



University Of Qom

Civil Infrastructure Researches

Online ISSN: 2783-140X
journal homepage: <https://cer.qom.ac.ir/>



Incremental Dynamic Analysis of Horizontal Pressure Vessels with Their Piping Systems

Mahdi Sharifi¹✉, Zeinab Maleki², Bijan Sayyafzadeh³✉

- Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: m.sharifi@qom.ac.ir
- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: zeinabmaleki@gmail.com
- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: B.Sayyafzadeh@stu.qom.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 31 Mar 2022
Revised 09 Dec 2022
Accepted 02 Jan 2023

Keywords:
Probabilistic Seismic Analysis,
Incremental Dynamic Analysis,
Horizontal Pressure Vessels,
Fragility Curves.

ABSTRACT

Reduction and management of risk of industrial plant especially energy is an important concern. Probabilistic and reliability method are used in risk and cost estimations. Oil, Gas and Petrochemical plant are the most energy producer plants that are in focus of cost, life and operation. These plants consist of several units, parts and equipment's. In order to study the risk of plants, it is needed to study the equipment's. The main goal of this research is probabilistic seismic assessment of fixed horizontal vessels. In this paper, finite element model of designed and constructed vessels in a real project is prepared and incremental dynamic analysis (IDA) is performed. Response of vessels components including the vessel body stress, piping stress, flange and elbow deformations, anchor bolt stress are extracted and their related limit state are defined. Finally the fragility curve of vessels components is prepared. The result shows that flange connection is the components that are potential for starting the damage of vessels.

Cite this article: Sharifi, Mahdi., Maleki, Zeinab., & Sayyafzadeh, Bijan. (2023). Incremental Dynamic Analysis of Horizontal Pressure Vessels with Their Piping Systems. *Civil Infrastructure Researches*, 9(1), 139-159. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.8058.1380>



Publisher: University of Qom.
© The Authors.

<https://doi.org/10.22091/cer.2023.8058.1380>



بررسی رفتار لرزاها مخزن تحت فشار افقی به همراه سیستم لوله‌کشی متصل به آن با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی

مهدی شریفی^۱، زینب ملکی^۲، بیژن سیافزاده^۳

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانame: m.sharifi@qom.ac.ir
۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانame: zeinabemaleki@gmail.com
۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانame: B.Sayyafzadeh@stu.qom.ac.ir

چکیده

بررسی رفتار لرزاها احتمالاتی مخزن تحت فشار افقی به همراه سیستم لوله‌کشی متصل به آن در این تحقیق مدنظر می‌باشد. مطالعه رفتار لرزاها تجهیزات به کار رفته در مجتمع‌های صنعتی، جهت استفاده در مطالعات ریسک مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهمین منظور، در مطالعه موردی مخزنی تحت فشار افقی طراحی و ساخته شده در یک پالایشگاه، با استفاده از روش اجزای محدود مدل‌سازی و مورد تحلیل‌های دینامیکی افزاینده قرار گرفته است. پاسخ‌های اجزای محدود مخزن افقی شامل تنش، تغییرشکل و چرخش از نتایج مدل اجزای محدود به دست آمده است. معیارهای خرابی و حالت‌های حدی برای اجزا شامل پوسته بدنه، میل‌مهرهای بیس‌پلیت، زانویه‌ها و فلنچ لوله‌ها تعیین شده است. براساس نتایج تجزیه و تحلیل دینامیکی افزاینده، نظریه آماری و مدل‌ها جهت محاسبه منحنی‌های شکنندگی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اتصالات فلنچ لوله‌ها و بدنه مخزن افقی مکان‌هایی هستند که مستعد شروع بیشترین خرابی در مخزن افقی می‌باشند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

کلیدواژه‌ها:

تحلیل لرزاها احتمالاتی،
تحلیل فزاینده دینامیکی،
مخزن تحت فشار افقی،
منحنی‌های شکنندگی.

استناد: شریفی، مهدی؛ ملکی، زینب؛ سیافزاده، بیژن. (۱۴۰۲). بررسی رفتار لرزاها مخزن تحت فشار افقی به همراه سیستم لوله‌کشی متصل به آن با استفاده از تحلیل دینامیکی افزایشی. *پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی*. ۱۵۹-۱۳۹.

<https://doi.org/10.22091/cer.2023.8058.1380>

ناشر: دانشگاه قم.

© نویسنده‌گان.



شناسه دیجیتال: <https://doi.org/10.22091/cer.2023.8058.1380>

۱- مقدمه

پژوهش‌های بسیاری در چند دهه اخیر توسط محققین در خصوص پتانسیل خطرات ناشی از آزادسازی مواد خطرناک از تجهیزات صنعتی فرآیندی یا ذخیره کننده که در اثر رویدادهای طبیعی آسیب دیده‌اند، ارائه گردد [۵]. با این وجود، به استثنای صنعت هسته‌ای، در استانداردهای ملی یا بین‌المللی مربوط به سازه‌ها، هنوز هیچ روش استاندارد شده‌ای برای ارزیابی ریسک لرزاوی کلی تجهیزات فرایندی صنعتی واقع در مناطق مستعد زلزله تولید نشده است [۶].

تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است که کارخانه‌های صنعتی می‌توانند تا حد زیادی آسیب ببینند، زلزله‌های سال‌های ۱۹۸۸ ارمنستان، زلزله ونچان^۱ سال ۲۰۰۸ در چین و زلزله بزرگ اخیر شرق ژاپن در سال ۲۰۱۱، نمونه‌های آشکار این مسئله هستند. در زلزله ازمیت سال ۱۹۹۹، کانون زلزله درصد زیادی از مناطق صنعتی ترکیه را در برگرفته بود. همانطور که انتظار می‌رفت تأسیسات صنعتی در منطقه به‌طور کلی در سطوح بالاتر طراحی و با کنترل کیفیت ساخت بهتر نسبت به سازه‌های مسکونی و معمول ساخته شده بودند، با این حال خرابی‌ها بسیار شدیدتر و سنگین‌تر نسبت به زلزله‌هایی با سطوح PGA مشابه بود و شامل مثال‌هایی از وقهه گسترده کسب‌وکار بوده است، تلفات مستقیم و غیرمستقیم با هم می‌توانست در مجموع به میلیاردها دلار برسد. در نتیجه مجموعه مواردی شامل: کمبود اطلاعات، نوع سازه‌های خاص و خطرپذیری بالا، مهمترین دلایلی هستند که منجر به انتخاب کارخانه‌های صنعتی جهت انجام تحقیق می‌شوند [۱ و ۷]. مخازن ذخیره سیال بهویژه مخازن روزمیانی، از جمله سازه‌های مهم و حیاتی در زیرساخت‌های انرژی بهشمار می‌آیند. این مخازن عموماً جهت ذخیره فرآورده‌های نفتی و ذخیره آب آتش‌نشانی استفاده می‌شوند. بنابراین بهره‌برداری از مخازن پس از وقوع زلزله دارای اهمیت بسزایی است [۷].

^۱- Wenchuan

در حال حاضر، صنعت نفت و گاز از مهم‌ترین منابع تأمین انرژی بشر امروزی محسوب می‌شود. نیاز مداوم به مواد شکل‌پذیر صنعتی، توسط تجهیزات فرآوری خصوصاً کارخانجات پتروشیمی توجه بسیاری را به این صنعت معطوف کرده است. از طرفی، آسیب‌پذیری ناحیه شهری و مکان‌های صنعتی به حوادث طبیعی، نگرانی‌های جهانی را به‌دلیل عدم آمادگی عمومی کشورها در پیش‌بینی میزان تأثیرات و پیامدهای ناشی از وقوع حوادث، ایجاد کرده است [۱].

کارخانه‌های صنعتی از تعداد زیادی واحدهای مجرزا تشکیل شده است، که در هر واحد، تجهیزات و سازه‌های انتقال خطوط لوله قرار گرفته‌اند. فرایند شیمیایی مورد نیاز برای به‌دست آوردن یک محصول خاص نیاز به حضور قطعات منحصر به فرد تجهیزاتی دارد که به نوبه خود ممکن است نیاز به تکیه‌گاه‌هایی نیز داشته باشد. بنابراین، به‌علت هندسه خاص و یا توزیع متفاوت جرم‌ها (ناشی از تجهیزات، لوله‌ها و غیره) سازه‌های موجود در کارخانه‌های صنعتی به گروههای سازه‌ای نامنظم و یا شاید خاص تقسیم شوند که به‌طور واضح نسبت به ساختمانهای متعارف موجود، متفاوت می‌باشد. ارزیابی لرزاوی احتمالاتی چنین کارخانه‌هایی نیازمند درک عملکرد، واکنش و رفتار تجهیزات، اجزا و سازه‌های تشکیل‌دهنده آنها است [۲ و ۳].

آسیب‌های ایجاد شده در مجتمع‌های صنعتی در اثر وقوع حوادث، باعث ایجاد تلفات جانی، آسیب‌های جسمی، خدمات زیست‌محیطی و خسارات اقتصادی شده است. عمدتاً وقوع و گسترش حوادث در کارخانجات صنعتی، در اثر خطرات طبیعی، مسائل فنی و خرابی سیستم‌ها و اجزاء، خطاهای انسانی و یا ترکیبی از آنها می‌باشد [۴].

احداث مجتمع‌های صنعتی در مناطق لرزاوی، اهمیت ارزیابی لرزاوی این صنایع را دوچندان کرده است و آسیب‌های گسترده ناشی از آن باعث شده است

بر عملکرد لرزه‌ای متمرکز شده‌اند [۱۱]. برخی مطالعات، ضرایب اطمینان به کار گرفته شده در طراحی HPV را مورد بحث قرار داده‌اند و در مورد خرابی یا آسیب آنها در میادین نفت و گاز در حین عملیات تحقیق کرده‌اند. رفتار لرزه‌ای چنین تجهیزاتی، بهویژه هنگامی که احتمال نشت محتويات خطرناک در نظر گرفته شود مورد بررسی است [۱۲].

فرهان و بوسیاس^۵ اجزای مختلف یک واحد فرعی (LNG^۶) را تحت مطالعه موردنی قرار دادند. تجهیزات واحد مربوطه هرکدام جداگانه و به صورت روش اجزای محدود مدل‌سازی و تحلیل شدند [۱۳]. سبحان و حسینی، به بررسی رفتار کمانشی مخزن فولادی استوانه‌ای تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای پرداختند. در این پژوهش، تحلیل IDA^۷ برای ۷ شتاب‌نگاشت، که هرکدام برای PGAهای مختلف از ۰/۰۵ g تا ۰/۵ g مقیاس شده، انجام شد [۱۴]. در مطالعه‌ای دیگر، با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی افزایشی بر روی مدل‌های المان محدود، ۱۴۰ مخزن ذخیره‌سازی ارزیابی شده و برای هر مخزن، توابع شکنندگی تجمعی لاغ نرمال در سه حالت حدی مختلف به دست آمده است [۱۵].

در حال حاضر، جهت طراحی HPVها، آیین‌نامه‌هایی همچون ASME، آیین‌نامه کمیته استاندارد اروپا، استانداردهای بریتانیا، کتاب‌های راهنمای معادلات راهنمای مورد استفاده واقع می‌شوند [۸]. با این حال، هنگام طراحی HPV، عدم قطعیت مربوط به مواد مورد استفاده و بارگذاری مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.

