Journal of Safe City

Online ISSN: 2676 556X

Journal Homepage: www.ispdrc.ir

Research Paper

A Resilience Model for Protecting Liquid Storage Tanks Against Explosive Threats

Shaahin Farahmandpay [a*], Hadi Baghbani [b], Mohammadreza Shekari [c]

[a]. * *PhD Student in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering 1, Shiraz University, Shiraz, Iran.*

[b]. *Assistant Professor, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, PhD in Strategic Management, specialization in Passive Defense, Tehran, Iran.*

[c]. *Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shiraz University – Estahban Higher Education Center, Estahban, Iran.*

https://doi.org/10.22034/ispdrc.2024.2040176.1128

ARTICLE INFO

Keywords:
Resilience ,
Liquid Tanks ,
Explosive Threats ,
Energy Supply Chain,
Fuzzy Delphi.

ABSTRACT

In this article, explosive threats are examined as one of the major challenges in protecting liquid storage tanks within the energy supply chain. Due to their high vulnerability to such threats, if not effectively protected, liquid storage tanks can become a source of domino effects and cause extensive damage throughout the energy supply chain. This study, adopting a comprehensive approach that combines quantitative and qualitative methods, presents a roadmap for safeguarding liquid storage tanks against these threats. The results indicate that focusing on resilience principles—such as absorption, preparedness, adaptability, and recovery—along with implementing supply chain resilience strategies—including employee training and empowerment, enhancing storage capacity and distribution centers, investing in resilient infrastructure, decentralizing the supply chain and distribution centers, utilizing diverse transportation methods, and developing emergency response plans and guidelines—plays a crucial role in reducing damages and improving the performance of the energy supply chain. This research offers a comprehensive scientific framework for fortifying liquid storage tanks. The proposed solutions are categorized into three sections: fortification of the tank location, structural reinforcement of the tanks, and solutions for responding to and recovering from explosive incidents. For example, key proposed measures include tank dispersion, site selection, the use of wall stiffeners and protective barriers, and the development of crisis management guidelines. In this study, mathematical modeling methods such as Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE), Eulerian, and Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) are suggested as tools for explosion simulation and the implementation of the proposed roadmap. This roadmap enables engineers to achieve the protection of liquid storage tanks by following its guidelines.

Received:
02 September 2024
Received in revised form:
26 September 2024
Accepted:
09 November 2024
pp. 41-62

Corresponding author (Email: sh.farahmandpay@shirazu.ac.ir)

Extended Abstract

Introduction

Liquid storage tanks are critical components of the energy supply chain, serving as essential infrastructure for the storage and distribution of liquid fuels, chemicals, and water. However, these tanks are particularly vulnerable to explosive threats, which can lead to catastrophic domino effects and extensive disruptions in the energy supply network. Historical events, such as repeated attacks on oil refineries during wartime, demonstrate the severe impact of such incidents on industrial operations and national security. The protection of these tanks is, therefore, paramount to maintaining energy security and mitigating the risk of extensive damage and supply chain interruptions. This study aims to develop a comprehensive protection framework for liquid storage tanks against explosive threats by employing resilience solutions.

Methodology

The research employs a mixed methods approach, combining both qualitative and quantitative methodologies. The qualitative component involves a comprehensive review of the literature to identify best practices and existing solutions for protecting liquid storage tanks. Subsequently, the quantitative analysis incorporates expert opinions gathered through a structured Delphi method, enhanced with fuzzy logic to address uncertainties in expert judgments.

Results and discussion

The results of this study, based on both qualitative and quantitative phases, identified six critical patterns for improving the resilience of liquid storage systems and their related supply chains. Experts confirmed the validity and effectiveness of all six patterns, which include employee training and empowerment, increasing storage and distribution capacity, investing in resilient infrastructure, supply chain diversification and distribution center dispersion, using diverse transportation methods, and emergency response programs and protocols. These patterns collectively achieved an average performance score of 3.89, highlighting their practical impact on system resilience. Employee training and capacity enhancement emerged as the most effective strategies, emphasizing the need for a skilled workforce and robust storage capabilities.

In terms of resilience principles, absorption and preparedness were identified as the most critical for ensuring system resilience against explosive threats. These principles were followed by adaptation and recovery, reinforcing the importance of pre emptive measures to absorb and prepare for potential hazards. The experts also identified detonations at a distance from ground level as the most critical explosion scenario. This situation is particularly hazardous due to the formation of the Mach wavefront, which can amplify the destructive effects of an explosion.

For simulation methods, the Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) method was determined to be the most accurate for analyzing large deformations, despite its longer computation times. The Eulerian method was considered a suitable alternative for low strain rate scenarios. Other methods, such as Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) and the Lagrangian method, showed lower effectiveness due to issues with precision and handling severe deformations.

In terms of tank protection solutions, the study emphasized tank dispersion using modern methods to reduce vulnerability by spreading tanks out and increasing logistical resilience. Spacing between tanks to reduce fire radiation and blast effects was also highlighted as a critical measure to prevent chain reactions in storage facilities. Strategic tank location, particularly in protective terrains, enhances resilience to both explosive and natural threats. Physical, security, and safety protection of tanks improves defenses against sabotage and enhances emergency response readiness, while camouflage and concealment reduce the visibility and targeting potential of tanks, especially in vulnerable areas. The use of blast wave reducing barriers increases the distance between the blast and the tanks, enhancing their resilience. Insulating and cooling systems minimize thermal and radiant effects on surrounding tanks in case of damage.

Regarding structural reinforcement of the tanks, wall stiffeners were identified as key to reinforcing tank walls and enhancing energy absorption to mitigate blast impacts. Concrete protective walls, while highly effective, require careful cost benefit analysis. Damping blades were found to be cost effective and efficient for improving tank resilience against explosions and natural disasters. Base isolators, though

less effective compared to other solutions, still offer benefits in enhancing tank resilience.

In terms of post explosion recovery, crisis management protocols were prioritized for ensuring a quick and effective response to maintain supply chain continuity. Employee training and awareness were deemed essential for efficiently managing crises and preventing supply chain disruptions, while fire suppression and environmental protection systems enhance the ability to recover from crises and comply with environmental regulations. These results underscore the importance of pre emptive measures and strategic infrastructure investments to improve the resilience of liquid storage tanks against explosive threats.

Conclusion

This research provides a scientifically rigorous and practically applicable framework for protecting liquid storage tanks from explosive threats. By integrating resilience principles and utilizing advanced simulation methods, the study offers a robust set of guidelines for engineers and policymakers. The proposed roadmap includes detailed recommendations on site fortification, structural reinforcement, and post incident response solutions, which collectively contribute to the long term safety and security of critical infrastructure within the energy supply chain. Implementing these solutions will not only enhance the resilience of storage tanks but also ensure the continuous and secure supply of energy resources in the face of both natural and man made threats.

The study concludes that a multi layered protection approach—comprising structural enhancements, strategic site planning, and effective emergency management—offers the most comprehensive protection for liquid storage tanks against explosive threats.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

نشریه علمی شهـــر ایمـــن

شاپا الکترونیکی: 2676 556X

Journal Homepage: www.ispdrc.ir

مقاله پژوهشی

راهکارهای مصون‌سازی مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری

شاهین فرهمندپی* دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی راه و ساختمان، دانشکده مهندسی ۱، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

هادی باغبانی استادیار، دکتری مدیریت راهبردی، گرایش پدافند غیرعامل، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران.

محمدرضا شکاری استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، مرکز آموزش عالی استهبان، استهبان، ایران.

https://doi.org/10.22034/ispdrc.2024.2040176.1128

اطلاعات مقاله

واژگان کلیدی:

تاب‌آوری، مخازن مایع، تهدیدات انفجاری، زنجیره تأمین انرژی، دلفی فازی.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۶/۱۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۷/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۸/۱۹

صص. ۶۲-۴۱

چکیده

در این مقاله، تهدیدات انفجاری به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم در حفاظت از مخازن مایع زنجیره تأمین انرژی، مورد بررسی قرار گرفته است. مخازن مایع به دلیل آسیب‌پذیری بالا در برابر تهدیدات انفجاری، در صورت عدم حفاظت مؤثر، می‌توانند منشأ اثرات زنجیره‌ای و خسارات گسترده در زنجیره تأمین انرژی باشند. این پژوهش با رویکردی آمیخته از روش‌های کمی و کیفی، به ارائه نقشه راهی برای مصون‌سازی مخازن مایع در برابر این تهدیدات می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که توجه به اصول تاب‌آوری نظیر جذب، آمادگی، سازگاری و بازیابی و همچنین الگوهای تاب‌آوری زنجیره تأمین از جمله آموزش و توانمندسازی کارکنان، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و مراکز توزیع، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم، پراکنده‌سازی زنجیره تأمین و توزیع مراکز، بهره‌گیری از روش‌های متنوع حمل‌ونقل و تدوین برنامه‌های پاسخ اضطراری و دستورالعمل‌ها، نقشی مؤثر در کاهش آسیب‌ها و ارتقای عملکرد زنجیره تأمین انرژی دارد و چهارچوب علمی جامعی برای مصون‌سازی مخازن ارائه می‌کند. راهکارهای پیشنهادی در این پژوهش در سه قسمت طبقه‌بندی شده‌اند: مقاوم‌سازی مکان استقرار مخازن، مقاوم‌سازی سازه مخازن و راهبردهای مقابله و بازیابی از حوادث انفجاری. به‌عنوان نمونه، پراکنده‌سازی مخازن، مکان‌یابی، استفاده از سخت‌کننده‌های دیواره، دیوارهای محافظ و تدوین دستورالعمل‌های مدیریت بحران از جمله راهکارهای کلیدی پیشنهادی این تحقیق محسوب می‌شوند. در این مطالعه، روش‌های مدل‌سازی ریاضی نظیر لاگرانژی دلخواه اویلری (*ALE*)، اویلری و هیدرودینامیک ذرات نرم (*SPH*) به‌عنوان ابزارهایی برای شبیه‌سازی انفجار و به‌کارگیری نقشه راه پیشنهادشده‌اند. نقشه راه پیشنهادی به مهندسان این امکان را می‌دهد تا با حرکت در مسیر آن مصون‌سازی مخازن مایع را به ارمغان آورند.

