



# Analysis and Evaluation of Vulnerability of Steel Tanks Under Explosive Loading and Determination of Safe Distance (Case Study: Ammonia Tank)

Ali Mostafavi zadeh<sup>1</sup>, Mohammad Yaser Radan<sup>\*2</sup>, Ghasem Dehghani Ashkezari<sup>3</sup>, Behnam Salehi<sup>1</sup>, Naser Jamshidi<sup>4</sup>

1. Former Graduate Student of Passive Defense Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
2. Assist. Prof., Faculty of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran. (Corresponding Author)  
[radan@mut.ac.ir](mailto:radan@mut.ac.ir)
3. Assist. Prof., Faculty of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
4. Head of Passive Defense and Crisis Management Section, NPC, Tehran, Iran.



<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.1.4.2>

Case Study

Terrorist actions in the national infrastructure are among the serious threats that have turned the minds of many officials in the countries towards themselves. The oil and gas industry is one of the infrastructures of countries and they play a very important role in the development of a country's economy. Therefore, protecting them is considered essential. Today, steel tanks are used in many different industries, including the oil and gas industries, steel tanks are among the industrial structures that are potentially exposed to the risk of fire and explosion due to the nature of the materials stored in them, and any damage to them affects the overall safety. It threatens the collection. Despite various significant technological advancements and the introduction of new equipment, distance remains a crucial and influential component in thwarting enemy actions. One of the most important measures in the field of protecting sensitive and vital centers is creating a safe distance (Stand Off) against explosive loads (design basis loads). In the present study, considering that the research results can be used to improve the vulnerability level, it can be said that the research is practical. Accordingly, this study examines the effects of explosive loading on a sample thin-walled steel tank (mega ammonia tank) and determines a suitable safe distance to counter potential threats. Using dynamic analysis and numerical modeling with Abaqus version 6.22 (released in 2022), the behavior of steel tanks under different explosive loading conditions was evaluated. By analyzing and assessing the initiation of damage on the tank's body and comparing the PEEQ (Equivalent Plastic Strain), Von Mises (Von Mises Theory), and JCCRT (Johnson-Cook Damage Initiation Criterion) charts, the damage inflicted on the tank's shell was assessed, and the Stand Off distance was determined. The results of this research provide new insights into the protection of tanks against explosive incidents.

#### Keywords:

Steel Tanks, Dynamic Analysis, Plastic Strain, Von Mises Theory, Stand Off Range.



Received: July 23, 2024  
Revised: Jan. 28, 2025  
Accepted: Feb. 9, 2025



Use your device to scan and read the article online

#### To cite this article:

Mostafavi zadeh, A., Radan, M. Y., Dehghani Ashkezari, Gh., Salehi, B. and Jamshidi, N. 2025. Analysis and Evaluation of Vulnerability of Steel Tanks Under Explosive Loading and Determination of Safe Distance (Case Study: Ammonia Tank), *Emergency Management*, 14(1), 76-110. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.1.4.2>.

© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)





## تحلیل و ارزیابی آسیب پذیری مخازن فولادی تحت بارگذاری انفجاری و تعیین حریم امن (مطالعه موردی: مخزن آمونیاک)

علی مصطفوی زاده<sup>۱</sup>، محمد یاسر رادان<sup>۲\*</sup>، قاسم دهقانی اشکذری<sup>۳</sup>، بهنام صالحی<sup>۱</sup>، ناصر جمشیدی<sup>۴</sup>

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
- ۲- استادیار، مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران (نویسنده مسئول) [radan@mut.ac.ir](mailto:radan@mut.ac.ir)
- ۳- استادیار، مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
- ۴- رئیس پدافند غیرعامل و مدیریت بحران، شرکت ملی صنایع پتروشیمی، تهران، ایران



<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.1.4.2>

مطالعه موردی

### چکیده

واژه‌های کلیدی:  
مخازن فولادی، تحلیل  
دینامیکی، کرنش  
پلاستیک، تئوری فون  
مایسز، فاصله Stand  
Off

اقدامات تروریستی در زیرساخت‌های ملی از جمله تهدیدات جدی است که ذهن بسیاری از مسئولان را در کشورها متوجه خودساخته است. صنعت نفت و گاز از جمله زیرساخت‌های کشورها به شمار رفته و نقش بسیار مهمی را در توسعه اقتصاد یک کشور ایفا می‌کنند؛ از این رو صیانت از آن‌ها امری ضروری به شمار می‌رود. امروزه مخازن فولادی در بسیاری از صنایع مختلف از جمله صنایع نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند، مخازن فولادی از جمله سازه‌هایی صنعتی هستند که به واسطه ماهیت مواد ذخیره‌شده در آنها به صورت بالقوه در معرض خطر حریق و انفجار قرار داشته و هرگونه آسیب در آنها ایمنی کل مجموعه را تهدید می‌کند. علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر مختلف فناوری و ورود تجهیزات جدید، هنوز هم مؤلفه فاصله به‌عنوان یک اصل مهم و تأثیرگذار در ناکامی دشمن شناخته‌شده و از مهم‌ترین اقدامات در حوزه حفاظت از مراکز حساس و حیاتی ایجاد فاصله امن (Stand Off) در برابر بارهای انفجاری (بار مینا) است. در پژوهش پیشرو نظر به اینکه نتایج پژوهش می‌تواند برای بهبود وضعیت سطح آسیب‌پذیری مورد استفاده قرار گیرد می‌توان گفت پژوهش حاضر کاربردی است. براین اساس در این مطالعه، به بررسی تأثیر بارگذاری‌های انفجاری بر روی یک نمونه مخزن فولادی جدار نازک (مگا مخزن آمونیاک) و تعیین حریم امن مناسب برای مقابله با تهدیدات احتمالی پرداخته شده است. با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی و مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار Abaqus نسخه ۶،۲۲ (منتشرشده در سال ۲۰۲۲)، رفتار مخازن فولادی تحت شرایط مختلف بارگذاری انفجاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. با تجزیه و تحلیل و ارزیابی شروع آسیب در بدنه مخزن و همچنین مقایسه نمودارهای PEEQ (کرنش پلاستیک معادل)، Von mises (تئوری فون مایسز) و JCCRT (معیار شروع آسیب جانسون - کوک) آسیب‌های وارده بر جداره مخزن ارزیابی شد و فاصله Stand Off تعیین شد، نتایج حاصل از این پژوهش، دیدگاه‌های نوینی در زمینه حفاظت مخازن در برابر حوادث انفجاری ارائه می‌کند.

دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲

اصلاح: ۱۴۰۳/۱۱/۹

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۱



از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله  
به صورت آنلاین استفاده کنید

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

مصطفوی‌زاده، ع.، رادان، م. ی.، دهقانی اشکذری، ق.، صالحی، ب. و جمشیدی، ن.، ۱۴۰۴، تحلیل و ارزیابی  
آسیب‌پذیری مخازن فولادی تحت بارگذاری انفجاری و تعیین حریم امن (مطالعه موردی: مخزن آمونیاک). مدیریت  
بحران، ۱۴ (۱)، ۷۶-۱۱۰. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.1.4.2>



© The Author(s).  
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

## ۱- مقدمه

کشور ایران به دلیل موقعیت ژئوپلیتیک خود همواره با تهدیدات و تهاجمات مستقیم و غیرمستقیم مواجه بوده است. تجربه جنگ تحمیلی نشان داد که زیرساخت‌های حوزه نفت و گاز کشور در برابر تهدیدات آسیب‌پذیر هستند [۱]. پس از پایان جنگ، تلاش‌هایی برای افزایش امنیت و مقاوم‌سازی این زیرساخت‌ها آغاز شد، این تلاش‌ها شامل برنامه‌های فنی متعددی بود که باهدف افزایش بازدارندگی و کاهش آسیب‌پذیری در برابر تهدیدات احتمالی طراحی شدند؛ زیرا این تأسیسات از اهمیت حیاتی اقتصادی و اجتماعی برخوردارند و آسیب به آن‌ها می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری به بار آورد. مخازن ذخیره سیال به‌عنوان یکی از سازه‌های راهبردی هر کشور، اهمیت ویژه‌ای دارند [۲].

حفاظت از این مخازن در برابر انفجار، به دلیل پیامدهای بالقوه آن، از جنبه‌های گوناگون حائز اهمیت است. وقوع انفجار در این مخازن می‌تواند موج‌های انفجاری شدید و مخرب ایجاد کرده و در یک لحظه، خسارت‌های گسترده‌ای به محیط پیرامونی و سایر مخازن و تأسیسات مجاور وارد کند [۳]. از طرف دیگر، به دلیل ویژگی‌های آنتروپوژنیک مواد ذخیره‌شده در آنها و پتانسیل بالقوه خود برای تأثیرگذاری منفی بر محیط زیست، حفاظت از آن‌ها به‌عنوان یک اولویت مهم مطرح می‌شود و در دسته‌بندی سازه‌هایی با حساسیت محیطی قرار می‌گیرند [۴].

مخازن ذخیره به دلیل ضخامت اندک دیواره‌هایشان در دسته سازه‌های جدار نازک قرار می‌گیرند و تحلیل پاسخ آن‌ها به بارهای انفجاری نیازمند روش‌های عددی و استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی است [۵]. یکی از رویکردهای پدافند غیرعامل در مواجهه با چنین سازه‌هایی، ایجاد حریم امن مناسب است. این رویکرد می‌تواند دوطرفه باشد، از یک طرف حفاظت محیط پیرامون

در برابر خطرات ذاتی که مخزن ایجاد می‌کند از طرف دیگر حفاظت مخزن در برابر تهدیدات پیرامونی یا به عبارتی ایجاد فاصله ایستایی یا Stand Off برابر بار مینا است.

امواج انفجار که انرژی آن‌ها به‌صورت ناگهانی آزاد می‌شود، بافاصله گرفتن از منبع کاهش می‌یابند و اثرگذاری آن‌ها بر سازه تابع شرایط فاصله و مشخصات انفجار است [۶]. در طراحی مقاوم، روابط محاسبه‌ی مشخصه‌های فشار انفجار در مراجع مختلف از جمله UFC 3-340-02 بر اساس TNT خالص به شکل کروی است. برای استفاده از این روابط در مورد مواد منفجره دیگر و شکل متفاوت از وزن معادل TNT با شکل کروی استفاده می‌شود [۷].

علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه‌های مختلف فناوری و ورود تجهیزات جدید در صحنه‌های نبرد، هنوز هم مؤلفه فاصله به‌عنوان یک پارامتر مهم و تأثیرگذار در ناکامی دشمن در اجرای عملیات خود شناخته‌شده و از مهم‌ترین اقدامات در حوزه حفاظت از مراکز حساس و حیاتی ایجاد فاصله امن (Stand Off) در برابر بارهای انفجاری (بار مینا) است. در این پژوهش به بررسی آسیب‌پذیری مخازن فلزی استوانه‌ای در مقابل بارهای انفجاری پرداخته و در ادامه به با بررسی اثرات خرابی بدنه در برابر انفجار در فواصل مختلف به تعیین فاصله Stand Off می‌پردازیم. با تعیین این فاصله می‌توان با به‌کارگیری اقدامات مؤثر پدافندی از جمله ایجاد مانع و یا تشدید اقدامات امنیتی به حفاظت از این مخزن پرداخت.

## ۲- مبانی نظری

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری انفجاری به عوامل مختلفی از جمله جنس مواد، طراحی سازه و به‌ویژه فاصله انفجار (Stand Off distance) وابسته است. تحقیقات متعدد نشان می‌دهند که Stand Off نقش حیاتی

۷۸

شماره ۲۹

بهار ۱۴۰۴

فصلنامه علمی

و پژوهشی



تخلیل و ارزیابی آسیب‌پذیری مخازن فولادی تحت بارگذاری انفجاری و تعیین حریم امن (مطالعه موردی: مخزن آمونیاک) / علی مصطفوی‌زاده، محمد یاسر رادان، قاسم دهقانی اشکداری، بهنام صالحی، ناصر جمشیدی

در کاهش شدت موج انفجار و توزیع تنش در سازه دارد. پژوهش‌ها همچنین تأکید دارند که درک اثر این فاصله می‌تواند به بهبود طراحی و کاهش آسیب‌های سازه‌ای کمک کند. استفاده از روش‌های عددی پیشرفته و آزمایش‌های تجربی برای تحلیل اثرات فاصله انفجار یکی از حوزه‌های کلیدی در این زمینه بوده است.

دادخواه و محبی (۲۰۲۳) به بررسی تأثیر فاصله انفجار (stand-off distance) بر شکنندگی انفجاری ساختمان‌های فولادی مقاوم لحظه‌ای را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که افزایش فاصله انفجار تا ۱۰ متر می‌تواند نسبت تغییر شکل‌های نسبی طبقات را تا ۵۲ درصد کاهش دهد. این مطالعه همچنین نشان داد که در شرایط وزن بالای مواد منفجره، فاصله انفجار ۶ متر می‌تواند به‌طور غیرمنتظره‌ای عملکرد سازه‌های بلندمرتبه را بدتر کند. پژوهشگران با استفاده از رویکرد ارزیابی احتمالاتی، تأثیر وزن مواد منفجره و محل انفجار را بر شکنندگی سازه‌ها تحلیل کردند و پیشنهاد کردند که طراحی محیطی تنها برای ساختمان‌های کم ارتفاع مؤثر است [۸].

در پژوهشی مجید مقدم (۲۰۲۱)، به بررسی تأثیر فاصله مواد منفجره بر روی تغییر شکل‌های دیواره مخزن و نیروهای مقاوم هیدرودینامیکی آب، بررسی امواج قائم آب بر اثر بارگذاری‌های انفجار و همچنین به بررسی تغییرات چگالی آب در مدت زمان انفجار پرداخت [۹].

مقدم و همکارانش (۱۳۹۹) رفتار قاب‌های فولادی با سیستم دیوار برشی فولادی را تحت تأثیر انفجارهای مختلف بررسی کردند. آن‌ها ۲۰ قاب فولادی با تعداد طبقات و عرض‌های متفاوت را در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی کرده و تحلیل دینامیکی غیرخطی را برای چهار سناریوی انفجاری انجام دادند. نتایج نشان داد که سازه‌های بلند عملکرد بهتری در برابر انفجار داشته و رفتار

غالب آن‌ها خمشی است. در مقابل، سازه‌های کوتاه آسیب‌پذیری بیشتری نشان داده و رفتار غالب برشی دارند، درحالی‌که سازه‌های متوسط رفتار ترکیبی خمشی و برشی از خود نشان می‌دهند [۱۰].

بهنام‌فر، مرادی و هاشمی (۱۳۹۸) در پژوهشی، یک روش تحلیلی برای برآورد پاسخ لرزه‌ای مخازن استوانه‌ای بتنی تحت تحریک افقی و قائم زلزله ارائه کردند. این روش با لحاظ انعطاف‌پذیری دیواره مخزن و میزان پرشدگی مایع طراحی شده و برای محاسبه فشار ضربه‌ای سیستم مایع پوخته از روش ریلی-ریتز استفاده شد. تحلیل ارتعاشی پوخته مخزن اثر مدهای محیطی و جداره مخزن در حرکت افقی زلزله را در نظر گرفت. نتایج نشان داد که پاسخ‌های آیین‌نامه ACI 350.3-06 تفاوت قابل‌توجهی با روش تحلیلی پیشنهادی دارد، زیرا انعطاف‌پذیری صحیح جداره مخزن در آیین‌نامه لحاظ نشده است. این مطالعه اطلاعات ارزشمندی برای بهبود طراحی لرزه‌ای مخازن بتنی و افزایش دقت آیین‌نامه‌ها ارائه می‌دهد [۱۱].

مجید حمزه (۱۳۹۷) اثر انفجار بر تونل‌های انتقال آب را با تحلیل عددی بررسی کرده است. سه ضخامت سگمنت بتنی (۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر) تحت بارگذاری مواد انفجاری در فواصل ۰٫۵، ۱ و ۲ متر مدل‌سازی شدند. نتایج نشان داد که آسیب به سگمنت تنها در ضخامت‌های ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر و فاصله ۰٫۵ متر رخ می‌دهد. بهینه‌ترین راهکار کاهش اثر امواج انفجار، دفن سازه یا خاک‌ریزی بر روی آن است [۱۲].

سروقد مقدم و همکاران (۱۳۹۵) رفتار مخازن بتنی استوانه‌ای تحت بارگذاری انفجاری را با مدل‌سازی انفجاری به وزن ۳۵۲/۰۸ کیلوگرم TNT در چهار حالت پرشدگی (خالی، یک‌چهارم پر، نیمه‌پر و سه‌چهارم پر) بررسی

کردند. نتایج نشان داد مخازن خالی بیشترین آسیب فشاری و کششی را تجربه می‌کنند و رفتار آن‌ها در برابر بارهای انفجاری با بارهای لرزه‌ای زلزله تفاوت زیادی دارد. مقایسه روش‌های ConWep و AUTODYN نشان داد که ConWep آسیب‌های فشاری کمتری (۲۵ درصد کاهش) را نسبت به AUTODYN پیش‌بینی می‌کند. این یافته‌ها به طراحی ایمن‌تر و مقاوم‌سازی مخازن در برابر بارگذاری انفجاری کمک می‌کند [۱۳].

نوابی‌نیا و همکاران (۱۳۹۱) ضریب رفتار مخازن بتنی زمینی و هوایی استوانه‌ای را با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی کردند. در این پژوهش، تأثیر عوامل سازه‌ای مانند ارتفاع، ضخامت و درصد میلگرد بر ضریب رفتار تحلیل شد. نتایج نشان داد که ویژگی‌های پایه نقش بیشتری در ضریب رفتار دارند و مقادیر ضریب برای ترک اولیه و گسترش ترک در مخازن هوایی به ترتیب ۴ و ۵ و در مخازن زمینی برای این سطوح به ترتیب ۱ و ۲ است. این تحقیق به بهینه‌سازی طراحی مخازن بتنی کمک می‌کند [۱۴].