بررسی دقیق داده‌هایی که از منابع معتبر مانند گزارش‌های زلزله صورت می‌گیرد، امکان درک رفتار سازه‌ها و تجهیزات را فراهم می‌کند و شناسایی حالت‌های خرابی و آسیب را ارایه می‌دهد. طبق گزارش‌های مربوط

مخازن تحت فشار افقی (HPV) یکی از تجهیزات متداول در پالایشگاه‌ها هستند که به صورت کلی، سازه‌ای استوانه‌ای شکل است و بر روی دو تکیه‌گاه به نام سدل^۸ نصب می‌شود. تجهیز فوق یک مخزن ذخیره‌سازی تحت فشار است که برای مقاومت در برابر بارهای حرارتی، فشار داخلی، باد و بارهای لرزه‌ای طراحی شده است [۸]. بدنه اصلی یک HPV، شامل صفحات با یا بدون سخت‌کننده‌هایی است که به شکل استوانه نورده شده‌اند. HPV همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. از HPV برای نگهداری مایعات، به عنوان مبدل‌های حرارتی یا تجهیزات فرآیندی جهت ترکیب یا تجزیه محصولات شیمیایی استفاده می‌شود.



[۹] LPG تحت فشار افقی^۴

به طور کلی، مواد نگهداری شده در یک HPV قابل اشتعال یا سمی و می‌تواند رادیواکتیو باشد (در نیروگاه‌های هسته‌ای). بنابراین طراحی این برای جلوگیری از نشت و کاهش پتانسیل خرابی تحت بارهای عملیاتی و محیطی لازم است [۱۰]. جزئیات اجزای HPV در شکل ۲ نشان داده شده است.

اگرچه ساختارهای HPV دارای شکل ساده‌ای هستند و رفتارهای سازه‌ای شناخته شده‌ای دارند، اما طراحی آنها پیچیده بوده و ملاحظات خاصی را می‌طلبد. مطالعات بسیاری در زمینه تحلیل و طراحی HPV، بویژه در مهندسی مکانیک صورت گرفته است، اما تعداد کمی

^۵- Farhan and Bousias

^۶- Liquefied Natural Gas

^۷- Incremental Dynamic Analysis

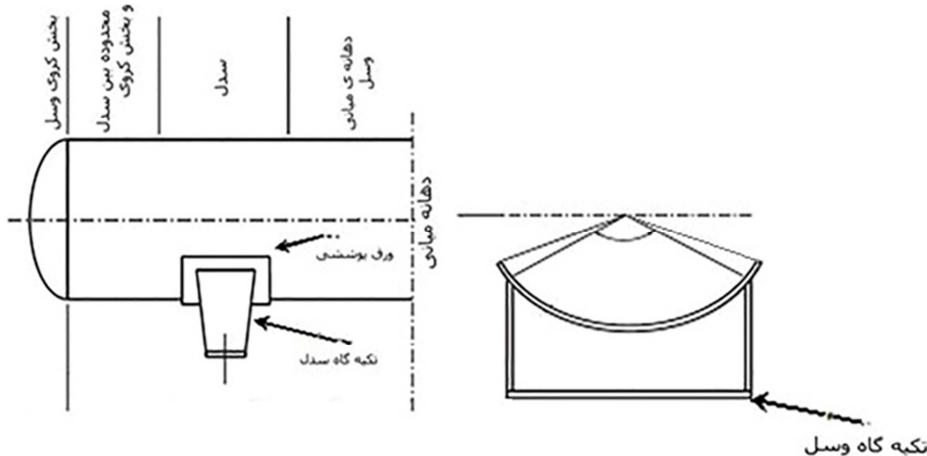
^۸- Horizontal pressure vessels

^۹- Saddel

^{۱۰}- Liquid Petroleum Gas

بوده است [۳].

به آسیب‌های مشاهده شده تجهیزات، در زلزله‌های گذشته، خرابی مخزن‌های افقی از شکست لوله‌ها کمتر



شکل ۲- نماهای شماتیک اجزای HPV

۲- مروری بر تحلیل IDA

مفهوم اصلی IDA، مقیاس کردن شتاب تاریخچه زمانی به صورت پیشرفت‌تر است که آن را در یک روش جامع در پاسخ به مهندسی زلزله بر مبنای عملکرد PBEE^۸) قرار داده است. این چارچوب که در اوخر دهه ۹۰ ظاهر شد، اساساً به‌دلیل نیاز به یک روش تحلیل قوی که بتواند تقاضاها و پاسخها را در هر سطح از شدت لرزه‌ای ارزیابی کند و اهداف عملکردی مختلف و خاص را برآورده نماید، ابداع گردید. روش تحلیل IDA شامل انجام چندین تحلیل دینامیکی غیرخطی از یک مدل سازه‌ای تحت مجموعه‌ای از رکوردهای حرکت زمین است، که هرکدام به چندین سطح از شدت لرزه‌ای مقیاس می‌شود [۱۷]. سطوح مقیاس شده، به‌طور مناسب انتخاب می‌گردند تا سازه طیف وسیعی از رفتار الاستیک تا غیرالاستیک و در نهایت، ناپایداری دینامیکی کلی (جایی که سازه به‌طور کلی سقوط می‌کند)، را شامل شود [۱۸]. منحنی‌های IDA نمایانگر تغییرات پاسخ سازه‌ای به نام پارامتر تقاضای مهندسی در برابر شدت‌های لرزه‌ای مختلف زلزله است. پس از انتخاب پارامتر شدت لرزه‌ای

به عنوان نمونه برخی حالات خرابی که در زلزله کوبه (۱۹۹۵) در تجهیزات گزارش شده است عبارتند از:
 (الف) واژگونی تجهیزات به‌دلیل شکست میل‌مهرارها
 (ب) تغییرشکل مخزن افقی به جهت امواج مایع داخلی و انفجار یا سوختن مایع قابل اشتغال
 (پ) توقف تولید گاز به‌دلیل نشت از سیستم لوله‌کشی
 (ت) شکست نازل و فلنچ متصل به مخزن به‌دلیل روانگرایی زمین [۱۶].

هدف از این تحقیق، بررسی رفتار لرزه‌ای احتمالاتی مخازن تحت فشار افقی می‌باشد. به همین منظور، در مطالعه موردي، یک HPV که در کارخانه پالایش گاز طبیعی طراحی و ساخته شده بود، با استفاده از روش اجزای محدود، شبیه‌سازی و مدل‌سازی شده و با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی افزاینده (IDA) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. معیارهای خرابی و حالت‌های حدی برای پوسته بدن مخزن افقی، میل‌مهرارهای کفستون‌ها، فلنچ و زانویی لوله‌ها تعیین شد و نتایج تحلیل، نظریه آمار و مدل‌ها برای محاسبه منحنی‌های شکنندگی استفاده شده است. نتایج نشان داد که اتصالات فلنچ لوله‌ها و بدن مخزن افقی بیشتر مستعد شروع خرابی در این مخزن می‌باشد.

^۸- Performance-Based Earthquake Engineering

- ۳- حداکثر چرخش در اتصالات به عنوان EDP برای خرابی فلنچ
 - ۴- حداکثر تنش محوری در سیستم لوله‌کشی به عنوان EDP برای زانویی‌ها
- ۳-۲- مجموعه شتابنگاشت‌های منتخب

جدول ۱، مجموعه‌ای از شتابنگاشت‌های منتخب مورد استفاده در تحقیق و ویژگی‌های آنها شامل بزرگاً برحسب ریشت، حداکثر شتاب زمین (g) و فاصله از محل شکست گسل (R_{rup}^{11}) برحسب کیلومتر را فهرست می‌کند. شتابنگاشت‌های ذکر شده از سایت پییر گردآوری شده است [۲۰]. نتایج تحقیقات پژوهشگران در سال ۲۰۰۵، نشان می‌دهد که هنگام انتخاب مجموعه‌ای از شتابنگاشت‌ها برای تجزیه و تحلیل IDA نیازی به درنظر گرفتن ویژگی‌های وضعیت سایت مانند فاصله و بزرگی نیست [۲۱]. طیف‌های پاسخ شتابنگاشت‌ها با استفاده از روش عددی جنینگز^{۱۲} به صورت مقیاس نشده و مقیاس شده در شکل ۳ نشان داده شده است [۲۲].

به جهت حل عددی یک معادله دینامیکی، روش‌های مختلفی موجود می‌باشد که در منابع معتبر همچون دینامیک سازه‌های چوپرا ارائه شده است. یکی از این روش‌های عددی روش جنینگز یا روش ABCD و یا روش مبتنی بر درون‌یابی خطی تابع تحریک می‌باشد که سرعت حل بالای این روش و پایداری و کارایی بالای آن از مزایای روش مذکور می‌باشد. البته برای حل سیستم تک درجه آزادی تحت شتابنگاشت‌های مرسوم با فواصل زمانی معمول تفاوتی در پاسخ محاسبه شده موجود نمی‌باشد. مقیاس‌سازی شتابنگاشت‌ها براساس مقدار دامنه بیشنه شتاب صورت گرفته است. کلیه شتابنگاشت‌ها براساس مقدار دامنه بیشنه ابتدا در

مناسب مطابق با هدف مورد نظر، رکوردهای انتخابی براساس ضرایب مقیاس افزایشی یا کاهشی، مقیاس می‌شوند. سپس پارامتر تقاضای مهندسی انتخاب شده تحت رکوردهای مختلف و با ضرایب متعدد با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی به دست می‌آید [۱۹]. در ادامه، پارامترها و ضریب مقیاس اعمال شده در مقاله به اختصار تعریف می‌گردد.

۱-۱- پارامتر شدت لرزه‌ای (IM)

پارامتر IM^9 ، پارامتری برداری است که مشخص‌کننده خصوصیتی از جنبش‌های شدید زمین، ناشی از زمین‌لرزه است. در این تحقیق، از حداکثر شتاب زمین برای بیان شدت لرزه‌ای استفاده شده است.

۱-۲- پارامتر نیاز مهندسی (EDP)

پارامتر نیاز مهندسی سازه (EDP^{10}) مشخص‌کننده پارامتری از پاسخ سازه در شدت‌های لرزه‌ای مختلف است. انتخاب EDP، بستگی به وضعیت خرابی مورد نظر دارد و به وضوح وابسته به المان مورد بررسی است. با استناد به تجربیات مشاهده شده در زلزله‌های گذشته، به نظر مرسد که بیشترین آسیب احتمالی به تجهیزات HPV مربوط به خرابی کفستان و میل‌مهرار، پلاستیسیته شدن و شکستگی بدنی اصلی در نزدیکی سدل‌ها و خرابی اتصالات سیستم لوله‌کشی (فلنج‌ها و زانویی‌ها) است [۳ و ۱۶]. EDP‌های زیر برای تهییه منحنی‌های شکنندگی تعیین شده است:

۱- حداکثر تنش بر بدن به عنوان EDP برای خرابی بدن

۲- حداکثر تنش محوری و برشی در هر میل‌مهرار به عنوان EDP برای خرابی میل‌مهرار

¹¹- Rupture

¹²- Jennings

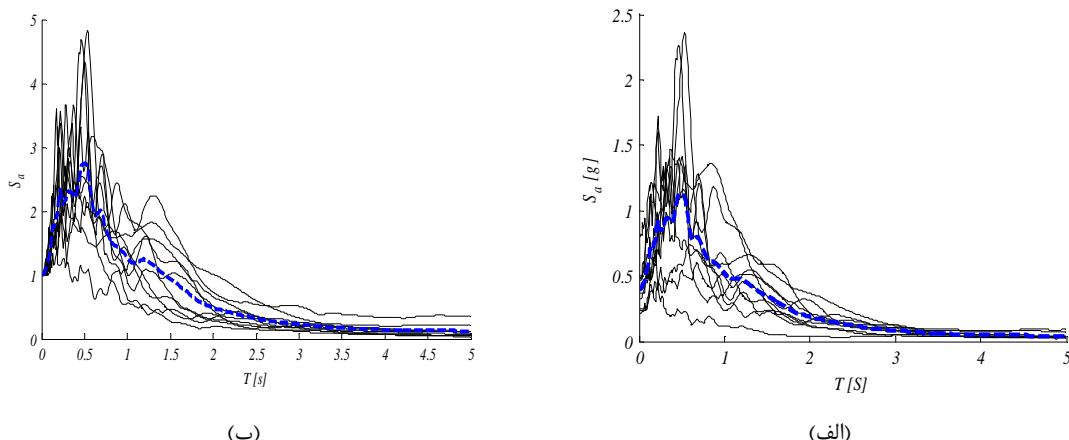
⁹- Intensity Measure

¹⁰- Engineering Demand Parameter

مقیاس ۱g تهیه شده است و سپس تحلیل های دینامیکی با تغییر مقدار دامنه به مقدار دلخواه تحلیل شده اند.

