt{t/r \times \sqrt{E}}} \quad (1)$$

که در آن  $t$  ضخامت معادل دیواره مخزن،  $\rho$  جرم حجمی سیال،  $E$  مدول الاستیسیته مخزن،  $H$  ارتفاع سیال درون مخزن و  $r$  شعاع مخزن می‌باشد.  $C_i$  ضریب بدون بعدی است که بر اساس جدول ۲ یا شکل ۴ به دست می‌آید:

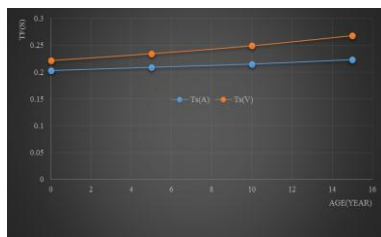


شکل ۴-  $C_i$  ضریب بدون بعد بر حسب  $H/r$

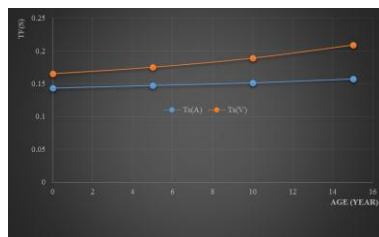
| H/r  | C <sub>i</sub> | mi/mL | mc/mL |
|------|----------------|-------|-------|
| 0.30 | 9.28           | 0.176 | 0.824 |
| 0.50 | 7.74           | 0.30  | 0.70  |
| 0.70 | 6.97           | 0.414 | 0.586 |
| 1.0  | 6.36           | 0.548 | 0.452 |
| 1.50 | 6.06           | 0.686 | 0.314 |
| 2.0  | 6.21           | 0.763 | 0.237 |
| 2.5  | 6.56           | 0.810 | 0.190 |
| 3.0  | 7.03           | 0.842 | 0.158 |

جدول ۲-  $C_i$  ضریب بدون بعد بر حسب  $H/r$

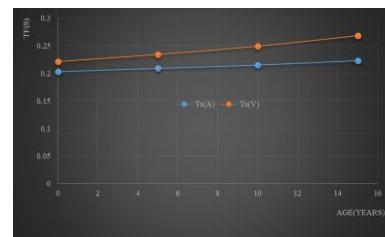
شکل ۵ مقایسه بین مقادیر محاسبه‌شده بر اساس فرمول Veletsos و همکاران و نتایج شبیه‌سازی قابل مشاهده است. ملاحظه می‌شود که به خصوص در مورد مخازن با عمر کم، نتایج به دست آمده از رابطه و نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل اجزای محدود بسیار نزدیک هستند. با بالاتر رفتن عمر مخزن میزان اختلاف بیشتر شده و در بیشترین میزان اختلاف به حدود ۱۵٪ رسیده است.



مخزن کوتاه  $HL/L = 0.9$



مخزن کوتاه  $HL/L = 0.6$



مخزن کوتاه  $HL/L = 0.3$

شکل ۵- مقایسه بین مقادیر محاسبه‌شده بر اساس فرمول Veletsos و همکاران و نتایج شبیه‌سازی آباکوس

## ۴.۱.۲. بررسی پدیده خوردگی و چگونگی در نظر گرفتن آن در مدل‌ها

بر اساس تحقیقات صورت گرفته روی مخازن موجود در صنایع نفت و پتروشیمی نواحی از دیواره مخازن که تحت اثر پدیده خوردگی قرار گرفته و کاهش در ضخامت دیواره مخازن را به دنبال خواهد داشت را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۸-۹].

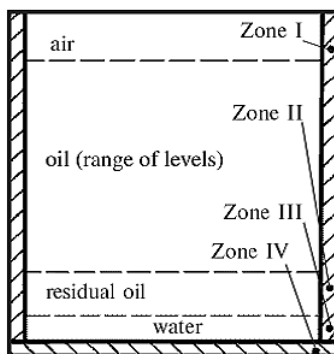
۱- کمر بند پایینی و کف مخزن از داخل به سمت بیرون، جایی که آب‌های ناشی از ترکیبات و مشتقات نفتی (Well Water) ته‌نشین می‌شود. در این حالت میزان خوردگی دیواره مخزن بین ۰/۴ تا ۰/۶ میلی‌متر در سال متغیر خواهد بود.