* نویسنده مسئول

رایانامه: sh.farahmandpay@shirazu.ac.ir

مقدمه

مخازن مایع به عنوان زیرساخت‌های حیاتی در تأمین و ذخیره‌سازی سوخت، آب و مواد شیمیایی خطرناک، نقش اساسی در صنایع مختلف و به‌ویژه در زنجیره تأمین انرژی ایفا می‌کنند. این مخازن با توجه به نیازهای گوناگون و نوع موادی که ذخیره می‌کنند، از مصالحی نظیر فولاد و بتن ساخته‌شده و در اشکال و اندازه‌های متنوعی طراحی می‌شوند. همچنین، بسته به شرایط محیطی و نوع کاربری، می‌توانند به‌صورت سطحی، زیرزمینی یا هوایی نصب شوند (*Hoseini & Beskhyroun, 2023*).

در دنیای پیچیده امروز، جوامع و تمدن‌ها همواره با بحران‌های متعددی روبه‌رو هستند که می‌توانند از حوادث طبیعی مانند زلزله و سیل تا جنگ، تروریسم، حملات سایبری به سیستم‌های اطلاعاتی و حتی بحران‌های ناشی از بیماری‌های واگیر و ویروسی را دربگیرند (*Wamba et.al, 2022*). بحران به وضعیتی اطلاق می‌شود که در اثر حوادث غیرمترقبه از حالت ایستا و عادی خود خارج‌شده و به شرایطی ناهمگون و مخاطره‌آمیز بدل می‌شود (سوری، ۱۳۹۴). این تهدیدات و ناپایداری‌ها، جوامع را با شرایط پیچیده‌ای مواجه می‌سازد که مدیریت و مقابله با آن‌ها نیازمند رویکردهای نوآورانه و تخصصی است. در این میان، مفهوم تاب‌آوری به عنوان یک راهکار کلیدی برای کاهش اثرات بحران‌ها و حتی تبدیل آن‌ها به فرصت‌هایی برای بهبود و ارتقا، در دهه‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای یافته است (*Villar et.al, 2023*؛ *Olcese et.al, 2024*).

پیچیدگی‌های فزاینده در روابط بین‌المللی و افزایش تهدیدات در حوزه‌های سیاسی، نظامی، اقتصادی، فرهنگی و فناوری، اهمیت بالای پایداری و حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی در برابر این تهدیدات را نشان می‌دهد؛ به‌ویژه در شرایط جنگ و درگیری (باغبانی، ۱۴۰۰)، جایی که حملات مستقیم به زیرساخت‌های انرژی و تأمین سوخت می‌تواند عملکرد صنایع حیاتی را به‌طور جدی مختل کند (*U.S. Army Corps of Engineers, 2020*). تجربه تاریخی جنگ تحمیلی نیز مؤید این واقعیت است؛ زمانی که پالایشگاه آبادان به‌دفعات مکرر تحت حمله قرار گرفت و پالایشگاه‌های دیگر کشور نظیر تهران، تبریز، اصفهان، کرمانشاه و شیراز نیز به ترتیب ۲، ۱۹، ۱۷ و ۴ بار از حملات رژیم بعث مصون نماندند و موردحمله قرار گرفتند (ضیغمی، ۱۴۰۰).

یکی از چالش‌های مهم در حفاظت از زیرساخت‌ها مذکور، پدیده «اثرات زنجیره‌ای» است. این پدیده به مجموعه‌ای از حوادث ناشی از یک حادثه اولیه اشاره دارد که می‌تواند به گسترش حوادث ثانویه و در نتیجه ایجاد خسارات شدیدتر منجر شود. در مناطق ذخیره‌سازی مواد اشتعال‌زا، اثرات زنجیره‌ای می‌تواند فاجعه‌بار باشد و پیامدهای وسیعی در پی داشته باشد (*Chen et.al, 2022*).

در این تحقیق تلاش شده تا نقشه راه جامعی برای مصون‌سازی مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری و دستیابی به اصول تاب‌آوری با استفاده از الگوهای مختلف ارائه شود. بر این اساس، ابتدا مبانی نظری تاب‌آوری و الگوهای مرتبط مورد بررسی قرارگرفته و سپس انفجار و پارامترهای مؤثر بر آن تشریح شده است تا با تکیه بر این مبانی، روش‌های ریاضی مناسب و کاربردی برای تحلیل انفجار معرفی و بررسی‌شده‌اند تا مهندسان بتوانند از راهکارهای ارائه‌شده، که بر اصول تاب‌آوری مکان استقرار مخازن، سازه‌های مخازن، مقابله با خسارات ناشی از تهدیدات و بازیابی مخازن پس از حادثه تمرکز دارد، استفاده کنند. این تحقیق با رویکرد آمیخته کیفی و کمی انجام است. در بخش کیفی، اسناد کتابخانه‌ای و پیشینه پژوهشی موردمطالعه قرارگرفته است تا الگوها و راهکارهای مؤثر در مصون‌سازی مخازن شناسایی شود. همچنین، از طریق انجام پرسش‌نامه و تحلیل نتایج با استفاده از روش دلفی فازی، نظرات و تجربیات خبرگان و صاحب‌نظران حوزه به‌صورت ساختاریافته گردآوری شده است.

مبانی نظری

تاب‌آوری به عنوان توانایی پیش‌بینی، آمادگی و سازگاری با شرایط در حال تغییر و همچنین جذب، پاسخگویی و بازیابی سریع از اختلالات تعریف می‌شود (*Ying et.al, 2023*). تعاریف متعددی از تاب‌آوری توسط سازمان‌های مختلف ارائه‌شده است که عمدتاً مشابه هستند؛ هرچند اغلب برای کاربردهای خاص تنظیم و سفارشی‌شده‌اند (*U.S. Army Corps of Engineers, 2020*). با توجه به این مطلب، چهار اصل تاب‌آوری به شرح زیر تعریف می‌شوند:

آمادگی: آمادگی به معنای پیش‌بینی و مهیا شدن برای یک شرایط غیرعادی و خارج از نرمال است (*Tortorella et.al, 2023*).

جذب: جذب به معنای تحمل یک استرس یا تحمل تغییر با حداقل خسارت و بدون از دست دادن عملکرد نرمال است (*U.S. Army Corps of Engineers 2020*). جذب شامل اقداماتی است که عملکرد لحظه‌ای دارند (*Noroozinejad Farsangi et.al, 2019*).

بازیابی: بازیابی به معنای بازگشت به عملکرد قبلی است که پس از یک اختلال یا تغییر در شرایط رخ داده است (*Katsaliaki et.al, 2023*).

سازگاری: سازگاری به معنای تنظیم سیستم‌ها با پیش‌بینی یا پاسخ به یک اختلال یا شرایط جدید است که از فرصت‌های مفید بهره‌مند شود و یا تأثیرات منفی را کاهش دهد (*Naz et.al, 2022*). الگوهای تاب‌آوری در زیرساخت‌ها به الگوهایی اشاره دارند که به سیستم‌ها کمک می‌کنند تا در مواجهه با چالش‌ها یا قطعی‌ها بهبود یابند و سازگار شوند (*Tang et.al, 2023*). در زیر برخی از الگوهای تاب‌آوری رایج پیرامون زنجیره تأمین گزارش‌شده است.

سرمایه‌گذاری در زیرساخت مقاوم: در طراحی و استفاده از فناوری‌های مقاوم سرمایه‌گذاری شود تا زیرساخت‌ها در برابر حوادث شدید آب‌وهوایی، بلایای طبیعی، جنگ و دیگر خطرات احتمالی مقاوم باشند (*Padmanabhi et.al, 2022*).

ظرفیت ذخیره‌سازی و مراکز توزیع: ظرفیت ذخیره‌سازی مواد افزایش یابد و انبارهای ذخیره‌سازی به‌طور راهبردی در مکان‌های جغرافیایی مختلف توزیع شوند. این اقدام تضمین می‌کند که در زمان بحران‌ها یا وقفه‌های زنجیره تأمین، ذخایر کافی برای پاسخگویی به تقاضا موجود باشد (*Keshavarz Ghorabaee,2021*).

برنامه‌های پاسخ اضطراری: برنامه‌های جامع پاسخ به مواقع اضطراری تدوین شوند که دستورالعمل‌ها و رویه‌های لازم برای مدیریت بحران‌ها در عملیات توزیع اقلام را مشخص کنند. این برنامه‌ها شامل تدابیر احتیاطی برای سناریوهایی مانند کمبود تأمین، خرابی زیرساخت‌ها و یا شرایط بحرانی می‌باشند (*Penadés et.al, 2017*).

آموزش و توانمندسازی: برنامه‌های آموزشی و توانمندسازی برای کارکنان درگیر در عملیات زنجیره تأمین ارائه شود تا توانمندی و توانایی پاسخ آن‌ها افزایش یابد. این برنامه‌ها شامل تمرینات منظم، شبیه‌سازی‌ها و فعالیت‌های توسعه مهارت است که اثربخشی مدیریت بحران را تضمین می‌کنند (آقا حسینی اشکاوندی و همکاران، ۱۳۹۵).

حمل‌ونقل با روش‌های متنوع: از روش‌های متنوع حمل‌ونقل (مانند لوله‌های، ریل، کامیون‌ها) برای تحویل اقلام استفاده شود تا خطر قطعی در حمل‌ونقل کاهش یابد. داشتن گزینه‌های حمل‌ونقل متعدد امکان انعطاف‌پذیری در تطبیق با شرایط متغیر را فراهم می‌کند و اطمینان از پایداری توزیع را فراهم می‌آورد (*Onal et.al, 2023*).

تکثیر در زنجیره‌های تأمین: ایجاد زنجیره‌های تأمین و شبکه‌های توزیع دوگانه، تا مواد از چندین تأمین‌کننده و مکان مختلف قابل‌دسترسی باشد. این کار به حداقل رساندن وابستگی به منابع تکیه می‌کند و تأثیرات قطعی‌ها مانند تراکم‌های زنجیره تأمین یا شکست تأمین‌کننده را به حداقل می‌رساند (*Yu et.al, 2023*).

با یکپارچگی این الگوهای در زنجیره تأمین، سازمان‌ها قادرند تا توانمندی خود را در مقابل بحران‌ها تقویت کنند، پایداری تأمین را حفظ کرده و تاب‌آوری سیستم‌های زیرساختی اساسی را تضمین کنند.