جدول ۱- مجموعه شتابنگاشت های منتخب

شماره	رویداد	ایستگاه	بزرگا	حداکثر شتاب زمین (g)	فاصله (km)
۱	Northridge	Beverly Hills_Mulhol	۶/۷	۰/۴۸	۱۷/۱۵
۲	Duzce, Turkey	Bolu	۷/۱	۰/۸۲	۱۲/۰۴
۳	Hector Mine	Hector	۷/۱	۰/۳۳	۱۱/۶۶
۴	Kobe, Japan	Shin_Osaka	۶/۹	۰/۲۴	۱۹/۱۵
۵	Kocaeli,Turkey	Duzce	۷/۵	۰/۳۶	۱۵/۳۷
۶	Kocaeli,Turkey	Arcelik	۷/۵	۰/۲۲	۱۳/۴۹
۷	Landers	Coolwater	۷/۳	۰/۴۲	۱۹/۷۴
۸	Northridge	Canyon Country_Lost Cany	۶/۷	۰/۴۸	۱۲/۴۴
۹	Kobe, Japan	Nishi_Akashi	۶/۹	۰/۴۹	۷/۰۸
۱۰	Landers	Yermo Fire Station	۷/۳	۰/۲۴	۲۲/۶۲



شکل ۳- طیف پاسخ شبه شتابنگاشت های منتخب و طیف میانگین به صورت (الف) مقیاس نشده و (ب) مقیاس شده با نسبت میرایی٪۵

در این مقاله مقادیر صفر، ۰/۵، ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است.

۵-۲- مشخصات الگوهای بارگزاری در تحلیل IDA

پس از تعریف رکوردها از نوع تاریخچه زمانی در نرم افزار SAP2000، ابتدا بارگزاری ثقلی با تابع رمپ^{۱۴} از نوع تاریخچه زمانی غیرخطی تعریف شده است. پس از آن، بارگزاری های جانبی برای هر رکورد در دو جهت X و Y با میرایی ۰/۰۲ و دوره تناوب مربوط به جهت اعمال زلزله، معرفی گردیده است. ضرایب مقیاس اعمال شده در

۴-۲- ضریب مقیاس

ضریب مقیاس (SF^{13}) یک عدد مثبت بین صفر تا بینهایت است که با ضرب در شتابنگاشت اولیه، شتابنگاشت های مقیاس شده حاصل می شود [۱۸].

$$SF = \frac{PGA(i)}{PGA} \quad (1)$$

در رابطه فوق، PGA بیشینه شتاب زمین و (i) برابر با مقدار عددی مدنظر برای هر شدت لرزاوی است که

¹⁴- Ramp

¹³- Scale Factor

یکی از مزایای استفاده از IDA این است که حالات خرابی مطابق با معیارهای عملکردی ایجاد شده توسط محقق، ارزیابی شود. این روش می‌تواند در عنصر سازه‌ای (مانند قاب‌های مقاوم در برابر نیروی جانبی) یا اجزای غیرسازه‌ای (مانند سیستم لوله‌کشی) اعمال گردد [۳]. همچنین بهدلیل کمبود دستورالعمل‌های طراحی لرزه‌ای کافی و یکنواخت برای صنعت پتروشیمی، نفت و سیستم‌های لوله‌کشی گاز، طراحان مجبور به پیروی از استانداردهای در نظر گرفته شده برای سایر سازه‌ها مانند ساختمان‌ها و نیروگاه‌های هسته‌ای هستند. در تحقیق پژوهشگران از روش‌های مبتنی بر تنش و کرنش مجاز جهت تعیین سطوح خرابی استفاده کردند [۲۴].

با توجه به گزارش‌های خرابی، تنش محوری و تنش برشی به عنوان EDP برای میل‌مهارها انتخاب گردید [۳ و ۱۶]. بهدلیل نبود منبعی مناسب، در این مقاله سطوح خرابی طبق تنش تسلیم فولاد براساس مطالعات موجود در این زمینه و قضاوت مهندسی تعریف شده‌اند [۲۴].

جهت محاسبه نشت لوله‌ها از فرمول تحریی ارائه شده در پایان‌نامه دانسی، $\theta /D_0 < 25^\circ$ بهمنظور سطح خرابی فلنچ لوله‌ها استفاده شده است، که در رابطه ذکر شده θ زاویه چرخش فلنچ لوله‌ها، D_0 قطر لوله‌ها و 25° عدد ثابت معادل برای تعیین سطوح تنش محوری در لوله‌های نزدیک به زانویی‌ها از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\sigma = \frac{P_c d_0}{4e_n} + 0.75i \frac{M_A + M_B}{z} \leq kf_n \quad (3)$$

که در آن، P_c فشار داخلی، d_0 قطر خارجی لوله، e_n ضخامت لوله، 0.75 ضریب تشدید تنش که در لوله‌های مستقیم یک می‌باشد، M_A گشتاور خمی در اثر بارهای دائمی و M_B گشتاور خمی در اثر بارهای آنی و Z اساس مقطع می‌باشد. ضریب k برای زلزله سطح بهره‌برداری برابر با $1/2$ و برای زلزله سطح توقف بهره‌برداری $1/8$ می‌باشد [۲۴]. جنس فولاد اختیار شده

هر شتاب‌نگاشت در ۶ گام مقدایر صفر، $0/5$ ، $1/5$ در نظر گرفته شده است. در بارگذاری‌های جانبی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در ادامه بارگذاری ثقلی تعریف شده انجام می‌شود. به‌طور کلی، سازه تحت ۱۰ رکورد، در هر دو جهت افقی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳- منحنی‌های شکنندگی

تابع شکنندگی یک عضو برای یک وضعیت خرابی مشخص، احتمال اینکه عضو در وضعیت خرابی (DS^{۱۵}) یا وضعیت خرابی بدتری، پس از تجربه هر مقدار داده شده از EDP قرار بگیرد، را بیان می‌کند. بنابراین ابتدا یک DS مناسب جهت ناظارت بر عملکرد عضو با توجه به تعريف می‌شود. این موضوع در حال حاضر در بخش (۲-۲) مشخص شده است. سپس لازم است یک مقدار آستانه EDPcap (یا ظرفیت) که شروع DS یا خرابی را نشان می‌دهد، تعریف شود. جهت به‌دست آوردن منحنی شکنندگی از رابطه (۲) که توسط کارورا و بارن^{۱۶} ارایه شده است، استفاده می‌گردد [۲۳]:

$$fragility = P \{ EDP \geq EDP_{CAP} IM \} \quad (2)$$

در رابطه بالا، احتمال رسیدن یا گذر خسارت EDP (پارامتر پاسخ تغییرشکل، نیرو، سرعت و غیره) از حد آستانه پاسخ EDPcap که برابر با آغاز خرابی است در شدت زمین‌لرزه IM می‌باشد. جهت به‌دست آوردن منحنی‌های شکنندگی براساس نتایج تحلیل‌های دینامیکی افزایشی در گام اول، سطوح تعیین‌کننده خرابی معرفی شده، سپس تشکیل ماتریس پاسخ و در ادامه با استفاده از روابط آماری تحلیل می‌شوند.

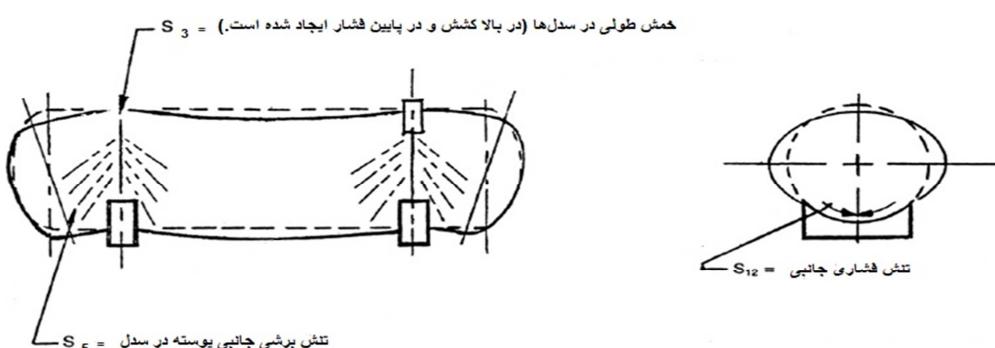
۳-۱- سطوح خرابی تجهیزات در تحقیق حاضر

¹⁵- Damage State

¹⁶- Corvera and Barron

از آنجاکه هیچ نام مشترکی برای سطوح مختلف عملکردی وجود ندارد، از اصطلاحات نشان داده شده در جدول‌های مربوط به هر حالت خرابی که در ادامه ذکر می‌شود، جهت تعیین سطوح عملکردی تجهیزات استفاده شده است. جدول‌های ۲ و ۳، به ترتیب حالت‌های حدی شکست محوری و شکست برشی میل‌مهارها را نشان می‌دهد. جدول ۴، مربوط به حالت حدی نشت لوله‌ها می‌باشد، همچنین حالت‌های حدی شکست زانویی و لوله‌ها در جدول ۵، ارایه شده است. در جدول ۶، حالت‌های حدی تغییرشکل جداره تعیین شده است. همچنین مقادیر ۷ برابر تنش موجود در اجزا F_y ، حداقل تنش تسلیم و F_u معادل تنش نهایی موجود در اجزا می‌باشد.

برای لوله‌ها از نوع A105 با تنש مجاز $F_u = 2530$ کیلوگرم بر سانتیمترمربع اعلام شده است. عواملی چون تأثیرات تکیه‌گاه‌ها، تنوع ضخامت و مقاطع، نازل‌ها، متعلقات خارجی و خمس کلی به علت وزن، نیروهای باد و زلزله، به طور کلی، باعث توزیع تنش‌های مختلف در مخزن افقی می‌باشد. تنش‌های بحرانی در مجاورت سدل شامل تنش خمشی طولی در سدل، تنش برشی در اطراف سدل و تنش فشاری در پایین سدل می‌باشند که در مرجع با عنوان مقادیر S3 و S5 و S12 معرفی شده‌اند و محل آنها در جداره مخزن افقی در شکل ۴ نشان داده شده است. روابط تنش مجاز بدنی از هندبوک طراحی مخازن تحت فشار حاصل شده است که S تنش کششی مجاز و E ضریب کاهشی در همه معادلات برابر 0.85 است [۲۵].



شکل ۴- برخی از تنش‌های ایجاد شده در جداره بدن [۲۶]

جدول ۲- حالت‌های حدی شکست محوری میل‌مهار

نام حالت حدی	معادله حالت حدی و مقدار مجاز مربوطه	بارامتر تقاضای مهندسی
سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه در رفتار محوری میل‌مهار (AAIO ^{۱۷})	$\sigma = 0.6F_y$ $\sigma = 4429(kg/cm^2)$	تنش محوری
سطح عملکرد ایمنی جانی در رفتار محوری میل‌مهار (AALS ^{۱۸})	$\sigma = F_y$ $\sigma = 7382(kg/cm^2)$	
سطح عملکرد آستانه فروریزش در رفتار محوری میل‌مهار (AACP ^{۱۹})	$\sigma = F_u$ $\sigma = 8788(kg/cm^2)$	

¹⁷- Anchors Axial Immediate Occupancy

¹⁸- Anchors Axial Life Safty

¹⁹- Anchors Axial Collaps

$$F_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \quad (4)$$

$0 \leq x < \infty$

در رابطه (۴)، λ و ζ دو پارامتر توزیع لگاریتم نرمال متغیر تصادفی x هستند.

