www.ElitesJournal.ir

مجله نخبگان علوم و مهندسی

Journal of Science and Engineering Elites

ISSN 2538-581X

جلد۱- شماره ۲- سال ۱۳۹۵

تحلیل تاریخچه زمانی مخازن استوانه‌ای جدارنازک با در نظر گرفتن اثرات درازمدت خوردگی

الهام صادقی[۱*]، سید هادی دهقان منشادی[۲]، سعید پیروزبخت[۳]

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

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

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

*Sadeghielham65@gmail.com

ارسال: بهمن ماه ۹۵ پذیرش: اسفند ماه ۹۵

خلاصه

مخازن فولادی جدار نازک در صنایع مختلف ازجمله در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و صنایع تأمین آب قابل‌استفاده است. مخازن استوانه‌ای عمودی روزمینی نمونه‌ای از چنین مخازنی می‌باشند. در این تحقیق رفتار مخازن ذخیره نفت تحت بارگذاری زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام مدل‌سازی از روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. در ابتدا برای اطمینان از صحت پیش‌بینی نتایج مدل‌های اجزای محدود، صحت سنجی با استفاده از نتایج تحقیقات محققین قبلی انجام شده است. پس از اطمینان از دقت پیش‌بینی‌های مدل اجزای محدود به بررسی رفتار مخازن تحت اثر زلزله پرداخته شد. متغیرهای تحقیق شامل هندسه مخزن، نوع رکورد زلزله و عمر مخزن با توجه به خوردگی جدار مخزن در طول مدت عمر مخزن است. تحلیل به‌صورت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی و با در نظر گرفتن غیرخطی شدن مواد و هندسه انجام گرفت. نتایج حاصل از تحلیل نشان داد که به‌طورکلی، با افزایش عمر مخزن و کاهش ضخامت جداره آن، تغییر مکان افقی جدار در زلزله بیشتر شده است. بااین‌حال میزان حداکثر برش پایه مخزن در طول زلزله تغییر قابل‌توجهی نداشته است. در اغلب نمونه‌ها بخش نزدیک به تکیه‌گاه مخازن دچار تغییر شکل بالایی گردیده است.

کلمات کلیدی: مخزن فولادی استوانه‌ای جدار نازک، زلزله، شبیه‌سازی اجزای محدود، تحلیل تاریخچه زمانی.

۱. مقدمه

مخازن یکی از شاخص‌ترین سازه‌های صنعتی است که برای نگهداری سیالات متفاوت و در گسترده وسیعی به ابعاد مختلف از کوچک تا بسیار بزرگ ساخته می‌شوند. ازآنجاکه انتقال مستقیم و بی‌واسطه سیالات نظیر نفت، گاز و آب از محل استخراج، تولید و یا جمع‌آوری به محل مصرف، کاری است که به‌ندرت انجام می‌شود و به دلیل عدم توانایی در تطبیق میزان تولید و مصرف، استفاده از چنین سازه‌هایی الزامی است. کلمه مخزن، عموماً تداعی‌کننده نوع خاصی از تأسیسات مورداستفاده در صنعت است، اما در حقیقت مخازن در فرم‌های مختلف برای نگهداری هر نوع سیال، بخار و حتی جامدات بکار می‌روند.

مخازن نگهداری سیالات در اشکال و ابعاد مختلف ساخته می‌شوند که معمول‌ترین آن‌ها فرم استوانه‌ای قائم است. مخازن موردنظر در این پژوهش، مخازن معمولی جدار نازک استوانه‌ای قائم فولادی است که برای نگه‌داری سیالات در درجه حرارت محیط بکار می‌روند. آسیب‌پذیری این مخازن در برابر زلزله بسیار زیاد است و بر اساس تجربه زلزله‌های گذشته خیلی بیشتر از ارزش خود و محتویاتشان خسارات مالی به بار می‌آورند. هرچند مخازن را سازه‌هایی کاملاً انعطاف‌پذیر در نظر می‌گیرند اما در حقیقت این سازه‌ها برای جلوگیری از تخریب و یا خروج سیالات، در برابر تحریکات لرزه‌ای دارای محدودیت‌های خاص خود هستند.

طی مراحل ساخت و در طول دوره بهره‌برداری، عوامل متعددی می‌توانند موجب ایجاد اختلال در عملکرد طبیعی و پیش‌بینی‌شده‌ی مخازن گردند. ازجمله این عوامل می‌توان به نواقص هندسی به وجود آمده در حین ساخت و عوامل محیطی نظیر طوفان‌ها و زلزله‌های شدید اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کارکرد مخازن که به‌آرامی و درگذر زمان تأثیر مخرب خود را آشکار می‌سازد، پدیده ی 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.

مشاهده‌های فراوانی از آسیب و خسارات مخازن در زلزله ۱۹۶۴ آلاسکا، ۱۹۷۱ سن فرناندو، ۱۹۷۸ سندایی ژاپن، ۱۹۹۴ نورثریج ایالات‌متحده، زلزله ۱۹۹۹ ترکیه و زلزله ۱۳۸۲ بم دیده‌شده است. پخش سیالات قابل اشتعال و خطر گسترش آتش‌سوزی، انتشار مواد سمی و خطرناک که منجر به آلودگی محیط‌زیست می‌شود و همچنین هدر رفتن سرمایه‌های ملی، نمونه‌هایی از اثرات جبران‌ناپذیر تخریب مخازن است. این مخازن می‌توانند محتوی مایعات آتش‌زا یا سمی باشند که آزاد شدن هر یک از آن‌ها باعث تحت‌الشعاع قرار گرفتن عملکرد قسمت‌های دیگر پالایشگاه و حتی شهرهای اطراف پالایشگاه می‌گردد. یکی از خطراتی که مخازن محتوی مواد سوختی و سازه‌های اطراف آن‌ها را تهدید می‌کند خطر آتش‌سوزی است. همچنین آسیب مخازن فولادی نگه دارنده آب در صنایع نفت و پتروشیمی باعث اختلال در اطفاء حریق در سازه‌ها و گسترش آتش‌سوزی می‌شود. ضمناً آسیب مخازن فولادی نگهداری آب در زمان‌های بحرانی مثلاً هنگام وقوع بلایای طبیعی (سیل، زلزله، طوفان، خشک‌سالی و...) تبعات انسانی ناگواری به دنبال دارد. ازاین‌رو بررسی رفتار لرزه ای این سازه‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است.

در ساخت، مونتاژ و همچنین در طول زمان بهره‌برداری از این سازه‌ها، معمولاً نقایصی به وجود آمده که آن‌ها را از فرم ایده آل خارج می‌کند. به‌عنوان نمونه می‌توان به پدیده خوردگی در طول عمر مخازن اشاره کرد که یکی از مهم‌ترین عوامل گسیختگی مخازن است. مخازن فولادی استوانه‌ای قائم به دو صورت مهارشده و مهار نشده در صنایع فوق کاربرد دارد که مکانیسم انتقال نیرو به تکیه‌گاه (شالوده) و فرم هندسه و ابعاد تکیه‌گاه در هرکدام متفاوت است. در مخازن مهارشده بدنه مخزن توسط تعدادی میله مهار که بهصورت یکنواخت در پیرامون مخزن قرار دارند به شالوده متصل می‌گردند. نیروهای مختلف وارد بر پای این‌گونه مخازن ازجمله برش پایه زلزله و لنگرهای واژگونی توسط میله مهارها و اصطکاک ورق کف و سطح شالوده به تکیه‌گاه منتقل می‌شود. برای ممانعت از واژگونی مخزن، شالوده باید توانایی ایجاد لنگر مقاوم داشته باشد. بدین منظور می‌بایست تمهیداتی جهت تقویت شالوده در نظر گرفته شود ازجمله استفاده از شالوده با وزن زیاد و یا استفاده از شمع در زیر شالوده مخزن است. در مخازن مهار نشده هیچ‌گونه اتصال مکانیکی بین مخزن و شالوده آن وجود ندارد و برش پایه مخزن تنها توسط اصطکاک کف مخزن و شالوده آن تحمل می‌گردد. در این مخازن لنگر مقاوم ناشی از وزن سقف و دیوار مخزن است. در صورت افزایش لنگر واژگونی نسبت به لنگر مقاوم، کف مخزن از سطح شالوده جداشده و لذا وزن قسمتی از مایع مخزن در لنگر مقاوم در برابر واژگونی مشارکت می‌نماید. درنتیجه شالوده این مخازن تنها لازم است توانایی تحمل وزن دیوار و سقف آن و نیروی فشاری لرزه‌ای پوسته را داشته باشد.

در مخازن مهارشده، مخزن به شالوده‌ای سنگین اتصال داشته تا از بلند شدگی آن به هر دلیلی جلوگیری گردد. لذا میله

مهارها می‌بایست توانایی انتقال مناسب نیروهای کششی ناشی از بلند شدگی و واژگونی مخزن به شالوده را دارا باشند. درنتیجه برای مهار مخزن به تعداد زیادی میله مهار که به نحو مناسبی به بدنه مخزن و شالوده متصل شده‌اند نیاز است. در صورت اتصال نامناسب میله مهار به دیوار مخزن و همچنین بروز پدیده‌ی خوردگی در بدنه مخزن امکان پارگی دیوار مخزن در هنگام وقوع زلزله وجود دارد. درنتیجه مهار مخازن پرهزینه است بنابراین اکثر مخازن به‌خصوص مخازن بزرگ، به‌صورت مهار نشده ساخته و در صنایع به‌کاربرده می‌شود.