۲- کمر بند بالایی مخزن، مرز بین مایعات هیدروکربن و بخارهای تشکیل شده در قسمت بالایی مخزن. در این حالت میزان خوردگی ۰/۴ میلی متر در سال خواهد بود.

با توجه به مطالب ذکر شده برای در نظر گرفتن میزان کاهش ضخامت، دیواره مخزن به سه قسمت تقسیم شد:

۱- کمر بند پایینی، ۲- کمر بند میانی، ۳- کمر بند بالایی.

میزان خوردگی و کاهش ضخامت روی دیواره مخزن در دو ناحیه‌ی کمر بند پایینی و بالایی به طور متوسط برابر با ۰/۵ میلی متر در سال در نظر گرفته شد از سوی دیگر میزان کاهش ضخامت در کمر بند میانی مخزن با توجه به مطالب ذکر شده قابل صرف نظر است. شکل ۶ چگونگی در نظر گرفتن خوردگی روی دیواره مخازن را نشان می دهد [۸-۹].



شکل ۶- چگونگی در نظر گرفتن کاهش ضخامت دیواره مخازن در اثر خوردگی [۸-۹]

#### ۵.۱.۲. مشخصات مخازن

مخزن استفاده شده در این تحقیق مخزن کوتاه جدار نازک فولادی مهار شده با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۴ می باشد و مشابه مخزنی است که در مطالعات Dehghan Manshadi and Maheri، خصوصیات لرزه ای آن مورد بررسی قرار گرفته است [۶]. ابعاد مخزن کوتاه با نسبت ارتفاع سیال به ارتفاع مخزن (۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹) در جدول ۳ تا جدول ۶ ذکر شده و هندسه آن در شکل ۷ قابل مشاهده است. مخزن با عمر ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ سال در نظر گرفته شده است؛ بنابراین در مجموع ۱۲ مدل ساخته و تحلیل گردیده است.

جدول ۳- مشخصات مخازن سالم

| تیپ مخزن | H/D | HL/H | شعاع (m) | ارتفاع کل (m) | ضخامت پوسته (mm) |
|----------|-----|------|----------|---------------|------------------|
| کوتاه    | 0.4 | 0.3  | 15.25    | 12.075        | 10.2             |
| کوتاه    | 0.4 | 0.6  | 15.25    | 12.075        | 10.2             |
| کوتاه    | 0.4 | 0.9  | 15.25    | 12.075        | 10.2             |

جدول ۴- مشخصات مخازن با عمر ۵ سال

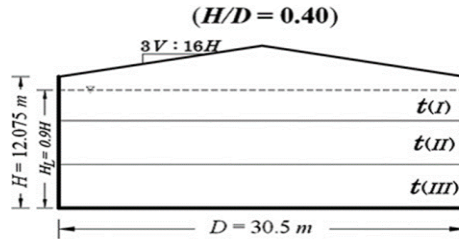
| تیپ مخزن | H/D | HL/H | شعاع (m) | ارتفاع کل (m) | ضخامت پوسته (mm) |
|----------|-----|------|----------|---------------|------------------|
| کوتاه    | 0.4 | 0.3  | 15.25    | 12.075        | 3.9              |
| کوتاه    | 0.4 | 0.6  | 15.25    | 12.075        | 8.1              |
| کوتاه    | 0.4 | 0.9  | 15.25    | 12.075        | 8.5              |

جدول ۵- مشخصات مخازن با عمر ۱۰ سال

| تیپ مخزن | H/D | HL/H | شعاع (m) | ارتفاع کل (m) | ضخامت پوسته (mm) |
|----------|-----|------|----------|---------------|------------------|
| کوتاه    | 0.4 | 0.3  | 15.25    | 12.075        | 2.2              |
| کوتاه    | 0.4 | 0.6  | 15.25    | 12.075        | 6.1              |
| کوتاه    | 0.4 | 0.9  | 15.25    | 12.075        | 6.8              |