۳-۲-۳- ماتریس پاسخ لرزه‌ای

پس از انجام تحلیل‌های دینامیکی افزایشی و استخراج پاسخ‌های سازه‌ای، ماتریس‌های پاسخ به ابعاد تعداد شتاب‌نگاشت در تعداد ضرایب مقیاس IM، برای هریک از حالت‌های خرابی تشکیل می‌شوند. پاسخ‌های سازه‌ای دارای توزیع لگاریتم نرمال باتابع چگالی احتمالاتی (PDF) به صورت زیر هستند:

جدول ۳- حالت‌های حدی شکست برشی میل‌مهرار

پارامتر تقاضای مهندسی	معادله حالت حدی و مقدار مجاز مربوطه	نام حالت حدی
تنش برشی	$\tau = 0.4F_y$	سطح عملکرد استفاده بی‌وقفه در رفتار برشی میل‌مهرار (ASIO ^{۲۰})
	$\tau = 2953(kg/cm^2)$	سطح عملکرد ایمنی جانی در رفتار برشی میل‌مهرار (ASLS ^{۲۱})
	$\tau = 0.6F_y$	سطح عملکرد آستانه فروریزش در رفتار برشی میل‌مهرار (ASCP ^{۲۲})
	$\tau = 4429(kg/cm^2)$	
	$\tau = F_y$	
	$\tau = 7382(kg/cm^2)$	

جدول ۴- حالت حدی نشت لوله‌ها

پارامتر تقاضای مهندسی	معادله حالت حدی و مقدار مجاز مربوطه	نام حالت حدی
چرخش فلنچ (FR ^{۲۳})	$\theta = \frac{2\bar{S}}{D_0}$ $* * D_0 = 0.2032(in), \theta = 0.00475(rad)$ $* D_0 = 0.508(in), \theta = 0.0019(rad) ...$	چرخش در محل فلنچ لوله‌ها

توجه: * قطر و مقدار دوران مجاز لوله اول و سوم را نشان می‌دهد.
** قطر و مقدار دوران مجاز لوله دوم را نشان می‌دهد.

جدول ۵- حالت‌های حدی شکست زانویی و لوله

پارامتر تقاضای مهندسی	معادله حالت حدی و مقدار مجاز مربوطه	نام حالت حدی
تنش محوری	$\sigma = 1.2f_n$ $\sigma = 3036(kg/cm^2)$	زلزله سطح بهره برداری (OBE ^{۲۴})
	$\sigma = 1.8f_n$ $\sigma = 4554(kg/cm^2)$	زلزله سطح توقف بهره برداری (SSE ^{۲۵})

۲۰- Anchors Shear Immediate Occupancy

۲۱- Anchors Shear Life Safty

۲۲- Anchors Shear Collaps

۲۳- Flang Rotation

۲۴- Operating Basis Earthquake

۲۵- Safe Shutdown Earthquake

$$\begin{aligned} P(S > s | \text{PGA}) &= P(X_i > x_i | \text{PGA}) \\ &= 1 - \Phi\left[\frac{\ln(x_i) - \lambda}{\zeta}\right] \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن، ϕ تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد، x_i کران بالای (i) و S_i (III, II, I = i) و λ و ζ همانگونه که در بخش ۳-۲ تعریف شد به سطح PGA وابسته می‌باشد [۱۸].

۴- معرفی مدل، مدل‌سازی و شرح مراحل

تجهیز در نظر گرفته شده جهت مطالعه لرزه‌ای احتمالی HPV‌ها، مخزن فولادی استوانه‌ای افقی به شماره ۲۰۰-۰۳ V-۰۳ در مجتمع شیرین‌سازی گاز در جزیره قشم در ایران طراحی و ساخته شده است. تجهیز HPV انتخاب شده یک ظرف تبخیر آمین غنی شده بود که مطابق آیین‌نامه ASME طراحی شده بود. مشخصات مکانیکی مصالح HPV براساس اطلاعات درج شده در نقشه‌های مکانیکی در جدول ۷ ارایه شده است.

آنها را می‌توان از اطلاعات دو پارامتر توزیع نرمال (میانگین μ و انحراف استاندارد σ) جامعه نمونه، مطابق روابط (۵) و (۶) محاسبه نمود:

$$\lambda = \ln \mu - \frac{1}{2} \zeta^2 \quad (5)$$

$$\zeta = \ln [1 + \delta^2] \quad (6)$$

در رابطه (۶)، δ با مقدار μ/σ برابر است [۱۸].

۳-۳- تحلیل شکنندگی

در منحنی شکنندگی برای حالت خرابی Si احتمال شرطی تجاوز خرابی ایجادشده در مخزن افقی و لوله‌ها بیش از سطح خرابی معین Si در یک سطح مشخص PGA است. این تعریف به صورت رابطه (۷) قابل بیان است:

جدول ۶- حالت‌های حدی تغییرشکل جداره

پارامتر تقاضای مهندسی	معادله حالت حدی و مقدار مجاز مربوطه	نام حالت حدی
تنش خمشی بدنه ^{۲۶}	$\sigma = SE$ $\sigma = 1392(kg/cm^2)$	(BBS ^{۲۶}
تنش برشی بدنه ^{۲۷}	$\tau = 0.8S$ $\tau = 1310(kg/cm^2)$	(BSS ^{۲۷}
تنش فشاری بدنه ^{۲۸}	$\sigma = 1.5S$ $\sigma = 2457(kg/cm^2)$	(BCS ^{۲۸}

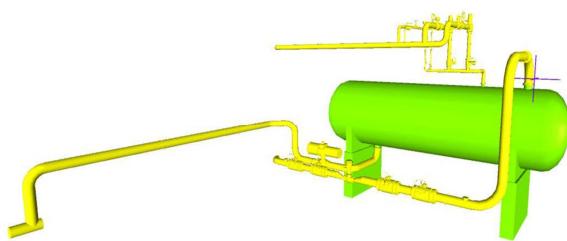
جدول ۷- مشخصات مکانیکی مصالح

فولاد				بتن	نوع مواد
بدنه و رینگ	سدل	لوله	میل مهار	فونداسیون	کاربرد
SA516_70N	SA283_C	SA105	A193_B7	C25	استاندارد
۷۸۵۰	۷۸۵۰	۷۸۵۰	۷۸۵۰	۲۵۰۰	(kg/m ³)
$2/1 \times 10^6$	$2/1 \times 10^6$	$2/1 \times 10^6$	$2/1 \times 10^6$	$2/5 \times 10^5$	(kg/cm ²)
۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۲	ضریب پواسون
۳۴۱۶	۲۰۹۰	۲۵۴۹	۷۳۸۲	۲۵۰	(kg/cm ²)
۵۲۰۰	۳۸۷۴	۴۹۴۵	۸۷۸۸	۲۵۰	(kg/cm ²)
تنش نهایی				تنش نهایی	

²⁶- Body Bending Stress

²⁷- Body Shear Stress

²⁸- Body Compression Stress

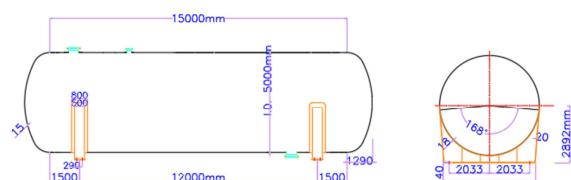


شکل ۶- تصویر سه بعدی HPV به همراه لوله‌های متصل (خروجی نرم‌افزار NavisWorks)

مدل اجزای محدود مخزن افقی در برنامه Sap2000V14.2 تهیه شده است. جهت تحلیل مخزن با توجه به صلب بودن مخزن، مشکلات عددی حین تحلیل و نیاز به در نظر گرفتن رفتار اجزای متعدد نظیر تنش در لوله‌ها و زانویی‌ها، دوران در فلنجها، و با توجه به وقت محدود این مطالعه، مدل‌سازی بدنه اصلی مخزن، سدل‌ها، صفحات تحتانی و پدستال‌ها، با المان سطحی (Shell) نوع خطی تعریف شده است. رفتار مصالح فولاد و بتن نیز خطی تعریف شده‌اند، که مشخصات آنها پیش‌تر در جدول ۷ ارایه شده است. با توجه به مدل‌سازی با استفاده از المان خطی شل در این تحقیق، در مدل‌های مختلف، سایزهای مختلف مش کنترل گردید و مش بهینه در مدل‌سازی استفاده شده است. با توجه به گزارشات موجود مربوط به خرایی‌های مخازن تحت فشار افقی و مشاهده خرایی این تجهیزات که در کف ستون و میل‌مهرارها اتفاق می‌افتد، رفتار کف ستون‌ها با تعریف المان‌های لینک خطی برای فشار کف و تنش محوری میل‌مهرار تعریف شده است [۳ و ۱۶]. بخشی از سیستم لوله‌کشی مجاور به HPV که می‌تواند جابه‌جایی لرزه‌ای را تجربه کند و تحت تأثیر واکنش مخزن قرار بگیرد با استفاده از عضو استخوانی^{۲۹} با سطح مقطع لوله مدل شده‌اند. برای تجهیز مورد بررسی سه خط لوله ایجاد شده است، دو خط لوله با قطر ۵۰۸ میلی‌متر، ضخامت ۳۵/۶ میلی‌متر در بالا و پایین مخزن و یک خط لوله دیگر با قطر ۲۰۳/۲ میلی‌متر، ضخامت ۳/۷۶ میلی‌متر در بالای مخزن مدل‌سازی شده

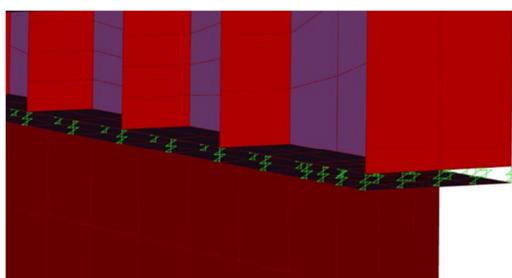
^{۲۹}- Frame

فشار طراحی مخزن ۵ بار (۵۰ تن بر مترمربع) و PGA طرح $g = ۰/۳$ است. ظرفیت مخزن افقی ۳۲۷ مترمکعب، قطر داخلی ۵ متر، طول مخزن افقی در قسمت استوانه‌ای (فاصله بین خطوط مماس به مماس) ۱۵ متر، طول کلی ۱۸ متر، فاصله بین سدل‌ها ۱۲ متر و ضخامت بدنه اصلی غیر از اطراف سدل‌های تقویت شده، ۱۵ میلی‌متر بود. بدنه در هر سدل با یک رینگ سخت‌کننده به ضخامت ۱۸ میلی‌متر تقویت شده است. ضخامت سدل‌ها ۲۰ میلی‌متر می‌باشد و هر سدل با دو صفحه سخت‌کننده جانبی و ۴ صفحه سخت‌کننده میانی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر تقویت شده است. ورق تحتانی یا کف‌ستون سدل‌ها $4666 \times 4666 \times 500$ میلی‌متر می‌باشد. برای هر سدل چهار میل‌مهرار M64 با فاصله ۴۰۶۶ میلی‌متر از یکدیگر در جهت عرضی و در فاصله ۲۹۰ میلی‌متر در جهت طولی همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، استفاده شدند. سدل‌ها بر روی پدستال‌های بتنی با ۱۵۰۰ میلی‌متر ارتفاع، ۴۶۶۶ میلی‌متر در جهت عرضی و ۸۰۰ میلی‌متر در جهت طولی مخزن نصب شده‌اند. لازم به ذکر است تمام اندازه‌های مربوط به اجزای تجهیز مورد بررسی در شکل ۵ بر حسب میلی‌متر ارایه شده است. شکل ۶، نمای سه‌بعدی مخزن و سیستم لوله‌کشی متصل به آن را نشان می‌دهد. در این تحقیق برای به دست آوردن اندازه و جهت لوله‌های متصل به مخزن از برنامه NavisWorks و فایل مربوط به پالایشگاه مخزن مورد بررسی، استفاده شده است.