کلیه‌ی مخازن فارغ از کاربری و شرایط متفاوت حاکم بر آن‌ها تحت تأثیر زلزله قرار گرفته و آسیب می‌بینند. مخازن استوانه‌ای مهارشده نگهداری مایعات با توجه به اندرکنش موجود بین سازه و مایع دارای رفتار دینامیکی نسبتاً پیچیده‌ای می‌باشند. عوامل متعددی ازجمله نسبت ارتفاع به قطر مخزن (H/D), درصد پرشدگی یا نسبت ارتفاع مایع داخل مخزن ب ارتفاع کل مخزن (HL/H) و بیشینه شتاب زلزله ورودی نیز می‌توانند بر رفتار لرزه‌ای این مخازن تأثیرگذار باشند. آسیب‌پذیری مخازن ذخیره‌ی مایعات در برابر زلزله بسیار زیاد است و بر اساس تجربه‌ی زلزله‌های گذشته خیلی بیشتر از ارزش خود و محتویاتشان خسارات مالی به بار می‌آورند. برای نمونه می‌توان به انهدام مخازن آب در زلزله‌های ۱۹۳۳ لانگ‌بیچ و ۱۹۷۱ سن فرناندو اشاره کرد که باعث کمبود آب مصرفی عمومی شدند. با بررسی مخازن آسیب‌دیده طی زلزله‌های متعدد مشاهده می‌شود که در اکثر مواقع خسارات ایجادشده در نزدیکی قسمت تحتانی مخزن قرار دارند و عمدتاً ناشی از موارد زیر هستند:

۱- وقوع پدید بلندشدگی و درنتیجه برش و شکست مهاربندی یا دیواره‌ی مخزن

۲- شکست بخش تحتانی مخزن و درنتیجه آسیب‌دیدگی اجزاء متصل به مخزن ازجمله لوله‌ها

مشاهدات و گزارش‌های اخیر در خصوص ارزیابی عملکرد مخازن طی زمین‌لرزه‌های گوناگون نشان می‌دهدکه مخازن فولادی نسبت به مخازن بتنی در سطح بالاتری از خطرپذیری قرار دارند و باید در مورد آن‌ها آنالیزهای دقیق‌تری انجام شود. در این میان وجود نواقص هندسی نظیر پدیده خوردگی می‌تواند برشدت خرابی این‌گونه سازه‌ها تحت اثر زلزله بیفزاید. لذا بررسی رفتار این‌گونه سازه‌ها تحت تأثیر توأمان نواقص هندسی و زلزله امری ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش سه نوع مخزن کوچک، متوسط و بزرگ با در نظر گرفتن اثرات ناشی از خوردگی تحت اثر زلزله مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند. در تمامی مدل‌ها ۹۰٪ ارتفاع مخزن از سیال پر است. هدف از انجام این مطالعه بررسی اثر غیریکنواختی ضخامت دیواره‌ی مخزن در اثر خوردگی روی پاسخ لرزه‌ای مخازن نظیر برش پایه، لنگر واژگونی و ... با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی می‌باشد. به‌منظور مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده می‌شود. هدف کاربردی تحقیق حاضر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که نتایج حاصل می‌تواند در طراحی‌های لرزه‌ای مخازن لحاظ شده و بحرانی‌ترین وضعیت موجود با توجه به نتایج به‌دست‌آمده به‌عنوان مبنای طراحی در نظر گرفته شود. از سوی دیگر نتایج تحقیق حاضر می‌تواند در امور مربوط به نگهداری، بازرسی و همچنین مقاوم‌سازی این‌گونه سازه‌ها مؤثر باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مبانی نظری تحقیق

هاسکینز و جاکوبسن در سال ۱۹۳۴ فشار ناشی از مود ضربه‌های مایع درون مخزن را به‌طور تجربی آنالیز کردند [۱]. جاکوبسن در سال ۱۹۴۹ با فرض صلبیت دیوار مخازن، با حل معادله لاپلاس و توزیع فشار هیدرودینامیکی مایع در مخازن و با اعمال شرایط مرزی مناسب، مسئله فشار دینامیکی مایع ناشی از مؤلفه افقی زلزله در مخازن استوانه‌ای را تحلیل نمود [۲]. هاونسر در سال ۱۹۵۷ و ۱۹۶۳ با استفاده از روشی ساده توزیع فشار هیدرودینامیکی مایع تحت اثر مؤلفه افقی زلزله در مخازن دارای دیواره‌ی صلب استوانه‌ای، دایره‌ای، سدها و دیوارهای حائل را برآورد نمود. [۳-۴].

هارون و هاوسنر در سال‌های ۱۹۸۱ و ۱۹۸۲ بر پایه جمع آثار قوای مودهای ارتعاش آزاد جانبی، حاصل از تلفیق روش اجزای محدود و المان مرزی، برای تحلیل مخازن استوانه‌ای دارای دیوار تغییر شکل‌پذیر روشی ارائه نمودند و با مقایسه پاسخ مخازن دارای دیوار صلب و پاسخ مخازن دارای دیوار تغییر شکل‌پذیر، میزان تأثیر تغییر شکل‌پذیری دیوار بر پاسخ را مطالعه نمودند و مشخص کردند می‌توان از اثر انعطاف‌پذیری بدنه روی مود مواج نوسانات مایع صرف‌نظر کرد [۵-۶]. هارون در سال ۱۹۸۳ به روش آزمایشگاهی اندرکنش سیال-سازه و مشخصات دینامیکی سه مخزن واقعی (دو مخزن مهارشده و یک مخزن مهارنشده) را مطالعه نمود و با استفاده از روش تحلیلی با در نظر گرفتن تغییر شکل‌پذیری دیوار، برای طراحی مخازن روشی ارائه نمود [۷]. کلاف و همکاران از مدل‌های کوچک‌مقیاس، جهت برآورد آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای مخازن استوانه‌های مهارشده و مهار نشده استفاده نمودند. این تحقیقات آزمایشگاهی نیز مؤید وجود دو بخش مواج و سخت در مایع در خلال حرکت دینامیکی بود. همچنین تغییر مکان‌های اعوجاجی قابل‌توجه در مخازن مشاهده شد که به نقص‌های هندسی اولیه در مخازن نسبت داده شد. [۸].

هارون و الیسی در سال ۱۹۸۵ برای تحلیل مخازن استوانه‌ای انعطاف‌پذیر تحت اثر مؤلفه افقی زلزله و حرکت گهواره‌ای بستر صلب مخزن روشی تحلیلی ارائه نمودند [۹]. اورورک و سو بر اساس عملکرد مخازن در زلزله‌های گذشته نشان دادند که نسبت ارتفاع به قطر مخزن بر روی آسیب‌پذیری لرزهای مخازن تأثیرگذار است. بر اساس نتایج این بررسی، منحنی‌های شکنندگی مخازن با نسبت ارتفاع کل به قطر مخزن برابر و کوچک‌تر از ۰/۷ و نسبت به مخازن با نسبت ارتفاع کل به قطر مخزن بزرگ‌تر از ۰/۷ با یکدیگر متفاوت است [۱۰]. این در حالی است که مالهوترا نسبت $H/D = ۰/۵$ را به‌عنوان مرز بین مخازن باریک و پهن معرفی می‌نماید [۱۱]. 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 ساده‌شده 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 ساده‌شده غالباً تقریبی هستند و قادر به نشان دادن رفتار واقعی سازه پیچیده‌ای نظیر مخزن در زمان زلزله نیستند [۱۲]. مطالعات تجربی نیز با توجه به محدود بودن تعداد مخازن قرار گرفته در معرض زلزله اغلب دارای عدم قطعیت‌های قابل‌توجهی می‌باشند و انجام مطالعات پارامتری بر روی این‌گونه داده‌ها عملاً امکان‌پذیر نیست [۱۳].

در این میان در مطالعات انجام شده با استفاده از مدل‌های دینامیکی دقیق‌تر نیز به دلیل وقت‌گیر بودن تحلیل‌ها و پیچیدگی مدل، یا رفتار مخزن تحت یک تحریک ورودی خاص مدنظر قرار گرفته [۱۴]. یا تنها بر روی یک پارامتر مطالعه نموده‌اند [۱۵]. ولتسوز و تانگ در سال ۱۹۸۷ پاسخ مخازن استوانه‌های با دیوار صلب و شکل‌پذیر را تحت اثر حرکت گهواره‌ای کف مخزن را مطالعه نمودند و رابطه میان پاسخ سیستم به حرکت گهواره‌ای کف و تحریک جانبی پایه را تشریح نمودند [۱۶]. ماهری و سورن در سال ۱۹۸۹، با آزمایش مخازن روی میز لرزان تأثیر تغییر شکل‌پذیری دیوار مخزن روی نیروهای هیدرودینامیکی مایع را بررسی نمودند. آزمایش‌ها روی دو مدل مخزن و در دو فاز انجام شد. در فاز اول اثرات سیال (در دو حالت مخزن پر و مخزن خالی) روی خصوصیات دینامیکی مخازن مورد بررسی قرار گرفت و در فاز دوم آزمایش‌ها ارتعاش اجباری به‌منظور بررسی نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر پوسته مخازن انجام گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که نیروهای هیدرودینامیکی برای مخازن انعطاف‌پذیر بسیار بزرگ‌تر ازآنچه است که برای مخازن صلب به دست می‌آید [۱۷]. ملهوترا و ولتسوز در سال‌های ۱۹۹۴ و ۱۹۹۶ مقاومت در برابر بلندشدگی تیر نیمه بی‌نهایت روی بستر صلب را تحلیل نمودند. تیر مورد بررسی تحت اثر بار گسترده یکنواخت قرار داشت و در تحلیل موردنظر تأثیر رفتار غیرخطی مصالح، اثرات غیرخطی هندسی و تأثیر سختی دیوار مخزن روی بلندشدگی لحاظ گردید. تحلیل‌های انجام‌گرفته تأثیر نیروهای محوری ایجادشده در ورق کف مخزن در مکانیزم تحمل بار ورق کف را نشان داد [۱۸-۱۹]. ملهوترا و ولتسوز در سال ۱۹۹۴ تأثیر بلندشدگی ورق کف مخزن بر پاسخ مخازن مهار نشده را مورد مطالعه قراردادند.

مشخص گردید که بلندشدگی ورق کف مخزن باعث کاهش فشار هیدرودینامیکی وارد بر دیوار مخزن می‌گردد [۲۰]. ملهوترا در سال‌های ۱۹۹۵ و ۱۹۹۷ با فرض امکان ایجاد مفصل پلاستیک تنها در لبه‌ی ورق کف روابط حاکم بر بلندشدگی تیر با طول نیمه بینهایت و قرار گرفته روی بستر الاستیک را توسعه دادند. همچنین با استفاده از آن بلندشدگی استاتیکی و دینامیکی مخزن قرار گرفته بر شالوده‌ی انعطاف‌پذیر را بررسی نمود [۲۱-۲۲]. یونان و ولتسوز در سال ۱۹۹۸ با استفاده از روشی ساده و تقریبی پاسخ مخازن استوانه‌ای صلب و دارای دیوار تغییر شکل‌پذیر محتوی مواد ویسکوالاستیک تحت اثر مؤلفه‌ی افقی زلزله را برآورد نمودند. [۲۳-۲۴]. در سال ۲۰۰۸ آهاری– عشقی و رزاقی– عشقی مطالعاتی در خصوص بلندشدگی مخازن استوانه ای مهارنشده فولادی تحت اثر زلزله انجام دادند [۲۵ و ۲۶].

مطابق مطالعات ادبیات فنی، بعضی از محققان تأثیر میزان ضخامت ورق کف در مخازن عریض در مقاومت در برابر بلندشدگی این مخازن را ناچیز شمرده‌اند. همچنین تعدادی از آن‌ها تأثیر افزایش ضخامت دیوار مخازن در برابر بلندشدگی را زیاد برشمرده و آن را همسنگ افزایش ضخامت ورق کف دانسته‌اند. نکته ای 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 ساده‌شده و مبتنی بر روش‌های استاتیکی معادل و یا بر اساس مطالعات تجربی بر روی عملکرد واقعی مخازن در زلزله‌های گذشته است. این در حالی است که مدل‌های ساده‌شده غالباً تقریبی هستند؛ و قادر به نشان دادن رفتار واقعی سازه پیچیده‌ای نظیر مخزن در زمان زلزله نیستند [۲۷].