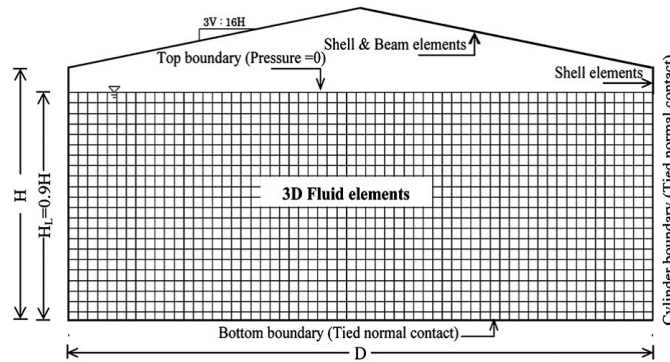
جدول ۶- مشخصات مخازن با عمر ۱۵ سال

| تیپ مخزن | HD  | HL/H | شعاع (m) | ارتفاع کل (m) | ضخامت پوسته (mm) |
|----------|-----|------|----------|---------------|------------------|
| کوتاه    | 0.4 | 0.3  | 15.25    | 12.075        | 4.6              |
| کوتاه    | 0.4 | 0.6  | 15.25    | 12.075        | 4.1              |
| کوتاه    | 0.4 | 0.9  | 15.25    | 12.075        | 5.1              |



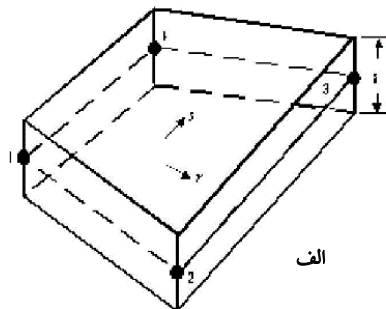
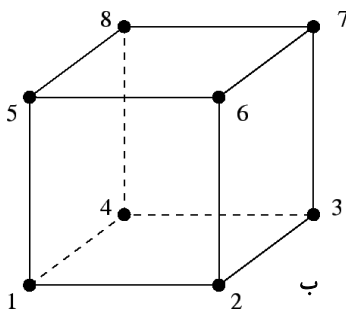
شکل ۷- مشخصات هندسی مخزن کوتاه [۶]

عناصر سیال در مرز بین دیواره مخزن و سیال تنها اجازه حرکت در جهت عمود بر دیواره مخزن را دارند؛ بنابراین لازم است در روند مدل‌سازی گره‌های مشترک سیال و پوسته در مرز دیواره مخزن و سیال در جهت عمود بر دیواره مخزن به یکدیگر وصل شوند. در این مطالعه گره‌های مشترک سیال و سازه که روی هم قرار دارند در جهت شعاعی به یکدیگر وصل شدند. در ضمن مش بندی سیال و سازه به گونه‌ای انجام شد که گره‌های سیال و سازه در مرز دیواره مخزن، بر هم منطبق شوند شکل ۸ [۶].



شکل ۸- شرایط مرزی بکار برده شده در مدل اجزای محدود سیال-سازه [۶]

المان استفاده شده برای مدل‌سازی جداره مخزن المان 4SR است. این المان دارای ۴ گره است و برای مدل کردن رفتار پوسته‌ها به کار می‌رود. هر یک از گره‌های این المان دارای ۶ درجه آزادی است که عبارت‌اند از سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی، برای مدل‌سازی سیال از المان سه‌بعدی Solid با نام C3D8R استفاده شده است. این المان دارای ۸ گره است شکل ۹ [۱۰].



شکل ۹- المان پوسته‌ای 4SR با ۴ گره (بعد ضخامت نشان داده شده واقعی نیست) و المان سه‌بعدی C3D8R [۱۰]

مشخصات مصالح فولاد و سیال به شرح جدول ۷ به نرم افزار معرفی شده است.