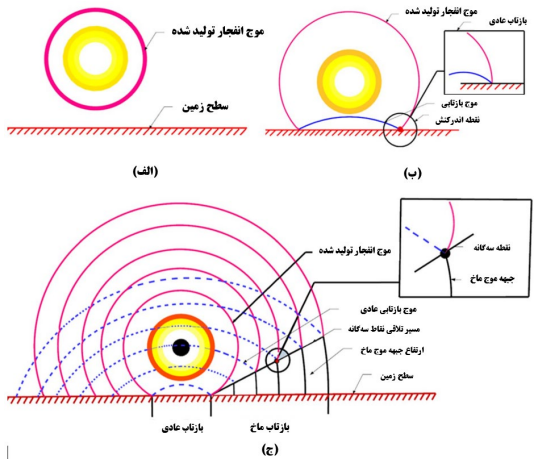
پیشینه پژوهش

تهدیدات انفجاری و مدل‌سازی

انفجار پدیده‌ای پیچیده است که تأثیرات گسترده‌ای بر محیط دارد. آسیب‌های ناشی از انفجار به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند: آسیب‌های ابتدایی که از امواج انفجار ناشی می‌شوند، آسیب‌های ثانویه که به دلیل قطعات پرتاب‌شده و ترکش‌ها به وجود می‌آید و آسیب‌های سومی که شامل گرما، آتش، گازهای سمی و ارتعاش زمین می‌شود (*TM 5 1300, 1990*)

وقتی انفجارهایی مانند *TNT* فعال می‌شود، گازهای داغ تولیدشده و هوای اطراف را فشرده می‌کنند. این فرآیند موجب شکل‌گیری موج انفجار می‌شود که شامل موج شوک با فشار بالا و باد سریع است (*Bphara et,al. 2023*). پارامترهای مهم در تحلیل انفجار شامل فاصله ایستاده و زاویه برخورد هستند. فاصله ایستاده، فاصله مستقیم و بدون مانع بین سازه و نقطه میانی مواد منفجره است و با افزایش این فاصله، شدت فشار انفجار کاهش می‌یابد (*Dadkhah & Mohebbi, 2023*). زاویه برخورد، زاویه‌ای است که توسط مماس به موج انفجار و سطح زمین ساخته می‌شود و بر تغییر فشار انفجار و الگوی تکانه بر ساختار تأثیر می‌گذارد (*Isaac et.al, 2023*).

انفجارهای غیر محصور به عنوان انفجار هوا، انفجار هوای آزاد و انفجار سطح بر اساس مکانی که ماده منفجره نسبت به سطح زمین قرار دارد، گروه‌بندی می‌شوند (*Shirbhate & G oel, 2020*). در مورد انفجار هوا، انفجار در ارتفاع خاصی از سطح زمین رخ می‌دهد و جبهه موج ماخ (شکل ۱) در نقطه خاصی شکل می‌گیرد، با این حال، هنگامی که ماده منفجره بالای سطح زمین در هوای آزاد انفجار می‌کند، آن را می‌توان به عنوان انفجار هوای آزاد دسته‌بندی کرد و اگر انفجار در سطح زمین رخ دهد، آن را انفجار سطحی می‌نامند. پدیده جبهه موج ماخ زمانی رخ می‌دهد که موج انفجار اولیه و موج شوک بازتابی با هم ادغام‌شده و یک موج تکی به نام جبهه موج ماخ را تشکیل می‌دهند. این پدیده تحت تأثیر زاویه برخورد و فرآیند بازتاب قرار دارد و می‌تواند تأثیرات شدیدی بر سازه‌ها داشته باشد (*Shirbhate et.al, 2020*).



شکل ۱. مکانیزم تولید جبهه موج ماخ (Shirbhate & Goel, 2020)

مدل‌سازی انفجار و تحلیل پاسخ سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری اهمیت زیادی دارد. این مدل‌سازی‌ها به دلیل پیچیدگی پدیده‌های انفجاری نیازمند استفاده از روش‌های عددی پیشرفته و نرم‌افزارهای تخصصی است. در این زمینه، روش‌های مختلفی مانند روش‌های لاگرانژی، اویلری (*Qin et.al, 2024*)، لاگرانژی دلخواه اویلری *(ALE) (Hung et.al, 2024)* و هیدرودینامیک ذرات نرم *(SPH) (Jindra et.al, 2024)* برای شبیه‌سازی رفتار سیستم تحت اثر انفجاری توسعه‌یافته‌اند. با استفاده از شبیه‌سازی عددی، کل رویداد انفجار می‌تواند تحلیل شود و پاسخ سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری تعیین گردد. روش‌های مختلفی مانند روش اجزای محدود (*FEM*) و روش المان گسسته (*DEM*) برای مدل‌سازی و تحلیل این نوع پدیده استفاده می‌شوند. روش‌های مذکور در نرم‌افزارهای مختلفی مانند *LS DYNA*، *ABAQUS*، *AUTODYN*، *ANSYS AUTODYN*، *Air3D*، *DYNA3D*، *BLASTX*، *ALE3D* و غیره پیاده‌سازی شده‌اند و در دسترس هستند (*Shirbhate & Goel, 2020*).

روش‌های لاگرانژی و اویلری از مهم‌ترین روش‌ها برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها تحت اثر انفجاری هستند. در روش لاگرانژی، شبکه المان همراه با ماده حرکت می‌کند و بار انفجار با استفاده از مدل *CONWEP* محاسبه می‌شود. این روش، مبتنی بر داده‌های تجربی بزرگ است و به لحاظ محاسباتی اقتصادی است، زیرا هوا به صورت آشکار با مواد منفجره و سازه مدل نمی‌شود. بااین‌حال، این روش به دلیل عدم محاسبه اثرات سایه‌ای و تغییر شکل بزرگ المان‌ها در نرخ کرنش بالا، کمتر دقیق است. در مقابل، در روش اویلری، شبکه المان در فضا ثابت است و ماده در این شبکه حرکت می‌کند. این فرمولاسیون مزایای بیشتری برای کار با تغییرات بزرگ دارد زیرا تغییر شکل شبکه وجود ندارد و نیاز به شبکه‌بندی جدید کاهش می‌یابد. این امر باعث می‌شود زمان محاسباتی نسبت به فرمولاسیون لاگرانژی دلخواه اویلری کاهش یابد (*Zakirsson, et.al, 2011*).

در روش لاگرانژی دلخواه اویلری (*ALE*)، شبکه المان می‌تواند ثابت باشد (مانند روش اویلری) یا همراه با ماده حرکت کند (مانند روش لاگرانژی). این روش با ترکیب مزایای روش‌های لاگرانژی و اویلری، مشکلات ناشی از تغییر شکل بزرگ در روش لاگرانژی را حل می‌کند و همچنین اثرات سایه‌ای و تمرکز انفجار را در نظر می‌گیرد. روش *ALE* می‌تواند به طور مؤثری فشار ناشی از انفجار را در محیط‌های پیچیده مانند هوا و مایعات مدل کند (*Abedini, et,al, 2020*). روش لاگرانژی دلخواه اویلری چند ماده‌ای (*MMALE*) نیز نسخه‌ای پیشرفته‌تر از روش *ALE* است که دامنه هوا و مواد منفجره را به صورت آشکار مدل می‌کند. این روش به دلیل مدل‌سازی دقیق‌تر کل فرآیند انفجار، از جمله انفجار مواد منفجره، با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده مورداستفاده قرار می‌گیرد و دقت بیشتری را ارائه می‌دهد (*Savrukoğlu & Aslantas, 2023*).

لوسی (۱۹۷۷) روش هیدرودینامیک ذرات نرم (*SPH*) را توسعه داد که بعدها در نرم‌افزارهایی مانند *LS DYNA* و *ABAQUS* پیاده‌سازی شد (*Zhang et.al, 2023*). این روش بر اساس معادلات حرکت مایعات عمل می‌کند و از روش لاگرانژی بدون شبکه استفاده می‌کند. این ویژگی به روش *SPH* اجازه می‌دهد تا مسائل با هندسه‌های نامنظم و تغییر شکل‌های بزرگ را به خوبی مدل کند. این روش به‌ویژه برای پیش‌بینی پاسخ خودروهای سبک زرهی و سازه‌های نظامی در برابر انفجارها مفید است. یکی از مزایای اصلی روش *SPH* این است که مشکل تغییر شکل بزرگ و گره‌گیری شبکه در مسائل با سرعت‌بالا را حل می‌کند (*Shirbhate & Goel, 2020, Keshavarz Mirza Mohammadi et.al, 2023a*).

از طرفی مخازن به دلیل اندازه بزرگ و پیچیدگی ساختاری‌شان، انجام آزمایش‌های تجربی بر روی آن‌ها به‌طور عملی غیرممکن و بسیار هزینه‌بر است؛ بنابراین، با استفاده از روش‌های عددی مانند روش‌های *FEM* و *CFD* (دینامیک سیالات محاسباتی)، می‌توان رفتار مخازن را تحت بارهای انفجاری شبیه‌سازی کرد و سیستم‌هایی برای افزایش تاب‌آوری آن‌ها ارائه داد. مدل جانسون کوک به دلیل توانایی در تحلیل رفتار مواد در نرخ‌های کرنش بالا، افزایش دما در اثر انفجار و در نظر گرفتن سخت شدگی، کاربرد گسترده‌ای در تحلیل سازه‌های ساخته‌شده از فولاد یا بتن مسلح (آرمه) تحت بارهای انفجاری دارد. این مدل به خوبی می‌تواند رفتار جامدات فلزی را در شرایط انفجار شبیه‌سازی کند و به همین دلیل برای تحلیل رفتار مخازن و سایر سازه‌ها در مواجهه با انفجار، مفید است (*Sahoo et.al, 2024*).

مخازن

در این قسمت راهکارهای طراحی مکان استقرار مقاوم برای مخازن در برابر تهدیدات انفجاری، مقاوم‌سازی سازه مخازن در برابر تهدیدات انفجاری و راهکارهای بعد از وقوع انفجار مورد مطالعه قرار گرفته است.