مطالعات تجربی نیز با توجه به محدود بودن تعداد مخازن قرار گرفته در معرض زلزله اغلب دارای عدم قطعیت‌های قابل‌توجهی می‌باشند. و انجام مطالعات پارامتری بر روی این‌گونه داده‌ها عملاً امکان‌پذیر نیست [۲۸]. در این میان در مطالعات انجام شده با استفاده از مدل‌های دینامیکی دقیق‌تر نیز به دلیل وقت‌گیر بودن تحلیل‌ها و پیچیدگی مدل یا رفتار مخزن تحت یک تحریک ورودی خاص مدنظر قرار گرفته است [۲۹] و یا تنها بر روی یک پارامتر مطالعه نموده‌اند [۳۰].

ماهری و سورن در سال ۱۹۸۶، با آزمایش مخازن روی میز لرزان تأثیر تغییر ناهمگونی دیوار مخزن روی نیروهای هیدرودینامیکی مایع را بررسی نمودند. آن‌ها در ادامه تحقیقات خود، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای متناظر آن را به دست آوردند و در راستای مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که عدم تقارن اولیه و غیریکنواخت بودن ضخامت در دیوار مخازن باعث می‌شود که مودهای جانبی کوچک‌تر تحریک نشوند [۳۱]. واتاوالا و نش در سال ۱۹۸۳، با استفاده از تئوری تغییرشکل‌های بزرگ غیرخطی پوسته، اثرات نقایص هندسی اولیه (out of roundness) روی ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای را بررسی نمودند [۳۲]. تاکاباتاکه و ماتسوکا در سال ۱۹۸۷، با در نظر گرفتن اعوجاج مقطع عرضی پوسته با استفاده از تئوری میله (rod theory) معادلات تغییر شکل پوسته‌های استوانه‌ای را ارائه نمودند. [۳۳]. زو و شینکه در سال ۱۹۸۵، اثر عدم تقارن و نقایص اولیه روی پاسخ لرز ه ای مخازن استوانه‌ای را مورد مطالعه قراردادند. عدم تقارن اولیه باعث مشارکت مودهای محیطی بالاتر در فشار هیدرودینامیکی می‌گردد. با استفاده از معادلات لاگرانژ، فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی و فشار هیدرودینامیکی مخازن استوانه‌ای دارای عدم تقارن اولیه محاسبه گردید [۳۴].

نیوا در سال ۱۹۷۸، پس از آزمایش مخزن بلند روی میز لرزان مشخص نمود که علاوه بر پاسخ تیر مانند پوسته، تغییر شکل‌های اعوجاجی مقطع عرضی دیوار نیز پاسخ مخزن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین روشی تحلیلی که رابطه میان نقایص هندسی اولیه پوسته و اعوجاج مقطع عرضی آن را مشخص می‌سازد، ارائه نمود. نتایج تحلیل‌ها مشخص نمود که تغییرات دینامیکی نیروهای حلقوی-محوری ایجادشده در جهت محیطی پوسته یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد تغییر شکل‌های اعوجاجی پوسته است [۳۵]. واتاوالا و نش (۱۹۸۳) با استفاده از تئوری تغییر شکل‌های بزرگ غیرخطی پوسته، اثرات نقایص هندسی اولیه بر روی ارتعاشات پوسته‌های استوانه‌ای را بررسی نمودند [۳۶].

زو و شینکه (۱۹۸۵) اثر عدم تقارن و نقایص اولیه بر روی پاسخ لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای را موردمطالعه قراردادند. عدم تقارن اولیه باعث مشارکت مودهای محیطی بالاتر در فشار هیدرودینامیکی می‌گردد. با استفاده از معادلات لاگرانژ، فرکانس‌های طبیعی، اشکال مؤدی و فشار هیدرودینامیکی مخازن استوانه‌ای دارای عدم تقارن اولیه محاسبه گردید [۳۷]. دهقان منشادی و ماهری در سال 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 مخزن را بر خصوصیات دینامیکی مخزن موردمطالعه قراردادند [۳۸]. در ادامه پژوهش قبلی، ماهری و عبداللهی در سال ۲۰۱۲ اثرات پدیده درازمدت خوردگی را روی مقاومت کمانشی دیواره‌ی مخازن مورد بررسی قراردادند [۳۹]. وکیلی، مرتضی و حسین شوکتی ۱۳۹۴، کمانش پوسته‌های استوانه‌های جدار نازک فولادی تحت بارگذاری فشار داخلی و نیروی محوری را مورد بررسی قراردادند [۴۰].

۲.۲. روش تحقیق

در آنالیزهای موردنظر از نرم‌افزار المان محدود آباکوس (ABAQUS) به‌منظور شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. در بخش صحت سنجی مدل از Abaqus/CAE جهت شبیه‌سازی و از Abaqus/Standard جهت آنالیز غیرخطی استفاده شده است. شبیه‌سازی رفتار مخزن فولادی در نرم‌افزار شامل تعریف هندسه مدل، ویژگی مصالح مصرفی، شرایط مرزی، نوع و سایز مش بندی است. در پایان پس از تکمیل مرحله پردازش مدل نتایج به‌صورت گرافیکی در مدول Visualization قابل‌مشاهده است. در این تحقیق از روش دینامیکی صریح برای اعمال بار زلزله به مخزن استفاده شده است. برای اطمینان از دقت و صحت پیش‌بینی مدل‌های ساخته‌شده توسط نرم‌افزار ذکرشده، از نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی استفاده خواهد شد. مدل‌های مشابه نمونه آزمایش‌شده با ابعاد هندسی و مشخصات مصالح کاملاً یکسان ساخته‌شده و تحت بارگذاری مشابه آزمایش مدل تحلیل می‌گردد و نتایج آزمایش با پیش‌بینی‌های حاصل از تحلیل مدل‌ها مقایسه می‌شود و در صورت انطباق، می‌توان به نتایج حاصل از مدل‌سازی اجزای محدود اعتماد نمود.

۳.۲. صحت سنجی مدل اجزای‌محدود

در گام اول برای اطمینان از دقت و صحت پیش‌بینی‌های مدل‌های اجزای محدود، مدل‌های ارائه‌شده در مراجع [۳۸]، [۱۷] و [۳۶] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی‌شده و نتایج حاصله با نتایج مراجع ذکرشده مقایسه گردید.

۱.۳.۲. مقایسه نتایج با آزمایش‌های ماهری و سورن

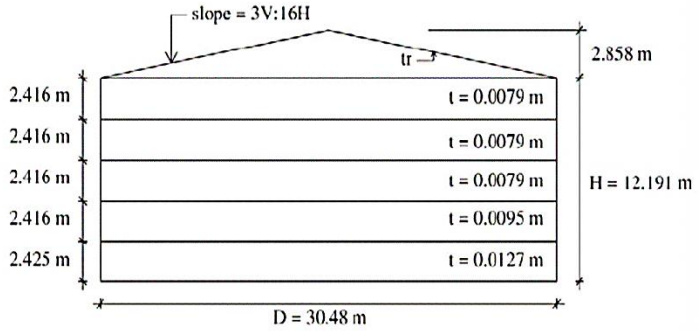
به‌منظور اطمینان از صحت مدل‌های ساخته‌شده مخزنی با ارتفاع ۰/۵ و شعاع ۰/۱۳ متر، مطابق آزمایش‌ها انجام شده توسط ماهری و سورن در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی‌شده و تحلیل مودال بر روی آن انجام گرفت. در جدول ۱ نتایج حاصله با یکدیگرمقایسه شده است که حکایت از انطباق نتایج دارد.

جدول ۱- مقایسه فرکانس‌های به‌دست‌آمده در آباکوس با نتایج مرجع [۱۳]

Mode	Frequency (Hz)		Error %
	Maheri	Present study	
1	172	174	1.16
4	324	311	4.01
5	854.6	804	5.92

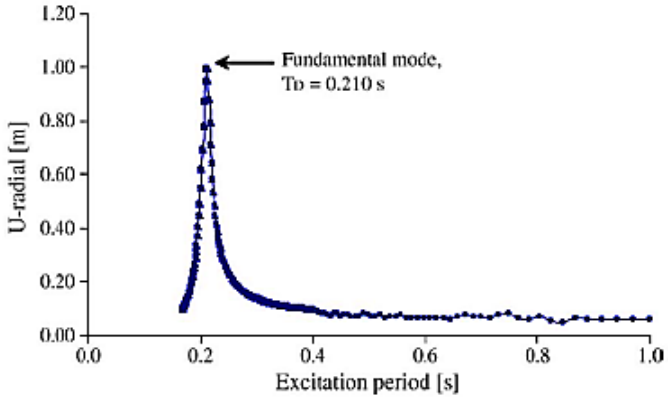
۲.۳.۲. صحت سنجی با نتایج تحلیلی

در مرحله دوم به‌منظور بررسی صحت مدل‌های ساخته‌شده، مخزنی با نسبت ارتفاع به قطر ۰/۴۰ (شکل ۱) که توسط ویرلا در سال ۲۰۰۴ موردمطالعه قرار گرفته بود شبیه‌سازی شد و همانند ویرلا تحت تحلیل مودال و هارمونیک قرار داده شد و نتایج به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱- هندسه مخزن مرجع با نسبت‌های ارتفاع کل به قطر مخزن ۰/۴ [۴]

شکل ۲ نتیجه کار انجام شده توسط ویرلا 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 ویرلا و همکاران نشان می‌دهد که مدل اجزای محدود آباکوس دقت مناسبی در پیش‌بینی نتایج داشته است.