جدول ۷- مشخصات مصالح

|                         |                            |
|-------------------------|----------------------------|
| 2E11 N/m <sup>2</sup>   | مدول الاستیسیته فولاد      |
| 7850Kg/m <sup>3</sup>   | جرم حجمی فولاد             |
| 0.3                     | ضریب پواسون فولاد          |
| 1.65E9 N/m <sup>2</sup> | مدول بالک سیال (Crude oil) |
| 860 Kg/m <sup>3</sup>   | جرم حجمی سیال (Crude oil)  |

### ۳. نتایج و بحث

با توجه به هدف انجام این مطالعه، نوع تحلیل مشخص می‌گردد. در این مطالعه هدف بررسی چگونگی تغییرات شکل مود، زمان تناوب مود حاکم و بررسی فشارهای هیدرودینامیکی مخزن کوتاه تحت اثر پدیده‌ی خوردگی است؛ بنابراین با توجه به هدف‌های تحقیق دو نوع تحلیل مورد نیاز است. مرحله‌ی اول، شامل تحلیل مودال است که از آن جهت تعیین مقدار فرکانس‌های طبیعی و شکل مود آن، در فرکانس مزبور استفاده می‌گردد. مرحله‌ی دوم، شامل تحلیل هارمونیک است که از آن به منظور تعیین فشارهای هیدرودینامیکی مخزن کوتاه استفاده می‌شود.

#### ۱.۳. آنالیز مودال

دانستن فرکانس اصلی مخزن کوتاه مایعات به منظور محاسبه‌ی فشار هیدرودینامیکی وارد بر دیواره مخزن از اهمیت زیادی برخوردار است. در سازه‌های خاصی همچون مخازن حاوی مایعات فرکانس اصلی سیستم همانند سازه‌های معمولی متناظر با کمترین فرکانس نیست و بنابراین به منظور تعیین فرکانس اصلی سیستم لازم است تا از ضریب مشارکت مودی و همچنین جرم مودی استفاده شود.

#### ۱.۱.۳. حالت اول مخزن کوتاه (HL/H = 0.3)

جدول ۸ نحوه‌ی تغییرات زمان تناوب مود حاکم در اثر پدیده‌ی خوردگی را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش عمر مخزن زمان تناوب مود حاکم افزایش می‌یابد.

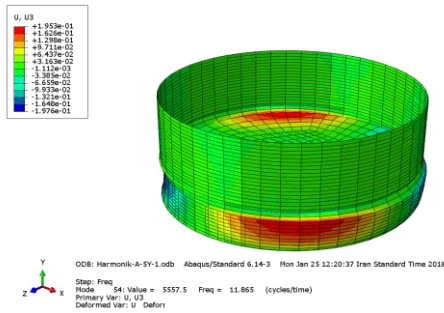
جدول ۸- شدت تغییرات زمان تناوب مود حاکم نسبت به عمر برای مخزن کوتاه (HL/H = 0.3)

| Model | Age | H/D | HL/H | Fundamental periods (s) |
|-------|-----|-----|------|-------------------------|
|       |     |     |      | Modal Analysis          |
| A 30% | 0   | 0.4 | 0.3  | 0.067                   |
| A 30% | 5   | 0.4 | 0.3  | 0.084                   |
| A 30% | 10  | 0.4 | 0.3  | 0.095                   |
| A 30% | 15  | 0.4 | 0.3  | 0.145                   |

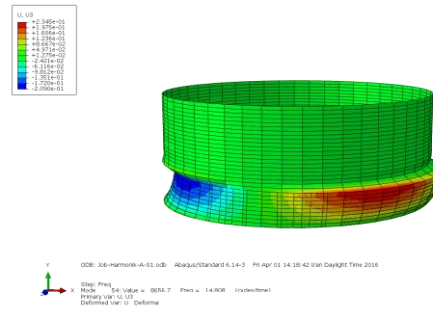
نتایج حاصل از مخزن کوتاه با ارتفاع نسبی سیال برابر ۰/۳ در شکل ۹ قابل مشاهده است؛ که بیانگر نحوه تغییرات شکل مودها تحت تأثیر هم‌زمان پدیده خوردگی و ارتفاع سیال است. شکل مودهای حاکم این گونه مخازن نشان می‌دهد که مود حاکم از نوع مود جانبی است. پر بودن یک‌سوم ارتفاع مخزن از سیال نفت باعث ایجاد شکم‌دادگی مخزن در این ناحیه شده است به گونه‌ای که با افزایش عمر مخزن و پیدایش پدیده خوردگی در این بخش از مخزن سبب تشدید شکم‌دادگی خواهد شد. از