چنگ و همکاران (۲۰۲۴)، با استفاده از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس، تأثیر انفجارهای داخلی و آسیب‌های ناشی از BLEVE (انفجار مایع جوشان) را بر سازه‌های دوگانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که طراحی بهینه هندسی، از جمله ضخامت یکنواخت دیواره‌ها و تنظیم فاصله Stand-Off، می‌تواند نقش مهمی در کاهش آسیب‌های مکانیکی و حرارتی داشته باشد. یافته‌ها حاکی از آن است که تنظیم دقیق فاصله انفجار نه تنها موجب کاهش تخریب دیواره‌ها می‌شود، بلکه توزیع تنش‌ها را بهبود می‌بخشد [۱۵].

صیفی و همکاران (۲۰۲۴)، در پژوهشی جامع، به شبیه‌سازی تأثیر بار انفجاری بر مخازن

استوانه‌ای جدار نازک پرداختند. با استفاده از معیار جانسون-کوک و شاخص کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)، رفتار دینامیکی مخازن بررسی شد. نتایج نشان داد که کاهش ضخامت دیواره‌ها و فاصله کمتر از منبع انفجار، به طور قابل توجهی خطر شکست دیواره‌ها را افزایش می‌دهد. این مطالعه همچنین نشان داد که افزایش نسبت ارتفاع به شعاع در مخازن، تغییر شکل‌های پلاستیک و آسیب‌پذیری سازه را تشدید می‌کند [۱۶].

خلیل (۲۰۲۴)، با تمرکز بر تحلیل دینامیکی سیلوهای فولادی، نقش تقویت‌کننده‌های سازه‌ای را در کاهش تنش‌های القایی بررسی کرد. این پژوهش نشان داد که طراحی بهینه ساختاری و استفاده از تقویت‌کننده‌های داخلی می‌تواند نقاط بحرانی آسیب‌پذیر را حذف کرده و مقاومت سازه در برابر بارهای انفجاری را افزایش دهد. یافته‌ها بر اهمیت طراحی تقویت‌شده به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در پایداری سازه تأکید دارند [۱۷].

جولیا روزین و همکاران (۲۰۲۴) طراحی مخازن فولادی ذخیره آمونیاک را برای بارهای انفجاری با فشار و مدت طولانی بررسی کردند. تحلیل عددی روی مخازنی با فشار اوج ۳۰ کیلو پاسکال و ۳۰۰ میلی‌ثانیه نشان داد که مخازن فولادی توانایی تحمل چنین بارهایی را دارند، اما طراحی برای فشارهای بالاتر بهبود ایمنی را تضمین می‌کند. این پژوهش با ارائه توصیه‌هایی، به ارتقای استانداردهای ایمنی و تحقیقات آینده کمک می‌کند [۱۸].

یانگ و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی آسیب ناشی از انفجار مخازن ذخیره در پارک‌های صنعتی شیمیایی شهرهای هوشمند پرداختند. این پژوهش به منظور پیش‌بینی و پیشگیری هوشمند از ریسک در پارک‌های صنعتی، مفهوم توزیع اهمیت احتمال آسیب منطقه‌ای را معرفی



کرد. روشی برای تحلیل اثرگذاری تدابیر کنترلی انفجار مخازن پیشنهاد شد که بر اساس تغییر درجه احتمال آسیب تعیین می‌شود. با استفاده از دیوارهای انفجار به عنوان تدبیر کنترلی، احتمال آسیب منطقه‌ای محاسبه شد و اثربخشی این تدابیر ارزیابی شد. نتایج این مطالعه به ارائه روشی مؤثر برای شهرهای هوشمند در پیش‌بینی و پیشگیری از اثرات انفجار کمک می‌کند [۱۹].

اوزر درلی و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی اثر انفجار ابر بخار (VCE) بر یکپارچگی سازه‌های مخازن حاوی گاز طبیعی مایع (LNG) پرداختند. در این پژوهش، با استفاده از تحلیل اجزای محدود (FEA)، چهار نوع اصلی مخازن حاوی تحت سناریوهای انفجار شعله‌زنی و انفجار بررسی شدند. نتایج نشان داد که مخازن تک‌لایه بیشترین آسیب را در پوسته خارجی تحت انفجار شعله‌زنی تجربه می‌کنند و بیشتر در معرض اثر آبخاری قرار دارند. همچنین، ترک خوردگی در دیوار بتن پیش‌تنیده مخازن دوگانه، کامل و غشایی تحت سناریوهای انفجار مشاهده شد. توصیه‌هایی برای طراحی ایمن و حفظ یکپارچگی سازه‌های مخازن نیز ارائه شد [۲۰].

سان‌یانگ‌وانگ و همکاران (۲۰۲۳)، به بررسی پاسخ دینامیکی و آسیب مخزن ذخیره‌سازی گاز طبیعی مایع تمام بتنی (ACLNG) تحت بارگذاری نفوذ و انفجار پرداخته‌اند. در این پژوهش، از مدل‌سازی عددی کوپلینگ سیال - جامد برای شبیه‌سازی رفتار مخزن استفاده شده است. الگوریتم لاگرانژ - اویلر و الگوریتم اویلری - لاگرانژی سیال - شبح (GEL) برای اعتبارسنجی نتایج به کار گرفته شده و مقایسه با داده‌های تجربی موجود، دقت این مدل‌ها را نشان داده است. نتایج پژوهش بیانگر آن است که موج انفجار پس از مدت کوتاهی به سرعت تضعیف می‌شود و اتصالات بین دیواره جانبی و صفحات بالایی و پایینی در معرض تمرکز تنش و خرابی

قرار دارند. این پژوهش بر لزوم تقویت اتصالات مخزن به‌منظور افزایش مقاومت آن در برابر بارهای دینامیکی تأکید دارد [۲۱].

الیاس علی و همکاران (۲۰۲۲) پاسخ انفجاری قاب‌های فولادی سرد نورد شده (CFS) محافظت‌شده با پانل‌های کامپوزیتی درجه‌بندی‌شده عملکردی (FGM) را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که پانل‌های FGM با کاهش تغییر شکل و فشار اوج و بهبود حالت‌های خرابی محلی تیرها، عملکرد بهتری نسبت به مواد گچی و کامپوزیت آلومینیوم دارند. این پژوهش پانل FGM را به عنوان راه‌حلی مؤثر برای طراحی مقاوم در برابر انفجار پیشنهاد می‌دهد [۲۲].

لی‌چن و همکاران (۲۰۲۲) به تحلیل رخداد اثر دومینو در مزارع مخازن ذخیره هیدروکربن پرداختند. این پژوهش بر ترکیب اثرات آتش‌سوزی و انفجار در رخداد‌های دومینو تمرکز داشت و یک روش‌شناسی برای تحلیل پاسخ سازه‌ای مخازن ذخیره به بار انفجار پس از آتش پیشنهاد کرد. در این روش، اثر دما و نرخ کرنش بالا به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده است. مدل عددی ارائه شده برای تحلیل فرایند پاسخ دینامیکی مخازن فولادی تحت سناریوهای مختلف استفاده شد. نتایج نشان داد که دمای بالا موجب تضعیف دیواره مخزن شده و جذب انرژی بیشتر از موج انفجار توسط دیواره مخزن را باعث می‌شود. این مطالعه به درک عمیق‌تری از اثرات آسیب به مخازن ذخیره تحت بارگذاری ترکیبی آتش و انفجار کمک می‌کند [۲۳].

احمد محمد الیعقوبی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از تحلیل اجزای محدود، تأثیر پارامترهای مختلف مانند ضخامت دیواره، سطح پرشدگی مایع و شدت انفجار را بر رفتار مخازن استوانه‌ای نازک دیواره بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش ضخامت دیواره و کاهش

سطح پرشدگی مایع می‌تواند به‌طور مؤثری مقاومت مخازن را در برابر بارهای انفجاری بهبود بخشد. همچنین مشخص شد که فاصله از منبع انفجار نیز تأثیر چشمگیری بر پایداری ساختاری مخزن دارد. این یافته‌ها به‌طور کلی بر اهمیت بهینه‌سازی طراحی مخازن به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری آنها در برابر انفجار تأکید می‌کنند [۲۴].

گوهوآ چن و همکاران (۲۰۲۰) رفتار شکست مخازن ذخیره نفت را تحت موج‌های انفجاری چندگانه با شبیه‌سازی در ANSYS/LS-DYNA بررسی کردند. نتایج نشان داد که اوج فشار، جابه‌جایی، تنش و کرنش در حالت موج‌های چندگانه به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این پژوهش مبانی نظری ارزشمندی برای طراحی مقاوم مخازن و بهینه‌سازی چیدمان در پارک‌های صنعتی شیمیایی فراهم می‌کند [۲۵].

یوشین جیانگ و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تأثیر پوشش پلی‌یوریا بر مقاومت انفجاری مخازن ذخیره‌سازی فولادی پرداختند. در این پژوهش، پاسخ مخازن فولادی تک‌لایه و پوشش داده‌شده با پلی‌یوریا تحت بار انفجاری با استفاده از TNT مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که لایه‌های پلی‌یوریا به کاهش جابه‌جایی‌های حداکثر و باقی‌مانده مخازن کمک می‌کنند. تحلیل‌های عددی اعتبارسنجی شده برای بررسی تأثیر ضخامت پوشش پلی‌یوریا نشان دادند که افزایش ضخامت باعث کاهش جابه‌جایی می‌شود. سه حالت تغییر شکل تحت بارهای مختلف شناسایی شدند که در آنها اثر کاهش جابه‌جایی پلی‌یوریا متفاوت بود [۲۶].

یان چن و همکاران (۲۰۱۹) پاسخ دینامیکی یک مخزن بتنی پیش‌تنیده LNG به بارگذاری ضربه‌ای را با استفاده از مدل عددی و ماده HJC برای بتن بررسی کردند. در این مطالعه، شبیه‌سازی برخورد موشک کروم تاماهاوک و

تحلیل مکانیسم خرابی و آسیب انجام شد. نتایج نشان داد فرمول‌های تجربی استاندارد محافظه‌کارانه‌تر از تحلیل‌های عددی هستند [۲۷].

لی کیم و همکاران (۲۰۱۹) آسیب‌پذیری لرزه‌ای مخازن فولادی ذخیره مایع را با مدل‌سازی پیشرفته در آباکوس و استفاده از داده‌های واقعی زمین‌لرزه در کره جنوبی بررسی کردند. نتایج نشان داد که داده‌های محلی دقت تحلیل‌ها را افزایش می‌دهند و نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از مایع نقش کلیدی در پیش‌بینی آسیب‌های سازه‌ای دارند. مقاوم‌سازی با سخت‌کننده‌های حلقوی کمانش الاستیک را کاهش داد، اما تأثیر قابل توجهی بر سایر آسیب‌ها نداشت [۲۸].

لی ینگ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی حفاظت انفجاری مخازن مایع در برابر بارگذاری انفجاری داخلی در سازه‌های کشتی پرداختند. در این پژوهش، ترکیبی از روش‌های تجربی و عددی برای مطالعه پاسخ دینامیکی مخزن مایع استفاده شد. ابتدا، پاسخ فیزیکی مخزن به بارگذاری انفجاری داخلی به‌طور تجربی مورد بررسی قرار گرفت و مدل کوپلینگ سیال - جامد برای شبیه‌سازی فرایند انفجار توسعه داده شد. تحلیل‌های عددی بر اساس این مدل ویژگی‌های فشار، مکانیسم‌های تغییر شکل و تغییرات انرژی را بررسی کردند. همچنین، تأثیر سطح و ضخامت مخزن بر پاسخ سازه‌ای آن مورد بحث قرار گرفت و فرمول تجربی ارائه شد [۲۹].

شیوجیان (۲۰۱۸) در پژوهشی، پاسخ دینامیکی اتافک فولادی تحت بارگذاری انفجار داخلی را از طریق آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی بررسی کرده است. تکنیک همبستگی تصویری دیجیتالی (DIC) برای ثبت جابه‌جایی سه‌بعدی و فرایند پاسخ دینامیکی به کار گرفته شد. نمونه‌های فولادی طراحی شده با استفاده از



ANSYS/LS-DYNA مدل سازی شدند. نتایج نشان دادند که برآمدگی صفحات جانبی به سمت بیرون و کماتش درون صفحه‌ای در صفحات مرزی رخ داده است و خطوط لولاهای پلاستیکی در قطرهای صفحه هدف مشاهده شدند. فرایند پاسخ شامل دو مرحله پلاستیک کلی صفحه و نوسان ناحیه مرکزی است. این پژوهش اثربخشی تکنیک DIC در ثبت پاسخ دینامیکی و کارایی روش عددی توسعه یافته را در مدل سازی مسائل دینامیکی تأیید می کند [۲۹].

میتال، چکراپورتی و متساگار (۲۰۱۴) از این روش برای به دست آوردن ضرایب ابعاد، بازدهی و ذخیره مایع در مخزن، ضخامت دیواره مخزن، شرایط مرزی در کف مخزن و شدت بارگذاری انفجاری استفاده نمودند. آنها از فرمول دوتایی اوپلر و لاگرانژ در آباکوس استفاده کردند. این روش از مزیت توجه به معادلات اساسی مکانیک سازه‌ای و جریان مکانیکی برخوردار بود. در تحقیق آنها بیشینه تنش و برش در دیواره مخزن، ارتفاع تکان خوردن آب و انرژی پاسخی سازه مطالعه شد. مشاهدات نشان داد که تنش ناشی از ارتفاع حرکت مایع در مخزن با کاهش فاصله از مواد منفجره و افزایش نسبت ابعادی از قبیل نسبت ارتفاع به شعاع، افزایش پیدا می کند. به عبارتی حرکت امواج مایع در مخزن و ضرباتی که به دیواره مخزن در هنگام انفجار یا زلزله از طرف این امواج وارد می شود، با افزایش نسبت ارتفاع به شعاع و با کاهش فاصله از مواد منفجره افزایش می یابد [۳۰].

### ۳- مفهوم شناسی

#### ۳-۱- مروری بر مفاهیم انفجار

انفجار به فرایندی اطلاق می شود که در آن مواد به طور ناگهانی به گاز و انرژی تبدیل می شوند. این فرایند معمولاً با تولید حرارت و گازهای پرانرژی همراه است که باعث ایجاد یک نیروی قوی در

راستای انبساط سریع گاز می شود. اگرچه مقدار انرژی آزاد شده در این پدیده می تواند زیاد یا کم باشد، اهمیت اصلی آن در نرخ سریع آزاد شدن انرژی نهفته است. در پی انفجار، امواجی تولید می شود که بسته به ویژگی های محیط انتشار، ممکن است شدت آنها افزایش یا کاهش یابد. این تغییرات ناشی از پدیده انعکاس امواج در مرزهای محیط های مختلف است که می تواند منجر به تقویت یا تضعیف فشار تولیدی شود [۸].

مواد منفجره ای که در پدیده های انفجاری استفاده می شوند، بر اساس حالت فیزیکی به دو دسته تقسیم می شوند: دسته اول شامل مواد منفجره جامد است و دسته دوم شامل مواد منفجره مایع یا گازی که برای ایجاد انفجار به کار می روند. در آیین نامه ها، امواج ناشی از مواد منفجره جامد به صورت موج ضربه ای هستند، در حالی که امواج حاصل از انفجار مواد منفجره مایع یا گاز به عنوان موج فشاری شناخته می شوند. تفاوت عمده در این دو نوع انفجار در مدل سازی موج انفجاری و استفاده از پارامترهای مختلف است. در دسته دوم، زمان رسیدن به بیشینه فشار طولانی تر از زمان رسیدن به بیشینه فشار در انفجارهای دسته اول است. از سوی دیگر مقدار موج منفی ایجاد شده در دسته دوم در مدت زمان کوتاه تری به وجود می آید [۳۱].

هنگامی که انفجار رخ می دهد، انفجار از یک مقدار کم شروع شده و به حداکثر می رسد و دوباره کم می شود که شبیه پروسه انفجار در داخل ماده منفجره است؛ اما این شکل ثابت نمی ماند و به علت اینکه سرعت موج در هوا به شرایطی از جمله دما و فشار بستگی دارد، آن قسمت از موج که دارای فشار و دمای بیشتری است با سرعت بیشتری حرکت می کند و بنابراین این قسمت پرفشارتر از بقیه نقاط جلو می افتد، ادامه این پروسه باعث می شود که در فاصله کمی از منبع انفجار شکل موج شبیه شکل زیر گشته که این

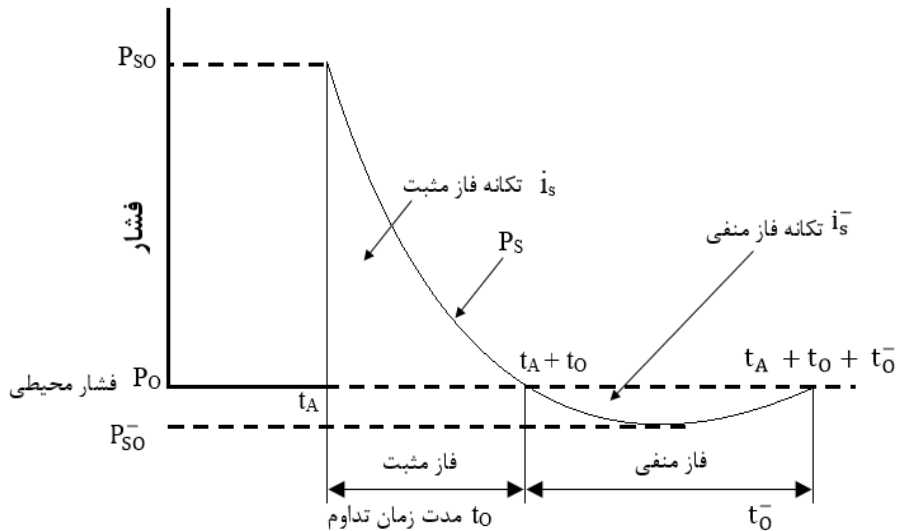
شکل برای هر انفجاری صادق است. در فواصل دورتر از منبع تولیدی انفجار، شکل موج دارای فاز منفی نیز می‌شود که در شکل مشخص است. قابل توجه است که سطح زیر نمودار فاز مثبت و منفی یکسان است. در محاسبات تحلیل‌های عملی، اغلب فاز مثبت مهم و مورد توجه است و فاز منفی غیر از انفجار در آب که باعث انفجار می‌شود، برای ما اهمیت چندانی ندارد. تنها یک سوم از کل انرژی شیمیایی انفجارهای بزرگ در روند انفجار خرج آزاد شده و میزان باقی مانده بسیار آهسته‌تر در هوا و زمانی که مواد منفجره با هوا و آتش مخلوط شده، آزاد می‌شود [۱۹].