شکل ۵- ابعاد HPV و سدل‌ها

ستون از بتن زیرین، فترهایی از نوع غیرخطی با حذف اثر انتقال کشش مدل سازی شده‌اند. همچنین مفصل پلاستیک وسط میل مهار نیز در نظر گرفته شده است. در ادامه، به شرح خصوصیات فنرها و مفصل پلاستیک پرداخته می‌شود. شایان ذکر است مخازن افقی مورد مطالعه، عمدتاً رفتار صلب‌گونه‌ای دارند و بنابر گزارشات مشاهده خرابی‌ها در زلزله‌های متعدد، رفتار غیرخطی بیشتر در کفستون و میل مهارها مشاهده گردیده است [۳ و ۱۶]. نوع فنر، چندخطی الاستیک^{۳۰} قرار داده شده است از آنجاکه فنرها موہومی هستند و حالت حقیقی ندارند، بنابراین رفتار پلاستیک برای آنها تعریف نشده است. همچنین ضریب سختی فشاری فنر عدد بالایی و مقدار ضریب میرایی در این قسمت ۰/۰۵ فرض شده است. فنر در راستای Z تعریف گردیده و در دو راستای دیگر ثابت فرض شده است. کشش در فنر نزدیک به صفر در نظر گرفته شده است. یکی از روش‌های مدل سازی، استفاده از لینک‌های فنر است که کشش را تحمل نمی‌کند و فقط فشار را تحمل می‌کنند [۲۷]. تعداد ۳۶ فنر به طول ۵۰ میلیمتر به طور متقارن و حدوداً یکی در میان، در نقاط مشبندی شده در فاصله بین صفحه سدل و صفحه فونداسیون اختصاص داده شده‌اند. شکل ۹، شبیه‌سازی کفستون را در مدل FEM نشان می‌دهد.



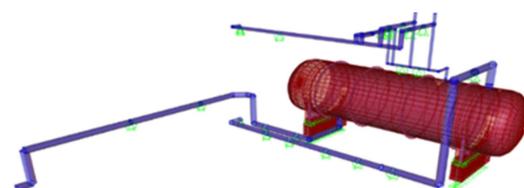
شکل ۹- مدل سازی سدل به پدستال با استفاده از المان‌های لینک

میل مهارها از عضو استخوانی با سطح مقطع گرد و قطر و ارتفاع ۵۰ میلیمتر که در وسط آنها مفصل

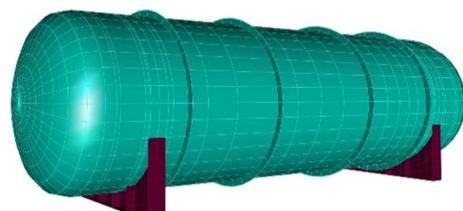
^{۳۰}- Multilinear Elastic

است. در این مدل در محل شیرآلات موجود روی لوله‌ها و همچنین نقاط حساس تنشی بر روی لوله‌ها مثل زانوبی‌ها، نقاطی جهت استخراج تغییرشکل و تنش در نظر گرفته شده است.

خطوط لوله در محل تکیه‌گاه‌ها مطابق با طراحی لوله‌کشی از نوع ثابت و یا لغزنه در طول لوله اعمال شده است و در محل تکیه‌گاه‌ها، حرکت جانبی لوله‌ها مقید شده است. تکیه‌گاه‌های انتهایی لوله‌ها، محل آن‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده است که در نتایج تحلیل مؤثر نباشد و به صورت مفصلی اعمال شده‌اند. شکل ۷، نمای سه‌بعدی مدل را در برنامه Sap2000 نشان می‌دهد. علاوه‌بر بدنه مخزن، پدستال‌ها و لوله‌ها دیده می‌شوند. شکل ۸، جزئیات بیشتری از بدنه مخزن افقی و سدل‌ها را نشان می‌دهد.



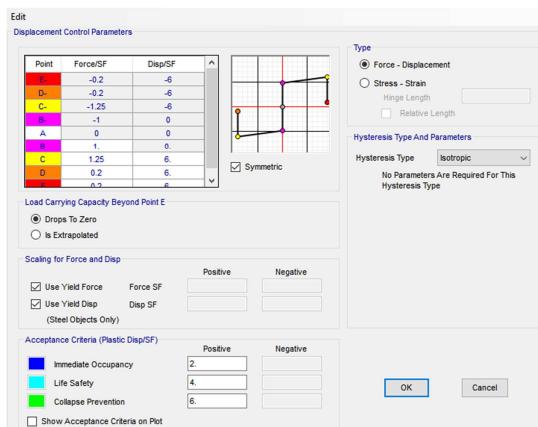
شکل ۷- تجهیز مدل سازی شده



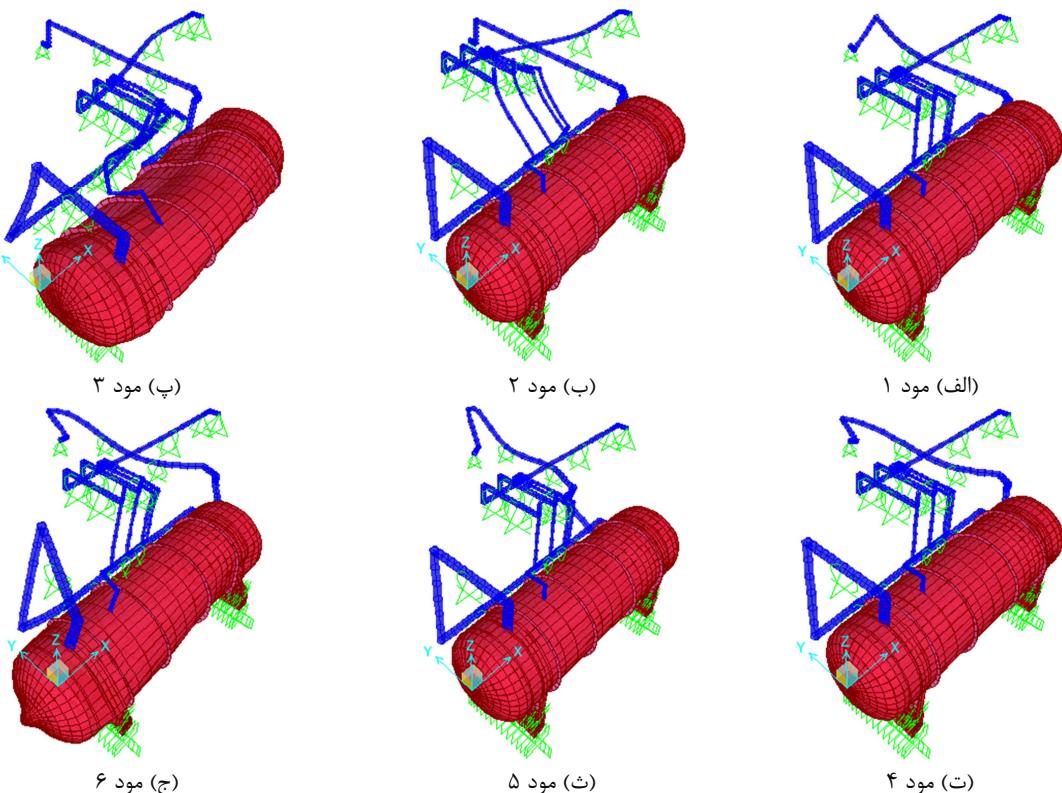
شکل ۸- بدنه و سدل‌ها

با توجه به حجمی مدل تحلیلی، در این مدل فونداسیون و اندرکنش خاک- سازه در نظر گرفته نشده است. برای در نظر گرفتن رفتار دقیق‌تر کفستون‌ها (صفحه تحتانی سدل‌ها به پدستال‌ها) و اعمال بلندشدن‌گی صفحه از روی پدستال‌ها و در نظر گرفتن رفتار میل مهار در عملکرد لردهای HPV، کفستون و ناحیه تماس بتنی آن در زیر صفحه ستون با هندسه یکسانی مدل شده‌اند. با توجه به تأثیرگذاری رفتار کفستون بر رفتار کلی سازه به ویژه اثرات حرکتی بر روی لوله‌ها، جهت مدل سازی رفتار میل مهارها و در نظر گرفتن اثر بلندشدن‌گی صفحه

نتایج تحلیل مودال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل مودال در شکل ۱۱ و در جدول ۸ ارایه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود حالت‌های غالب در جهت طولی مود ۵ و در جهت عرضی مود ۱ می‌باشد.



شکل ۱۰- تعریف مفصل پلاستیک میل مهارها



شکل ۱۱- شکل ۶ مود اول ارتعاش برای مخزن ثابت (200-V-03)

تحقیق، ۶ مرتبه تحلیل در دو جهت طولی و عرضی برای ۱۰ شتاب‌نگاشت اجرا شده است. نتیجه یک منحنی پیوسته در صفحه IM-EDP است که به کاربر اجازه

پلاستیک تعریف شده است، مدل شده‌اند؛ زیرا این عضو می‌تواند نیروی محوری و برشی را در میل‌مهارها نشان دهد. مفصل پلاستیک از نوع شکل‌پذیر براساس نیروی محوری تعریف شده است. فرضیات در نظر گرفته شده برای مفصل پلاستیک در شکل ۱۰ ارایه شده است. بارگذاری مخزن افقی و سیستم لوله‌کشی، شامل وزن تجهیزات (بار مرده) و وزن سیال (بار بهره‌برداری) است.

بار مرده توسط نرم‌افزار محاسبه و به مدل اعمال می‌شود. بار بهره‌برداری نیز مطابق با مبانی ارایه شده در مشخصات فنی سازنده تجهیز محاسبه و به سازه وارد می‌شود. با توجه به اینکه در مدل‌سازی تجهیز و لوله‌های مربوطه اطمینان حاصل گردد که نوع مدل‌سازی به‌گونه‌ای است که رفتار اصلی مخزن را تحت تأثیر قرار نداده است،

۵- اجرای تحلیل‌های IDA

یک منحنی واحد IDA با وارد کردن نقاط گسسته حاصل از تجزیه و تحلیل دینامیکی تولید می‌شود. در این

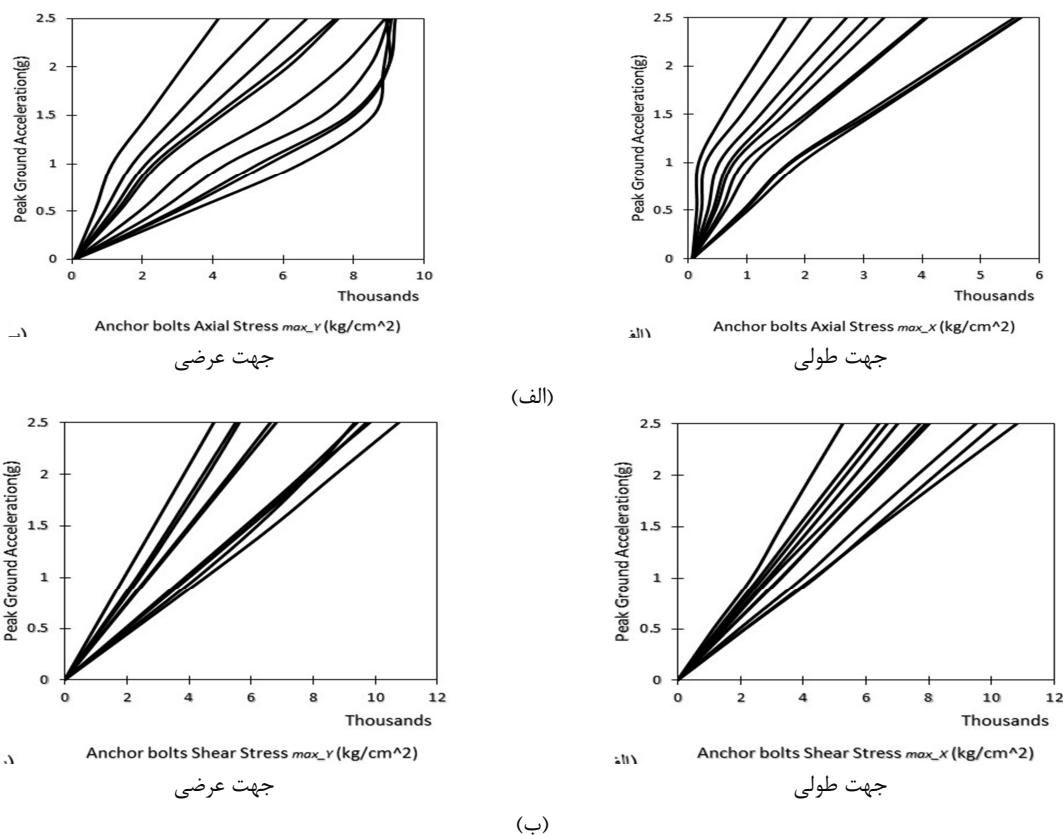
می‌دهد مقدار EDP را در هر مقدار IM بدون هیچگونه اجرای اضافی به دست آورد.