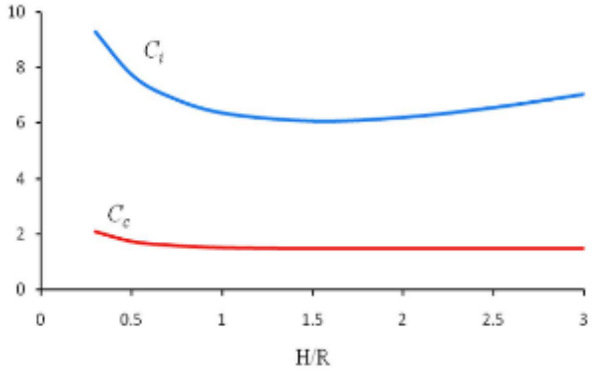
شکل ۲- مقایسه تغییرات جابجایی نسبت به زمان تناوب برای مخزن ۰/۴ [۴]

۳.۳.۲. کنترل صحت مدل‌سازی بر اساس روابط ارائه‌شده توسط ولتسوز و همکاران

زمان تناوب طبیعی مودهای ضربه‌ای و مود گهواره‌ای بر اساس رابطه ارائه‌شده توسط ولتسوز که اساس روابط موجود در آئین‌نامه‌ها است، به‌صورت معادله ۱ محاسبه خواهد شد [آیین‌نامه API].

$$T_{imp} = C_i \times \frac{H\sqrt{\rho}}{\sqrt{t/r} \times \sqrt{E}} \qquad (۱)$$

که در آن t ضخامت معادل دیواره مخزن، ρ 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 **Error! Reference source not found.** به دست می‌آید:

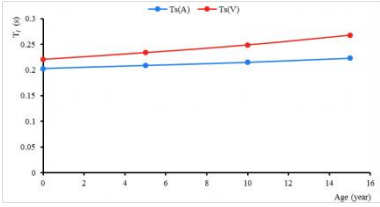


شکل ۳- Ci ضریب بدون بعد برحسب H/R

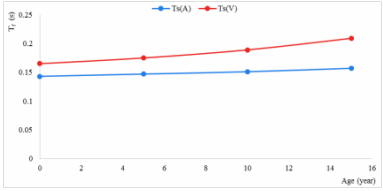
جدول ۲- Ci ضریب بدون بعد برحسب H/R

H/r	C_I	m_f/m_L	m_c/m_L
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

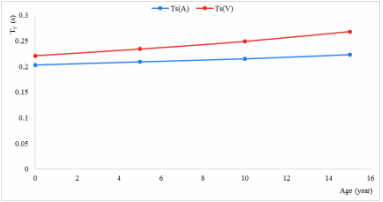
در شکل ۴، شکل ۵ و شکل ۶ مقایسه بین مقادیر محاسبه‌شده بر اساس فرمول ولتسوز و همکاران و نتایج شبیه‌سازی قابل‌مشاهده است. ملاحظه می‌شود که به‌خصوص در مورد مخازن با عمر کم، نتایج به‌دست‌آمده از رابطه و نتایج پیش‌بینی‌شده توسط مدل اجزای محدود بسیار نزدیک هستند. با بالاتر رفتن عمر مخزن میزان اختلاف بیشتر شده و در بیشترین میزان اختلاف به حدود ۱۵٪ رسیده است.



شکل ۴- مقایسه بین مقادیر محاسبه‌شده بر اساس فرمول ولتسوز و همکاران و نتایج شبیه‌سازی آباکوس در مخزن A (HL/H=0.9)



شکل ۵- مقایسه بین مقادیر محاسبه‌شده بر اساس فرمول ولتسوز و همکاران و نتایج شبیه‌سازی آباکوس در مخزن B (HL/H=0.6)



شکل ۶- مقایسه بین مقادیر محاسبه‌شده بر اساس فرمول ولتسوز و همکاران و نتایج شبیه‌سازی آباکوس در مخزن B(HL/H=0.9)

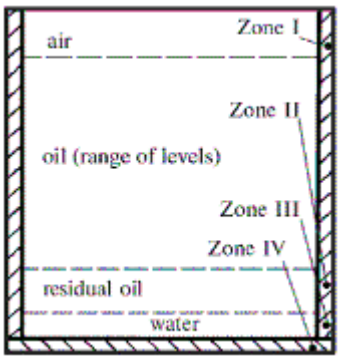
۴.۳.۲. بررسی پدیده خوردگی و چگونگی در نظر گرفتن آن در مدل‌ها

خوردگی در علم مهندسی یکی از مهم‌ترین مسائلی است که علاوه بر پدید آوردن مشکلات اقتصادی، زیست‌محیطی، فنی و ایمنی‌بخش قابل‌ملاحظه‌ای از تحقیقات و پژوهش‌های صنعتی را به خود اختصاص داده است. افزایش قیمت انرژی، نیروی انسانی، فشارها و دماهای بالا و محیط‌های خورنده‌تر و پیچیده‌تر در فرایندهای صنعتی باعث می‌شوند که زیان‌های اقتصادی ناشی از خوردگی در سال‌های آتی به‌طور تصاعدی افزایش یابد. اهمیت خوردگی در صنایع هنگامی بیشتر می‌شود که اثرات سوخوردگی به‌طور مستقیم امنیت کاربران را تهدید کند. در تأسیسات خدماتی نظیر خطوط انتقال و مخازن آب، خوردگی باعث کاهش عمر بهره‌برداری و صرف هزینه‌های سنگین نگهداری می‌شود. بر اساس تحقیقات صورت گرفته روی مخازن موجود در صنایع نفت و پتروشیمی نواحی از دیوار مخزن که تحت اثر پدیده خوردگی قرار گرفته و کاهش در ضخامت دیوار مخازن را به دنبال خواهد داشت را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۲۸-۲۹].

۱- کمربند 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 دیوار مخزن بین ۰/۴ تا ۰/۶ میلی‌متر در سال متغیر خواهد بود.

۲- کمربند بالایی مخزن، مرز بین مایعات هیدروکربن و بخارهای تشکیل‌شده در قسمت بالایی مخزن. در این حالت میزان خوردگی ۰/۴ میلی‌متر در سال خواهد بود.

شکل ۷ چگونگی در نظر گرفتن خوردگی روی دیواره مخازن را نشان می‌دهد.



شکل ۷- چگونگی در نظر گرفتن کاهش ضخامت دیوار مخازن در اثر خوردگی [۲۸-۲۹]

۵.۳.۲. مشخصات هندسی مخازن مدل شده و شرایط مرزی و المان هایی مورد بررسی و نحوه مش بندی مدل ها

مخازن استفاده شده در این تحقیق همگی از نوع مخازن جدار نازک فولادی مهارنشده می‌باشند و مشابه مخازنی هستند که در مطالعات دهقان منشادی و ماهری [۳۸]، خصوصیات لرزه‌ای آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. درمجموع از سه نوع مخزن استفاده شده است که ابعاد این مخازن در جدول ۳ تا جدول ۵ ذکرشده و هندسه‌ی آن‌ها در شکل ۸ قابل‌مشاهده است. مخازن با عمر ۰، ۱۰ و ۱۵ سال در نظر گرفته‌شده‌اند و سه زلزله به هر مدل اعمال‌شده است؛ بنابراین در مجموع ۶ مدل ساخته و تحلیل گردیده است. شایان‌ذکر است در تمامی موارد سطح سیال برابر ۹۰٪ ارتفاع مخزن در نظر گرفته‌شده است.

جدول ۳- مشخصات مخازن سالم

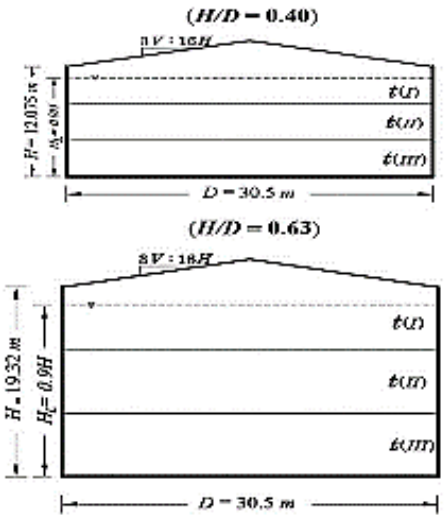
تیپ مخزن	H/D	H_L/L	شعاع (m)	ارتفاع کل (m)	ضخامت پوسته (mm)
A	0.4	0.9	15.25	12.075	10.2
B	0.63	0.9	15.25	19.32	16

جدول ۴- مشخصات مخازن با عمر ۱۰ سال

تیپ مخزن	H/D	HL/L	شعاع (m)	ارتفاع کل (m)	ضخامت پوسته (mm)
A	0.4	0.9	15.25	12.075	6.8
B	0.63	0.9	15.25	19.32	12.6

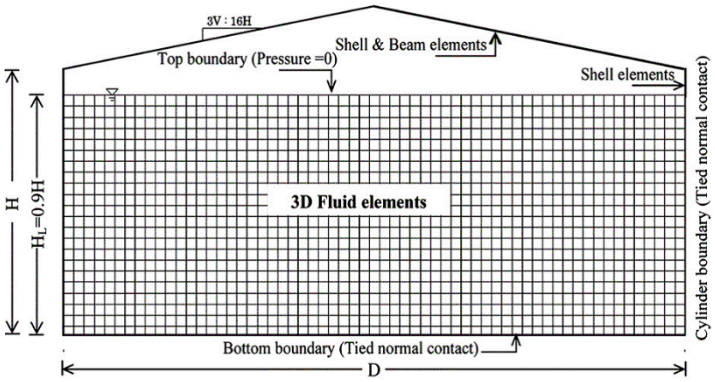
جدول ۵- مشخصات مخازن با عمر مفید ۱۵ سال

تیپ مخزن	H/D	H_L/L	شعاع (m)	ارتفاع کل (m)	ضخامت پوسته (mm)
A	0.4	0.9	15.25	12.075	5.1
B	0.63	0.9	15.25	19.32	10.9



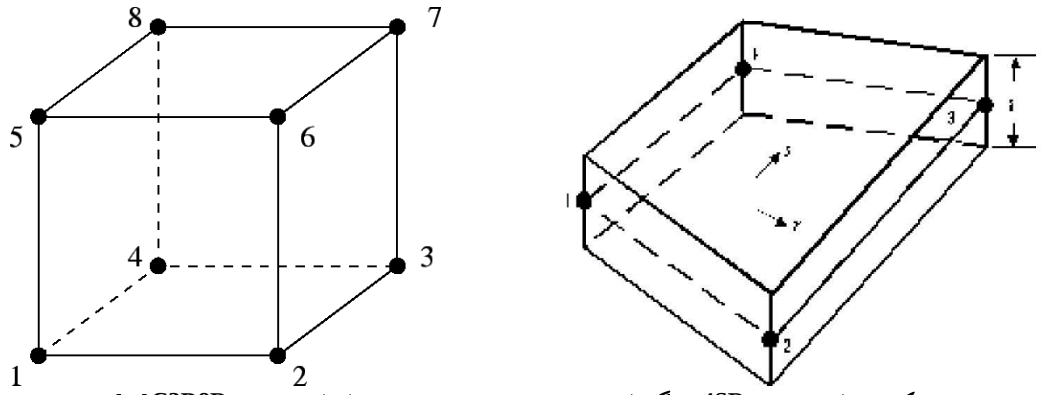
شکل ۸- مشخصات هندسی مخازن مدل شده A و B و C [۱۳]

در سازه مخازن واقعی، برای اتصال ستون‌ها به کف مخزن از فونداسیون بتنی و یا ضخیم نمودن ورق کف مخزن استفاده می‌شود. در مخزن نشان داده‌شده در شکل ۸ محل اتصال ستون فونداسیون نشان داده نشده است، بنابراین به‌منظور گسترش تنش وارده در محل اتصال از روش ضخیم نمودن صفحه کف استفاده شده است اما در این مطالعه ازآنجاکه مخازن مهارشده فرض شده‌اند، از مدل‌سازی کف مخزن چشم‌پوشی شده است. عناصر سیال در مرز بین دیوار مخزن و سیال تنها اجازه‌ی حرکت در جهت عمود بر دیواره مخزن را دارند؛ بنابراین لازم است درروند مدل‌سازی گره‌های مشترک سیال و پوسته در مرز دیوار مخزن و سیال در جهت عمود بر دیوار مخزن به یکدیگر وصل شوند. در این مطالعه گره‌های مشترک سیال و سازه که روی‌هم قرار دارند در جهت شعاعی به یکدیگر وصل شدند. در ضمن مش بندی سیال و سازه به‌گونه‌ای انجام شد که گره‌های سیال و سازه در مرز دیوار مخزن، بر هم منطبق شوند (شکل ۹). در این تحقیق فرض شده که هر مخزن در سه حالت ارتفاع سیال از نفت خام به چگالی ۸۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول حجمی ۱/۶۵گیگا پاسکال پرشده است.