روند مذکور در مورد تولید امواج مختلف و فشار ناشی از آنها در محاسبات مهندسی به صورت تغییرات فشار - زمان انفجار در شرایط مختلف تقریب زده شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا روند تغییرات فشار نسبت به زمان و مقدار حداکثر فشار ضربه در فاز مثبت از اهمیت بیشتری در محاسبات برخوردار بوده و معمولاً به صورت تابع‌نمایی مطابق شکل (۱) نشان داده می‌شود. تغییرات نشان داده شده در این شکل را

تاریخچه فشار - زمان موج می‌نامند: فشار موج انفجاری به مرور کاهش یافته تا به فشار اتمسفر برسد. به علت اینرسی ذرات هوا، پس از گذر از موج انفجاری، مولکول‌های هوا به حرکت خودشان در راستای دور شدن از مرکز ادامه می‌دهند و باعث تولید مکش در ادامه این موج فشاری می‌شوند؛ بنابراین موج انفجار در هوا دارای مقادیر مثبت و منفی و نهایتاً صفر شدن فشار است.

### ۳-۲- طبقه‌بندی موقعیت انفجار

انفجارها از نظر موقعیت نسبت به سازه به دودسته انفجار خارجی و انفجار داخلی تقسیم می‌شوند. انفجار خارجی یا انفجار غیر محبوس نیز متناسب با موقعیت خرج انفجار نسبت به سطح زمین و سازه، به ۳ نوع انفجار هوایی، انفجار سطحی و انفجار در عمق تقسیم می‌شود. جدول (۱) به ارائه طبقه‌بندی موقعیت‌های مختلف انفجار اختصاص دارد.



شکل (۱): تغییرات فشار زمان موج انفجار در فازهای مثبت و منفی [۸]

جدول (۱): طبقه‌بندی موقعیت انفجار [۳۲]

| موقعیت انفجار | ماهیت انفجار        | نوع بار وارد بر سازه   |
|---------------|---------------------|--|
| انفجار خارجی  | انفجار در هوا       | امواج مستقیم<br>ترکش   |
|               | انفجار در سطح زمین  | امواج مستقیم<br>امواج بازتابی<br>شوک زمین (حرکت امواج در زمین) |
|               | انفجار در داخل زمین | شوک زمین (حرکت امواج در زمین)<br>سرعت ذرات                     |
| انفجار داخلی  | محبوس               | ضربه داخلی   |
|               | نیمه محبوس          | ضربه داخلی   |

هوایی،  $P_{So}$ ، هدف بسیاری از تحقیقات علمی در دهه‌های ۱۹۴۰ الی ۱۹۶۰ میلادی بوده است. نخستین بار بیشینه فشار انفجار،  $P_{So}$ ، توسط براد در سال ۱۹۵۵ مطابق روابط در زیر پیشنهاد شد [۷].

(۲) حوزه نزدیک

$$P_{So} = \frac{6/7}{Z^3} + 1; (P_{So} > 10 \frac{kg}{cm^2})$$

(۳) حوزه میانی یا دور

$$P_{So} = \frac{5/85}{Z^3} + \frac{1/455}{Z^2} + \frac{0/975}{Z} - 0/019; (0/1 < P_{So} < 10 \frac{kg}{cm^2})$$

روابط هنریش<sup>۲</sup>

هنریش بر پایه مطالعات براد و با انجام اصلاحات تحلیلی بر روابط وی و همچنین بهره‌گیری از نتایج مطالعات آزمایشگاهی، روابط را متناسب با مقدار فاصله مقیاس شده برای محاسبه فشار مبنای انفجار ارائه نموده [۷]:

(۴)

$$P_{So} = \frac{0/00625}{Z^4} + \frac{0/357}{Z^3} + \frac{5/54}{Z^2} + \frac{14/072}{Z}; (0/05 \leq Z < 0/34)$$

### ۳-۳- فشار مبنای انفجار

از نکات مهم در بارگذاری انفجاری سازه‌ها محاسبه مقدار حداکثر بیش فشار در فاصله معینی از مرکز انفجار است که به فشار مبنای انفجار معروف است و با  $p$  نشان داده می‌شود. روابط مختلفی در مراجع معتبر برای محاسبه بیش فشار مبنا ارائه شده است که معمولاً به صورت تابعی از فاصله مقیاس شده،  $Z$  بیان می‌شود. فاصله مقیاس شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

$R$  فاصله از مرکز خرج به متر و  $W$  جرم خرج TNT به کیلوگرم است. در مورد مواد منفجره‌ای غیر از TNT، می‌توان جرم آن را با بکارگیری ضریبی به جرم معادل TNT تبدیل نمود. این ضریب تبدیل خرج‌های مختلف به جرم معادل TNT در مراجع مختلف ارائه شده است که در ادامه این نوشتار به آن اشاره خواهد شد.

### روابط براد<sup>۱</sup>

پارامترهای انفجار و روابط مورد استفاده برای تعیین حداکثر فشار برخورد ناشی از یک انفجار

<sup>2</sup> J. Henrych

<sup>1</sup> Brode

(۵)

$$P_{So} = \frac{6/194}{Z^3} + \frac{0/326}{Z^2} + \frac{2/132}{Z}; (0/3 \leq Z < 1)$$

(۶)

$$P_{So} = \frac{3/288}{Z^3} + \frac{4/05}{Z^2} + \frac{0/662}{Z}; (1 \leq Z < 10)$$

### ۳-۴- معیار شروع آسیب

متداول‌ترین نوع آسیب در طی فرایندهای شکل‌دهی، آسیب ترم است. در این نوع از آسیب رشد و جوانه‌زنی ریز حفره‌ها توأم با کرنش پلاستیک زیاد و در طی بارگذاری استاتیکی یا دینامیکی رخ می‌دهد تشکیل و رشد این آسیب، منجر به پارگی و شکست ماده می‌شود. منظور از شکست ماده، ازدست‌دادن ظرفیت تحمل بار است که در اثر تخریب تدریجی سفتی ماده ایجاد می‌شود و مدل‌سازی آن با استفاده از تئوری مکانیک شکست امکان‌پذیر است.

مدل‌سازی شکست ماده با ترکیبی از مکانیسم‌های متعدد شکست، در نرم‌افزار آباکوس امکان‌پذیر است. در این نرم‌افزار، مراحل معرفی مکانیسم شکست از چهار گام زیر تشکیل شده است.

- تعریف رفتار ماده سالم بدون (نقص)؛
- تعیین معیار شروع آسیب؛
- تعریف قانون رشد آسیب؛

حذف المان زمانی که سفتی ماده به‌طور کامل تخریب شد المان‌ها از محاسبات حذف می‌شوند. همچنین این نرم‌افزار برای فلزات نرم انواع مختلفی از معیارهای شروع آسیب را ارائه می‌دهد که هر یک از آنها با توجه به نوع شکست، ماده انتخاب می‌شوند. مقادیر معیار شروع آسیب در بازه صفر الی یک قرار می‌گیرند. مقدار «صفر» به معنای عدم وجود آسیب در المان مربوطه و مقدار «یک» به معنای گسستگی کامل ماده از المان مربوطه است [۳۳].

### ۳-۵- معادله پلاستیک جانسون کوک<sup>۱</sup>

برای کنترل شکست در حین تغییر شکل، از معیار شکست لحظه‌ای جانسون - کوک استفاده شده است. جانسون و کوک در سال ۱۹۸۵ رابطه‌ای برای شکست دینامیکی مواد ارائه نمودند که در کدهای رایانه‌ای استفاده شده است. بر اساس این طرح، شکست هنگامی که کرنش پلاستیک در ماده به مقدار  $\epsilon_D^{pl}$  برسد رخ خواهد داد [۳۴].

(۷)

$$\sigma_f = [A + B(\epsilon_p)^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p^*)][1 - (T^*)^m]$$

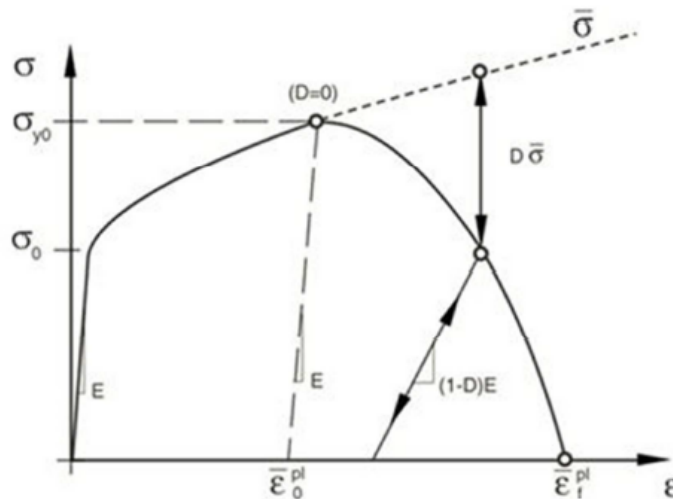
$$(T^*)^m = \frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)}$$

$$\dot{\epsilon}_p^* = \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_{p0}} \quad (۸)$$

$\sigma_f$  تنش جریان،  $\epsilon_p$  کرنش پلاستیک،  $\dot{\epsilon}_p$  نرخ کرنش،  $\dot{\epsilon}_{p0}$  نرخ کرنش مینا،  $\dot{\epsilon}_p^*$  نسبت نرخ کرنش به نرخ کرنش مینا،  $T$  دمای ماده،  $T_r$  دمای اتاق،  $T_m$  دمای ذوب ماده و  $T^*$  نسبت دما است [۳۳].

$A$ ،  $B$ ،  $m$  و  $n$  نیز ثابت‌های ماده هستند.

معیار آسیب جانسون کوک نیز برای پیش‌بینی شروع آسیب مربوط به حفره‌ها، رشد جوانه‌زنی آن‌ها در فلزات نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد این مدل کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب را به صورت تابعی از تنش سه محوره و نرخ کرنش در نظر می‌گیرد.



شکل (۲): شکل نمودار تنش - کرنش [۳۴]

بنابراین، متغیر آسیب  $D$  از صفر (ماده بدون آسیب) تا یک (گسیختگی کامل) تغییر نموده و در هر قدم حل، نمو مثبت آن توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود:

$$\Delta D = \frac{\Delta \varepsilon_{eq}}{\Delta \varepsilon_D^{pl}} \geq 0 \quad (11)$$

در این رابطه  $\Delta \varepsilon_{eq}$  و  $\Delta \varepsilon_D^{pl}$  به ترتیب کرنش معادل و کرنش پلاستیک معادل است [۳۴].

### ۳-۶- فاصله Stand Off

به فاصله مرکز انفجار تا سازه هدف را فاصله Stand Off گویند. پیش‌بینی این فاصله به منظور مقابله با اثرات بارهای انفجاری امری ضروری است. اغلب تعیین فاصله Stand Off بسیار دشوار است، چراکه تعیین این فاصله وابسته به پیش‌بینی وزن ماده منفجره است. آیین‌نامه وزارت دفاع ایالات متحده، در شرایط مواجهه با حداقل فواصل Stand Off، این فواصل را بر اساس سطح ایمنی موردنیاز تعیین و مشخص می‌کند.

فاصله Stand Off یک معیار ایمنی است که در زمینه‌های نظامی و مهندسی برای تعیین

$$\bar{\varepsilon}_D^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \eta)] [1 + d_4 \ln(\dot{\varepsilon}_p^*)] (1 + d_5 \bar{\theta})$$

$d_1 - d_5$  پارامترهای کرنش شکست ماده،  $\eta$  نسبت تنش سه محوره (تنش هیدرو استاتیک

به تنش فون مایسز<sup>۱</sup>) و  $\bar{\theta}$ ، دمای بی‌بعد است [۳۴]

این معیار برای بارگذاری‌های دینامیکی مناسب بوده و برای حالات شبه استاتیکی توصیه نمی‌شود. شکل زیر نمودار تنش - کرنش یک ماده نرم از زمان شروع بارگذاری تا وقوع شکست کامل نشان می‌دهد. مطابق شکل، ماده دارای سه فاز الاستیک خطی، کار سختی و آسیب است. از نقطه شروع ناپایداری، آسیب شروع شده و با افزایش بارگذاری رشد می‌کند. در این هنگام اگر باربرداری صورت بگیرد به علت افت خواص مکانیکی ماده، شیب باربرداری با حالت بارگذاری یکسان نخواهد بود [۳۳].

<sup>1</sup> Von Mises

جدول (۲): توصیف تهدید؛ (فما ۴۵۲) [۳۵]

| توصیف تهدید             | ماده منفجره (معادل کیلوگرم TNT) |
|-------------------------|---------------------------------|
| بمب لوله‌ای             | ۲/۵                             |
| بمب کمربندی انتحاری     | ۵                               |
| بمب جلیقه‌ای انتحاری    | ۱۰                              |
| بمب درون کیف و ساک دستی | ۲۵                              |
| خودروی بمب‌گذاری شده    | ۵۰۰                             |
| مسافر / محموله          | ۲۰۰۰                            |
| کامیون کوچک             | ۵۰۰۰                            |
| تانکر آب                | ۱۵۰۰۰                           |
| تریلی کوچک              | ۳۰۰۰۰                           |

مشخص شد که روزانه حدود ۳۰ تا ۴۰ دستگاه انواع خودروهای سنگین و کامیونت از این منطقه عبور می‌کنند. در این پژوهش، از میان دسته‌بندی خودروها، کامیون کوچک به‌عنوان نمونه انتخاب شده است [۳۵].

#### ۴- روش‌شناسی

وقتی روش پژوهش مدل‌سازی نرم‌افزاری باشد، صحت سنجی به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین مراحل پژوهش محسوب می‌شود به‌نحوی که اعتبار پژوهش مستقیماً به نتیجه صحت سنجی بستگی دارد به عبارتی صحت روش مدل‌سازی، مدل ماده مورد استفاده، بارگذاری و روش تحلیل درگرو عملیات صحت سنجی است. یکی از معتبرترین روش‌های صحت سنجی مقایسه نتایج تحلیل عددی با نتایج تجربی و آزمایشگاهی تمام‌مقیاس است که البته با توجه به محدود و غیراقتصادی بودن چنین آزمایش‌هایی می‌توان از نتایج آزمایش‌های کوچک‌مقیاس استفاده نمود.

در صورتی که نتایج تجربی در دسترس نباشد می‌توان از نتایج مدل‌سازی‌های معتبر استفاده نمود. روش دیگر نیز مقایسه نتایج با محاسبات دستی است که در مدل‌ها و مسائل پیچیده میسر نیست. در ابتدا مدل‌سازی عددی که توسط نرم‌افزار آباکوس انجام خواهد شد بایستی صحت سنجی انجام شود و در ادامه به بررسی رفتار یک

فاصله ایمن بین محل انفجار و سازه‌ها یا افراد استفاده می‌شود. هدف از تعیین این فاصله، کاهش خطر آسیب به افراد و ساختمان‌ها در صورت وقوع انفجار است.

برای مثال، در یک سناریوی نظامی، فاصله Stand Off می‌تواند برای تعیین بهترین مکان قرارگیری نیروها یا تجهیزات در برابر انفجارهای احتمالی استفاده شود. در مهندسی، این فاصله می‌تواند برای طراحی ساختمان‌ها و سازه‌ها به‌گونه‌ای باشد که در برابر انفجارهای نزدیک مقاومت کنند. در نهایت، استفاده صحیح از فاصله Stand Off به‌عنوان بخشی از یک راهبرد جامع امنیتی، می‌تواند به کاهش خطرات ناشی از انفجارها و افزایش ایمنی کلی کمک کند. این اصول در طراحی مکان‌های عمومی، تأسیسات نظامی و حتی در برنامه‌ریزی برای رویدادهای بزرگ که ممکن است هدف حملات تروریستی قرار گیرند، کاربرد دارد.

#### ۳-۷- تعیین بار مینا

جدول (۲)، بر اساس آیین‌نامه فما ۴۵۲<sup>۱</sup>، به‌عنوان مرجعی برای دسترسی سریع به فاصله ایمن از بمب با مقدار مشخصی از ماده انفجاری طراحی شده است [۳۵].