استتار و اختفاء

اصطلاح «استتار و اختفا» به طور گسترده در صنعت دفاع استفاده می‌شود. امروزه از روش‌های نقاشی، در کشورهای مختلف برای استتار مخازن ذخیره سوخت و نفت و دفن مخازن برای اختفاء استفاده می‌شود. ازاین‌رو رنگ محیطی که با محیط اطراف همخوانی داشته باشد به مخازن اضافه می‌شود تا آن‌ها را سخت‌تر بتوان از آسمان پیدا کرد و مورد حمله قرار داد (نشریه ۱۲۳، ۱۳۹۵).

ساخت سازه‌های حساس مانند مخازن در دشت‌ها یا مناطق صاف، خطر آسیب‌پذیری در برابر انفجار را افزایش می‌دهد؛ زیرا این زمین‌ها کمترین محافظت طبیعی در برابر انتشار موج‌های انفجار فراهم می‌کنند (نشریه ۱۲۳، ۱۹۳۵). نبود موانع طبیعی مانند بلندی‌ها یا پستی‌ها باعث می‌شود موج‌های انفجار به‌طور مؤثرتری در این مناطق حرکت کرده و تقویت شوند. در نتیجه، نیروی انفجار در فواصل دورتر گسترش یافته و آسیب‌های بیشتری ایجاد می‌کند (*Zhou & Hao, 2008, Shirbhate & Goel,2020, Isaac et.al, 2023*). همچنین در این مناطق، محافظت و پنهان‌سازی محدود است و سازه‌ها بیشتر در معرض حملات مستقیم قرار می‌گیرند.

حفاظت فیزیکی، امنیتی و ایمنی

در مدیریت و عملیات استفاده از مخازن، توجه به حفاظت فیزیکی و امنیتی مکان استقرار آن‌ها حائز اهمیت است (*U.S. Headquarters Department of the Army, 2022*). اقدامات امنیتی شامل استفاده از نگهبان و بازرسی‌های امنیتی قبل از ورود وسایل نقلیه و افراد به محل‌های نگهداری مخازن می‌باشد (*EFMA 426, 2003*). حفاظت فیزیکی یکی از مهم‌ترین عوامل در جلوگیری از وقوع انفجار است. رعایت فاصله ایمن از محل احتمال انفجار و سازه مخازن می‌تواند از انفجارهای خرابکارانه و تروریستی جلوگیری کند. طبق قانون فاصله مقیاس شده در انفجار، افزایش فاصله از مخازن باعث کاهش اثر ترکش‌های پرتاب‌شده و بار انفجار می‌شود (*Dadkhah & Mohebbi, 2023*). این مهم با استفاده از دیوارها و فنس‌ها و همچنین امکان بهره‌برداری در فاصله‌ای دور از مخازن قابل‌تحقق است (*EFMA 426, 2003*).

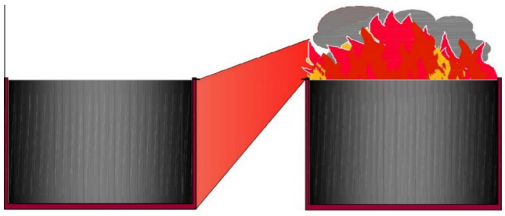
پراکنده‌سازی

پراکنده‌سازی مخازن و گسترش مراکز توزیع، راهکارهای مؤثری برای افزایش تاب‌آوری سیستم‌های لجستیکی و زنجیره تأمین هستند. این روش به زنجیره‌های تأمین کمک می‌کند تا در مواجهه با نوسانات و بحران‌های مختلف تاب‌آوری بیشتری داشته باشند. با پراکنده‌سازی مخازن به جای تمرکز در چند مرکز بزرگ، تأمین نیازها از مناطق مختلف ادامه می‌یابد و عملیات لجستیک با کمترین اختلال مواجه می‌شود. این راهکار خطرات وابستگی به یک تأمین‌کننده یا محل خاص را کاهش می‌دهد و به مدیریت ریسک کمک می‌کند(*Onal et. al, 2023*).

فاصله‌گذاری

یکی از پدیده‌های بسیار مهم در خصوص مناطقی که مواد اشتعال‌زا در آنجا قرار دارد، پدیده «اثرات زنجیره‌ای» می‌باشد (*Chen et.al, 2022*). تعریف آن عمدتاً شامل سه عنصر اساسی است: (۱) حادثه اولیه و اثرات فیزیکی آن، مانند تابش گرمای آتش، موج شوک انفجار، ترکش‌های انفجار و غیره؛ (۲) حادثه گسترش‌یافته ثانویه یا مرتبه اول بالقوه؛ این حادثه از گسترش اولیه سرچشمه می‌گیرد. حادثه و نشت مواد اشتعال‌زا خطرناک که از عوامل این حادثه می‌باشد؛ (۳) اثرات بعدی حاصل و خرابی‌های پیشرونده (*Kong, 2021*). تجربیات گذشته نشان داده‌اند قریب به ۳۵٪ وقوع این پدیده در مراکز صنعتی مربوط به مخازن نگهداری مواد شیمیایی و مواد اشتعال‌زا بوده است (*Ghasemi & Nourai, 2017*). علاوه بر این ۴۳٪ اثرات زنجیره‌ای به وجود آمده در اثر استخرهای گرمایی و ۵۳٪ آن‌ها بر اثر انفجار به وجود آمده‌اند (*Chen et.al, 2022*). استخرهای گرمایی به وجود آمده ناشی از آتش‌سوزی یا حمله به یکی از مخازن می‌توانند بر مخازن دیگر نیز تأثیر بگذارند. همچنین انفجار علاوه بر فشاری که به سازه اطراف وارد می‌کنند می‌تواند ترکش‌هایی را به مخازن وارد کند. از این رو راهکارهای متعددی برای مقابله با این پدیده پیشنهادشده است که مهم‌ترین آن‌ها فاصله ایمن بین مخازن، استفاده سیستم‌های سردکننده در زمان اضطراری و عایق‌های حرارتی نام برد (*Sambuci et.al, 2023*). فرآیند تابش، استخر گرمایی در اثرات زنجیره‌ای در شکل ۲ قابل مشاهده است.

اسناد متعددی در خصوص اندازه‌گیری فاصله مخازن وجود دارد که طراحان در زمان طراحی باید به آن توجه کنند تا بتوانند این پدیده را کنترل کنند. ازجمله این اسناد می‌توان (مؤسسه نفت کد ایمنی پالایش ۱۹۸۱، انجمن ملی حفاظت از آتش‌سوزی آمریکا (*NFPA*)، انجمن ملی حفاظت از آتش‌سوزی آمریکا (*NFPA 15*)، موسسه نفت آمریکا (*API 2030*)، مقررات ملی فرانسه، انجمن حفاظت از آتش‌سوزی انگلستان، مقررات ملی چین، استاندارد شرکت ملی نفت ایران، استاندارد بیمه آتش‌سوزی ژاپن) اشاره کرد (*Ghasemi & Nourai, 2017*)؛ که بسته به نوع مخزن سقف مخزن موارد موجود و اندازه مخزن فاصله‌های مختلفی را اختیار می‌کنند.



شکل ۲. مکانیزم تابش گرمایی در اثرات زنجیره‌ای (Ghasemi & Nourai, 2017)

موانع انفجاری

یک راهکار دیگر برای افزایش تاب‌آوری مخازن در برابر بارهای انفجاری، ارائه یک مانع انفجار یا دیوار انفجاری در اطراف آن‌ها می‌باشد. موانع به‌عنوان یکی از اصولی‌ترین اقدامات مهندسی برای کاهش اثرات انفجار برسازه‌ها شناخته می‌شود (*EFMA*

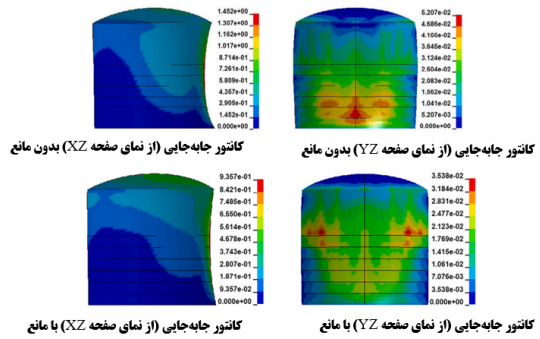
426, 2003). یک مانع و یا دیوار انفجاری یک فاصله ایستاده را برای محافظت از ساختار در برابر انفجار خارجی فراهم می‌کند. علاوه بر این، به‌عنوان یک مانع در جهت کاهش انتشار موج انفجار عمل می‌کند. بنابراین، بخشی از انرژی انفجاری به عقب منعکس می‌شود و سپس توزیع فشار انفجار بر ساختار پشت مانع تغییر می‌کند و بیشینه فشار انفجار کاهش می‌یابد (*Keshavarz Mirza Mohammadi et.al, 2023b*). فرآیند تأثیرگذاری این موانع این‌گونه است که با تشکیل یک مرز مستحکم انرژی زیادی از موج انفجار را مستهلک می‌کند و باعث انعکاس موج انفجار خواهد شد و سایه‌ای موج انفجار را در پست جسم تولید می‌کند که این پدیده در انفجارهای سطحی مانع از تشکیل جبه موج ماخ می‌شود که بسیار مؤثر در کاهش اثرات انفجار خواهد بود (*Zhou & Hao, 2008, Sullivan et.al, 2024*).

کشاورز میرزا محمدی و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که یک مانع متشکل از سیال به عنوان مایع جاذب انرژی موج انفجار، در یک دیوار می‌تواند نتایج زیر را به دنبال داشته باشد. یک انفجار شبیه‌سازی‌شده ۴۰۰ کیلوگرم *TNT* حداکثر فشار ۳.۲۴ بار را تولید می‌کند. یک مانع با ضخامت ۰.۲۵ متر در فاصله ۱۰ متری از مواد منفجره، اوج فشار را می‌تواند به ۰.۴۸ بار کاهش دهد که تقریباً ۲۵٪ مقدار اولیه است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش ضخامت و مقاومت مانع و کاهش فاصله آن با انفجار می‌توان بهترین عملکرد را در مقابله به فشار ناشی از انفجار را از موانع وصول کرد. همچنین با توجه به خطرات ناشی از آتش حاصل از انفجار و از سوی دیگر حضور نیروی انسانی در اتاق‌های کنترل و فضاهای ساختمانی، استفاده از این راهکار می‌تواند آسیب به نیروهای انسانی، امکانات و سازه‌ها را کاهش دهد.