جدول ۸- درصد مشارکت جرمی مودهای تحلیلی تجهیز مدل‌سازی شده

شماره مود	دوره تناب	U_x	U_y	U_z
۱	۰/۱۹۹۴	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۵۰۰۲۵۲	۰/۰۰۰۰۹۶
۲	۰/۱۸۴۸	۰/۰۰۰۱۱۳	۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۷۳
۳	۰/۱۷۱۶	۰/۰۰۶۲۳۳	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۲۹
۴	۰/۱۵۴۷	۰/۰۵۰۰۳۸	۰/۰۰۰۳۰۸۱	۰/۰۰۰۰۹۲
۵	۰/۱۴	۰/۸۲۳۲۰۴	۰/۰۰۰۱۵۴	۰/۰۰۰۰۲۲
۶	۰/۱۲۱۶	۰/۰۰۰۰۵۳	۰/۰۰۰۶۱	۰/۰۰۰۰۷۷

منحنی‌ها برای حداکثر تنش محوری زانویه‌های لوله‌های متصل به مخزن در جهت‌های طولی و عرضی ارایه شده است.

شکل ۱۲، منحنی‌های IDA برای رفتار محوری و رفتار برشی میل‌مهرهای مخزن در دو جهت افقی نشان می‌دهد در شکل ۱۳، منحنی‌های IDA برای حداکثر چرخش در اتصالات فلنجهای مخزن و همچنین این



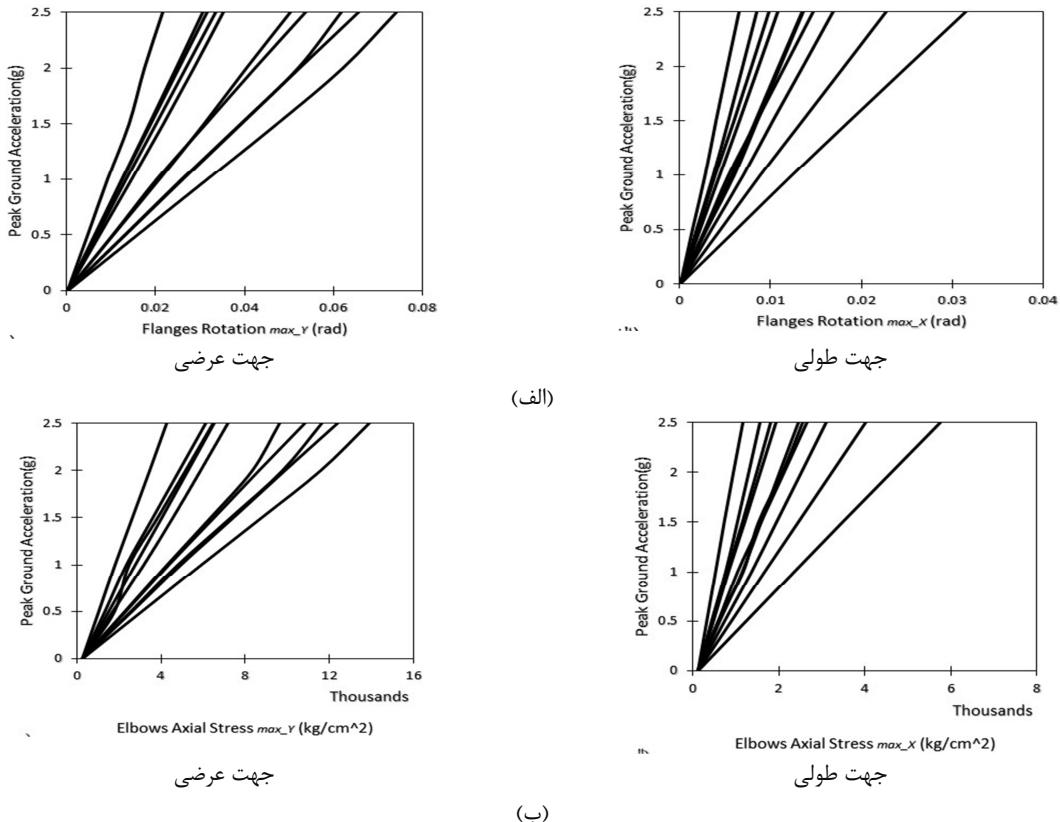
شکل ۱۲- منحنی‌های IDA برای رفتار (الف) محوری و (ب) برشی میل‌مهرهای مخزن افقی (200-V-03) در جهت طولی و عرضی

منحنی‌های IDA برای یک ساختمان مسکونی نشان‌دهنده رفتارهای نرم‌شونده، سخت‌شونده، بازگشتی و سخت‌شوندگی شدید می‌باشد. با توجه به سختی قابل ملاحظه HPV همانظور که در شکل‌ها مشاهده

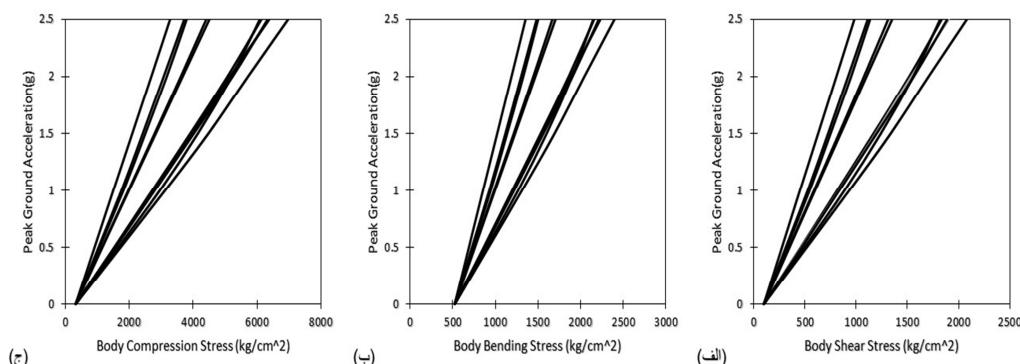
شکل ۱۴ نیز منحنی‌های IDA برای سه حالت حداکثر تنش بر بدن را ارایه می‌دهد. نتایج هریک از حالات خرابی تعریف شده در بخش دوم به صورت منحنی‌های IDA ارایه شده است. به طور کلی،

قانون جابه‌جایی برابر پیروی می‌کنند. در این حالت، جابه‌جایی حاصل از تجزیه و تحلیل سیستم الاستیک با سیستم غیرالاستیک تقریباً برابر است [۲۸].

می‌شود، منحنی‌های IDA تقریباً خطی هستند (از نوع سخت‌شونده). برای نوع سخت‌شونده، منحنی‌های IDA به صورت خطی تغییر می‌کنند و این سازه‌ها عموماً از



شکل ۱۳- منحنی‌های IDA برای حداکثر (الف) چرخش در اتصالات فلنج‌ها و (ب) تنش محوری زانویی لوله‌های متصل به مخزن افقی (۲۰۰-V-03) در جهت طولی و عرضی



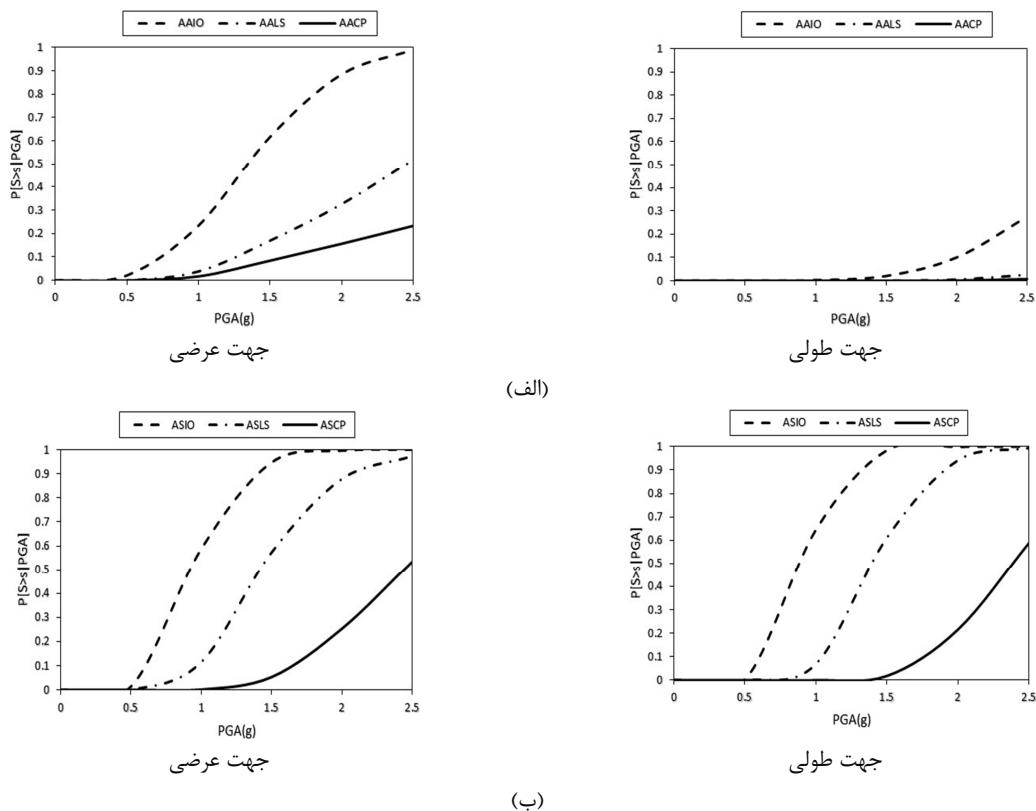
شکل ۱۴- منحنی‌های IDA برای سه حالت حداکثر تنش بر بدن مخزن افقی (۲۰۰-V-03) (الف) تنش برشی، (ب) تنش خمشی و (ج) تنش فشاری بدن

اشاره می‌شوند، برای حالات خارجی تعریف شده در بخش دوم و براساس سطوح عملکردی ذکر شده در بخش سوم در دو جهت طولی و عرضی نشان داده شده است. شکل ۱۵، منحنی‌های شکنندگی برای رفتار محوری و رفتار

آسیب‌پذیری لرزه‌ای یک عضو سازه‌ای یا غیرسازه‌ای می‌تواند به صورت گرافیکی از طریق توابع شکنندگی تهیی شده، بیان شود [۳]. جهت ارزیابی سازه مورد بررسی شکل‌های مربوط به منحنی‌های شکنندگی که در ادامه

رفتار محوری میل‌مهرها در سه سطح عملکردی تعریف شده بحرانی‌تر است.