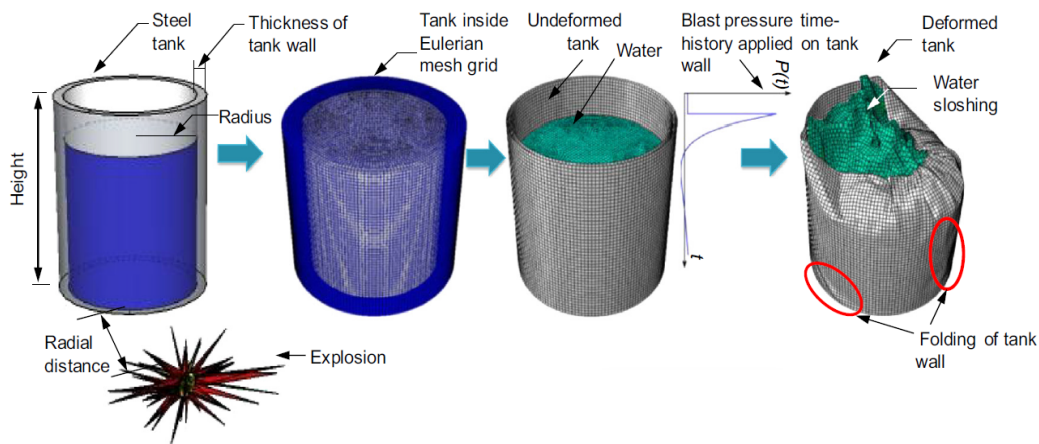
با بررسی شرایط مجتمع صنعتی مورد مطالعه،

<sup>1</sup> FEMA 452/January 2005





شکل (۴): نمائی از محل بارگیری کامیون‌های حمل بار در مجاورت مخزن



شکل (۶): مراحل شبیه‌سازی مخزن [۳۰]

مشخصات الگوی بارگذاری انفجاری نیز در جدول (۴) ارائه شده است. در این جدول که به صورت مستقیم از پژوهش میتال و همکاران (۲۰۱۴) استخراج شده است، وزن مقادیر وزن TNT معادل، فاصله از مرکز انفجار، فاصله مقیاس شده و حداکثر فشار انفجار ذکر شده است.

۳-۱-۴- مشخصات مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی صحت سنجی  
پارامترهای مواد شرکت‌کننده در مدل‌سازی به شرح جداول ۵ الی ۷ معرفی می‌شوند.

۲-۱-۴- اعتبارسنجی و تأیید صحت و دقت مدل مخازن در نرم‌افزار آباکوس  
به دلیل تأیید صحت و دقت مدل مخازن و اطمینان از نتایج حاصله و منطبق بر واقعیت، می‌بایست نتایج خروجی از نرم‌افزار اعتبارسنجی شود. با توجه اینکه در سناریوی اصلی مدل‌سازی این پژوهش، بحث سیال (آمونیاک) در مخازن در نظر گرفته می‌شود؛ از این رو به منظور صحت سنجی نرم‌افزار از پژوهش میتال و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شده [۳۰] و نتایج حاصل شده از نرم‌افزار با نتایج آن پژوهش مطابقت داده شد. مشخصات مدل‌های مورد مطالعه در پژوهش به شرح زیر است:

جدول (۳): مشخصات مدل‌های مورد مطالعه در پژوهش [۳۰]

| Parameters considered for analysis |                       |                       |                   |                                       |                                    |   |   |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---|---|
| Analysis cases                     | Radius of tank, R (m) | Height of tank, H (m) | Aspect ratio, H/R | Percentage filled, P <sub>f</sub> (%) | Tank boundary conditions           | Thickness of tank wall, t <sub>w</sub> (mm) | Scaled distance, Z (m/kg <sup>1/3</sup> ) |
| 1.                                 | 0.6                   | 0.3                   | 0.5               | 50, 75, 100                           | Fixed, Simply Supported, and Rigid | 1, 5, 10                                    | 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5                   |
| 2.                                 | 0.6                   | 0.6                   | 1.0               | 50, 75, 100                           |                                    | 1   |   |
| 3.                                 | 0.6                   | 1.2                   | 2.0               | 50, 75, 100                           |                                    | 1   |   |
| 4.                                 | 0.6                   | 1.56                  | 2.6               | 50, 75, 100                           |                                    | 1, 5, 10                                    |   |

جدول (۴): اوج فشار انفجار برای فواصل مقیاس بندی شده مختلف [۳۰]

| Radial distance, R (m) | Equivalent TNT mass, W (kg) | Scaled distance, Z (m/kg <sup>1/3</sup> ) | Peak blast pressure, P <sub>so+</sub> (kPa) |
|------------------------|-----------------------------|---|---|
| 2.35                   | 100                         | 0.5                                       | 1162.46                                     |
| 5                      | 100                         | 1.0                                       | 243.90                                      |
| 7                      | 100                         | 1.5                                       | 107.66                                      |
| 9.5                    | 100                         | 2.0                                       | 51.39                                       |
| 11.5                   | 100                         | 2.5                                       | 37.50                                       |

جدول (۵): پارامترهای آب [۳۰]

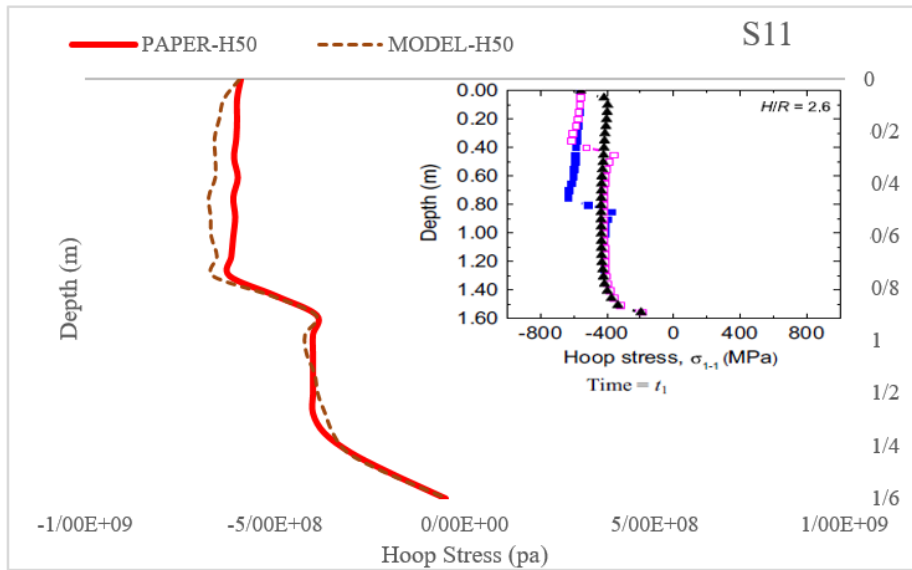
|  |       |
|--|-------|
| چگالی  | ۱۰۰۰  |
| سرعت صوت در آب                                       | ۱۵۰۰  |
| ثابت ماده (Γ <sub>0</sub> )                          | ۰     |
| ثابت ماده  | ۰     |
| ویسکوزیته (μ <sub>air</sub> , N-sec/m <sup>2</sup> ) | ۰,۰۰۱ |

جدول (۶): پارامترهای هوا [۳۰]

|  |                        |
|--|------------------------|
| فشار هوا (P, kPa)                                    | ۱۰۱/۳                  |
| دما (T, K)   | ۳۰۰                    |
| چگالی (ρ <sub>0,air</sub> , kg/m <sup>3</sup> )      | ۱۲۷,۱                  |
| ثابت جهانی گاز (R, J/kg-K)                           | ۲۸۷                    |
| گرمای ویژه در حجم ثابت (C <sub>v</sub> , J/kg-K)     | ۷۱۶                    |
| ویسکوزیته (μ <sub>air</sub> , N-sec/m <sup>2</sup> ) | ۱۰×۸۴۸/۱ <sup>-۵</sup> |

جدول (۷): پارامترهای مخزن مقاله صحت سنجی [۳۰]

| ضریب پواسون   | A (MPa) | B (MPa)    | مدول الاستیسیته (GPa)      | چگالی (kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------------|---------|------------|----------------------------|----------------------------|
| ۰/۳           | ۳۶۰     | ۶۳۵        | ۲۱۰                        | ۷۸۰۰                       |
| n             | m       | دمای ذوب   | پارامترهای آسیب جانسون کوک |                            |
| ۰             | ۰       | ۰          |                            |                            |
| نرخ کرنش مرجع | C       | دما انتقال |                            |                            |
| ۱۰۰           | ۰/۰۷۵   | ۰          |                            |                            |

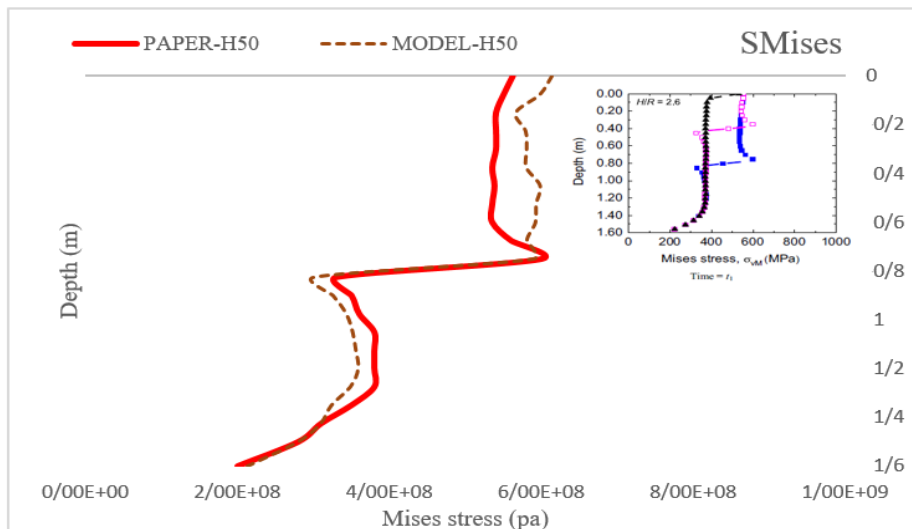


نمودار (۱): بررسی تنش حلقه‌ای ( $\sigma_{1-1}$ ) روی دیواره مخزن

درصد پرشدگی مخزن ۵۰ درصد

جدول (۸): مقایسه درصد اختلاف مقاله صحت سنجی با نمونه شبیه‌سازی شده

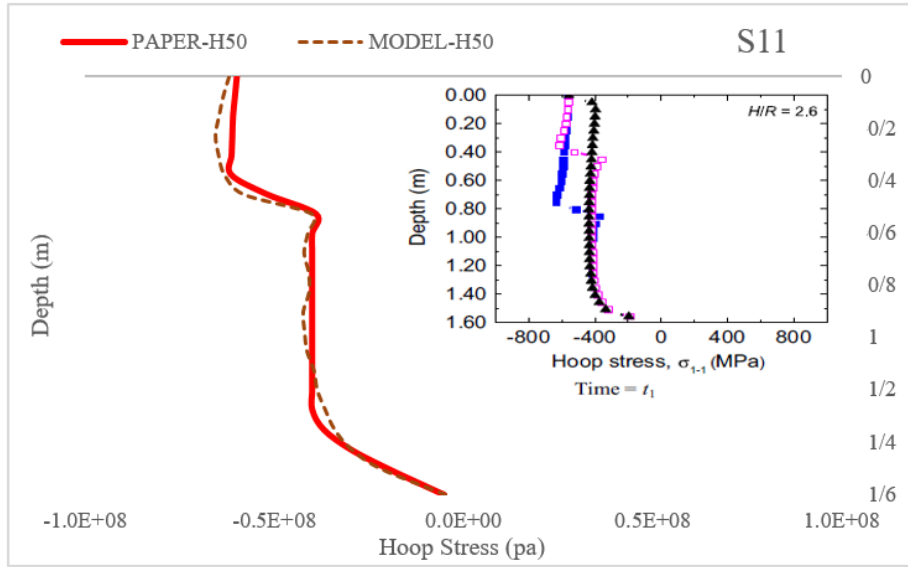
| متوسط درصد اختلاف | حداکثر درصد اختلاف |
|-------------------|--------------------|
| ۶%                | ۱۰%                |



نمودار (۲): نمودار تنش فون میسز روی دیواره مخزن

جدول (۹): مقایسه درصد اختلاف مقاله صحت سنجی با نمونه شبیه‌سازی شده

| متوسط درصد اختلاف | حداکثر درصد اختلاف |
|-------------------|--------------------|
| ۷%                | ۱۰%                |

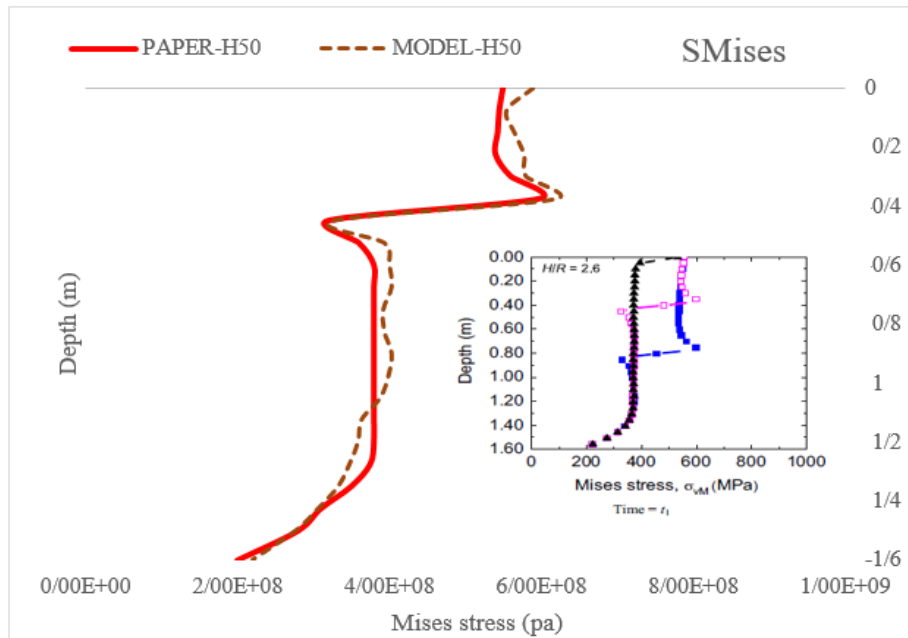


نمودار (۳): بررسی تنش حلقه‌ای ( $\sigma_{1-1}$ ) روی دیواره مخزن

درصد پرشدگی مخزن ۷۵ درصد:

جدول (۱۰): مقایسه درصد اختلاف مقاله صحت سنجی با نمونه شبیه‌سازی شده

| متوسط درصد اختلاف | حداکثر درصد اختلاف |
|-------------------|--------------------|
| ۴%                | ۱۰%                |



نمودار (۴): نمودار تنش فون مایسز روی دیواره مخزن

جدول (۱۱): مقایسه درصد اختلاف مقاله صحت سنجی با نمونه شبیه‌سازی شده

| متوسط درصد اختلاف | حداکثر درصد اختلاف |
|-------------------|--------------------|
| ۵%                | ۹%                 |

فاصله ایمن را شناسایی کنیم. زمانی که ماکزیمم تنش وارده کمتر از تنش تسلیم باشد JCCRT عدد صفر را نشان می‌دهد و بیانگر عدم وجود آسیب در بدنه است.

#### ۴-۱-۵- مشخصات هندسی مخزن مورد مطالعه

مخزن مورد مطالعه دارای بدنه فولادی و به شکل استوانه‌ای است. جزئیات مشخصات مخزن در شکل (۷) و جدول (۱۲) ارائه شده است. همچنین، مدل ایجاد شده از مخزن برای انجام شبیه‌سازی، در شکل (۸) نشان داده شده است.

#### ۴-۱-۶- مشخصات مصالح مصرفی

مشخصات مصالح بکار گرفته شده در شبیه‌سازی مخزن در جداول (۱۳ و ۱۴) معرفی شده‌اند:

#### ۴-۱-۷- آنالیز حساسیت مش

تحلیل مش<sup>۳</sup> در نرم‌افزار آباکوس به منظور اطمینان از دقت و کارایی حل عددی انجام می‌شود. در این فرایند، مدل هندسی به المان‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود و نتایج حاصل برای اندازه‌های مختلف مش ارزیابی می‌شود. هدف اصلی این تحلیل، یافتن مش بهینه‌ای است که دقت بالا را با کمترین هزینه محاسباتی ممکن ترکیب کند.

در نمودار ارائه شده، چهار نوع مش مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند که هر کدام با رنگ و نوع خط متفاوتی نمایش داده شده‌اند. برای تعیین ابعاد بهینه مش، اندازه‌های مختلف با دقت مورد

پس از انجام تحلیل توسط حلگر صریح در نرم‌افزار آباکوس، مشاهده می‌شود انطباق قابل توجهی بین نتایج وجود دارد که بیانگر صحت روش مدل‌سازی، مدل ماده مورد استفاده، بارگذاری و روش تحلیل است.

#### ۴-۱-۴- تعیین فاصله مناسب (حریم امن)<sup>۱</sup>

باتوجه به اینکه در محیط صنعتی مورد مطالعه، اکثر خودروهای عبوری از نوع کامیون و خودروهای باری سنگین است و از طرفی محل بارگیری کامیون‌های حمل بار در مجاورت مخزن مورد نظر قرار دارد؛ از این رو وزن ماده منفجره TNT (بار مبنا) مطابق دستورالعمل فم-۴۵۲<sup>۲</sup>، معادل انفجار ۵۰۰۰ کیلوگرم TNT انتخاب شده است و نوع انفجار در نظر گرفته شده در این تحقیق از نوع انفجار سطحی است.

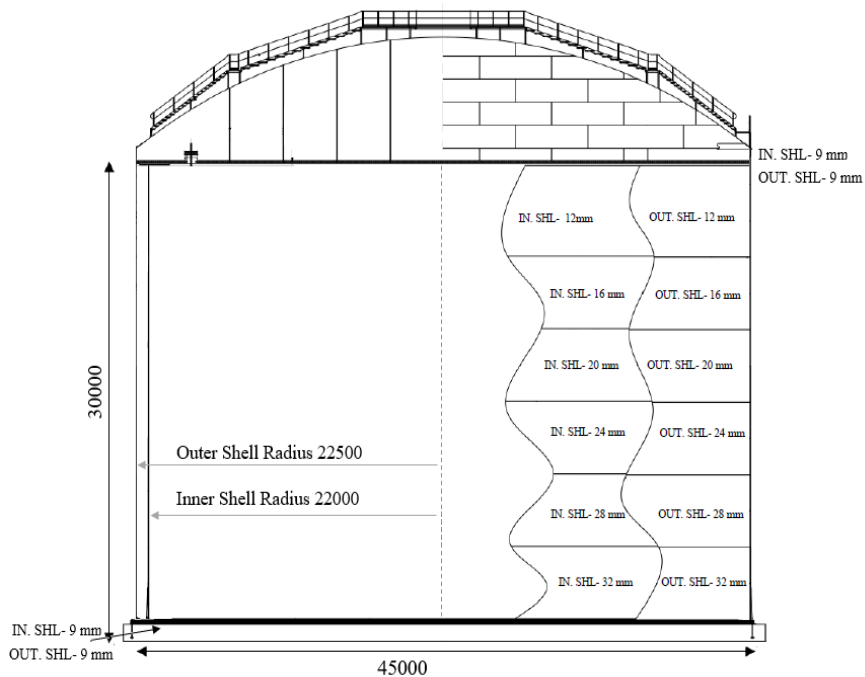
در اینجا به منظور ایمن‌سازی مخزن آمونیاک، دو نوع از مصادیق ایمن‌سازی مطابق با شاخص‌های معرفی شده در قسمت‌های قبلی را در دو حالت زیر در نظر گرفته و نتایج حاصل مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. در این حالت ماده منفجره ۵۰۰۰ کیلوگرم (بار مبنا) را در فواصل مختلف نسبت به مخزن (stand off) قرار می‌دهیم تا باتوجه به بار مبنا فاصله ایمن تعیین شود.