وانگ و همکاران، ۲۰۲۲ در مطالعه خود اثرات موانع را بر روی پاسخ دینامیکی مخازن در اثر بار انفجار با ابعاد واقعی و با استفاده از شبیه‌سازی ریاضی محاسبه کردند و نتایج آن‌ها این موضوع را نشان داده است که وجود موانع باعث کاهش کرنش های پلاستیک در دیواره مخزن و همچنین کاهش خطرات پارگی پوسته مخزن خواهد شد و همچنین تغییر شکل‌های عمودی دیواره مخزن در صورت وجود این موانع تا ۶۷٪ در مقایسه با نبودشان کاهش داشته است. این مقایسه در شکل ۳ قابل مشاهده است.

جداساز پایه

در ادامه مطلب تلاش شده است راهکارهای افزایش تاب‌آوری سازه مخزن را در برابر تهدیدات انفجاری مورد بررسی قرار گیرد. سیستم‌های کنترل‌کننده پاسخ دینامیکی سازه‌ها اعم از مخازن یکی از روش‌های مؤثر برای افزایش قابلیت تاب‌آوری آن‌ها در مقابله باره‌ای ناشی از موج انفجار می‌باشد. این سیستم‌ها عمدتاً به دو دسته فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. سیستم کنترل پاسخ دینامیکی فعال به سیستمی گفته می‌شود که نیروهای خارجی توسط جک‌های هیدرولیکی در پایه به سازه منتقل می‌شوند و پاسخ‌های دینامیکی سیستم را بهبود می‌بخشند (*Gedikli & Ergüven, 1999*) اما سیستم‌های غیرفعال با نیروهای خارجی مرتبط نیستند و بسیار کم‌هزینه‌تر هستند و با تغییر در ماهیت فیزیکی سازه‌ها و به صورت پیوسته خصوصیات دینامیکی آن‌ها را بهبود می‌بخشند (*Jing et.al, 2024*) که چند نمونه از این سیستم‌ها در زیر مورد بررسی قرارگرفته است.



شکل ۳. کرنش پلاستیک و جابه‌جایی دیواره مخزن در حضور مانع و عدم حضور آن (Wang et.al, 2022).

سیستم جداساز پایه، یکی از سیستم‌های جدیدی است که برای صیانت از مخازن در برابر زلزله عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داده است اما تحقیقات اخیر نشان داده‌اند این سیستم‌ها باعث افزایش تاب‌آوری سازه‌ها در مقابل فشار ناشی از موج انفجار می‌شوند (*Tolani, et.al, 2022, Zhang et.al, 2023, Toplu & Kirtel, 2023*). خصوصیت بسیار حائز اهمیت استفاده از جداساز در مخازن به این موضوع باز می‌گردد که با توجه به اصل سازگاری تاب‌آوری با این سیستم می‌توان تاب‌آوری مخازن را در دو بحران تهدیدات انفجاری و زمین‌لرزه افزایش داد.

جداسازهای پایه قابلیت بالایی در اتلاف انرژی دارند خواه می‌خواهد این انرژی از طریق انفجار و یا زلزله به سازه وارد شود. جداسازهای به دلیل این که فرکانس پایینی دارند در زمان مواجه با تکانه‌ها با فرکانس بالا مانند انفجار و یا زلزله با دامنه تناوب کوتاه اثرات تشدید به وجود آمده از بار را به دلیل دوری فرکانس با فرکانس بار کاهش می‌دهد ازاین‌رو جابه‌جایی و گرادیان شتاب در اعضای اصلی سازه کاهش پیدا می‌کند (*Kangda & Bakre, 2018*). چنگیزی و داگن (۲۰۱۳) نشان داده‌اند جداساز پایه یاتاقان لاستیکی چندلایه (*LBR*) باعث کاهش تنش‌های پوسته خارجی مخازن دو دیواره شده‌اند ازاین‌رو می‌توان از این سیستم برای کنترل مخازن استفاده برد. بالاراج و همکاران (۲۰۲۱) به نتایج مشابه ای برای مخازن هوایی جداسازی شده در اثر بار انفجار رسیده‌اند که نشان از قابلیت این سیستم در افزایش تاب‌آوری مخازن دارد. جداسازهای پایه در انواع مختلفی طراحی و تولید می‌شوند. از متداول‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

یاتاقان لاستیکی با میرایی بالا (*HDRB*) و یاتاقان چندلایه (*LBR*): این سیستم‌ها از چندلایه فولادی و لاستیکی تشکیل شده‌اند و دارای

رفتار خطی با اتلاف انرژی بالا در راستای افقی و مقاومت بالا در راستای عمودی هستند (*Farahmandpey et.al, 2023*).

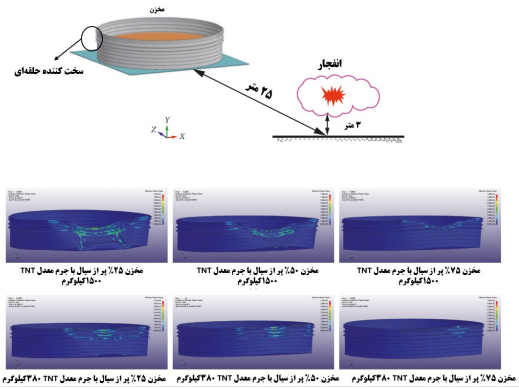
جداساز آونگ اصطکاکی (*FPS*): شامل یک صفحه اصلی، مفصل لغزنده و یک ظرف کروی مقعر از فولاد ضدزنگ است. این سیستم با حرکت لغزنده بر روی سطح کروی، نیروی مقاوم و میرایی ایجاد می‌کند (*Toplu & Kirtel, 2023*).

یاتاقان لاستیکی با هسته سربی (*LRB*): دارای قابلیت پشتیبانی از بار عمودی، انعطاف‌پذیری افقی و میرایی مکمل است. این جداساز از لایه‌های لاستیکی با یک هسته سربی تشکیل‌شده و در برابر بارهای عمودی و تنش‌های برشی عملکرد خوبی دارد (هو، ۲۰۱۵: ۱۱۲ ،۱۱۳).

سخت‌کننده‌های دیواره

سخت‌کننده‌های فولادی دیواره، نقش مهم در ارتقای تاب‌آوری و عملکرد سازه‌های فولادی مانند مخازن تحت شرایط انفجار و بارگذاری سنگین دارند. این عناصر سازه‌ای به طور مؤثر برای تقویت صفحات فولادی استفاده می‌شوند که با توزیع بار و کار انجام‌شده میزان خرابی و تغییر شکل صفحات فولادی را کاهش می‌دهند. علاوه بر مقاومت در برابر انفجار، سخت‌کننده‌ها نقش حیاتی در حمایت از صفحات فولادی تحت شرایط بارگذاری استاتیک و دینامیک با توزیع استرس‌ها به طور یکنواخت و کاهش احتمال انحراف، پیچیدگی یا سایر اشکال شکست سازه نیز دارند (*Gan et.al, 2022*).

لو و همکاران (۲۰۱۹) از این سیستم برای افزایش مقاومت مخازن در برابر انفجار بهره برده‌اند که برای مخازن استوانه‌ای این سخت‌کننده‌ها به صورت حلقه دورتادور مخازن اعمال می‌شوند و حمایت از سازه مخزن را به ارمغان می‌آورند. نتیجه قابل‌توجهی که در مطالعه متعددی حاصل‌شده است این است که میزان ارتفاع سیال درون مخزن در زمان انفجار تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای را در بهبود خصوصیات دینامیکی مخازن می گذارند (شکل ۴) (*Mittal et.al, 2014, Lu et.al, 2019*). برعکس این موضوع که در زلزله، پر بودن مخزن می‌تواند خطرات را افزایش دهد (*Ding et.al, 2024*).



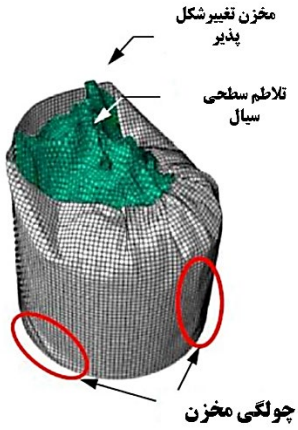
شکل ۴. اثرات میزان ارتفاع سیال در مخازن صیانت شده با استفاده از سخت‌کننده (Lu et.al, 2019)

دیوارهای محافظ و دو لایه

دیوارهای محافظ مخازن عمدتاً برای مخازن گاز مایع یا مخازن با دمای پایین استفاده می‌شوند که ممکن است انفجارهای شدیدی به دنبال داشته باشند. این دیوارها مانند موانع عمل می‌کنند و امواج انفجار را جذب و در برابر آن مقاومت می‌کنند. برخلاف موانع عادی، دیوارهای محافظ بخشی از سازه مخزن محسوب می‌شوند و در طراحی مخازن موردمطالعه قرار می‌گیرند. برای مخازن با دیواره فولادی، دیوارهای محافظ معمولاً از بتن پیش‌تنیده ساخته می‌شوند که مقاومت بالایی در برابر انفجار دارند. این دیوارها ممکن است به‌صورت کامل یا بدون سقف اجرا شوند (*Bhattacharyya et.al, 2024*). مزیت این دیوارها مقاومت بالای آن‌هاست، اما مهم‌ترین دلایل کم استفاده بودن آن‌ها، هزینه‌های بالای ساخت و محدودیت دسترسی فیزیکی برای تعمیر و نگهداری مخزن، می‌باشد. این هزینه‌ها نه‌تنها شامل ساخت دیواره، بلکه به دلیل نیاز به پی‌های بزرگ‌تر و تعداد شمع‌های بیشتر نیز می‌باشد (*Sharari et.al, 2022*).