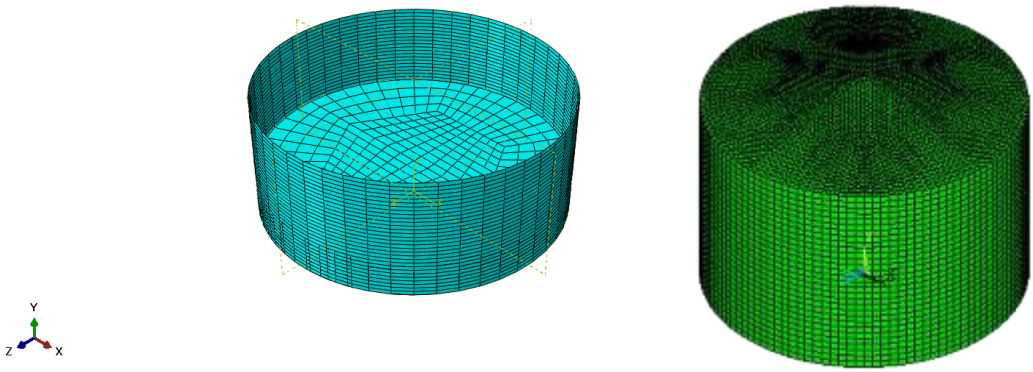
شکل ۹- شرایط مرزی بکار برده شده در مدل اجزای محدود سیال - سازه [۱۳]

المان استفاده شده برای مدل‌سازی جدار 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) بانام C3D8R استفاده شده است. این المان دارای ۸ گره است(شکل ۱۰).



شکل ۱۰- المان پوسته‌ای 4SR با ۴ گره (بعد ضخامت نشان داده‌شده واقعی نیست) والمان سه‌بعدی C3D8R [۴۱]

نمونه یکی از مدل‌های مش بندی در شکل ۱۱ قابل‌مشاهده است.



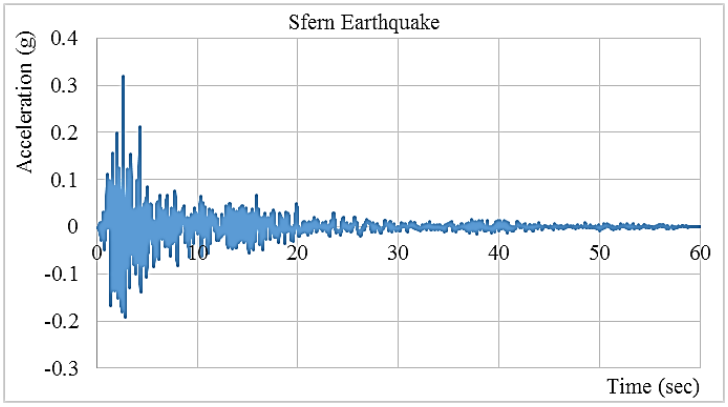
شکل ۱۱- نمونه مدل مش بندی شده مخزن B ۰/۶۳ = H/D - مدل مش بندی شده ی مخزن B (سمت چپ) و مدل مش بندی شده سیال (سمت راست)

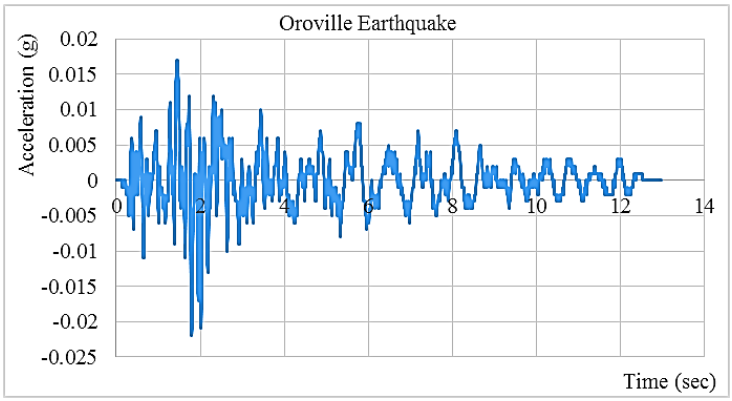
مشخصات مصالح فولاد و سیال به شرح جدول ۶ به نرم‌افزار معرفی‌شده است.

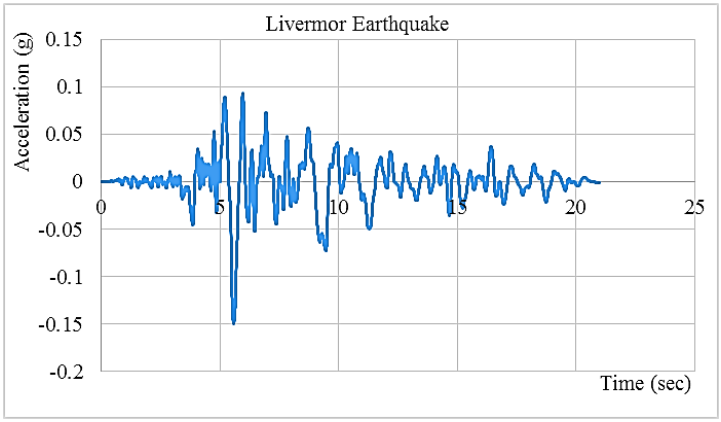
جدول ۶- مشخصات مصالح

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

در این مطالعه هدف بررسی پاسخ سازه به بارگذاری دینامیکی تاریخچه زمانی رکورد سه زلزله متفاوت تحت اثر پدیده خوردگی است. رکوردهای مورداستفاده عبارت‌اند از زلزله‌های لیور، ارویل و اسفرن. رکورد این سه زلزله در شکل ۱۲ قابل‌مشاهده است.







شکل ۱۲- رکورد زلزله‌های مورداستفاده در تحقیق

۳. نتایج و بحث

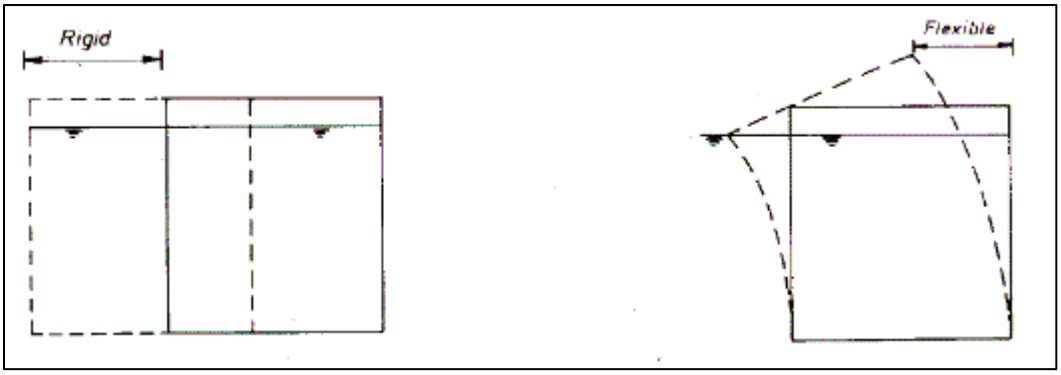
نام‌گذاری مدل‌ها برحسب نوع مخزن (A, B) و عمر مخزن (0y, 10y, 15y) انجام شده است. در ادامه نتایج حاصل از مدل‌سازی‌ها بیان خواهد شد. بدین منظور نحوه تغییرات و توزیع فشار هیدرودینامیکی، تاریخچه زمانی جابجایی، برش پایه و لنگر پای مخزن تحت اثر رکوردهای زلزله یادشده هم‌زمان با پدیده خوردگی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج در سه بخش برای مخازن کوتاه A (H/D=0.4)، متوسط B (H/D=0.63) ارائه می‌گردد. شایان‌ذکر است در تمامی موارد سطح سیال برابر ۹۰٪ ارتفاع مخزن در نظر گرفته‌شده است.

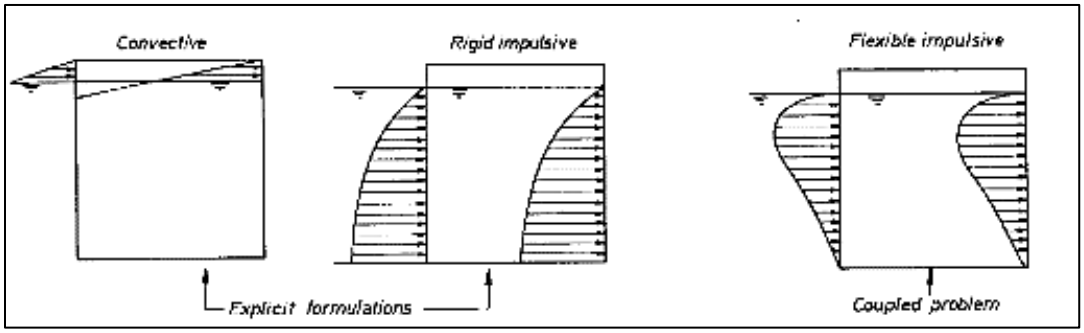
۱.۳. مخازن کوتاه A (H/D=0.40)

در این بخش به بررسی مخازن کوتاه تحت تأثیر هم‌زمان پدیده خوردگی و زلزله می‌پردازیم. در گام اول نحوه توزیع تغییرات فشار هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱.۱.۳. نحوه توزیع تغییرات فشار هیدرودینامیکی

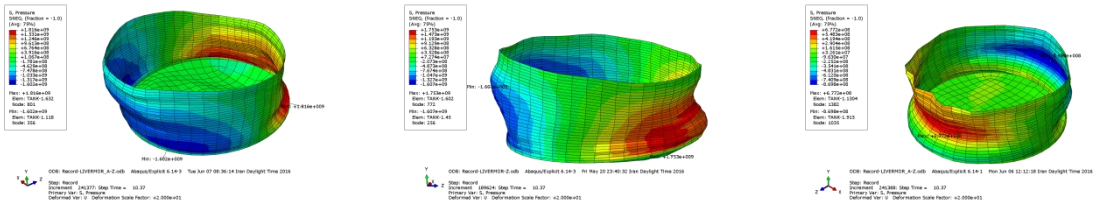
زمانی که پایه‌ی یک مخزن مایع تحت اثر لرزش زمین قرار می‌گیرد، فشار مایع نسبت به حالت تعادل استاتیکی دچار تغییر می‌شود. در حالتی که مخزن تحت اثر شتاب افقی قرار دارد و سطح مایع داخل آن آزاد است، قسمتی از مایع در طول دیوار و کف مانند یک جسم صلب هماهنگ با مخزن حرکت می‌کند، درحالی‌که قسمت باقی‌مانده مایع حول محور افقی عمود برجهت تحریکات زلزله به‌صورت گهواره‌ای نوسان کرده و یا به‌عبارت‌دیگر دچار پدیده امواج سطحی می‌شود. قسمتی از جرم مایع که هماهنگ با دیوار مخزن حرکت می‌کند به جزء ضربه‌ای (Impulsive) و قسمتی که دارای حرکت گهواره‌ای است به جزء انتقالی (Convective) مشهور است. جزء ضربه‌ای را می‌توان به دو بخش عملکرد صلب (Rigid impulsive) و انعطاف‌پذیر (Flexible impulsive) تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱۳).