با بررسی نمودارهای PEEQ ( کرنش پلاستیک معادل)، Von mises (تئوری فون مایسز) و JCCRT (معیار شروع آسیب جانسون - کوک) می‌توانیم آسیب‌های وارده را ارزیابی کرده و

<sup>۱</sup> Stand Off

<sup>۲</sup> FEMA 452/January 2005

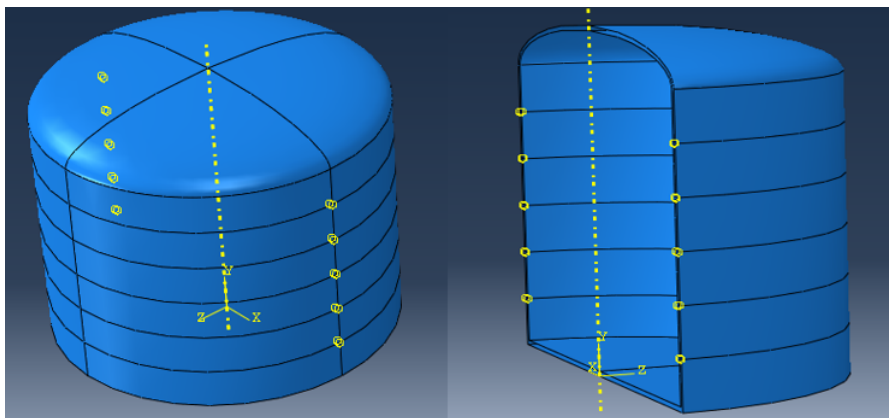
<sup>۳</sup> Mesh Analysis



شکل (۷): شکل کلی مخزن مورد مطالعه

جدول (۱۲): جزئیات پیکربندی ساختاری مخزن فولادی مورد مطالعه

| ضخامت لایه بیرونی (OUT. SHL) (mm) | ضخامت لایه داخلی (IN. SHL) (mm) | ارتفاع (m) | PLATE   |   |
|-----------------------------------|---------------------------------|------------|---------|---|
| ۹                                 | ۹                               | -          | (Roof)  | ۱ |
| ۱۲                                | ۱۲                              | ۵          | (Wall)  | ۲ |
| ۱۶                                | ۱۶                              | ۵          | (Wall)  | ۳ |
| ۲۰                                | ۲۰                              | ۵          | (Wall)  | ۴ |
| ۲۴                                | ۲۴                              | ۵          | (Wall)  | ۵ |
| ۲۸                                | ۲۸                              | ۵          | (Wall)  | ۶ |
| ۳۲                                | ۳۲                              | ۵          | (Wall)  | ۷ |
| ۹                                 | ۹                               | -          | (Floor) | ۸ |



شکل (۸): شبیه‌سازی مخزن در نرم‌افزار آباکوس

جدول (۱۳): پارامترهای آمونیاک مایع [۲۵]

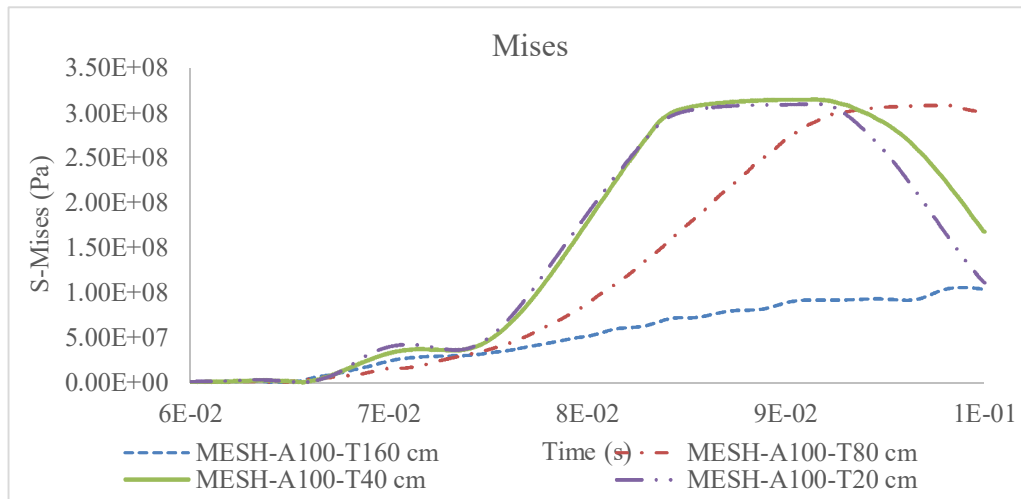
| چگالی | ویسکوزیته             | سرعت صوت | ضرایب معادله حالت |            |
|-------|-----------------------|----------|-------------------|------------|
|       |                       |          | s                 | $\Gamma_0$ |
| 729   | $2/55 \times 10^{-4}$ | 1100     | .                 | .          |

جدول (۱۴): پارامترهای مخازن اصلی [۲۶]

| چگالی<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | مدول الاستیسیته<br>(GPa) | ضریب پواسون | گرمای ویژه |
|------------------------------|--------------------------|-------------|------------|
| ۷۸۵۰                         | ۲۰۰                      | ۰/۳         | ۴۶۰        |

| پارامتر پلاستیک<br>جانسون کوک | A<br>(MPa) | B<br>(MPa) | m          | n             |
|-------------------------------|------------|------------|------------|---------------|
|                               |            | ۲۴۶        | ۱۳۰        | ۱             |
| پارامتر آسیب<br>جانسون کوک    | d1         | d2         | d3         | d4            |
|                               | ۰/۰۵       | ۳/۴۴       | -۲/۱۲      | ۰/۰۰۲         |
| پارامتر آسیب<br>جانسون کوک    | d5         | دمای ذوب   | دما انتقال | نرخ کرنش مرجع |
|                               | ۰/۶۱       | ۱۷۰۰       | ۱۳۰۰       | ۱             |

مقایسه تنش فون مایسز در نقطه‌ای به ارتفاع ۲۲.۵ متری روی لایه بیرونی مخزن برای انفجار در فاصله ۵۰ متری

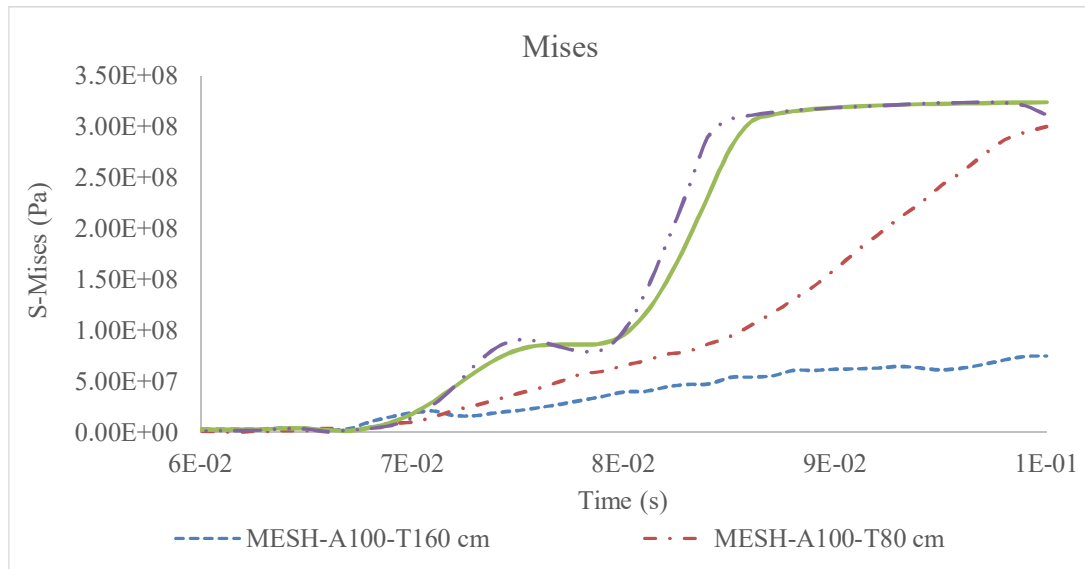


نمودار (۵): تنش فون میسز - زمان؛ (مأخذ: نگارندگان)

جدول (۱۵): آنالیز حساسیت مش؛ (مأخذ: نگارندگان)

| MODEL     | MESH-A100-T160 cm | MESH-A100-T80 cm  | MESH-A100-T40 cm | MESH-A100-T20 cm  |
|-----------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| MAX MISES | $0.6 \times 10^8$ | $0.3 \times 10^8$ | $1 \times 10^8$  | $0.9 \times 10^8$ |
| %         | ۶۶                | ۲                 | ۲                | -                 |

مقایسه تنش فون مایسز در نقطه‌ای به ارتفاع ۲۷ متری روی لایه بیرونی مخزن برای انفجار در فاصله ۵۰ متری

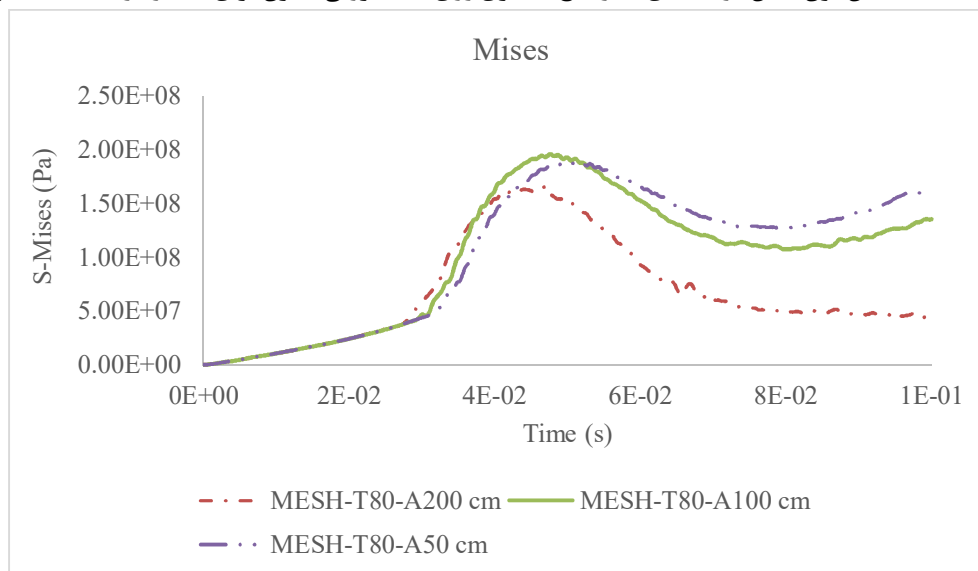


نمودار (۶): تنش فون مایسز - زمان

جدول (۱۶): آنالیز حساسیت مش؛ (مأخذ: نگارندگان)

| MODEL     | MESH-A100-T160 cm  | MESH-A100-T80 cm   | MESH-A100-T40 cm  | MESH-A100-T20 cm  |
|-----------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| MAX MISES | $7/10^8 \times 46$ | $3/10^8 \times 00$ | $3/10^8 \times 2$ | $3/10^8 \times 2$ |
| %         | ٪۷۵                | ٪۷                 | ٪۰                | -                 |

مقایسه تنش فون میسز در نقطه‌ای به ارتفاع ۷ متری روی لایه بیرونی مخزن برای انفجار در فاصله ۲۰ متری

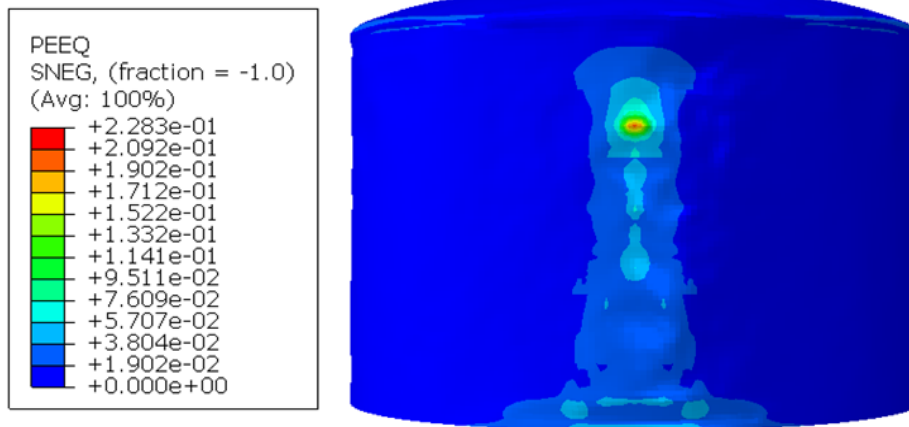


نمودار (۷): تنش فون مایسز - زمان؛ (مأخذ: نگارندگان)

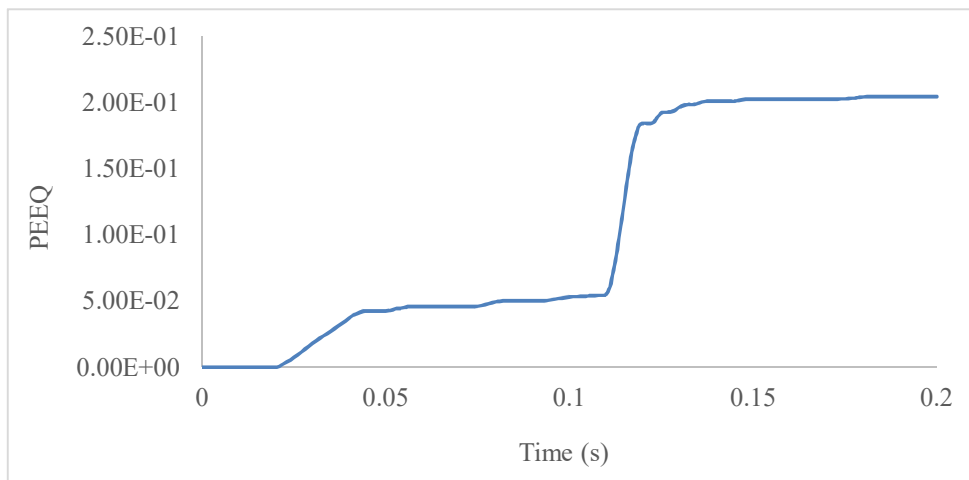
جدول (۱۷): آنالیز حساسیت مش؛ (مأخذ: نگارندگان)

| MODEL     | MESH-T80-A200<br>cm | MESH-T80-A100<br>cm | MESH-T80-A50<br>cm |
|-----------|---------------------|---------------------|--------------------|
| MAX MISES | $1/10^4 \times 68$  | $1/10^4 \times 96$  | $1/10^4 \times 88$ |
| %         | ٪۱۵                 | ٪۴                  | -                  |

ماده منفجره ۵۰۰۰ کیلوگرم در فاصله ۱۰ متری از وجه جلویی مخزن  
بررسی کرنش پلاستیک بر روی دیواره مخزن



شکل (۹): کانتور کرنش پلاستیک در زمان ۰/۲ ثانیه؛ (مأخذ: نگارندگان)



نمودار (۸): تنش کرنش پلاستیک - زمان (در محل ایجاد کرنش پلاستیک حداکثر در مخزن)؛  
(مأخذ: نگارندگان)

پارامترهای کلیدی شبیه‌سازی مشخص شود. نتایج این تحلیل‌ها شامل اطلاعاتی در زمینه دقت محاسبات، پایداری شبیه‌سازی و زمان موردنیاز برای حل مسئله است و در ادامه

ارزیابی قرارگرفته‌اند تا بالاترین دقت شبیه‌سازی با کمترین هزینه محاسباتی حاصل شود. این فرایند شامل مقایسه نتایج حاصل از مش‌های با اندازه‌های گوناگون است تا تأثیر تغییر ابعاد بر



ارائه شده‌اند. این نتایج در انتخاب ابعاد مش بهینه کمک می‌کنند تا تعادلی مناسب بین دقت و کارایی برقرار شود.

باتوجه به نتایج تحلیل مدل‌ها و همگرایی‌ها در مش‌ها MESH A100-T40 cm (مش آمونیاک ۱۰۰ سانتی‌متر و مش مخزن ۴۰ سانتی‌متر) نیازی به کوچک‌تر شدن اندازه مش‌ها وجود ندارد؛ بنابراین (MESH A100-T40 cm) برای مش‌بندی انتخاب شده است.

توضیح و تحلیل نمودار: این نمودار، کرنش پلاستیک (PEEQ) را در دیواره مخزن در برابر زمان نشان می‌دهد. این شرایط در حضور یک ماده منفجره به جرم ۵۰۰۰ کیلوگرم و فاصله ۱۰ متری از وجه جلویی مخزن بررسی شده است. کرنش پلاستیک در نقطه‌ای که بیشترین مقدار آن در مخزن رخ داده، محاسبه و ترسیم شده است.