تیغه‌های میراگر

تیغه‌های میراگر سیستم کنترل غیرفعالی هستند که برای کنترل تلاطم سطحی سیال در مخازن از آن‌ها استفاده می‌شود. عمده استفاده این تیغه‌های میراگر در کنترل امواج سطحی سیال در زلزله‌ها می‌باشد (*Wang et.al, 2023*). مطالعات نشان داده‌اند در زمان وقوع انفجار و ایجاد فشارهای ناشی از آن بر دیواره مخازن سیال درون مخزن با سرعت قابل توجهی دیواره مخزن جداشده و به سقف و طرف مقابل مخزن برخورد می‌کند که باعث افزایش فشار و خرابی مخزن در سقف و وجه مخالف می‌شود که می‌تواند باعث سرریز شدن سیال درون مخزن و بروز آتش‌سوزی شود (شکل ۵).



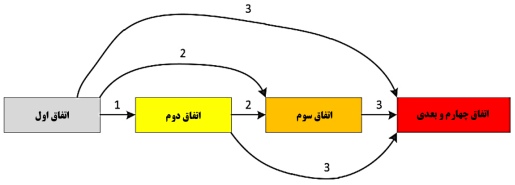
شکل ۴. امواج سطحی سیال در مخازن در اثر بار انفجار (Mittal et.al, 2014)

تیغه‌های میراگر باعث می‌شوند که بخش همرفتی و بخش تکانشی سیال به یکدیگر تبدیل شوند. از این رو، بخش تکانشی

سیال محصور شده و آزادی عمل کمتری برای جدا شدن از مخزن و تماس با سطح مخالف مخزن خواهد داشت (*Farahmandpey et.al, 2023*). بر این اساس در پدیده انفجار تیغه‌های میراگر می‌توانند باعث کاهش حجم و سرعت پرتاب سیال به سقف و وجه مخالف شوند. از طرف دیگر تیغه های میراگر با متصل کردن وجه‌های مخالف مخزن به یکدیگر مانند سخت‌کننده‌های مخازن عمل کرده و باعث افزایش مقاومت سازه مخزن می‌شوند (*Ren et.al, 2023*). همچنین تانگ و همکاران (۲۰۲۳) نشان داده‌اند که سرعت پرتابه که با مخزن برخورد می‌کند در حضور تیغه‌های میراگر کاهش قابل‌توجهی داشته است و باعث کاهش آسیب به مخازن و تغییر شکل‌های آن‌ها شده است.

سیستم اطفای حریق و حفاظت محیط زیستی

در صورت بروز انفجار و وارد آمدن خسارت به مخازن، راهکارهایی برای افزایش سرعت بازیابی و کاهش خسارات مطرح‌شده که در ادامه بیان‌شده‌اند. مخازن مایع به‌خصوص مخازن صنعتی دارای مواد اشتعال‌زا و سمی هستند. اگر مخازن موردحمله و هدف قرار گرفتند بسیار حیاتی است تا تأسیسات اطفای حریق و تمهیدات از پیش تعیین‌شده حفاظت محیط زیستی به‌درستی پیش‌بینی‌شده باشند و وارد عمل شوند. با وارد آمدن خسارت به مخزن و بروز آتش‌سوزی و نشت مواد سمی که پدیده‌ای بسیار محتمل است، علاوه بر اطفای حریق مخزن مذکور، باید مخازن دیگر نیز در برابر تابش‌های گرمایی مخزن آتش‌گرفته و در مقابل احتمال سرایت آتش به آن‌ها محافظت شوند تا از وقوع پدیده اثرات زنجیره‌ای اجتناب شود (*Ding et.al, 2021*) (شکل ۶). آیین‌نامه‌های مختلفی وجود دارند که مقادیر موردنیاز برای شدت آب جهت خنک کردن و کنترل دمای مخزن به منظور جلوگیری از انفجار داخلی را پیشنهاد کرده‌اند که در جدول ۱ قابل‌مشاهده است. البته توجه به این موضوع مهم است که عدم قطعیت‌های موجود در واقعیت مانند جهت وزش باد، میزان خرابی، دمای محیط، فاصله مخزن، میزان سوخت درون مخازن و ... مورد توجه قرار گیرد (*Ghasemi & Nourai, 2017*).



شکل ۵. پدیده اثرات زنجیره‌ای *(Ding et.al, 2021)*

جدول ۱. شدت آب برای محافظت از مخازن *(Ghasemi & Nourai, 2017)*

کشور	سازمان توسعه‌دهنده	شدت آب موردنیاز $(1/min/m^2)$	
		مخزن در حریق	مخزن مجاور
آمریکا	انجمن ملی حفاظت از آتش *(NEPA)*	۲.۸	۱.۱
	انجمن ملی حفاظت از آتش *(NEPA 15)*	۸.۱۵	
	شرکت مهندسی اسو *(Esso)*	۳.۶۶	
	موسسه سوخت آمریکا *(API 2030)*	۱۰.۲	۴.۱
انگلستان	انجمن آتش‌نشانی	۹.۸	
	انجمن انرژی *(IP 19)*	۱۰	۲
فرانسه	مقررات ملی	۱۵ ۵	
ژاپن	شرکت بیمه آتش‌سوزی استاندارد	۱۰	
چین	مقررات ملی	۲.۵ (سقف شناور)، ۲ (سقف ثابت)	۲
ایران	استانداردهای شرکت نفت ایران	۱۰.۲	

مخازن ذخیره‌سازی مایعات حاوی مواد سمی و اشتعال‌زا هستند که در صورت خرابی بر اثر تهدیدات انفجاری یا دیگر عوامل، ممکن است مواد سمی به محیط آزاد شوند و خطرات جانی برای انسان‌ها ایجاد کرده و همچنین با نفوذ به آب‌های زیرزمینی، مشکلات زیست‌محیطی را به همراه داشته باشند (*Trávníček et.al,2019*). ازاین‌رو در مکان‌هایی که چنین مخازنی هستند باید از صفحه‌های نفوذناپذیر در محیط استفاده (ژئوممبران) کرد که در صورت نشتی راه ورود این مواد به آب های زیرزمینی گرفته شود. همچنین مکان‌های دارای مخازن بزرگ باید به صورتی شیب بندی شده باشند که نشتی‌های مخازن به سرعت از محیط خارج شده و جمع‌آوری و مدیریت شوند (*Bahadori, 2020*).

آموزش و توانمندسازی کارکنان

نقش کارکنان یکی از عوامل اساسی در موفقیت در مواجهه با بحران‌های مختلف شناخته می‌شود. کارکنان که با محیط آشنایی دارند، می‌توانند بهتر از دیگر کارکنان به تشخیص مسائل و شناسایی خطرات در محیط کمک کنند. آن‌ها به دلیل تجربیات گذشته می‌توانند الگوهای مشکلات و راه‌حل‌های مؤثر را

شناسایی کنند. همچنین آگاهی کارکنان از فرآیندها و دستورالعمل‌های ایمنی و امنیتی می‌تواند به کاهش زمان نیاز برای واکنش به بحران و اجرای اقدامات اضطراری کمک کند (*Edwards, 2023*). کارکنانی که قابلیت هماهنگی و ارتباط مؤثر با اعضای دیگر گروه را دارند، می‌توانند در مواجهه با بحران‌ها بهترین عملکرد را ارائه دهند. این شامل ارتباطات میان سطوح مختلف سازمان، ازجمله کارکنان عادی تا مدیران بالاتر می‌شود. هماهنگی مناسب کارکنان باعث می‌شود تا تلاش‌ها و اقدامات گروه متمرکز و همسو باشند و بهترین رویه برای مقابله با بحران اجرا شود (*Liu Lastres et.al, 2023*). تحقیقات نشان داده است که در ۲۴۱ رخداد اتفاق آتش‌سوزی مخازن در بین سال‌های ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۸، ۱۷٪ به دلیل خطاهای کارکنان، ۲۰.۷٪ به دلایل سازمانی، ۲۰.۷٪ دلایل خارجی و ۴۱.۵٪ باقی دلایل اتفاق افتاده است. بر این اساس اهمیت آموزش و هوشیاری کارکنان در طول بهره‌وری از مخازن بسیار حائز اهمیت است (*Trávníček et.al,2019*).

با توجه به مطالب بیان‌شده، تلاش گردیده است تا راهکارهای ارائه‌شده در ادبیات تحقیق در قالب پرسش‌نامه برای خبرگان مطرح شود و تأثیر و کارایی آن‌ها در خصوص مخازن مورد بررسی قرار گیرد. گویه‌هایی مستخرج از ادبیات تحقیق که پژوهشگران با استفاده از آن پرسش‌نامه را طراحی کرده‌اند، در جدول ۲ گزارش‌شده است.

روش تحقیق

روش تحقیق این تحقیق از روش آمیخته کتابخانه‌ای و میدانی تشکیل شده است. در بخش کتابخانه‌ای، از منابع علمی و تخصصی معتبر داخلی و خارجی بهره‌برداری شده و در بخش میدانی، داده‌ها با استفاده از پرسش‌نامه طراحی‌شده گردآوری شده است. روایی و پایایی پرسش‌نامه با نظر خبرگان و ضریب آلفای کرونباخ برابر با ۰.۸۱ ارزیابی‌شده که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالای ابزارهای سنجش است. جامعه آماری این مطالعه شامل ۵۰ نفر بوده و برای جمع‌آوری و تحلیل نظرات متخصصان از روش دلفی فازی استفاده‌شده است.

روش دلفی به عنوان یک رویکرد معتبر برای رسیدن به توافق و جمع‌آوری نظرات متخصصان در موضوعات پیچیده و تخصصی شناخته می‌شود. در روش دلفی سنتی، نظرات خبرگان با استفاده از اعداد قطعی ارائه می‌شود که این می‌تواند به وجود عدم قطعیت در پاسخ‌ها منجر شود. برای کاهش این عدم قطعیت، پیشنهاد می‌شود که نظرات خبرگان به صورت زبان طبیعی جمع‌آوری شده و سپس با استفاده از اعداد فازی تحلیل شوند (لطیفی و همکاران، ۱۳۹۷). در این مطالعه، نظرات خبرگان با استفاده از اعداد فازی مثلثی تجزیه‌وتحلیل شده است که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$M = (l, m, u) \quad (۱)$$

$$u_M(x) = \begin{cases} \dfrac{x-l}{m-l} & l \le x \le m \\ \dfrac{u-x}{u-m} & m \le x \le u \\ 0 & elsewhere \end{cases} \quad (۲)$$

در این معادلات، M یک عدد فازی است که l کران پایین، m محتمل‌ترین مقدار و u کران بالا هستند. تابع عضویت اعداد فازی با $u_M(x)$ نشان داده می‌شود.