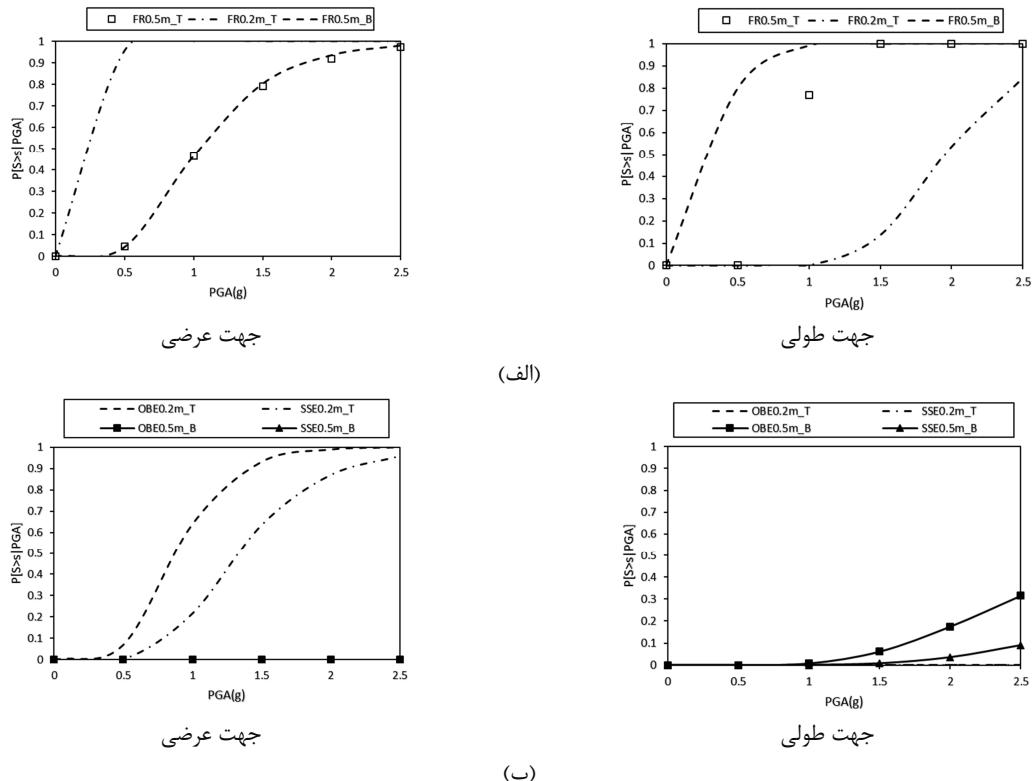
برشی میل‌مهرهای مخزن را نشان می‌دهد. با مقایسه نمودارهای شکل ۱۵، مشاهده می‌شود رفتار برشی میل‌مهرهای مخزن در دو جهت طولی و عرضی نسبت به



شکل ۱۵- منحنی‌های شکنندگی برای رفتار (الف) محوری و (ب) برشی میل‌مهرهای مخزن افقی (V-03-200) در جهت طولی و عرضی

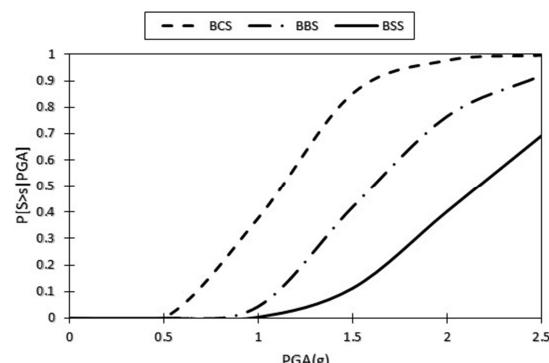
شکل ۱۶- ب نشان داده شده است. براساس جدول ۵، در زانویی‌ها دو سطح عملکردی تعریف شده است. همانطور که در شکل ۱۶- ب مشاهده می‌شود، در زلزله جهت طولی، امنیت لرزاها زانویی بیشتر است؛ زیرا از ۱ g وارد خرابی می‌شود. همچنانی لوله‌های ۰/۵۰۸ متر نسبت به زانویی لوله‌ی با قطر ۰/۲۰۳۲ متر بحرانی‌تر است، ولی در زلزله جهت عرضی زانویی مربوط به لوله با قطر ۰/۲۰۳۲ متر در دو سطح عملکردی تعریف شده در حدود ۰/۵ g وارد خرابی می‌شوند، در حالی که زانویی‌های لوله ۰/۵۰۸ متر دچار خرابی نمی‌شوند. لازم به ذکر است که زانویی لوله ۰/۵۰۸ متر که در بالای مخزن قرار دارد تا ۰/۲۵ g بررسی شده است، در دو جهت وارد هیچ سطحی از خرابی نمی‌شود.

منحنی‌های شکنندگی برای حداکثر چرخش فلنچها در شکل ۱۶- الف ارایه شده است. همانطور که در بخش ۴ اشاره شد، مخزن دارای ۳ خط لوله می‌باشد که هر کدام دارای فلنچ و زانویی می‌باشند. در راهنمای نمودار هر فلنچ با قطر لوله مربوطه و موقعیت قرارگیری آن بر روی مخزن معرفی شده است. برای مثال، FR0.5m_T حداکثر چرخش فلنچ با قطر ۰/۵ متر که در بالای مخزن قرار دارد، می‌باشد. مطابق شکل ۱۶- الف، در زلزله جهت طولی، فلنچها با قطر بزرگتر ۰/۵۰۸ متر نسبت به فلنچ ۰/۲۰۳۲ متر زودتر به مرحله خرابی می‌رسد. این در حالی است که در زلزله جهت عرضی ضعیفترین فلنچ با قطر ۰/۲۰۳۲ متر که حدوداً وسط و بالای مخزن قرار دارد مستعد خرابی است. همچنانی منحنی‌های شکنندگی برای حداکثر تنش محوری زانویی لوله‌های متصل به مخزن در



شکل ۱۶- منحنی‌های شکنندگی برای حداکثر (الف) چرخش در اتصالات فلنجها و (ب) تنش محوری زانویی لوله‌های متصل به مخزن افقی (200-V-03) در جهت طولی و عرضی

مخزن با در نظر گرفتن اثرات حرکتی سیال، به سطح تنش‌های بالاتر از انتظارشان رسیدند و دلیل آن را اتصال مخزن به ستونک‌های بتونی کوتاه و سختی بالای آنها دانستند.



شکل ۱۷- منحنی‌های شکنندگی برای سه حالت حداکثر تنش بر بدن مخزن افقی (200-V-03) تنش برشی، تنش خمی و تنش فشاری بدن

از طرفی، برای مخازن تحت فشار نیز با توجه به نیاز اینمی باشد، حتی برای مناطق با لرزه‌خیزی کم، ارزیابی فراتر از ضوابط آیین‌نامه‌ای را توصیه کردند. براساس

شکل ۱۷، منحنی‌های شکنندگی مربوط به سه حالت حداکثر تنش بر بدن را ارایه می‌دهد. مقادیر احتمال حاصل شده متناظر با سطوح عملکردی برای تجهیز مورد مطالعه، می‌توانند معیاری برای ارزیابی سازه‌های مشابه باشند. در جدول ۶، سه حالت حداکثر تنش بر بدن مخزن تعریف شده و در شکل ۴، مکان آنها بر روی مخزن نشان داده شده است. طبق منحنی‌های شکنندگی در شکل ۱۷ که مربوط به بدن مخزن افقی می‌باشد، مربوط به تنش فشاری جانبی بدن نسبت به سایر نقاط بدن مخزن زودتر به خرابی می‌رسد.

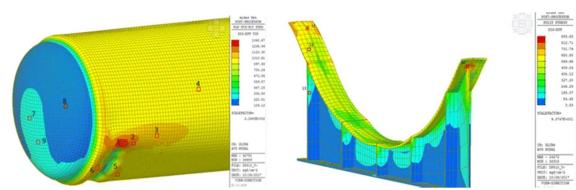
۶- صحتسنجی

با توجه به بزرگ‌مقیاس بودن این تجهیزات، نتایج آزمایشگاهی جهت صحتسنجی مدل وجود ندارد. فیوره^{۳۱} و همکاران، در بررسی اجزای محدود لرزمای یک

^{۳۱}- Fiore

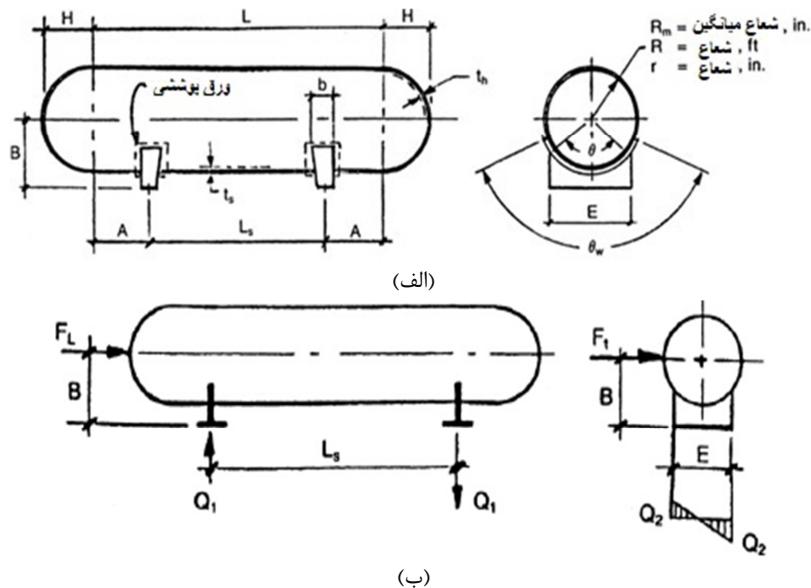
از طرفی جهت صحتسنجی، مدل تحت بار استاتیکی خطی با ترکیب بار شامل بار مرده، بار بهرهبرداری، بار زلزله در دو راستای x و y تحلیل شده است و نتایج تنش‌های پوسته در نرمافزار Sap2000 با نتایج تنش محاسبه شده برای پوسته مخزن طبق فرمول‌های ارایه شده در هندبوک وسی مقایسه شده است [۲۶]. شکل ۱۹-الف، ابعاد مربوط به مجھولات موجود در رابطه تنش را مشخص کرده است. شکل ۱۹-ب، نیروهای عکس‌العمل سدلهای و نیروهای زلزله را نشان می‌دهد. ابتدا نیروهای عکس‌العمل سدلهای Q_1 و Q_2 براساس شکل ۱۹-ب و روابط (۸) تا (۱۰) محاسبه می‌شوند. در این روابط، W_0 وزن اجرایی وسی، F_1 و F_2 به ترتیب نیروهای برش پایه در دو راستای طولی و عرضی می‌باشد. سپس از طریق رابطه (۱۱)، تنش بحرانی پوسته که همان S_{12} تنش فشاری جانبی است محاسبه می‌گردد.

پژوهش فیوره حداکثر تنش‌های بدنه در سطح مشترک بین زینهای نگهدارنده یا سدل‌ها و دیوارهای مخزن ایجاد می‌شود، دقیقاً قسمتی که مقاطع مقید شده‌اند و در صورت عدم افزایش مقطع، افزایش تنش در این قسمت منطقی است که ممکن است تبدیل به ضعیفترین ساختار برای کل سازه شوند. شکل ۱۸، تنش مطابق با ترکیب بار بحرانی در تحقیق فیوره را نشان می‌دهد [۲۹]. براساس شکل ۱۷، مکان مربوط به تنش فشاری جانبی بدنه در زیر سدل نسبت به سایر نقاط بدنه مخزن دارای تنش بیشتری است و زودتر به خرابی می‌رسد، که با یافته‌های فیوره مطابقت دارد.