روند نمودار

- فاز اولیه (۰ تا ۰/۰۲ ثانیه): مقدار کرنش پلاستیک نزدیک به صفر است، نشان‌دهنده عدم تغییر محسوس در ماده
- فاز رشد آهسته (۰/۰۲ تا ۰/۱۲ ثانیه): کرنش پلاستیک به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که موج انفجار به دیواره مخزن رسیده و ماده به تدریج وارد ناحیه پلاستیک شده است.
- فاز افزایش ناگهانی (۰/۱۲ تا ۰/۱۴ ثانیه): یک رشد ناگهانی در کرنش پلاستیک مشاهده می‌شود که به دلیل اعمال تنش شدید ناشی از موج انفجار است.
- فاز پایدار (بعد از ۰/۱۴ ثانیه): کرنش پلاستیک به یک مقدار ثابت نزدیک می‌شود، نشان‌دهنده این است که ماده به حالت پایداری رسیده و تغییرات اضافی رخ نمی‌دهد.

### بررسی تنش بر روی دیواره مخزن

این نمودار تغییرات تنش فون مایسز را در برابر زمان در محلی که کرنش پلاستیک حداکثر در مخزن رخ داده، نشان می‌دهد. تنش فون مایسز معیار اصلی برای ارزیابی رفتار تسلیم در مواد تحت بارگذاری چند محوره است و کاربرد زیادی در تحلیل‌های مکانیک شکست دارد.

با بررسی نمودارها و مطابق با تئوری انرژی تغییر شکل (تنش فون مایسز) می‌توان به این نتیجه رسید که قسمت‌هایی از بدنه مخزن که به نقطه تسلیم رسیده و از حد مجاز خود عبور کرده‌اند، از ناحیه الاستیک وارد ناحیه پلاستیک شده و دیواره مخزن در آن قسمت دچار تغییر شکل می‌شود.

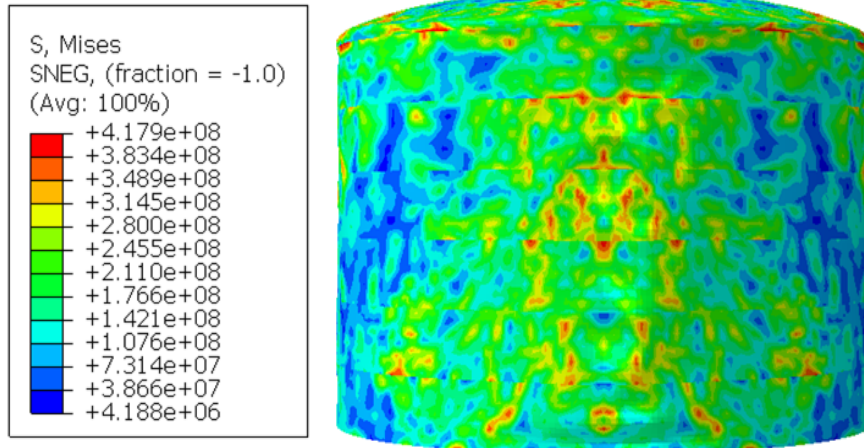
این نمودار تغییرات آسیب (JCCRT) در برابر زمان را در محلی که کرنش پلاستیک حداکثر در مخزن رخ داده، نشان می‌دهد. پارامتر آسیب نشان‌دهنده سطح خرابی و تضعیف ماده در اثر بارگذاری‌های شدید؛ مانند انفجار است.

### ۴-۱-۸- روند کلی نمودار

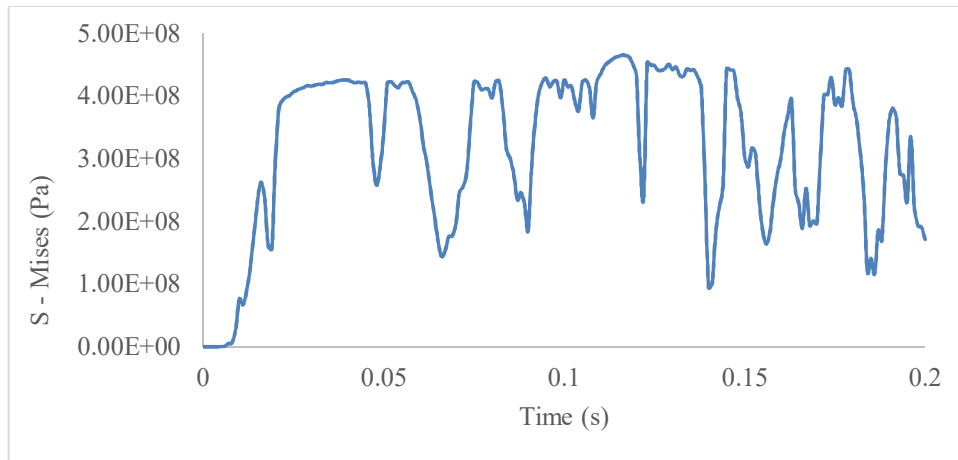
- فاز اولیه (۰ تا ۰/۰۴ ثانیه): شاخص آسیب به سرعت افزایش پیدا می‌کند. این افزایش نشان‌دهنده شروع فرآیند آسیب در ماده است که هم‌زمان با اعمال موج انفجار آغاز می‌شود.
- فاز پایداری نسبی (۰/۰۴ تا ۰/۱۲ ثانیه): نرخ افزایش آسیب کاهش می‌یابد و نمودار به صورت تقریباً یکنواخت ادامه می‌یابد. در این بازه، آسیب به تدریج انباشته می‌شود اما تغییری ناگهانی مشاهده نمی‌شود.

<sup>1</sup> معیار شروع آسیب JCCRT: Johnson-Cook Criterion (جانسون - کوک)

بررسی تنش بر روی دیواره مخزن

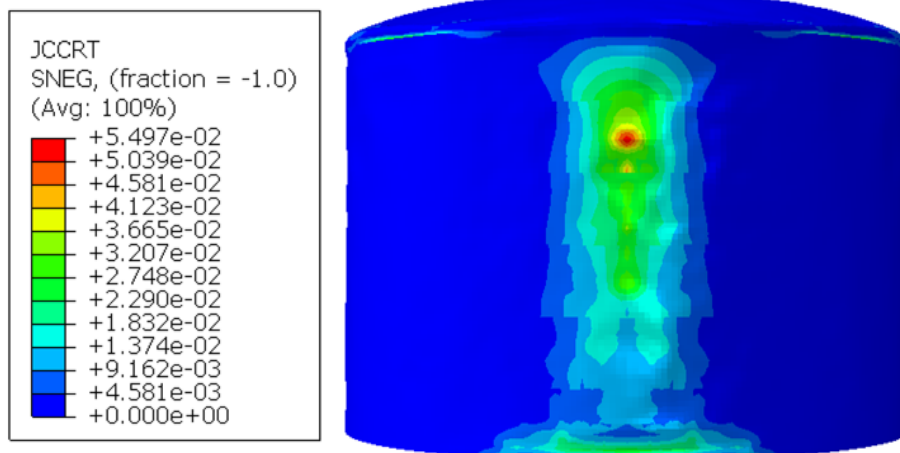


شکل (۱۰): کانتور تنش فون میسز در زمان ۰/۲ ثانیه؛ (مأخذ: نگارندگان)

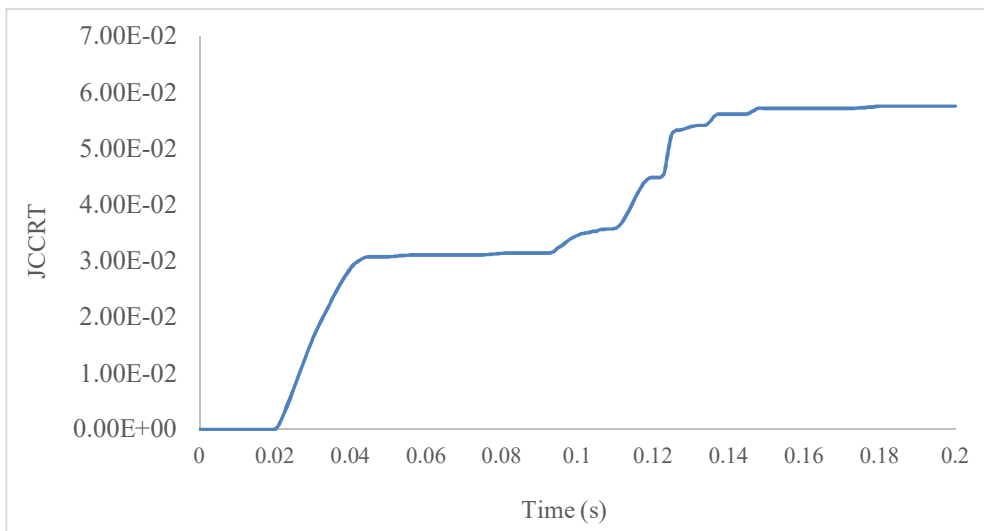


نمودار (۹): تنش فون میسز - زمان (در محل ایجاد کرنش پلاستیک حداکثر در مخزن)؛ (مأخذ: نگارندگان)

بررسی آسیب بر روی دیواره مخزن

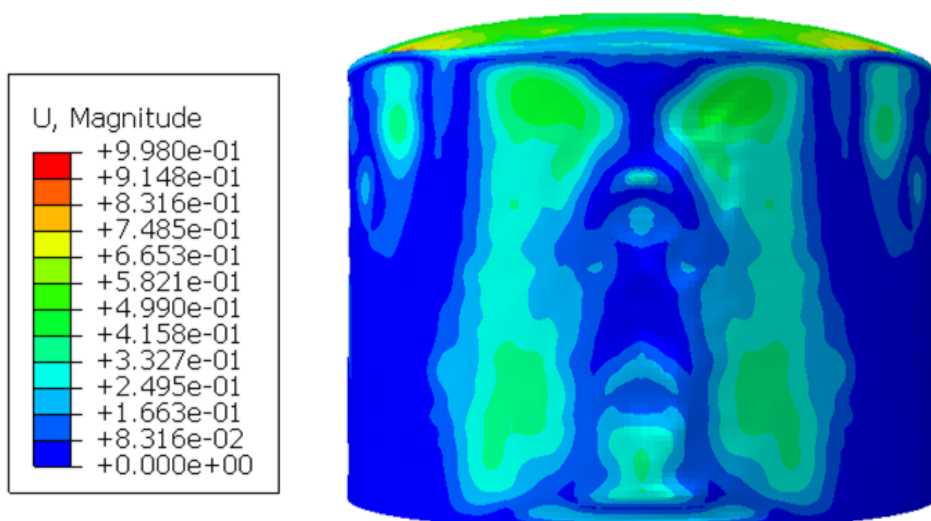


شکل (۱۱): کانتور آسیب در زمان ۰/۲ ثانیه؛ (مأخذ: نگارندگان)



نمودار (۱۱): آسیب (JCCRT) - زمان (در محل ایجاد کرنش پلاستیک حداکثر در مخزن)؛ (مأخذ: نگارندگان)

### بررسی تغییر شکل بر روی دیواره مخزن

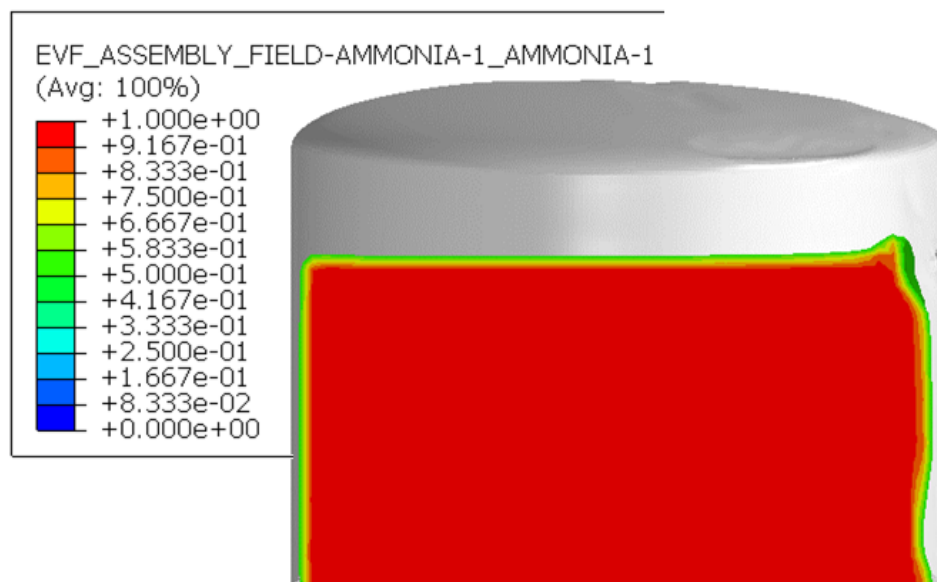


شکل (۱۲): کانتور تغییر شکل در زمان ۰/۲ ثانیه (مأخذ: نگارندگان)

این شکل کانتورهای تغییر شکل<sup>۱</sup> دیواره مخزن را در زمان ۰/۲ ثانیه پس از انفجار نشان می‌دهد. تغییر شکل، به‌عنوان معیاری از جابه‌جایی نقاط مختلف بر روی دیواره مخزن، نقش مهمی در تحلیل پایداری و استحکام ساختاری مخزن تحت بارگذاری انفجاری ایفا می‌کند.

- فاز افزایش مجدد (۰/۱۲ تا ۰/۱۶ ثانیه): شاخص آسیب دوباره با نرخ بالاتری افزایش می‌یابد که احتمالاً به دلیل اثرات موج‌های بازتابی انفجار و تعامل آن‌ها با دیواره مخزن است.
- فاز نهایی (۰/۱۶ تا ۰/۲ ثانیه): نمودار به حالت پایداری نزدیک می‌شود و آسیب به مقدار نهایی خود می‌رسد.

<sup>1</sup> Displacement



شکل (۱۳): کانتور تلاطم در زمان ۰/۲ ثانیه (مأخذ: نگارندگان)

جدول (۱۸): بیشینه نمودارهای استخراجی از شبیه‌سازی (مأخذ: نگارندگان)

| بیشینه نمودارهای استخراجی از شبیه‌سازی در فاصله ۱۰ متر |                    |                    |       |
|--|--------------------|--------------------|-------|
| PEEQ   | S - Mises          | S11                | JCCRT |
| $۲/۳۱ \times ۱۰^{-۱}$                                  | $۴/۶۶ \times ۱۰^۸$ | $۵/۰۱ \times ۱۰^۸$ | ۰,۰۵۷ |

### توضیحات کانتور

مناطق با تلاطم بالا (قرمز): بیشترین تلاطم در ناحیه پایینی و مرکزی مخزن رخ داده است. این نواحی احتمالاً تحت تأثیر مستقیم موج انفجار یا جابه‌جایی شدید دیواره مخزن قرار گرفته‌اند.

مناطق با تلاطم کم (سبز و آبی): نواحی نزدیک به دیواره‌ها و بالای مخزن کمترین مقدار تلاطم را دارند.

این آرامش ممکن است به دلیل محدودیت حرکت سیال در نزدیکی مرزهای مخزن باشد. نمودارهای رسم شده مربوط به المان لبه تقارن نزدیک‌ترین فاصله به انفجار که کرنش وجود دارد رسم شد و کانتور تنش برای مربوط به کل مخزن است.

مناطق با تغییر شکل بالا (قرمز و زرد): این نواحی بیشترین تغییر شکل را نشان می‌دهند. معمولاً در محل‌های نزدیک به نقطه برخورد مستقیم موج انفجار یا نقاط ضعف ساختاری دیده می‌شوند.

تحلیل تصویر: بررسی تلاطم سیال درون مخزن این شکل نشان‌دهنده کانتورهای توزیع تلاطم سیال (آمونیاک) درون مخزن است. تلاطم سیال که با مقیاس رنگی مشخص شده، میزان آشفتگی یا تغییرات در سطح و توزیع سیال را به دلیل اثرات خارجی مانند موج انفجار یا حرکت مخزن نشان می‌دهد.

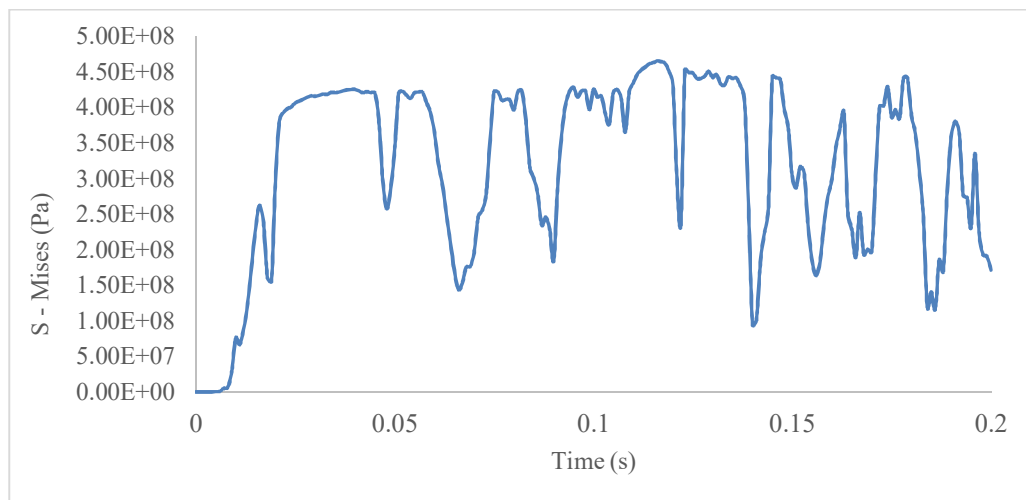
#### ۴-۱-۹- ارزیابی پاسخ و انتشار خسارت برای فواصل مختلف (Stand Off)

در فاصله ۱۰ متری از مرکز انفجار، رویداد در حوزه نزدیک رخ داده است ( $Z=1/47 < 3$ ) همان طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، فشار موج انفجار در هنگام برخورد به سازه به حدی بالا است که حتی لایه‌های پایینی مخزن، با وجود ضخامت بیشتر، بررسی نمودارها و تحلیل مبتنی بر تئوری انرژی تغییر شکل (تنش فون مایسز) نشان می‌دهد که بخش‌هایی از بدنه مخزن که به حد تسلیم رسیده‌اند و از آستانه مجاز خود عبور کرده‌اند، وارد ناحیه پلاستیک شده‌اند. در نتیجه، دیواره مخزن در این نواحی تغییر شکل دائمی را تجربه می‌کند. این رفتار نشان‌دهنده عبور ماده از ناحیه الاستیک و آغاز تغییرات پلاستیک تحت اثر بارگذاری شدید ناشی از موج انفجار است.