مراحل روش دلفی فازی به شرح زیر است:

۱) طراحی پرسش‌نامه تحقیق بر اساس ادبیات موضوع و استفاده از مقیاس‌های کلامی (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) برای شاخص‌های موردنظر.

۲) تبدیل متغیرهای کلامی به اعداد فازی با استفاده از جدول ۲ که مقادیر متناظر را برای متغیرهای کلامی مشخص می‌کند.

جدول ۲. جدول تبدیل متغیرهای کلامی به اعداد فازی

متغیرهای کلامی	اعداد فازی
خیلی کم	[۲ ,۱ ,۱]
کم	[۳ ,۲ ,۱]
متوسط	[۴ ,۳ ,۲]
زیاد	[۵ ,۴ ,۳]
خیلی زیاد	[۵ ,۵ ,۴]

(نگارندگان)

۳) برای هر سؤال از هر یک از خبرگان، یک عدد فازی به دست می‌آید و امید ریاضی اعداد فازی برای هر سؤال محاسبه می‌شود.

$$\overline{M_i} = \left(\overline{l_i}, \overline{m_i}, \overline{u_i}\right) \quad (۳)$$

$$\Rightarrow \overline{M_i} = \left[\sum_{j=1}^{K}\left(l_i^j\, p_{l_i}^j\right), \sum_{j=1}^{K}\left(m_i^j\, p_{m_i}^j\right), \sum_{j=1}^{K}\left(u_i^j\, p_{u_i}^j\right)\right] \forall\, i$$

$$\Rightarrow \overline{M_i} = 1,2, \dots, N$$

در این معادله، N تعداد سؤالات، i شماره سؤال، K تعداد خبرگان و j شماره خبره هستند. احتمال رخداد هر متغیر کلامی با فرض استقلال خبرگان برابر با $\frac{1}{K}$ در نظر گرفته شده است.

۴) محاسبه میزان اختلاف از امید ریاضی برای هر خبره

$$\varepsilon_i^j = \begin{bmatrix} \left|\sum_{j=1}^{K}\left(l_i^j\, p_{l_i}^j\right) - l_i^j\right| \\ \left|\sum_{j=1}^{K}\left(m_i^j\, p_{m_i}^j\right) - m_i^j\right| \\ \left|\sum_{j=1}^{K}\left(u_i^j\, p_{u_i}^j\right) - u_i^j\right| \end{bmatrix}, \forall\, i = 1,2, \dots, N \quad (۴)$$

۵) بازتولید اعداد فازی و تکرار مرحله تبدیل پرسش‌نامه.

۶) محاسبه امید ریاضی اعداد فازی جدید و انجام فازی‌زدایی با استفاده از میانگین کران بالا، کران پایین و مقدار محتمل

$$V_{crisp}^{j} = \frac{\overline{l_j'} + \overline{m_j'} + \overline{u_j'}}{3} \quad \forall j = 1,2,\dots,k \tag{۵}$$

که در رابطه بالا V_{crisp}^{j} مقدار قطعی پاسخ و $(\overline{l_j'}, \overline{m_j'}, \overline{u_j'})$ امید ریاضی اعداد فازی جدید هستند.

۷) مقایسه میزان اختلاف پاسخ‌های جدید با قدیم

$$\varepsilon_{V_{crisp}}^{j} = \left|\frac{1}{3}\left[(\overline{l_i}, \overline{m_i}, \overline{u_i}) - (\overline{l_j'}, \overline{m_j'}, \overline{u_j'})\right]\right| \quad \forall j \tag{۶}$$
$$\Rightarrow \varepsilon_{V_{crisp}}^{j} = 1,2,\dots,k$$

اگر میزان اختلاف کران بالا، کران پایین و مقدار محتمل از حد آستانه متغیر کلامی خیلی کم (۱.۳۳) کمتر باشد، مراحل پرسش‌نامه پایان می‌یابد.

یافته‌های پژوهش و بحث

با در معرض پرسش قرار دادن شاخص‌ها و راهکارهای استخراج‌شده از ادبیات تحقیق نتایج فازی این شاخص‌ها در جدول ۳ و مقادیر عدد قطعی پاسخ‌ها در شکل ۷ گزارش شده است.

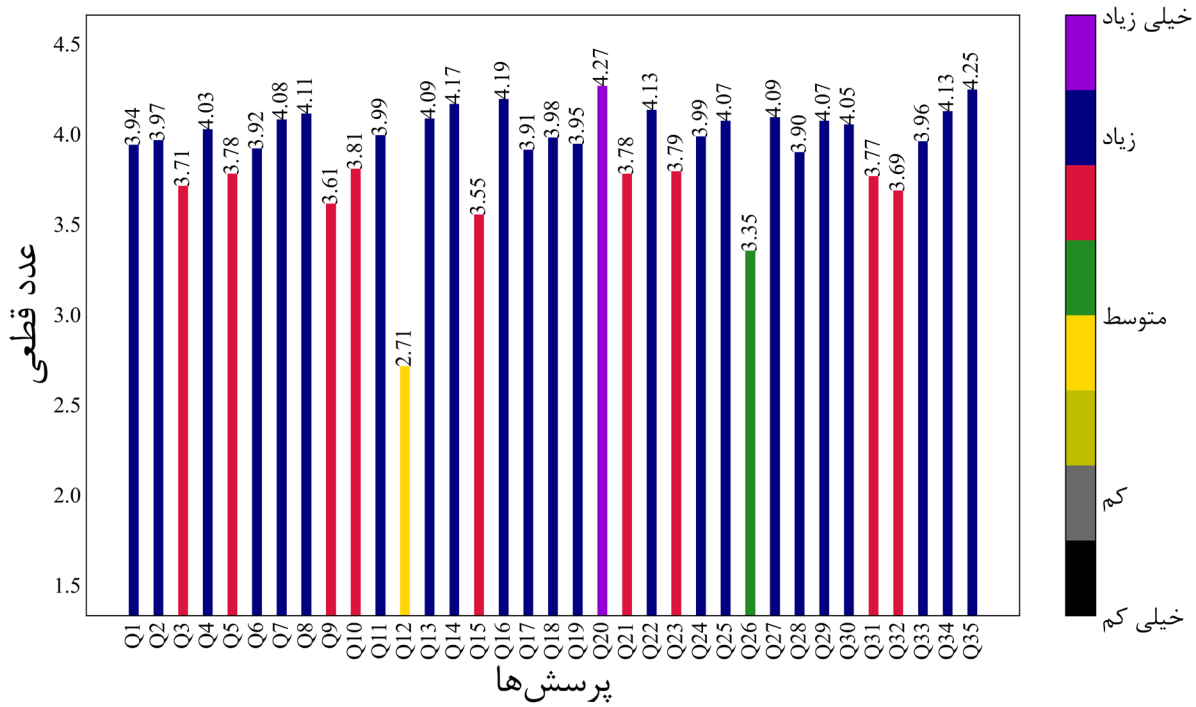
جدول ۳. نتایج تحلیل پرسش‌نامه به روش دلفی فازی

ردیف		گویه	نتایج دلفی فازی		
			میانگین فازی مرحله ۱	میانگین فازی مرحله ۲	اختلاف عدد قطعی
۱	تاب‌آوری	اهمیت الگوی تاب‌آوری بر پایه سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم در زنجیره تأمین	['۴.۷' '۴.۰' '۳.۱']	['۴.۷' '۴.۱' '۳.۱']	۰.۰۰
۲		اهمیت الگوی تاب‌آوری بر پایه افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و مراکز توزیع در زنجیره تأمین	['۴.۸' '۴.۱' '۳.۱']	['۴.۷' '۴.۱' '۳.۱']	۰.۰۳
۳		اهمیت الگوی تاب‌آوری بر پایه برنامه‌های پاسخ اضطراری در زنجیره تأمین	['۴.۵' '۳.۸' '۲.۸']	['۴.۵' '۳.۸' '۲.۸']	۰.۰۱
۴		اهمیت الگوی تاب‌آوری بر پایه آموزش و توانمندسازی کارکنان در زنجیره تأمین	['۴.۶' '۴.۱' '۳.۲']	['۴.۸' '۴.۲' '۳.۲']	۰.۰۴
۵		اهمیت الگوی تاب‌آوری بر پایه حمل‌ونقل با روش‌های متنوع در زنجیره تأمین	['۴.۶' '۳.۹' '۳.۰']	['۴.۶' '۳.۹' '۲.۹']	۰.۰۵
۶		اهمیت الگوی تاب‌آوری بر پایه تکثیر در زنجیره تأمین	['۴.۷' '۴.۰' '۳.۱']	['۴.۷' '۴.۰' '۳.۰']	۰.۰۰
۷		اهمیت اصل آماده‌سازی برای صیانت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۴.۸' '۴.۳' '۳.۴']	['۴.۸' '۴.۲' '۳.۲']	۰.۰۹
۸		اهمیت اصل جذب برای صیانت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۴.۸' '۴.۳' '۳.۳']	['۴.۹' '۴.۲' '۳.۲']	۰.۰۳
۹		اهمیت اصل بازیابی برای صیانت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۴.۴' '۳.۵' '۲.۶']	['۴.۵' '۳.۷' '۲.۷']	۰.۱۱
۱۰		اهمیت اصل سازگاری برای صیانت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۴.۶' '۳.۹' '۲.۹']	['۴.۶' '۳.۹' '۲.۹']	۰.۰۰
۱۱	مدل‌سازی ریاضی انفجار	تأثیر انفجار در فاصله از سطح (انفجار در هوا) بر سازه‌ها در مقایسه با انفجار سطحی و هوای آزاد	['۴.۷' '۴.۱' '۳.۱']	['۴.۷' '۴.۱' '۳.۱']	۰.۰۳
۱۲		عملکرد شبیه‌سازی انفجار بر اساس فرمولاسیون لاگرانژی، در تخمین بار انفجار بر مخازن مایع	['۳.۷' '۲.۹' '۱.۹']	['۳.۶' '۲.۷' '۱.۹']	۰.۱۲
۱۳		عملکرد شبیه‌سازی انفجار بر اساس فرمولاسیون اویلری، در تخمین بار انفجار بر مخازن مایع	['۴.۹' '۴.۴' '۳.۴']	['۴.۹' '۴.۲' '۳.۲']	۰.۱۳
۱۴		عملکرد شبیه‌سازی انفجار بر اساس فرمولاسیون لاگرانژی دلخواه اویلری *(ALE)*، در تخمین بار انفجار بر مخازن مایع	['۴.۷' '۴.۲' '۳.۳']	['۴.۹' '۴.۳' '۳.۳']	۰.۱۰
۱۵		عملکرد شبیه‌سازی انفجار بر اساس فرمولاسیون روش هیدرودینامیک ذرات نرم *(SPH)*، در تخمین بار انفجار بر مخازن مایع	['۴.۳' '۳.۴' '۲.۵']	['۴.۵' '۳.۶' '۲.۶']	۰.۱۷
۱۶		کارایی مدل جانسون کوک وابسته به نرخ کرنش، دما و رفتار سخت شدن فولاد برای مدل‌سازی تغییر شکل سازه مخزن در انفجار	['۴.۸' '۴.۲' '۳.۳']	['۴.۹' '۴.۳' '۳.۳']	۰.۱۰