شکل ۱۸- تنش مطابق با ترکیب بار بحرانی تحقیق فیوره

[۲۹]



شکل ۱۹- (الف) ابعاد رایج برای وسی واقع بر دو سدل و (ب) نیروهای عکس‌العمل سدلهای [۲۶]

$$Q_1 = \frac{W_0}{2} + \frac{F_l B}{L_s} \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{W_0}{2} + \frac{3F_t B}{E} \quad (9)$$

$$Q = \max(Q_1, Q_2) \quad (10)$$

در رابطه (۱۱)، مقدار K_5 ضریب وابسته به زاویه θ براساس مرجع [۲۶] برابر $0.64/0^\circ$ مشخص شده است.

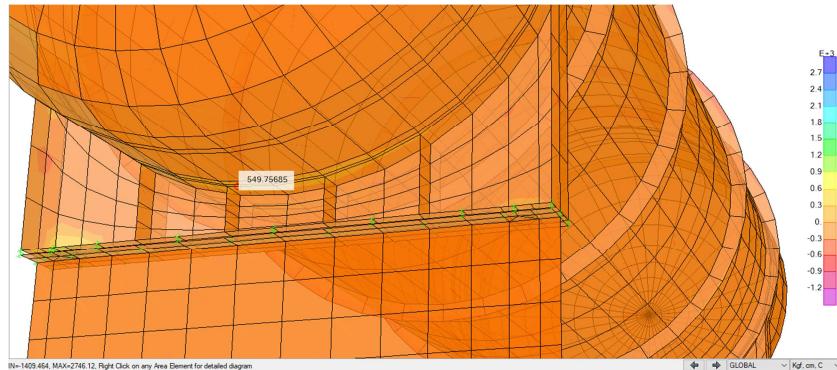
همچنین t_w ضخامت ورق پوششی و t_h ضخامت پوسته بدنه و سایر مجھولات براساس ابعاد مشخص شده در شکل ۱۹ تعیین می‌شوند.

۷-نتایج

در این مقاله، به ارزیابی لرزه‌ای احتمالاتی یک مخزن تحت فشار افقی واقع در پالایشگاه هنگام پرداخته شد. از تکنیک مدل‌سازی FEM استفاده شد و منحنی‌های پاسخ IDA با استفاده از تجزیه و تحلیل‌های دینامیکی افزایشی غیرخطی برای اجزای موجود در مدل به دست آمد.

$$S_{12} = -\frac{K_s Q}{t_s \left(b + 1.56\sqrt{rt_s} \right)}, t_s = t_s + t_w \quad (11)$$

شکل ۲۰، حداکثر تنش پوسته در ترکیب بار بحرانی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است عدد مشخص شده در شکل ۲۰ تنش فشاری جانبی را تعیین می‌کند. در نهایت، تنش فشاری جانبی حاصل از فرمول‌های هندبوک مساوی تنش ارایه شده در برنامه Sap2000 برابر ۵۴۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است.



شکل ۲۰- تنش مخزن مورد بررسی مطابق با ترکیب بار بحرانی

به سایر تنش‌های بدنه که حدود ۱ g وارد خرابی می‌شود، بسیار بحرانی‌تر است. این مطلب، یافته‌های فیوره و همکاران مطابقت دارد.

-۳- شکل ۱۵- الف نشان می‌دهد رفتار محوری میل‌مهرها در جهت طولی در محدوده g ۱/۵ و در جهت عرضی حدود g ۰/۵ وارد خرابی می‌شود. همچنین طبق شکل ۱۶- الف در فلنجهای در جهت طولی از کمترین مقدار PGA تا حدود g ۱ شروع خرابی است ولی در جهت عرضی از کمترین مقدار PGA تا حدود g ۰/۵ وارد خرابی می‌شود. برای زانویی‌ها طبق شکل ۱۶- ب در جهت طولی از g ۱ شروع خرابی است ولی در جهت عرضی تا حدود g ۰/۵ وارد خرابی می‌شود. بنابراین تجهیز و متعلقات متصل به آن در زلزله در جهت عرضی نسبت به جهت طولی بیشتر مستعد خرابی است.

حالاتی محدودی برای اجزا (تنش بدنه و میل‌مهر، تنش داخلی لوله، اتصالات لوله‌کشی) معرفی شده است و منحنی‌های شکنندگی با استفاده از منحنی‌های IDA حاصل محاسبه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل، منحنی‌های ترسیم شده و فرضیاتی که در مدل‌سازی و تحلیل اعمال شد، می‌توان نتایج ذیل را بیان کرد:

۱- همانگونه که در شکل ۱۶- الف مشاهده شد فلنجهای با کمترین مقدار PGA وارد مرحله خرابی می‌شوند. این در حالی است که در سایر اجزا در محدوده g ۰/۵ خرابی شروع می‌شود. از طرفی، زلزله حاکم منطقه g ۰/۳ می‌باشد. بنابراین اتصال و رفتار آنها مهمتر است و احتمال خرابی فلنجهای بیشتر از سایر اجزا بوده و این نوع خرابی باعث از بین رفتن محتوا می‌شود.

۲- مطابق شکل ۱۷، خرابی در سدل در اثر تنش فشاری در محدوده g ۰/۵ شروع می‌شود، نسبت

References

- [1] Alessandri, S., Caputo, A. C., Corritore, D., Giannini, R., Paolacci, F., & Phan, H. N. (2018). Probabilistic risk analysis of process plants under seismic loading based on Monte Carlo simulations, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 136-148. doi: [10.1016/j.jlp.2017.12.013](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.12.013)
- [2] Baltas, C., Lestuzzi, P., & Koller, M. G. (2014). Seismic assessment of horizontal cylindrical reservoirs. In *Seismic Design of Industrial Facilities: Proceedings of the International Conference on Seismic Design of Industrial Facilities (SeDIF-Conference)*, 461-472. doi: [10.1007/978-3-658-02810-7_39](https://doi.org/10.1007/978-3-658-02810-7_39)
- [3] Danesi, R. J. (2015). *Seismic risk of industrial plants: Assessment of a petrochemical piperack using incremental dynamic analysis*, Doctoral dissertation, MSc Thesis Rose School. Pavia, Italy.
- [4] Rasmussen, K. (1995). Natural events and accidents with hazardous materials. *Journal of hazardous Materials*, 40(1), 43-54. doi: [10.1016/0304-3894\(94\)00079-V](https://doi.org/10.1016/0304-3894(94)00079-V)
- [5] Krausmann, E., & Cruz, A. M. (2008). NATECH disasters: when natural hazards trigger technological accidents-Preface, *Natural Hazards*, 46(2), 139-141.
- [6] Caputo, A. C. (2016). A model for probabilistic seismic risk assessment of process plants. In *Pressure Vessels and Piping Conference*, 50466, V008T08A025. doi: [10.1115/PVP2016-63280](https://doi.org/10.1115/PVP2016-63280)
- [7] Johnson, G. S., Aschheim, M., & Sezen, H. (2000). Industrial facilities. *Earthquake Spectra*, 16(1_suppl), 311-350. doi: [10.1193/1.1586158](https://doi.org/10.1193/1.1586158)
- [8] Kumar, V., Kumar, N., Angra, S., & Sharma, P. (2014). Design of Saddle Support for Horizontal Pressure Vessel. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 8(12), 1-5. doi: [10.5281/zenodo.1097060](https://doi.org/10.5281/zenodo.1097060)
- [9] Lees, F. (2012). *Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control*. Butterworth-Heinemann.
- [10] Anandhu, P. D., & Avis, A. (2017). Design and Analysis of Horizontal Pressure Vessel and Thickness optimization. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 6(5).
- [11] Carluccio, A. Di, Fabbrocino, G., Salzano, E., & Manfredi, G. (2008). Analysis of Pressurized Horizontal Vessels Under Seismic Excitation, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 12-17.
- [12] Anbazhagan, A. S., Anand, M. D., & Milton, G. A. (2012). Development of finite element based wind and seismic design procedure for horizontal pressure vessel. *Procedia engineering*, 38, 3998-4004. doi: [10.1016/j.proeng.2012.06.457](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.457)
- [13] Farhan, M., & Bousias, S. (2020). Seismic fragility analysis of LNG sub-plant accounting for component dynamic interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(10), 5063-5085. doi: [10.1007/s10518-020-00896-y](https://doi.org/10.1007/s10518-020-00896-y)
- [14] Sobhan, M. S., & Hosseini, P. (2022). A Study of the Buckling Behavior of Aboveground Cylindrical Steel Tank under Seismic Loading. *Civil Infrastructure Researches*, 8(1), 21-34. doi: [10.22091/cer.2021.7560.1324](https://doi.org/10.22091/cer.2021.7560.1324) [In Persian]
- [15] Bovo, M., Barbaresi, A., & Torreggiani, D. (2020). Definition of seismic performances and fragility curves of unanchored cylindrical steel legged tanks used in wine making and storage. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(8), 3711-3745. doi: [10.1007/s10518-020-00841-z](https://doi.org/10.1007/s10518-020-00841-z)
- [16] Suzuki, K. (2008). Earthquake damage to industrial facilities and development of seismic and vibration control technology, *Journal of System design and dynamics*, 2(1), 2-11. doi: [10.1299/jsdd.2.2](https://doi.org/10.1299/jsdd.2.2)
- [17] Vamvatsikos, D., & Cornell, C. A. (2002). The incremental dynamic analysis and its application to performance-based earthquake engineering, In *Proceedings of the 12th European conference on earthquake engineering*, 40, 1375-92.
- [18] Kouhestani, S., Sayyafzadeh, B., & Sharifi, M. (2020). Seismic Vulnerability Assessment of Derrick-Supported Flare_Stacks Using Fragility Curves, *Civil Infrastructure Researches*, 6(1), 89-102. doi: [10.22091/cer.2021.6244.1218](https://doi.org/10.22091/cer.2021.6244.1218) [In Persian]
- [19] Khojasteh Far, A. (2013). Determining the Collapse Fragility Curve in Flexural Steel Structures by Considering Different Sources of Modeling Uncertainties Using Fuzzy Logic. *Ph.D Thesis*, Faculty of Civil Engineering, Khajeh Nasir Tosi University. [In Persian]
- [20] PEER NGA-West2 database. <https://NGawest2.Berkeley.Edu/Site>.
- [21] Iervolino, I., & Cornell, C. A. (2005). Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. *Earthquake Spectra*, 21(3), 685-713. doi: [10.1193/1.1990199](https://doi.org/10.1193/1.1990199)
- [22] Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Published by Pearson, University of California at Berkeley
- [23] Barron-Corvera, R. (2000). *Spectral evaluation of seismic fragility of structures*. State University of New York at Buffalo.
- [24] Bursi, O., Paolacci, F., & Reza, M. S. (2015). Seismic performance assessment of oil & gas piping system through nonlinear analysis. In *5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Crete, Greece.

- [25] Caprinozzi, S., M. Ahmed, M., Paolacci, F., Bursi, O. S., & La Salandra, V. (2017). Univariate fragility models for seismic vulnerability assessment of refinery piping systems. In *Pressure Vessels and Piping Conference*, 58035, V008T08A033. doi: **10.1115/PVP2017-65138**
- [26] MOSS, D. R. (2004). *Pressure Vessel Design Manual*. Elsevier Science.
- [27] Bathe, J., & Wilson, E. (1976). *Numerical methods in finite element analysis*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ.
- [28] Tabeshpoor, M. R. (2015). *Nonlinear analysis of structures*. Tehran, Fadak Isatis Publication.
- [29] Fiore, A., Rago, C., Vanzi, I., Greco, R., & Briseghella, B. (2018). Seismic behavior of a low-rise horizontal cylindrical tank. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 10(2), 143-152. doi: **10.1007/s40091-018-0188-y**