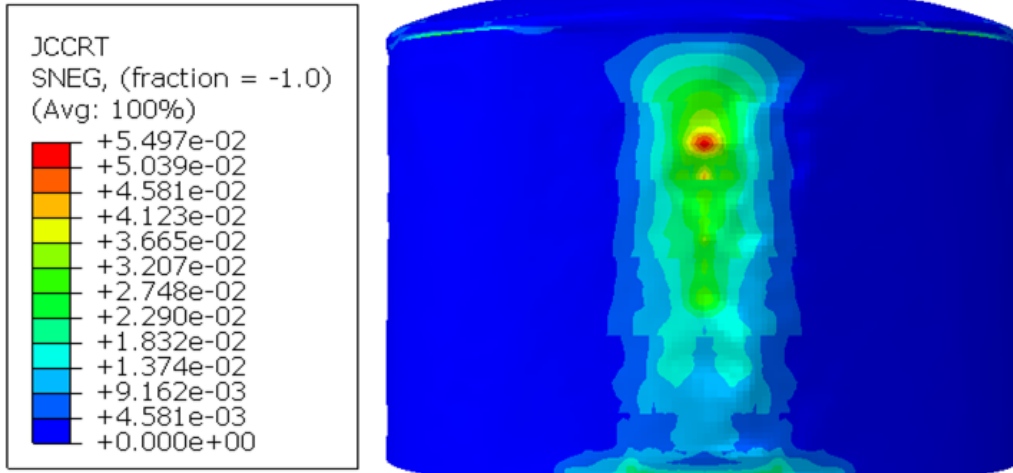
همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر تنش فون مایسز (466 Mpa) از مقدار تنش تسلیم فولاد مخزن (278 Mpa) فراتر رفته است؛

بنابراین، سازه وارد ناحیه رفتار پلاستیک شده و تغییر شکل‌های دائمی را تجربه می‌کند.

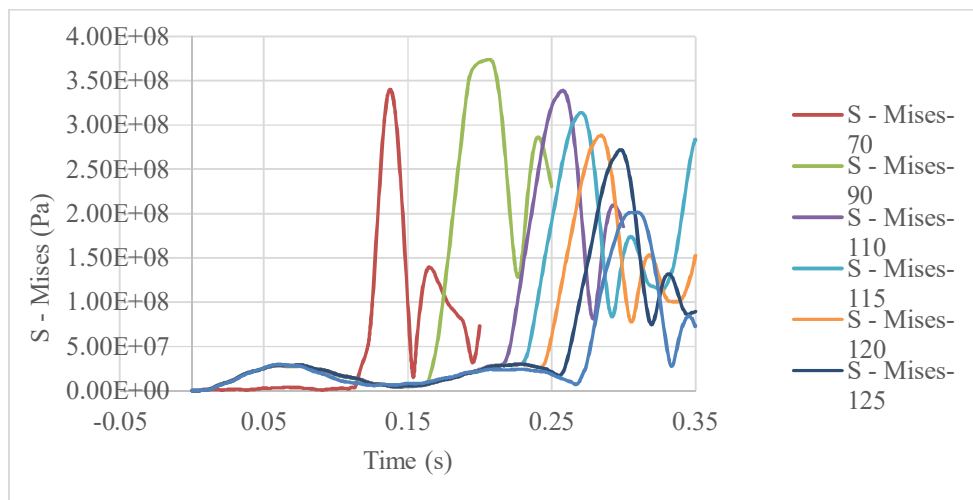
با افزایش فاصله بین ماده منفجره و مخزن (حریم ایمن)، انفجار از حوزه نزدیک به حوزه دور ( $Z > 3$ ) منتقل شده و میزان آسیب در بدنه مخزن کمتر می‌شود. در این سناریو ما به دنبال اولین نقطه تسلیم هستیم؛ از این رو در هر فاصله، محل تنش ماکزیمم و نقطه تسلیم متفاوت از محل قبلی بوده است. در فواصل نزدیک اول دیوار مخزن مورد آسیب قرار می‌گیرد و نمودار فون مایسز بیانگر رسیدن به نقطه تسلیم در بدنه مخزن است. ما با توجه به اینکه در فواصل دور با کاهش شدت فشار موج انفجار، بدنه مخزن آسیب کمتری دیده و اطمینان از مخزن مورد آسیب بیشتری قرار می‌گیرد که ضخامت کمتری داشته باشد. از این رو در فواصل دورتر بیشترین تنش از بدنه به قسمت‌های بالایی و سقف مخزن منتقل می‌شود.



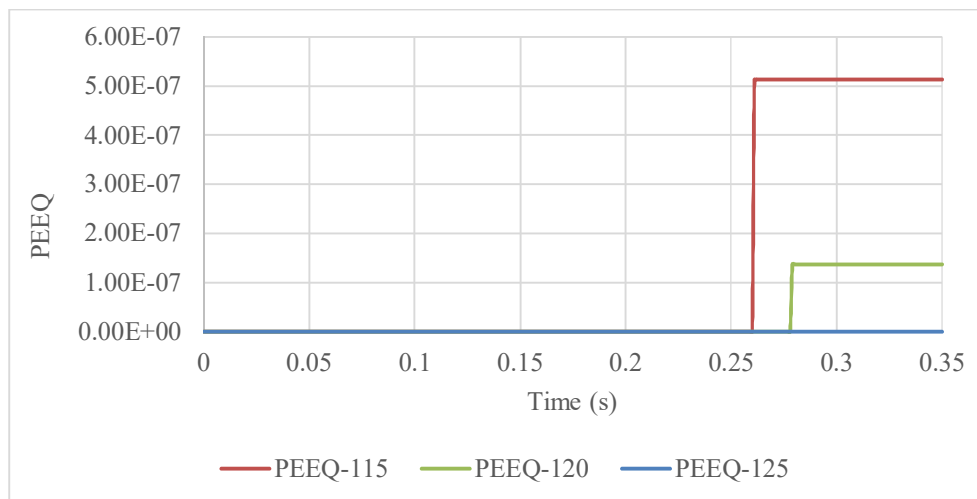
نمودار (۱۲): تنش فون مایسز - زمان (در فاصله ۱۰ متری از مخزن) (مأخذ: نگارندگان)



شکل (۱۴): کانتور آسیب در زمان ۰/۲ ثانیه (در فاصله ۱۰ متری از مخزن) (مأخذ: نگارندگان)



نمودار (۱۳): مقایسه تنش فون مایسز در فواصل مختلف (مأخذ: نگارندگان)



نمودار (۱۴): مقایسه کرنش پلاستیک معادل در فواصل مختلف (مأخذ: نگارندگان)

۱۰۴  
شماره ۲۹  
بهار ۱۴۰۴  
فصلنامه علمی  
و پژوهشی



تحلیل و ارزیابی آسیب پذیری مخازن فولادی تحت بارگذاری انفجاری و تعیین حریم امن (مطالعه موردی: مخزن آمونیاک) / علی مصطفوی زاده، محمد یاسر رادان، قاسم دهقانی اشکداری، بهنام صالحی، ناصر جمشیدی

**جدول (۱۹): مدل نوآورانه تعیین حریم امن در مواجهه با تهدیدات انفجاری (مأخذ: نگارندگان)**

| تعیین بار مبنا <sup>۱</sup>   |   |
|---|---|
| شرح   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• شناسایی کامل خطرات مرتبط با دارایی‌ها از جمله مواد ذخیره‌شده، شرایط محیطی و زیرساخت‌ها. این مرحله شامل تحلیل جامع سناریوهای احتمالی، مانند نشت، انفجار، یا حوادث طبیعی است.</li> <li>• برای این مرحله، از ابزارهای تحلیل سیستماتیک مانند (HAZOP) Hazard and Operability Study یا What-If Analysis استفاده شود تا هیچ سناریوی بالقوه‌ای از قلم نیفتد.</li> <li>• داده‌های تاریخی مرتبط با حوادث مشابه و تحلیل‌های مبتنی بر تجربیات گذشته به این بخش اضافه شود.</li> </ul>   |
| تحلیل تکرار <sup>۲</sup> با رویکرد انفجار   |   |
| شرح   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• شناسایی کامل خطرات مرتبط با دارایی‌ها، از جمله مواد ذخیره‌شده، ویژگی‌های محیطی و جزئیات ساختاری زیرساخت‌ها. این مرحله شامل تحلیل جامع سناریوهای احتمالی نظیر نشت، انفجار، یا حوادث طبیعی است.</li> <li>• برای این مرحله، استفاده از ابزارهای تحلیل سیستماتیک مانند (HAZOP) Hazard and Operability Study، What-If Analysis و همچنین استانداردهای بین‌المللی نظیر FEMA452 پیشنهاد می‌شود تا اطمینان حاصل شود که هیچ سناریوی بالقوه‌ای از قلم نیفتاده است.</li> </ul>   |
| مدل‌سازی انفجاری: تحلیل پیامد <sup>۳</sup>  |   |
| شرح   | <p>ارزیابی شدت تأثیرات یک حادثه احتمالی: برای این منظور، می‌توانید با در نظر گرفتن نوع تهدید و تمام متغیرهای موجود، از یک یا چند روش زیر استفاده کنید.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>۱. مدل‌های نیمه تجربی: نظیر TNO Multi-Energy Method برای تحلیل موج انفجار در فضای باز.</li> <li>۲. مدل‌های تجربی: استفاده از معادله‌های فشار موج مانند Kingery-Bulmarsh Equations.</li> <li>۳. مدل تحلیلی: تعیین حریم امن با استفاده از Scaled Distance Approach بر اساس جرم ماده منفجره و فاصله تا محل انفجار.</li> <li>۴. مدل‌های عددی: مدل‌سازی عددی: انجام شبیه‌سازی‌های دقیق با بهره‌گیری از نرم‌افزارهایی مانند آباکوس، ال‌اس‌داین و سایر ابزارهای مشابه.</li> <li>۵. مدل‌سازی فشار موج انفجار: استفاده از مدل Baker-Strehlow-Tang (BST) برای پیش‌بینی فشار موج انفجار و تأثیر آن بر ساختمان‌ها و انسان‌ها.</li> </ol> <p>تلفیق داده‌های تجربی و مدل‌سازی عددی: ترکیب داده‌های تجربی و مدل‌سازی عددی، قابلیت تعمیم نتایج را به شرایط عملیاتی افزایش می‌دهد و مقاله را از نظر دقت علمی برجسته‌تر می‌کند.</p> |
| و ارائه شاخص‌های ایمن‌سازی بر اساس بار مبنا بررسی مقررات و استانداردها برای تهدیدات انفجاری |   |
| شرح   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• DoD UFC 3-340-02: استاندارد طراحی مقاومت در برابر انفجار برای ساختمان‌های نظامی.</li> <li>• ASCE Manual 59: راهنمای مهندسی انفجار برای سازه‌های شهری.</li> <li>• NFPA495: ایمنی در ذخیره‌سازی و استفاده از مواد منفجره.</li> <li>• مقایسه الزامات بین‌المللی و تطبیق طراحی‌ها با فناوری‌های مدرن.</li> </ul>   |
| تعیین حریم امن  |   |
| شرح   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• شرح: محاسبه حریم امن با در نظر گرفتن شدت و پیامد انفجار.</li> <li>• پیشنهاد سه‌لایه حریم امن:</li> <li>• حریم ایمنی کامل<sup>۴</sup>: حفاظت از انسان‌ها و سازه‌ها بدون تأثیر.</li> <li>• حریم هشدار<sup>۵</sup>: تأثیرات جزئی و نیاز به تخلیه سریع.</li> <li>• حریم خطر<sup>۶</sup>: مناطق با احتمال آسیب‌های شدید.</li> </ul>   |

۱۰۵

شماره ۲۹

بهار ۱۴۰۴

فصلنامه علمی

و پژوهشی



تحلیل و ارزیابی آسیب‌پذیری مخازن فولادی تحت بارگذاری انفجاری و تعیین حریم امن (مطالعه موردی: مخزن آمونیاک) / علی مصطفوی‌زاده، محمد یاسر رادان، قاسم دهقانی اشکذری، بهنام صالحی، ناصر جمشیدی

<sup>1</sup> Threat Assessment

<sup>2</sup> Frequency Analysis

<sup>3</sup> Consequence Analysis

<sup>4</sup> Complete Safe Zone

<sup>5</sup> Caution Zone

<sup>6</sup> Danger Zone

در نمودار بالا مشاهده می‌شود با مقایسه نمودار فون مایسز در فواصل مختلف درمی‌یابیم هر چه فاصله ماده منفجره از مخزن بیشتر می‌شود از مقدار ماکزیمم تنش فون مایسز کاسته شده در ادامه از کرنش پلاستیک مخزن هم کاسته می‌شود این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند تا در فاصله ۱۲۵ متری ماکزیمم تنش (MPa 272) و این مقدار کمتر از تنش تسلیم فولاد بوده در نتیجه در این فاصله رفتار سازه در حالت پلاستیک قرار ندارد و در نتیجه کرنش پلاستیک (PEEQ) عدد صفر را نشان می‌دهد و این فاصله به‌عنوان فاصله ایمن برای مخزن تحت انفجار مبنا تعیین می‌شود.

#### ۴-۲- ارائه مدل نوآورانه به‌منظور تعیین حریم امن برای ایمن‌سازی عملیاتی از زیرساخت‌های حیاتی (CIP)<sup>۱</sup> در مواجهه با تهدیدات انفجاری

بر اساس مطالعات جامع و نتایج تحلیلی حاصل از این پژوهش، مدل دقیق و علمی برای تعیین حریم امن طراحی و ارائه شده است. این مدل نوآورانه بر پایه اصول پدافند غیرعامل تدوین شده است. ساختار این مدل مبتنی بر مدل‌سازی دقیق رفتار امواج انفجاری، تحلیل فشارهای ناشی از انفجار و بررسی آسیب‌پذیری مواد و سازه‌ها در برابر این پدیده‌ها است و با در نظر گرفتن معیارهای کلیدی مانند شدت انفجار، فاصله مقیاس شده و رفتار دینامیکی سازه‌ها، به متخصصان اجازه می‌دهد تا با دقتی بالا، محدوده‌های ایمنی و حریم‌های امنیتی را تعیین کنند.

هدف اصلی از تدوین این مدل، کاهش تلفات جانی، محافظت از دارایی‌های حیاتی و کاهش خسارات اقتصادی ناشی از حوادث انفجاری است.

از آنجایی‌که این پروتکل ابزار جامعی برای برنامه‌ریزی امنیتی فراهم می‌کند، می‌تواند در طراحی‌های مهندسی، برنامه‌ریزی شهری و تدوین استانداردهای ایمنی برای ساختمان‌های حساس و زیرساخت‌های حیاتی مانند نیروگاه‌ها، مخازن ذخیره‌سازی مواد شیمیایی و تأسیسات نظامی به کار گرفته شود. همچنین، این روش می‌تواند به‌عنوان راهنمایی علمی در مدیریت ریسک و تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در برابر تهدیدات انفجاری مورداستفاده قرار گیرد.

پژوهش حاضر با تمرکز بر تحلیل رفتار مخازن فولادی جدار نازک (مگا مخزن آمونیاک) تحت بارگذاری‌های انفجاری، گامی مؤثر در گسترش مرزهای دانش فنی و ارائه راهکارهای عملی در راستای ارتقای ایمنی زیرساخت‌های حیاتی برداشته است. با بهره‌گیری از روش المان محدود در نرم‌افزار Abaqus 2022 و تلفیق شاخص‌های پیشرفته‌ای مانند کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)، تئوری تنش فون مایسز<sup>۲</sup> و معیار آسیب جانسون - کوک (JCCRT)، این پژوهش توانسته است دقت و عمق تحلیل‌های مهندسی را به‌طور چشمگیری ارتقا دهد و بینشی جامع در خصوص رفتار مکانیکی مخازن تحت شرایط بحرانی ارائه کند.

ترکیب این شاخص‌ها، رویکردی چندبعدی را برای ارزیابی آسیب‌های سازه‌ای معرفی می‌کند که نه تنها به شناسایی نقاط ضعف مخازن می‌پردازد، بلکه امکان تحلیل رفتار در شرایط پیچیده بارگذاری را نیز فراهم می‌آورد. به‌عنوان مثال، شاخص PEEQ میزان تغییر شکل پلاستیک را مشخص کرده و نقش اساسی در تحلیل شکل‌پذیری سازه ایفا می‌کند، درحالی‌که Von Mises با ارزیابی نواحی بحرانی تنش، مقاومت ماده را در برابر تسلیم می‌سنجد. از سوی دیگر، JCCRT قادر است آغاز و گسترش آسیب

<sup>2</sup> Von Mises

<sup>1</sup> Critical Infrastructure Protection

را در شرایط دینامیکی پیش‌بینی کند. این هم‌افزایی شاخص‌ها، به پژوهش حاضر ویژگی تحلیلی منحصربه‌فردی بخشیده است که در پژوهش‌های پیشین کمتر مشاهده شده است.