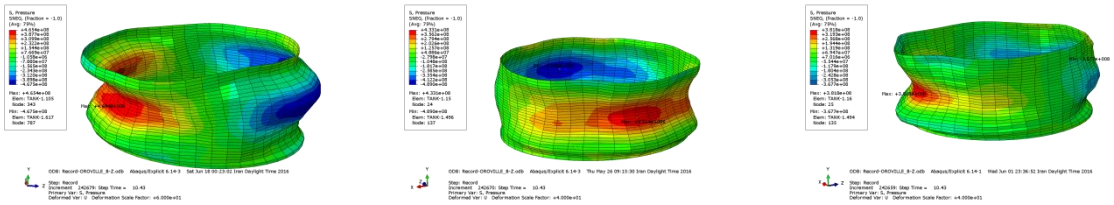
شکل ۱۳- توزیع فشار هیدرودینامیکی در سازه‌های استوانه‌ای

بخشی از جرم مایع که در هر یک از این دو نوع کنش شرکت می‌کند به هندسه و ابعاد مخزن بستگی دارد. در مخازن استوانه‌ای عمودی بلند، جزء ضربه‌ای عموماً بزرگ‌تر از دو برابر جزء انتقالی و در مخازن عریض جزء انتقالی معمولاً بزرگ‌تر است. فشارهای هیدرودینامیکی ناشی از این دو نوع حرکت دارای توزیع متفاوتی در ارتفاع مخزن بوده و تغییراتشان نسبت به زمان با یکدیگر متفاوت است. فشارهای ناشی از جزء ضربه‌ای دارای نوسان‌های با فرکانس بالا است درحالی‌که فشار ناشی از جزء انتقالی که در سطح مایع حداکثر بوده دارای نوسانات با فرکانس پایین است. برای مخازن عریض با نسبت $H/R = 1.5$ سهم مؤلفه‌ی ضربه‌ای مایع در جواب قابل صرف‌نظر است و سیستم مخزن-مایع را می‌توان به‌عنوان یک سیستم یک درجه آزادی با شرایط تکیه‌گاهی ثابت در پایه در نظر گرفت. فشار هیدرودینامیکی باعث ایجاد لنگر واژگونی در پای مخزن می‌گردد. در مخازن مهارشده نیروی کششی ناشی از لنگر واژگونی از طریق میله مهارها به پی منتقل می‌گردد. لیکن در مخازن مهار نشده درصورتی‌که کشش قائم ایجادشده در دیوار از فشار قائم ناشی از وزن دیوار و سقف مخزن (در صورت وجود) تجاوز نماید، دیوار مخزن دچار بلندشدگی می‌گردد. مخازن مهار نشده به‌این‌علت مستعد بلندشدگی هستند که تمامی وزن مخزن و مایع داخل آن در لنگر واژگونی شرکت می‌نماید درصورتی‌که تنها وزن مخزن و وزنی از مایع که بر روی قسمت بلند شده‌ی ورق کف مخزن قرار دارد به‌عنوان لنگر مقاوم عمل می‌نمایند. در مطالعات اولیه، پاسخ لرزه‌ای مخازن بر اساس صلب بودن دیواره‌ی مخزن و یک سیستم کاملاً مهارشده مورد بررسی قرار می‌گرفت، اما در مطالعات بعدی انعطاف‌پذیری دیواره مخزن در تحلیل‌ها در نظر گرفته شد و اهمیت آن بر روی پاسخ لرزه‌ای به اثبات رسید. شکل ۱۴، شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نحوه تغییرات توزیع فشار هیدرودینامیکی را در انتهای رکورد زلزله نشان می‌دهد.



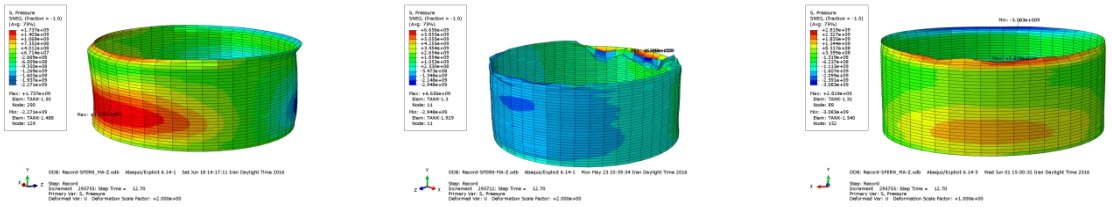
الف- مخزن سالم　　ب- بعد از گذشت ۱۰ سال　　ج- بعد از گذشت ۱۵ سال

شکل ۱۴- توزیع فشار هیدرودینامیکی در مخزن A (H/D=0.40)در انتهای رکورد Liver



الف- مخزن سالم　　ب- بعد از گذشت ۱۰ سال　　ج- بعد از گذشت ۱۵ سال

شکل ۱۵- توزیع فشار هیدرودینامیکی در مخزن A (H/D=0.40) در انتهای رکورد ارویل



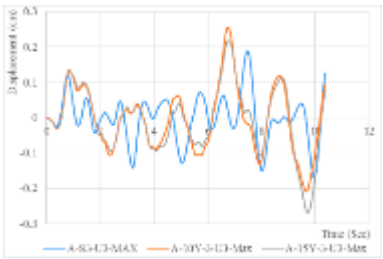
الف- مخزن سالم　　ب- بعد از گذشت ۱۰ سال

شکل ۱۶- توزیع فشار هیدرودینامیکی در مخزن A (H/D=0.40)در انتهای رکورد اسفرن

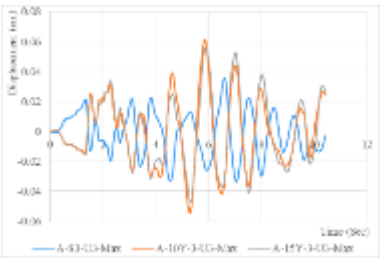
شکل ۱۴، شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نشان می‌دهد، در اثر گذشت زمان و پیدایش پدیده خوردگی بیشینه فشار هیدرودینامیکی تحت یک زلزله خاص افزایش می‌یابد. اثر زلزله به صورت یک بار رفت و برگشتی بوده که در مدت زمان کوتاهی بر سازه وارد می شود و مقدار ان با گذشت زمان نوسان زیادی دارد، این موضوع یعنی بار زلزله یک بار دینامیکی محسوب می شود.دستگاههای شتاب نگار می توانند در هنگام وقوع یک زلزله ، شتاب حرکت زمین را بصورت تابعی از زمان و در طول وقوع زلزله ثبت کنند. در روش تحلیل تاریخچه زمانی با توجه به اینکه در لحظه به لحظه اعمال شتاب نگاشت،پاسخ های سازه (نظیر شتاب ،سرعت، تغییر مکان و نیرو) را به دست می اوریم، عملا می توانیم درک مناسبی از رفتار سازه در هنگام رخ دادن زلزله داشته باشیم و در نهایت از نتایج ان برای طراحی سازه استفاده کنیم [۴۲].

۲.۱.۳. بررسی تاریخچه زمانی جابجایی در مخزن A (H/D=0.40)

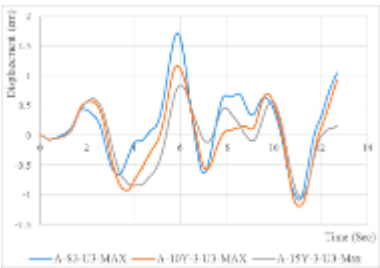
در این بخش به مقایسه تاریخچه زمانی جابجایی تحت اثر پدیده خوردگی ناشی از زلزله‌های یادشده می‌پردازیم. قابل‌توجه است که جابجایی ثبت‌شده برای تمامی حالات مربوط به یک گره خاص در بالاترین تراز مخزن است.



شکل ۱۸- تاریخچه زمانی جابجایی در بالاترین قسمت مخزن در تانک A (H/D=0.40)تحت زلزله لیورمور



شکل ۱۷- تاریخچه زمانی جابجایی در بالاترین قسمت مخزن در تانک A (H/D=0.40)تحت زلزله اورویل



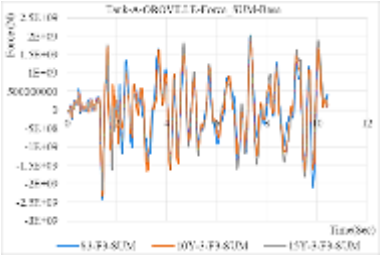
شکل ۱۹- تاریخچه زمانی جابجایی در بالاترین قسمت مخزن در تانک A (H/D=0.40)تحت زلزله اسفرن

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عمر سازه، میزان تغییر مکان حداکثر سازه افزایش‌یافته است. به‌طوری‌که تحت زلزله لیورمور حداکثر تغییر مکان برای مخزن سالم، ۱۵/۹ میلی‌متر، برای مخزن ۱۰ ساله ۲۵ میلی‌متر و برای مخزن ۱۵ ساله برابر ۲۶/۱میلی‌متر است. همان‌طور که برای زلزله اورویل مشاهده می‌شود، با افزایش عمر سازه، میزان تغییر مکان حداکثر سازه افزایش‌یافته است. به‌طوری‌که حداکثر تغییر مکان برای مخزن سالم، ۳/۳ میلی‌متر، برای مخزن ۱۰ ساله ۵/۲ میلی‌متر و برای مخزن ۱۵ ساله برابر ۵/۳ میلی‌متر است. در زلزله اسفرن تغییر مکان مخزن صفرساله بیشتر از تغییر مکان دو مخزن دیگر است که دلیل آن را می‌توان به وزن بیشتر مخزن صفر ساله به دلیل ضخامت بیشتر جدار آن نسبت داد. به‌طوری‌که حداکثر تغییر مکان برای مخزن ۰ ساله، ۱/۵۳ سانتی‌متر، برای مخزن ۱۰ ساله ۱/۱۷۶ سانتی‌متر و برای مخزن ۱۵ ساله برابر ۱/۰۳۶ سانتی‌متر است.