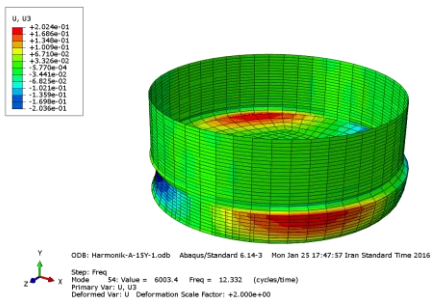
سوی دیگر با وجود خوردگی در یک سوم بالایی دیواره مخزن مشاهده می شود رفتار ناحیه دوسوم بالایی مخزن تقریباً در طول عمر مخزن یکنواخت و ثابت است.



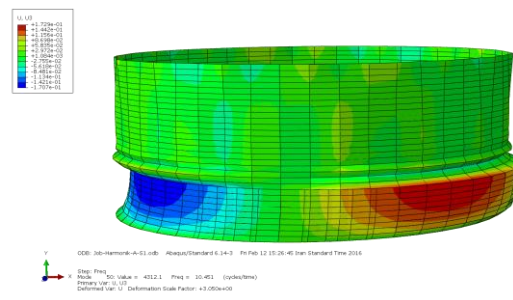
ب: بعد از گذشت ۵ سال



الف: مخزن سالم



د: بعد از گذشت ۱۵ سال



ج: بعد از گذشت ۱۰ سال

شکل ۱۰- مود اصلی مخزن کوتاه با نسبت  $HL/H = 0.30$

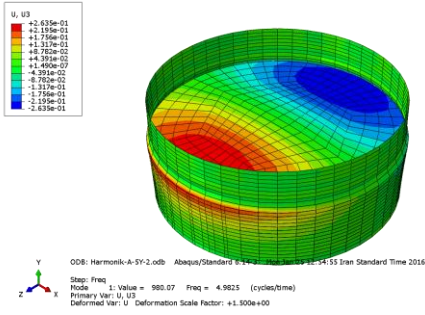
### ۲.۱.۳ (HL/H = 0.6) حالت دوم مخزن کوتاه

جدول ۹ نحوه تغییرات زمان تناوب مود حاکم در اثر پدیده خوردگی را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش عمر مخزن زمان تناوب مود حاکم افزایش می یابد.

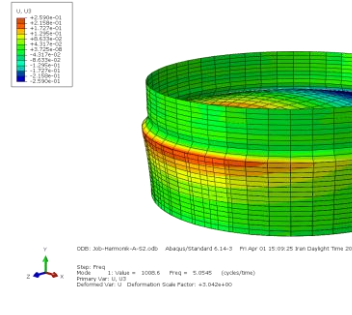
جدول ۹- شدت تغییرات زمان تناوب مود حاکم نسبت به عمر برای مخزن کوتاه ( $HL/H = 0.6$ )

| Model | Age | H/D | HL/H | Fundamental periods (s) |
|-------|-----|-----|------|-------------------------|
|       |     |     |      | Modal Analysis          |
| A 30% | 0   | 0.4 | 0.6  | 0.067                   |
| A 30% | 5   | 0.4 | 0.6  | 0.084                   |
| A 30% | 10  | 0.4 | 0.6  | 0.095                   |
| A 30% | 15  | 0.4 | 0.6  | 0.145                   |

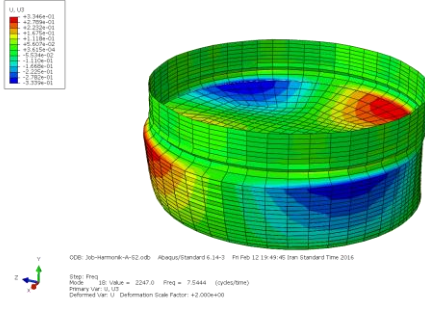
نتایج حاصل از مخزن کوتاه با ارتفاع نسبی سیال برابر ۰/۶ در شکل ۱۱ قابل مشاهده است؛ که بیانگر نحوه تغییرات شکل مودها تحت تأثیر هم زمان پدیده خوردگی و ارتفاع سیال است. همان گونه که از شکل ها مشاهده می شود با پر شدن تقریباً دوسوم ارتفاع مخزن از سیال، این بخش از ارتفاع مخزن از جابجایی نسبی بیشتری نسبت به یک سوم بالایی مخزن، برخوردار هستند. به بیانی دیگر ارتفاع سیال نقش عمده ای در شکل مود حاکم مخزن خواهد داشت.