یکی از نوآوری‌های مهم این پژوهش، طراحی و ارائه مدل نوآورانه برای حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی (CIP) است که به‌طور خاص بر تعیین فاصله امن بر اساس بار انفجاری مبنای تمرکز دارد. برخلاف رویکردهای متداول که اغلب در سطح تحلیل‌های تئوریک باقی می‌مانند، این مدل نوآورانه با بهره‌گیری از داده‌های واقعی و مدل‌سازی دقیق، چارچوبی عملیاتی و قابل‌اطمینان برای کاهش خسارات ناشی از تهدیدات انفجاری فراهم کرده است.

این مطالعه با ارائه مدلی دقیق و عملیاتی، بهبود قابل توجهی در شناسایی و کاهش خطرات انفجاری و حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی فراهم آورده است. نتایج این پژوهش به‌عنوان مرجعی برای مهندسان، تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران می‌تواند در طراحی ایمن زیرساخت‌ها و توسعه برنامه‌های ملی مدیریت بحران نقش کلیدی ایفا کند.

بر اساس این مدل با در نظر گرفتن ویژگی‌های شرایط هر زیرساخت، از جمله ویژگی‌های ساختاری و جزئیات فنی زیرساخت مورد مطالعه، امکان تعریف حریم‌های امنیتی چندلایه را میسر ساخته است که شامل:

- **حریم ایمنی کامل:** منطقه‌ای که حفاظت کامل از افراد و سازه‌ها تضمین می‌شود.
- **حریم هشدار:** منطقه‌ای با تأثیرات جزئی که نیاز به اقدامات احتیاطی سریع دارد.
- **حریم خطر:** منطقه‌ای که در معرض آسیب‌های جدی و بالقوه است.

مدل ارائه شده در این پژوهش نه تنها برای طراحی ایمن مخازن بلکه به‌عنوان چارچوبی برای

تحلیل و طراحی سایر سازه‌های حساس در برابر بارهای انفجاری قابل استفاده است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در دنیای امروز که شاهد پیشرفت‌های چشمگیر در صنعت و فناوری هستیم، حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی در برابر حوادث احتمالی به یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسان و مدیران تبدیل شده است.

صنایع نفت و گاز از مهم‌ترین زیرساخت‌های اقتصادی هر کشور محسوب می‌شوند که لازم است در برابر تهدیدات انفجاری نظامی و غیرنظامی مصون باشند. مخازن ذخیره سیال جز سازه‌های استراتژیک هر کشوری هستند این مخازن از جمله سازه‌هایی هستند که به‌واسطه ماهیت مواد ذخیره شده در آنها به‌صورت بالقوه در معرض خطر حریق و انفجار قرار داشته و هرگونه آسیب در آنها ایمنی کل مجموعه را تهدید می‌کند. با وجود ورود فناوری‌ها و تجهیزات جدید در صحنه نبرد هنوز هم فاصله به‌عنوان یک مانع مهم در ناکامی دشمن عمل نموده و آمایش مراکز حساس و حیاتی کشور و ایجاد یک حریم امن و متناسب با تهدیدات متصور است. یکی از مهم‌ترین اقدامات در حوزه حفاظت از سازه ایجاد فاصله امن در برابر بار مبناست.

برای دستیابی به این هدف، در این پژوهش یک مخزن آمونیاک با ظرفیت ذخیره‌سازی ۱۵،۰۰۰ تن (۷۵ درصد پرشدگی) تحت بارگذاری ناشی از یک انفجار سطحی معادل ۵،۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل اثرات ناشی از انفجار بر ساختار بدنه مخزن با استفاده از روش اجزای محدود (FEM) انجام شد.

به‌منظور ارزیابی میزان آسیب، نتایج حاصل از شبیه‌سازی شامل نمودارهای کرنش پلاستیک معادل (PEEQ)، تئوری فون مایسز و JCCRT

<sup>1</sup> Standard Blast Load

(معیار شروع آسیب جانسون - کوک) تحلیل شد. این بررسی‌ها امکان ارزیابی شدت آسیب‌های وارده به مخزن در فواصل مختلف و شناسایی فاصله ایمن را فراهم می‌کند. نتایج حاصل به شرح زیر ارائه شده است:

• در فاصله ۱۰ متر انفجار در حوزه نزدیک رخ داده است، فشار موج انفجار بسیار شدیدی به سازه برخورد کرده که لایه‌های پایین مخزن که ضخامت بیشتری دارند دچار آسیب می‌شوند و معیار شروع آسیب ماکزیمم عدد را در این فاصله دارد.

• با افزایش فاصله به ۱۲۵ متری مخزن ماکزیمم تنش (MPa 272) و این مقدار کمتر از تنش تسلیم فولاد بوده در نتیجه در این فاصله رفتار سازه در حالت پلاستیک قرار ندارد و در نتیجه کرنش پلاستیک (PEEQ) و معیار شروع آسیب (JCCRT) عدد صفر را نشان می‌دهد و این فاصله به عنوان فاصله ایمن برای مخزن تحت انفجار مبنا تعیین می‌شود.

با بررسی دقیق نتایج و تحلیل شبیه‌سازی‌های دو سناریو مطرح شده در این پژوهش، مشخص شد تعیین فاصله مناسب، متناسب با بار انفجار مبنا (۵۰۰۰ کیلوگرم ماده منفجره TNT) و ایجاد حریم ایمن پیرامون مخزن، توانست به خوبی ریسک ناشی از این تهدید را کاهش دهند و از این سازه پراهمیت در برابر تهدید مبنا حفاظت کنند. در نظر گرفتن حریم امن برای مخازن به دلیل خطرات ذاتی بالقوه‌ای که دارند، فقط به فاصله‌ی آن‌ها از مواد منفجره محدود نمی‌شود. بلکه، لازم است تا فاصله‌ی ایمن بین مخازن و سایر سازه‌های صنعتی موجود در مجتمع‌های پتروشیمی یا پالایشگاه‌ها نیز در نظر گرفته شود. رعایت این اصل تنها معطوف به محیط‌های صنعتی نمی‌شود این امر به‌ویژه برای مخازنی که در محدوده‌ی شهری قرار دارند و باید فاصله‌ی کافی از مناطق مسکونی و تجاری مجاور حفظ

کنند، اهمیت دارد.

در این پژوهش، پروتکل نوآورانه برای حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی ارائه شده است که در آن، حریم امن هر دارایی بر اساس مقدار بار انفجاری مبنا تعیین می‌شود. این روش با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف خطر، امکان طراحی سطح حفاظتی متناسب و کارآمد را برای هر دارایی فراهم می‌کند. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این رویکرد می‌تواند به‌طور چشمگیری خسارات ناشی از حوادث انفجاری را کاهش داده و سطح ایمنی زیرساخت‌ها را بهبود بخشد. این دستاوردها نه تنها امنیت فیزیکی دارایی‌های حیاتی را تضمین می‌کنند، بلکه می‌توانند به عنوان یک چارچوب مرجع برای توسعه استراتژی‌های حفاظتی در سطح ملی و بین‌المللی مورداستفاده قرار گیرند.

در گذشته، رویکردهای متداول در تعیین حریم امنیتی اغلب با استفاده از نرم‌افزارهای دیگری انجام می‌شد و کمتر پژوهشی به موضوع تعیین حریم امن متناسب بار مبنا می‌پرداخت و برای اولین بار با نرم‌افزار آباکوس در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت و در انتها یک پروتکل جدید برای تعیین فاصله امن استاندارد را ارائه داده است که می‌تواند به‌طور قابل توجهی در افزایش امنیت زیرساخت‌های حیاتی کمک کند. این رویکرد جدید، امکان ارزیابی دقیق‌تر بارهای انفجاری و تأثیرات آن‌ها بر سازه‌ها را فراهم می‌آورد و به مهندسين امکان می‌دهد تا با دقت بیشتری، حریم‌های امنیتی را بر اساس شرایط واقعی هر پروژه تعیین کنند.

## ۶- تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌ها و راهنمایی‌های ارزنده معاونت انرژی سازمان پدافند غیرعامل و همچنین مدیریت HSE و پدافند غیرعامل شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران در



explosion by consideration of liquid surface movements. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. doi: 10.22034/jcee.2021.41085.1957.

۱۰- مقدم، ح.، شعبانلو، م.، ساعدی داریان، ا. (۱۳۹۹).

بررسی آثار ناشی از انفجار بر ساختمان‌های دارای سیستم دیوار برشی فولادی طراحی شده برای مقاومت در برابر بارهای متعارف لرزه‌ای. *مجله مهندسی عمران شریف*.

doi: ۱۲۹-۱۱۷، (۳، ۱) ۳۶، ۲  
10.24200/j30.2019.53613.2562

۱۱- بهنام فر، ف.، مرادی، ر.، هاشمی، ش. (۱۳۹۸).

بررسی رفتار دینامیکی مخازن استوانه‌ای بتنی ذخیره مایع تحت اثر حرکت افقی و قائم زلزله. *تحقیقات بتن*، ۱۲(۱)، ۳۹-۱۲۲. doi: 10.22124/jcr.2018.8259.122157-39

۱۲- حمزه، م.، خسروی، ف.، پسران بهبهانی، ح. (۱۳۹۷).

بررسی اثر انفجار بر روی سگمنت‌های بتنی تونل‌های مرزی. *دانشکده پدافند غیرعامل - دانشگاه امام حسین*.

DOR: ۳۵۸-۳۴۹، (۳) ۹، (ع)  
20.1001.1.26762935.1397.9.3.9.8

۱۳- کرمی، م.، سروقد مقدم، ع.، ضیایی، م. (۱۳۹۵).

تحلیل آسیب‌پذیری مخازن بتنی ذخیره سیال تحت اثر انفجار هوایی. *رفتار سازه‌ها در برابر انفجار*، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، دانشگاه صنعتی

خواجه‌نصیرالدین طوسی، ۷(۱)، ۴۵-۵۸. DOR: 20.1001.1.26762935.1395.7.1.5.6

۱۴- گلاری ساروقانی، ل؛ و نوایی نیا، ب. (۱۳۹۱). تعیین

ضریب رفتار مخزن‌ها بتنی استوانه‌ای با استفاده از تحلیل فرآیند غیرخطی. *نشریه مهندسی عمران دانشگاه بابل*.

doi: ۱۲۳-۱۳۵، (۲) ۲۳، بهار و تابستان  
10.22067/civil.v23i2.17009

15. Cheng, R., Chen, W., & Hao, H. (2024). Performance of double-arch tunnels under internal BLEVE. *Underground Space*, 9(2), 123-137.

<https://doi.org/10.1016/j.undsp.2024.01.006>

16. F. Saifi, S. M. Anas, R. Tahzeeb, M. Shariq و M. Alam, "Numerical investigation of blast loading effects on a thin-walled cylindrical steel storage tank", *Mater. Today Proc.*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.04.001>.

17. Khalil, M. (2024). Advanced seismic modeling and analysis of flat-bottom cylindrical steel silos interacting with stored granular-like materials. *Depositolegale*, 36(1), 89-101.

<https://hdl.handle.net/20.500.14242/65009>

18. Rosin, J., Stocchi, A., Bruckhaus, N., Heyner, J., Weidner, P., & Waas, T. (2024). Cylindrical Steel Tanks Subjected to Long-Duration and High-Pressure Triangular Blast Load: Current Practice and a Numerical Case

پیشبرد این پژوهش قدردانی نمایند. همچنین، از

داوران محترم که با نقطه نظرات ارزشمند خود در

ارتقای کیفیت این اثر نقش داشته‌اند، سپاسگزاری

می‌شود.

## ۱۰- منابع

1. Olanipekun, I. O., & Alola, A. A. (2020). Crude oil production in the Persian Gulf amidst geopolitical risk, cost of damage and resources rents: is there asymmetric inference. *Resources Policy*, 69, 101873. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101873>

2. Eskandari, M., & Alidoosti, A. (2019). Investigating the Factors That Reduce the Urban Gas Pipeline Vulnerability to Explosion Threats. *Journal of Disaster and Emergency Research*, 2(1), 17-28. <https://doi.org/10.18502/jder.v2i1.567>

3. Zio, E. (2018). The future of risk assessment. *Reliability Engineering & System Safety*, 177, 176-190.

<https://doi.org/10.1016/j.res.2018.04.020>

4. Krane, J. (2020). Security amid Instability: Oil Markets and Attacks in the Persian Gulf. *Georgetown Journal of International Affairs* 21, 120-128.

<https://dx.doi.org/10.1353/gia.2020.0010>.

5. Akrami, V., Norouzi, M., & Teymour-Moghaddam, S. (2021). A parametric study on the axial load carrying capacity of dented cylindrical columns. *Modares Civil Engineering Journal*, 21(4), 19-33. URL: <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-46293-en.html>

6. Siah Mansour, A., & Hosseini, S. A. (2024). Evaluation of blast-induced progressive collapse in steel structures with conventional braces, moment-resisting braces, and buckling-restrained braces using LS-DYNA. *Journal of Engineering Structures*. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00536-1>

7. Kodur, V. K. R., & Banthia, N. (Eds.). (2015). *Response of Structures Under Extreme Loading: Proceedings of the Fifth International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures Under Extreme Loading (PROTECT 2015)*, DEStech Publications, Inc. ISBN: 978-1605952277.

8. Dadkhah, H., & Mohebbi, M. (2023, May). Effect of stand-off distance on blast fragility of steel moment-resisting buildings. In *Structures* (Vol. 51, pp. 1694-1705). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.118>

9. Razavi Tosee, S. V., Moghadam, M., & Shahrbanouzadeh, M. (2021). Investigation of hoop stresses of fluid storage RC tanks under

۱۰۹  
شماره ۲۹  
بهار ۱۴۰۴  
فصلنامه علمی  
و پژوهشی



تحلیل و ارزیابی آسیب‌پذیری مخازن فولادی تحت بارگذاری انفجاری و تعیین حریم امن (مطالعه موردی: مخزن آمونیاک) / علی مصطفوی‌زاده، محمد یاسر رادان، قاسم دهقانی اشکداری، بهنام صالحی، ناصر جمشیدی

- <https://doi.org/10.1155/2019/6190159>
29. Li, Y., Zhang, L., Dengbao, X., Zhao, T., Du, Z., Wu, W., & Fang, D. (2019). Experiment and numerical study on dynamic response of liquid cabin under internal blast loading. *Thin-Walled Structures*, 145, 106405. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106405>
30. Yao, S., Zhang, D., Lu, Z., Lin, Y., & Lu, F. (2018). Experimental and numerical investigation on the dynamic response of steel chamber under internal blast. *Engineering Structures*, 168, 877-888. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.067>
31. Rajendran, A. M. *Failure of Brittle Materials Under Shock and Impact: Experiments and Modelling*. Springer Nature.: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-981-97-7026-7.pdf>
32. Orlov, M. Y. (2024). Proceedings of the XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics: XII CICMCM, 15-17 November 2023, Tomsk, Russia (Vol. 1067). Springer Nature. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=F1fEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5>
33. Tamiru, T., Seid, S., Bogale, D., & Ashuro, B. (2023). Damage modeling and failure analysis of glass fiber-reinforced composite cylindrical laminates using continuum damage mechanics. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 23(4), 1527-1537., doi: 10.1007/s11668-023-01689-6.
34. Pedroso, A. F., Sebbe, N. P., Costa, R. D., Barbosa, M. L., Sales-Contini, R. C., Silva, F. J., ... & de Jesus, A. M. (2024). INCONEL® Alloy Machining and Tool Wear Finite Element Analysis Assessment: An Extended Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(1), 37. doi: 10.3390/jmmp8010037.
35. F. E. M. Agency و U. S. D. of H. Security, Risk Management Series: Risk Assessment - A How-To Guide to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings, 26 January 2013. U.S.: Createspace Independent Publishing Platform, 2005.
- Study. *Applied Sciences*, 14(8), 3465. <https://doi.org/10.3390/app14083465>
19. Cui, T., Wang, Y., & Xu, G. (2024). The Storage Tank Explosion Damage and the Effectiveness of Control Measures in the Chemical Industrial Parks of Smart Cities. *Electronics*, 13(14), 2757. <https://doi.org/10.3390/electronics13142757>
20. Bhattacharyya, R., Russian, O., Dereli, O., & Ozbey, M. (2024). A finite element analysis-based approach for blast-resistant design of LNG containment tanks. *Structures*, 59, 105757. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105757>
21. Sun, Y., Wang, C., Wang, W., & et al. (2023). Dynamic response analysis of a small-scaled ACLNG storage tank under penetration and explosion loadings. *Acta Mechanica Sinica*, 39(5), doi: 10.1007/s10409-023-23110-x.
22. Ali, E., & Althoey, F. (2022). Numerical investigation on blast response of cold-formed steel framing protected with functionally graded composite material. *Buildings*, 12(2), 118. <https://doi.org/10.3390/buildings12020118>
23. Li, X., Chen, G., Khan, F., Lai, E., & Amyotte, P. (2022). Analysis of structural response of storage tanks subject to synergistic blast and fire loads. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 80, 104891. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104891>
24. Al-Yacoubi, A. M., Hao, L. J., Liew, M. S., Ratnayake, R. M. C., & Samarakoon, S. M. K. (2021). Thin-walled cylindrical shell storage tank under blast impacts: Finite element analysis. *Materials*, 14(22), 7100. <https://doi.org/10.3390/ma14227100>
25. Chen, G., Wang, F., Zhou, C., & et al. (2020). Dynamic response analysis of large arch-roof oil tank subjected to the coupling impact of two-source blast waves based on finite element method. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 20(3), 333-347. <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00833-w>
26. Jiang, Y., Zhang, B., Wei, J., & Wang, W. (2020). Study on the dynamic response of polyurea coated steel tank subjected to blast loadings. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 67, 104234. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104234>
27. Yan, C., Zhai, X. M., & Wang, Y. H. (2019). Numerical study on the dynamic response of a massive liquefied natural gas outer tank under impact loading. *Journal of Zhejiang University Science A*, 20(6), 823-837. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1900172>
28. Lee, S., Kim, B., & Lee, Y.-J. (2019). Seismic fragility analysis of steel liquid storage tanks using earthquake ground motions recorded in Korea. *Mathematical Problems in Engineering*.