۳.۱.۳. بررسی تاریخچه زمانی برش پایه در مخزنA (H/D=0.40)

در این بخش به مقایسه تاریخچه زمانی برش پایه تحت اثر پدیده خوردگی ناشی از زلزله‌های یادشده می‌پردازیم.

شکل ۲۰- تاریخچه زمانی برش پایه مخزن A
H/D=0.40تحت زلزله لیورمور



شکل ۲۱- تاریخچه زمانی برش پایه مخزن
H/D=0.40A تحت زلزله اورویل

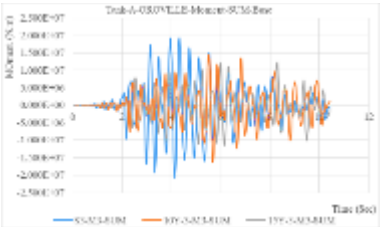
شکل ۲۲- تاریخچه زمانی برش پایه مخزن A
H/D=0.40تحت زلزله اسفرن

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برشی پایه مخازن در طول اعمال رکورد با تغییر عمر مخزن تغییر قابل‌ملاحظه‌ای نداشته است.

۴.۱.۳. بررسی تاریخچه زمانی لنگر پای مخزن در مخزن A (H/D=0.40)

در این بخش به مقایسه لنگر پای مخزن تحت اثر پدیده خوردگی ناشی از زلزله‌های یادشده می‌پردازیم.

شکل ۲۳- تاریخچه زمانی لنگر پای مخزن
H/D=0.40A تحت زلزله لیورمور



شکل ۲۴- تاریخچه زمانی لنگر پای مخزن A
H/D=0.40تحت زلزله اورویل

شکل ۲۵- تاریخچه زمانی لنگر پای مخزن A
H/D=0.40تحت زلزله اسفرن

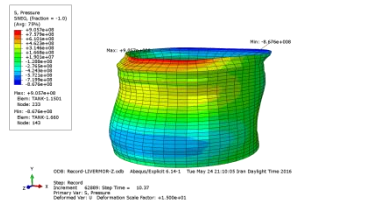
همان‌طور که مشاهده می‌شود در دو رکورد اول بیشترین میزان لنگر اعمال‌شده مربوط به مخزن سالم و در رکورد اسفرن میزان لنگر واردشده به هر سه مخزن تقریباً باهم برابر است.

۲.۳. مخازن متوسط B (H/D=0.63)

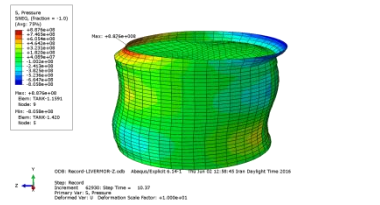
در این بخش به بررسی مخازن متوسط تحت تأثیر هم‌زمان پدیده خوردگی و زلزله می‌پردازیم. در گام اول نحوه توزیع تغییرات فشار هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱.۲.۳ نحوه توزیع تغییرات فشار هیدرودینامیکی در مخزن متوسط B (H/D=0.63)
در شکل ۲۶،

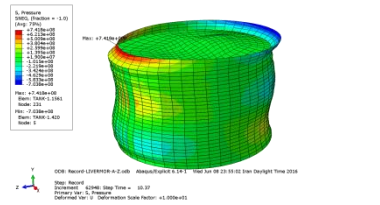
شکل ۲۷ و شکل ۲۸ توزیع فشار وارده به مخزن از جانب سیال قابل‌مشاهده است.



الف- مخزن سالم

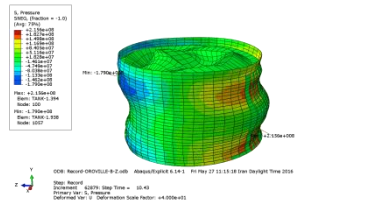


ب- بعد از گذشت ۱۰ سال

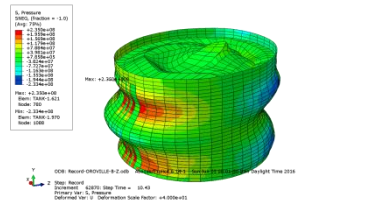


ج- بعد از گذشت ۱۵ سال

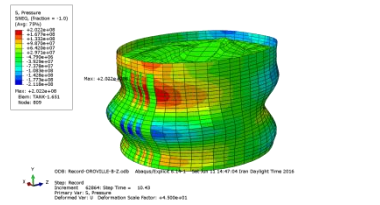
شکل ۲۶- توزیع فشار هیدرودینامیکی در مخزن متوسط B (H/D=0.63) در انتهای رکورد Liver



الف- مخزن سالم

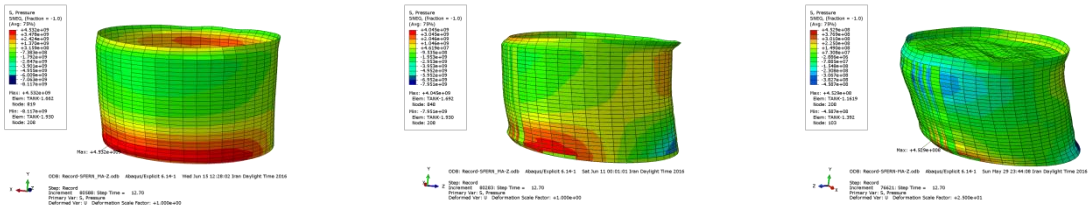


ب- بعد از گذشت ۱۰ سال



ج- بعد از گذشت ۱۵ سال

شکل ۲۷- توزیع فشار هیدرودینامیکی در مخزن متوسط B (H/D=0.63) در انتهای رکورد اورویل



الف- مخزن سالم **ب- بعد از گذشت ۱۰ سال** **ج- بعد از گذشت ۱۵ سال**

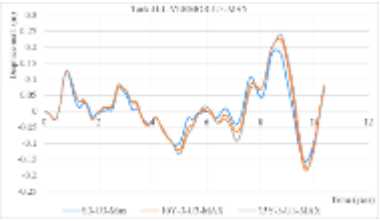
شکل ۲۸- توزیع فشار هیدرودینامیکی در مخزن متوسط B (H/D=0.63) در انتهای رکورد اسفرن

مقایسه شکل ۲۶،

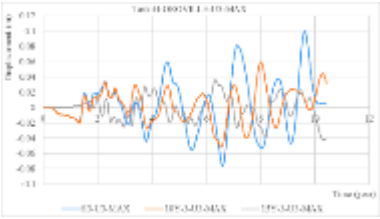
شکل ۲۷ و شکل ۲۸ نشان می‌دهد، در اثر گذشت زمان و پیدایش پدیده خوردگی بیشینه فشار هیدرودینامیکی تحت یک زلزله خاص افزایش می‌یابد.

۲.۲.۳. بررسی تاریخچه زمانی جابجایی در مخزن متوسط B (H/D=0.63)

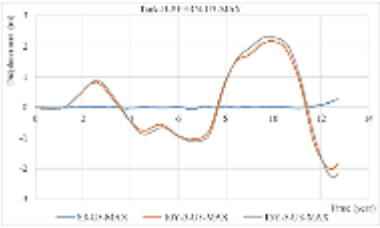
در این بخش به مقایسه تاریخچه زمانی جابجایی تحت اثر پدیده خوردگی ناشی از زلزله‌های یادشده می‌پردازیم. قابل‌توجه است که جابجایی ثبت‌شده برای تمامی حالات مربوط به یک گره خاص در بالاترین تراز مخزن است.



شکل ۲۹- تاریخچه زمانی جابجایی در بالاترین قسمت مخزن در تانک B (H/D=0.63) تحت زلزله لیورمور



شکل ۳۰- تاریخچه زمانی جابجایی در بالاترین قسمت مخزن در تانک B (H/D=0.63) تحت زلزله اورویل



شکل ۳۱- تاریخچه زمانی جابجایی در بالاترین قسمت مخزن در تانک B (H/D=0.63) تحت زلزله اسفرن

در زلزله اول با افزایش عمر سازه، میزان تغییر مکان حداکثر سازه افزایش‌یافته است. به‌طوری‌که حداکثر تغییر مکان برای مخزن صفر ساله، ۲۰ سانتی‌متر، برای مخزن ۱۰ ساله ۲۱ سانتی‌متر و برای مخزن ۱۵ ساله برابر ۲۳ سانتیمتر است. در زلزله دوم مخزن با عمر صفرسال در این زلزله بیشترین جابه‌جایی را داشته است که دلیل آن را می‌توان به وزن بیشتر مخزن صفر ساله به دلیل ضخامت بیشتر جدار آن نسبت داد. به‌طوری‌که حداکثر تغییر مکان برای مخزن صفر ساله، ۹۷ میلی‌متر، برای مخزن ۱۰ ساله ۵۱ میلی‌متر و برای مخزن ۱۵ ساله برابر ۴۳ میلی‌متر است. در زلزله سوم میزان تغییر مکان حداکثر سازه افزایش‌یافته است. به نظر می‌رسد در مخازن ۱۰ و ۱۵ ساله با توجه به تغییر مکان بالای ایجادشده گسیختگی به وجود آمده باشد. به‌طوری‌که حداکثر تغییر مکان برای مخزن سالم، ۲۴ میلی‌متر، برای مخزن ۱۰ ساله ۲۲/۸ میلی‌متر و برای مخزن ۱۵ ساله برابر ۲۳ میلی‌متر است.

۳.۲.۳. بررسی تاریخچه زمانی برش پایه در مخزن متوسط B (H/D=0.63)

در این بخش به مقایسه تاریخچه زمانی برش پایه تحت اثر پدیده خوردگی ناشی از زلزله‌های یادشده می‌پردازیم.