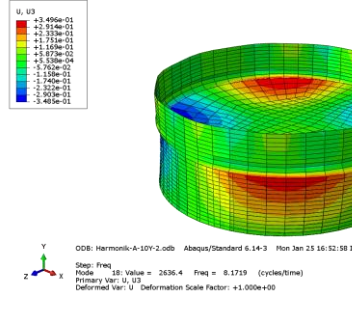
ب: بعد از گذشت ۵ سال



الف: مخزن سالم



د: بعد از گذشت ۱۵ سال



ج: بعد از گذشت ۱۰ سال

شکل ۱۱- مود اصلی مخزن کوتاه با نسبت  $HL/H = 0.6$

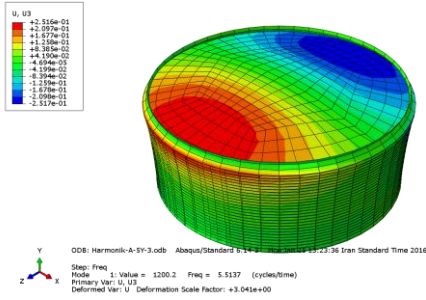
### ۳.۱.۳. حالت سوم مخزن کوتاه ( $HL/H = 0.9$ )

جدول ۱۰ نحوه تغییرات زمان تناوب مود حاکم در اثر پدیده خوردگی را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش عمر مخزن زمان تناوب مود حاکم افزایش می یابد.

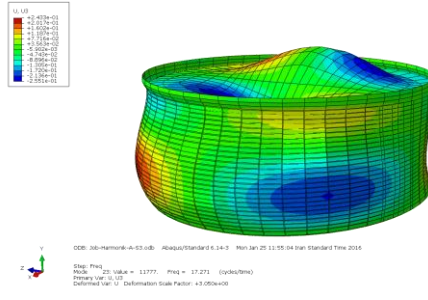
جدول ۱۰- شدت تغییرات زمان تناوب مود حاکم نسبت به عمر برای مخزن کوتاه ( $HL/H = 0.9$ )

| Model | Age | H/D | HL/H | Fundamental periods (s) |
|-------|-----|-----|------|-------------------------|
|       |     |     |      | Modal Analysis          |
| A 30% | 0   | 0.4 | 0.9  | 0.058                   |
| A 30% | 5   | 0.4 | 0.9  | 0.083                   |
| A 30% | 10  | 0.4 | 0.9  | 0.109                   |
| A 30% | 15  | 0.4 | 0.9  | 0.188                   |

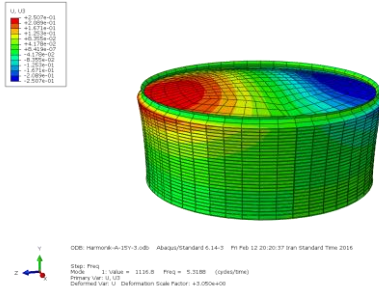
نتایج حاصل از مخزن کوتاه با ارتفاع نسبی سیال برابر ۰/۹ در شکل ۱۲ قابل مشاهده است؛ که بیانگر نحوه تغییرات شکل مودها تحت تأثیر هم زمان پدیده خوردگی و ارتفاع سیال است. چنانچه مشاهده می شود، با پر شدن ۹۰ درصد از ارتفاع مخزن از سیال شکل مود حاکم مخزن به سمت شکل مود طره ای میل می کند. به بیانی دیگر در این حالت بیشترین جابجایی نسبی همانند تیر طره مربوط به قسمت بالایی مخزن است. در این میان با پدیدایش پدیده خوردگی در اثر افزایش عمر مخزن، فرکانس طبیعی مخزن کاهش یافته که افزایش زمان تناوب مود حاکم را به همراه خواهد داشت.



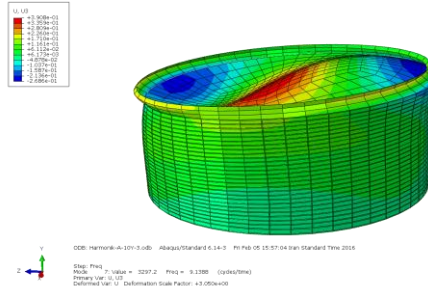
ب: بعد از گذشت ۵ سال



الف: مخزن سالم



د: بعد از گذشت ۱۵ سال



ج: بعد از گذشت ۱۰ سال

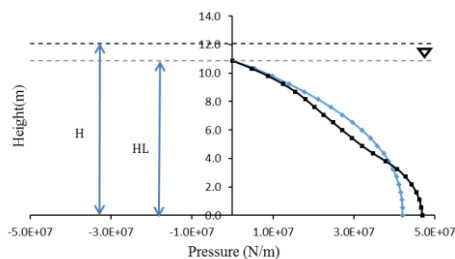
شکل ۱۲- مود اصلی مخزن کوتاه با نسبت  $HL/H = 0.9$

### ۲.۳. آنالیز هارمونیک

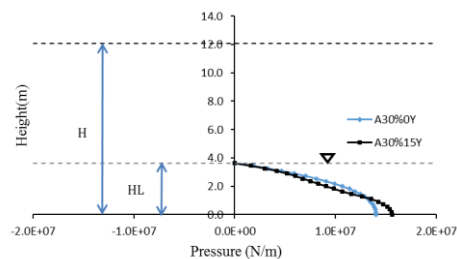
تحلیل هارمونیک معمولاً بعد از تحلیل مودال انجام می‌گیرد. دانستن محدوده‌ی فرکانس‌های طبیعی سازه (توسط تحلیل مودال)، جهت بررسی رفتار سازه در این محدوده توسط تحلیل هارمونیک ضروری است. این تحلیل نیز به شکل تقریبی مقدار فرکانس‌های طبیعی را ارائه می‌دهد. در این مرحله سیستم تحت یک شتاب افقی برابر با  $1g$  ( $g = 9.81m/s^2$ ) با استفاده از تحلیل هارمونیک خطی قرار گرفت و اثر پدیده‌ی خوردگی روی فشار هیدرودینامیکی مخازن بررسی گردید. در این قسمت باید پارامترهای میرایی به سیستم معرفی شود.

### ۱.۲.۳. مخزن کوتاه ( $H/D = 0.40$ )

همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، افزایش عمر مخزن که با پدیده‌ی خوردگی همراه است، باعث تغییراتی در توزیع فشار هیدرودینامیکی خواهد شد. به بیانی دیگر پیدایش خوردگی در یک سوم کمر بند پایینی مخزن سبب افزایش فشار هیدرودینامیکی خواهد شد. این موضوع در هر دو سطح سیال نمایان است. برای مخازنی که سطح سیال در آن ۹۰ درصد ارتفاع مخزن است این تغییرات بیشتر است. چنانچه شکل ۱۳ نشان می‌دهد با گذشت ۱۵ سال از عمر مخزن کاهش فشار هیدرودینامیکی را در یک سوم میانی مخزن خواهیم داشت.



ب: ( $HL/H = 0.90$ )



الف: ( $HL/H = 0.30$ )

شکل ۱۳- مقایسه توزیع فشار هیدرودینامیکی مخزن کوتاه در حالت بهره‌برداری و پانزده سال پس از ساخت

## ۴. نتیجه گیری

با توجه به یافته‌های این تحقیق و مقایسه آن‌ها نتایج زیر قابل بیان است:

- ۱- با افزایش عمر مخزن کوتاه و کاهش ضخامت دیواره به دلیل پدیده خوردگی، سختی جانبی مخزن کوتاه کاهش یافته که این امر سبب کاهش فرکانس طبیعی غالب و یا افزایش زمان تناوب مود حاکم خواهد شد.
- ۲- افزایش عمر مخزن کوتاه سبب تغییراتی در شکل مود حاکم مخزن کوتاه نسبت به حالت بهره‌برداری (مخزن سالم) خواهد شد. این تغییرات در کمربند پایینی مخزن کوتاه با شدت بیشتری همراه بوده و با شکم‌دادگی دیواره‌ی مخزن کوتاه همراه است. افزایش سطح سیال در مخزن کوتاه افزایش جرم کل را به همراه خواهد داشت که سبب افزایش زمان تناوب مود حاکم خواهد شد.
- ۳- با افزایش نسبت ارتفاع به قطر مخزن کوتاه و لاغر شدن سازه، مود حاکم به سمت مود تیر طره میل خواهد کرد (برای مخازن پر). البته وجود پدیده خوردگی سبب خواهد شد برای مخزن کوتاه با سن بالا، مود تیر طره ایده آل نباشد.
- ۴- برای مخازن کوتاهی که به‌طور کامل پر نیستند (تنها بخشی از آن با سیال پر شده نظیر ۳۰ و ۶۰ درصد ارتفاع مخزن کوتاه) بخشی از کمربند مخزن کوتاه که دچار خوردگی شده است تأثیر چندانی در شکل مود نخواهد داشت. به بیانی دیگر چنانچه کمربند خورده شده‌ی دیواره مخزن در تماس با سطح سیال باشد نقش عمده‌ای در شکل مود مخزن کوتاه بازی خواهد کرد.
- ۵- توزیع فشار هیدرودینامیکی وارده از سیال به جداره مخزن کوتاه با افزایش عمر مخزن کوتاه و کاهش ضخامت آن ناشی از خوردگی دارای تغییرات قابل ملاحظه‌ای است. به گونه‌ای که افزایش عمر مخزن کوتاه افزایش فشار هیدرودینامیکی در پای مخزن کوتاه و کاهش آن را در کمربند میانی (برای مخازن کوتاه پر) به همراه خواهد داشت.

## ۵. مراجع

۱. تاجداران، احمد و محمد حسن صداق. (۱۳۹۵). کماتش الاستوپلاستیک مخازن فولادی استوانه ای تحت اثر بارهای دینامیکی زلزله با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و سیال، اولین همایش سراسری مباحث کلیدی در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی ایران، گرگان.
۲. وکیلی، مرتضی و حسین شوکتی. (۱۳۹۴). کماتش پوسته‌های استوانه‌ای جدارنازک فولادی تحت بارگذاری فشار داخلی و نیروی محوری، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز دانشکده مهندسی عمران.
۳. صادقی، آرش. محمودرضا ماهری و نادر برهمند. (۱۳۹۴). بررسی پدیده خوردگی در جداره مخازن فولادی نفتی و تأثیر آن بر رفتار مخزن در برابر بلندشدگی تحت اثر مولفه افقی زلزله، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز دانشکده مهندسی عمران.
۴. زنوزی مرند، حسین. مجید رستمی بهنمیری، محمد تقی پورچاری و مجتبی رستمی. (۱۳۹۴). بررسی اثر ارتفاع سیال درمیزان جذب ضربه ناشی از انفجار بر روی مخازن ذخیره سوخت، دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز دانشکده مهندسی عمران.
5. Maheri M. R, and Severn R. T, (1986). Hydrodynamic effects in steel liquid storage tanks Steel Structures. Recent Research Advances and their Applications to Design, pp. 483-508.
6. Dehghan Manshadi S. H, Maheri M. R, (2010). The effects of long term corrosion on the dynamic characteristics of ground base cylindrical liquid storage tanks. Thin-Walled Structures 88-96.
7. Veletsos A. S, and Tang Y, (Nov 1987). Rocking response of liquid storage tanks. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 113, no. 11. pp. 1774-1792.
8. Medvedeva M. L, and Tiam T. D, (1998). Classification of corrosion damage in steel storag Tanks. Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 34. Nos. 9-10.
9. Zagórski A, Matysiak H, Tsyrlunyk O, Zvirko O, Nykyforchyn H, and Kurzydłowski K, (2004). Corrosion and stress-corrosion cracking of exploited storage tank steel. Materials Science, Vol. 40. No. 3.
10. Abaqus/CAE 6.10, and Analysis User Manual.