شکل ۳۲- تاریخچه زمانی برش پایه مخزن B تحت زلزله لیورمور H/D=0.63

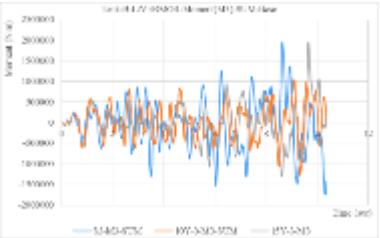
شکل ۳۳- تاریخچه زمانی برش پایه مخزن B تحت زلزله اورویل H/D=0.63

شکل ۳۴- تاریخچه زمانی برش پایه مخزن B تحت زلزله اسفرن H/D=0.63

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برش پایه مخازن در طول اعمال رکورد با تغییر عمر مخزن تغییر قابل‌ملاحظه‌ای نداشته است. در مورد زلزله اسفرن به دلیل اینکه در مخزن با عمر ۱۰ و ۱۵ سال، خرابی اتفاق افتاده برش پایه تغییرات قابل‌توجهی داشته است.

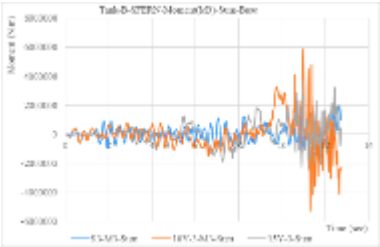
۴.۲.۳. بررسی تاریخچه زمانی لنگر پای مخزن متوسط B (H/D=0.63)

در این بخش به مقایسه لنگر پای مخزن تحت اثر پدیده خوردگی ناشی از زلزله‌های یادشده می‌پردازیم.



شکل ۳۵- تاریخچه زمانی لنگر پای مخزن B تحت زلزله لیورمور H/D=0.63

شکل ۳۶- تاریخچه زمانی لنگر پای مخزن B تحت زلزله اورویل H/D=0.63



شکل ۳۷- تاریخچه زمانی لنگر پای مخزن B تحت زلزله اسفرن H/D=0.63

همان‌طور که مشاهده می‌شود در دو رکورد اول بیشترین میزان لنگر اعمال‌شده مربوط به مخزن سالم و در رکورد اسفرن میزان لنگر واردشده به مخازن ۱۰ و ۱۵ ساله به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر است.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به خروجی‌های دریافت شده از نرم‌افزار و مقایسه آن‌ها نتایج زیر قابل‌بیان است:

۱- شبیه‌سازی مخازن و پیش‌بینی رفتار آن‌ها با استفاده از روش اجزای محدود با دقت مناسبی قابل انجام است و با توجه به ابعاد سازه‌هایی مانند مخازن استفاده از این روش بسیار کارا و کم‌هزینه است.

۲- مخازن ذخیره سیالات تحت بارگذاری زلزله به دلیل ضخامت کم جداره و وزن بالای سیال دچار تغییرشکل‌های نسبتاً بزرگی می‌شوند که می‌تواند در قالب کمانش‌های محلی و یا تغییر شکل کلی مخزن و خرابی آن گردد.

۳- در اغلب نمونه‌ها بخش نزدیک به تکیه‌گاه مخازن دچار تغییر شکل بالایی گردیده است و لازم است این ناحیه از مخزن تقویت گردد که برای مثال می‌توان از سخت‌کننده‌ها در این ناحیه استفاده نمود.

۴- با بررسی رفتار مخازن مشابه که عمر متفاوت و درنتیجه ضخامت جدار متفاوت ناشی از خوردگی داشته است، در اکثر نمونه‌ها مخزن با عمر بالاتر دچار تغییرشکل‌های بزرگ‌تر شده است که میزان اختلاف تغییرشکل‌ها در برخی نمونه‌ها قابل‌توجه بوده است.

۵- میزان برش پایه در زمان اعمال شتاب زلزله به سازه تفاوت محسوسی در نمونه‌های مشابه با عمر متفاوت نداشته است و تاریخچه برش تکیه‌گاهی سازه‌ها با عمرهای متفاوت با تقریب اندکی بر هم منطبق بوده است.

۶- میزان لنگر واژگونی وارد بر نمونه‌ها با تغییر عمر سازه تغییرات قابل‌ملاحظه داشته است و ملاحظه شد که بیشترین لنگر واژگونی به مخزن سالم است.

۷- در مخزن متوسط H/D = 0.63 B در برخی نمونه‌ها خرابی مخزن مشاهده گردید و این مخازن با حجم سیال بالای موجود در آن‌ها در برابر زلزله آسیب‌پذیر بوده و تغییرشکل‌های بزرگی در آن‌ها مشاهده گردیده است.

۸- میزان بیشینه فشار هیدرودینامیکی در اثر پیدایش پدیده خوردگی تحت اثر یک زلزله خاص افزایش می‌یابد.

۵. مراجع

1. Hoskinns L. M, and Jacobsen L. S, (1934). Water Pressure in a Tank Caused by a Simulated Earthquake. *Bull Seism Soc Am, Vol. 24.*

2. Jacobsen L. S, (1949). Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of a fluid surrounding a cylindrical pier. *Bull Seism Soc Am, Vol. 39.*

3. Housner G. W, (1957). Dynamic pressure on accelerated fluid containers. *Bull Seism Soc Am, Vol. 47.* pp. 15-35.

4. Housner G. W, (1963). The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of the Seismological Society of America,* 53 (2), 381–9.

5. Haroun M. A, and Housner G. W, (Apr 1981). Seismic design of liquid storage tank. *Journal of the Technical Councils, ASCE, Vol. 107.* TC1, pp. 191-207.

6. Haroun M. A, and Housner G. W, (Oct 1982). Dynamic characteristics of liquid storage tanks. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 108.* EM 5, pp. 783-800.

7. Haroun M. A, (Mar, Apr 1983). Vibration studies and tests of liquid storage tanks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 11.* pp. 179-206.

8. Clough R. W, Niwa A, and Clough D. P, (1979). Experimental Seismic Study of Cylindrical Tanks. *Journal STR Div, 7 (ST 12),* 2565-2590.

9. Haroun M. A, Ellaithy H. M, (1985). Model for flexible tanks undergoing rocking. *Journal of Engineering Mechanics,* 111 (2), 143–57.

10. O. Rourke M, and So P, (2000). Seismic Fragility Curves for On-Grade Steel Tanks. *Earthquake Spectra,* 16 (4).

11. Malhotra P, (2000). Practical Nonlinear Seismic Analysis of Tanks. *Earthquake Spectra,* 473-492.

12. 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.

13. ASCE (2001). Seismic Fragility Formulations for Water Systems. Part 1, *Guidelines American Lifeline Alliances, USA.*

14. Barton D. C, and Parker J. V, (1987). Finite Element Analysis of the Seismic Response of Anchored and Un-Anchored Liquid Storage Tanks. *Journal Earthquake Engineering, and STR Dyn,* 15, 299-322.

15. 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.

16. Veletsos A. S, and Tang Y, (Nov 1987). Rocking response of liquid storage tanks. *Journal of Engineering Mechanics, Vol. 113,* No. 11. pp. 1774-I792,

17. Maheri M. R, and Severn R.T, (1989). Impulsive hydrodynamic pressure in ground-based cylindrical structures. *Journal of Fluids and Structures, Vol. 3,* pp. 555-577.

18. Malhotra P. K, and Veletsos A. S, (1994). Beam Model for Uplifting Analysis of Cylindrical Tanks. *Journal Str. Engineering, ASCE,* 120 (12), 3471-3488.

19. Malhotra P. K, and Veletsos A. S, (1994). Uplifting Analysis of Base Plates in Cylindrical Tanks. *Journal Str. Engineering, ASCE,* 120 (12), 3489-3505.

20. Malhotra P. K, and Veletsos A. S, (1994). Uplifting Response of Un-Anchored Liquid- Storage Tanks. *Journal Str. Engineering, ASCE,* 120 (12), 3525-3547.

21. Malhotra P, (1995). Base Uplifting Analysis of Flexibly Supported Liquid Storage Tanks. *Journal Earthquake Engineering Str. Dyn,* 24 (12), 1591-1607.

22. Malhotra P, (1997). Seismic Response of Soil Supported Un-Anchored Liquid-Storage Tanks. *Journal Str. Engineering, ASCE,* 123 (4), 440-450.

23. Younan A. H, and Veletsos A. S, (Jan. 1998). Dynamics of solid-containing tanks I. Rigid tanks. *Journal of Structural Engineering, Vol. 124.* No. 1. pp. 52-61.

24. Younan A. H, and Veletsos A. S, (Jan. 1998). Dynamics of solid-containing tanks. II. Flexible tanks. *Journal of Structural Engineering Vol. l24.* No. 1. pp. 62-70.

25. Eshghi S, and Ahari M. N, (2001). Evaluation of Seismic Vulnerability of Oil Storage Tanks. *Proc. SEE4, Int. Conf. Tehran. Iran (In Persian).*

26. Eshghi S, and Razzaghi M. S, (2005). Performance of Industrial Facilities in the 2003 Bam Iran Earthquake. *Earthquake Spectra,* 21 (S1), 395-410.

27. 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.

28. ASCE (2001). Seismic Fragility Formulations for Water Systems Part 1 Guidelines. *American Lifeline Alliances, USA.*

29. Barton D. C, and Parker J. V, (1987). Finite Element Analysis of the Seismic Response of Anchored and Un-Anchored Liquid Storage Tanks. *Journal Earthquake Engineering and Str. Dyn,* 15, 299-322.

30. 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.

31. 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.

32. Watawala L, and Nash W. A, (1983). Influence of initial geometric imperfections on Vibrations of thin circular cylindrical shells. *Computers & Structures, Vol. 16.* No.1-4. pp. 125-130.

33. Takabatake H, and Matsouka O, (1987). Elastic analysis of circular cylindrical shells By rod theory including distortion of cross-section. *International Journal of Solids And Structures, Vol. 23.* pp. 797-817.

34. Zui H, Shinke T, (1985). Seismic response analysis of cylindrical tanks with initial irregularities on side walls. *Journal of Pressure Vessel Technology, ASME,* 107 (2), 107–17.

35. Niwa A, (l978). Seismic behavior of tall liquid storage tanks. *Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley,* 330 pages.

36. Watawala L, Nash W. A, (1983). Influence of initial geometric imperfections on vibrations of thin circular cylindrical shells. *Computers & Structures,* 16 (1-4), 125-130.

37. Zui H, Shinke T, (1985). Seismic response analysis of cylindrical tanks with initial irregularities on side walls. *Journal of Pressure Vessel Technology, ASME,* 107 (2), 107-117.

38. 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.

39. Maheri M. R, Abdollahi A, (2013). The effects of long term uniform corrosion on the buckling of ground based steel tanks under seismic loading. *Thin-Walled Structures*, 1-9.

40. Vakeily Morteza & Hossen Shokaty, (2014). Buckling of cylindrical open-topped steel tanks under wind load. *Spatial Structures Research Center, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, China.

41. Abaqus/CAE 6.10, and Analysis User Manual.

۴۲. محسن حیدری و محمد آهنگر (۱۳۹۴)، مجموعه کتاب‌های زیر ذره بین سری عمران استاندارد ۲۸۰۰، صفحه ۱۳۵ الی ۱۳۸.