ردیف		گویه	نتایج دلفی فازی		
			میانگین فازی مرحله ۱	میانگین فازی مرحله ۲	اختلاف عدد قطعی
۱۷	راهکارهای تاب‌آوری مکان استقرار مخازن	استتار و اختفا مخازن با استفاده از روش‌های نوین برای حفاظت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۳.۰', '۴.۰', '۴.۷']	['۳.۰', '۴.۰', '۴.۷']	۰.۰۱
۱۸		مکان‌یابی مخازن با استفاده از روش‌های نوین برای حفاظت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۳.۱', '۴.۱', '۴.۸']	['۳.۱', '۴.۱', '۴.۸']	۰.۰۰
۱۹		حفاظت فیزیکی، امنیتی و ایمنی مخازن با استفاده از روش‌های نوین برای حفاظت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۳.۱', '۴.۰', '۴.۷']	['۳.۱', '۴.۱', '۴.۷']	۰.۰۱
۲۰		پراکنده‌سازی مخازن با استفاده از روش‌های نوین برای حفاظت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۳.۵', '۴.۵', '۴.۹']	['۳.۴', '۴.۴', '۴.۹']	۰.۰۷
۲۱		پیش‌بینی و استفاده از عایق‌های حرارتی و سردکننده‌ها برای مخازن در صورت بروز آتش‌سوزی برای یکی از مخازن	['۲.۹', '۳.۹', '۴.۶']	['۲.۹', '۳.۹', '۴.۶']	۰.۰۱
۲۲		فاصله‌گذاری بین مخازن به منظور کاهش پرتو تابشی آتش و اثرات موج انفجار در صورت بروز تهدید علیه یکی از مخازن برای حفاظت از مخازن دیگر	['۳.۳', '۴.۲', '۴.۷']	['۳.۳', '۴.۳', '۴.۸']	۰.۰۸
۲۳		کارایی موانع در دفع و استهلاک نیروی انفجار	['۲.۹', '۳.۹', '۴.۶']	['۲.۹', '۳.۹', '۴.۶']	۰.۰۰
۲۴	مقام سازی سازه مخزن	سیستم جداساز پایه برای صیانت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۳.۲', '۴.۲', '۴.۸']	['۳.۱', '۴.۱', '۴.۷']	۰.۰۴
۲۵		ارضاء اصل سازگاری در تاب‌آوری با استفاده از جداسازهای پایه برای مقابله با زلزله و طوفان برای صیانت از مخازن مایع	['۳.۴', '۴.۳', '۴.۸']	['۳.۲', '۴.۲', '۴.۸']	۰.۱۰
۲۶		استفاده از جداسازهای پایه با نرخ بالاتر میرایی	['۲.۴', '۳.۳', '۴.۲']	['۲.۴', '۳.۴', '۴.۳']	۰.۰۷
۲۷		استفاده از سخت‌کننده‌های دیواره برای صیانت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۳.۳', '۴.۲', '۴.۸']	['۳.۲', '۴.۲', '۴.۸']	۰.۰۰
۲۸		ارضاء اصل سازگاری در تاب‌آوری با استفاده از سخت‌کننده دیوار برای مقابله با زلزله و به خصوص طوفان به عنوان بادشکن برای صیانت از مخازن مایع	['۳.۰', '۴.۰', '۴.۷']	['۳.۰', '۴.۰', '۴.۷']	۰.۰۱
۲۹		استفاده از دیوار محافظ با توجه به هزینه بالای دیوار بتنی برای صیانت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۳.۳', '۴.۲', '۴.۷']	['۳.۲', '۴.۲', '۴.۸']	۰.۰۱
۳۰		سیستم تیغه‌میراگر برای صیانت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۳.۱', '۴.۰', '۴.۷']	['۳.۲', '۴.۲', '۴.۸']	۰.۱۱
۳۱		ارضاء اصل سازگاری در تاب‌آوری با استفاده تیغه‌میراگر برای مقابله با زلزله و طوفان برای صیانت از مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری	['۲.۸', '۳.۸', '۴.۶']	['۲.۸', '۳.۸', '۴.۶']	۰.۰۱
۳۲		استفاده از تعداد بالای تیغه‌های میراگر در مخازن برای افزایش سختی دیواره و کنترل موج سطحی مایع داخل مخزن	['۲.۹', '۳.۹', '۴.۶']	['۲.۸', '۳.۸', '۴.۵']	۰.۱۱
۳۳	راهکارهای صیانت از مخازن در صورت وقوع انفجا	جانمایی و پیش‌بینی سیستم اطفای حریق و حفاظت محیط‌زیست برای کاهش خسارات تهدیدات انفجاری علیه مخازن مایع و تسریع در بازیابی	['۳.۱', '۴.۱', '۴.۸']	['۳.۱', '۴.۱', '۴.۸']	۰.۰۴
۳۴		هوشیاری کارکنان و آموزش آن‌ها در زمان بروز تهدیدات انفجاری علیه مخازن مایع	['۳.۲', '۴.۱', '۴.۷']	['۳.۳', '۴.۳', '۴.۹']	۰.۱۰

ردیف	گویه	نتایج دلفی فازی		
		میانگین فازی مرحله ۱	میانگین فازی مرحله ۲	اختلاف عدد قطعی
۳۵	اهمیت مدیریت بحران در مواجه با تهدیدات انفجاری علیه مخازن مایع	['۳.۴' '۴.۳' '۴.۹']	['۳.۴' '۴.۴' '۵.۰']	۰.۰۳

(نگارندگان)



شکل ۶. نتایج عدد قطعی تحلیل دلفی فازی (نگارندگان)

فاز کیفی، شش الگوی: سرمایه‌گذاری در زیرساخت مقاوم، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و مراکز توزیع، برنامه‌های پاسخ اضطراری، آموزش و توانمندسازی، حمل‌ونقل با روش‌های متنوع، تکثیر در زنجیره‌های تأمین را به‌عنوان الگوها و رویه‌های مناسب برای ارتقای تاب‌آوری یک سیستم و زنجیره تأمین وابسته به آن شناسایی کرده است. نتایج فاز کمی حاصل‌شده از نظر خبرگان نشان داده است که هر شش الگو شناسایی‌شده مورد تأیید قرارگرفته‌اند. میانگین عملکردی این الگوها برابر با ۳.۸۹ بوده که نشان‌دهنده اثربخشی مطلوب آن‌ها است. این الگوها به ترتیب اهمیت به شرح زیر هستند:

۱) آموزش و توانمندسازی کارکنان (۴.۰۳)
۲) افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و مراکز توزیع (۳.۹۷)
۳) سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم (۳.۹۴)
۴) تکثیر زنجیره تأمین و پراکندگی مراکز توزیع (۳.۹۲)
۵) استفاده از روش‌های متنوع حمل‌ونقل (۳.۷۸)
۶) برنامه‌های پاسخ اضطراری و دستورالعمل‌ها (۳.۷۱)

ازاین‌رو هر یک از راهکارهای پیشنهادی مصون‌سازی مخازن باید در مسیر این الگوها تعریف و تبیین شود تا علمی و در جهت برآورده کردن نیازهای سیستم و زنجیره تأمین باشد.

همچنین نتایج نشان داده است که تمام اصول تاب‌آوری معرفی‌شده در تحقیق برای تکمیل چرخه کامل تاب‌آوری حائز اهمیت هستند. با توجه به این‌که هدف این تحقیق، افزایش تاب‌آوری مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری، می‌باشد؛ هر راهکاری که هرکدام از اصول تاب‌آوری مذکور را که مورد توافق و توجه خبرگان قرارگرفته است را ارضا کند، به‌درستی در چارچوب علمی جای می‌گیرد؛ اما جامعه خبرگان اصل جذب، به معنای مقابله با تهدید و آمادگی، به معنای پیش‌بینی تهدید و مهیا بودن را با اهمیت‌تر دانسته است. بر این اساس اهمیت اصول تاب‌آوری به شرح زیر اولویت‌بندی می‌شود:

۱) جذب (۴.۱۱)
۲) آمادگی (۴.۰۸)
۳) سازگاری (۳.۸۱)

۴) بازیابی (۳.۶۱)

در ارزیابی‌های انجام‌شده توسط خبرگان، انفجار در فاصله‌ای از سطح زمین به‌عنوان بحرانی‌ترین حالت انفجار نسبت به انفجار سطحی و هوای آزاد شناسایی‌شده است. این شرایط به دلیل ایجاد جبهه ماخ ناشی از انعکاس موج انفجار، می‌تواند تأثیرات مخربی بر ساختارها و تجهیزات داشته باشد؛ بنابراین، در طراحی مخازن در برابر انفجار، در نظر گرفتن انفجار در فاصله از سطح زمین به‌عنوان سناریوی بحرانی الزامی است.

در بخش مدل‌سازی انفجار علیه مخازن، فرمولاسیون لاگرانژی دلخواه اویلری (ALE) با امتیاز ۴.۱۷ به‌عنوان بهترین روش شبیه‌سازی معرفی‌شده است. این روش ترکیبی از مزایای دو دیدگاه لاگرانژی و اویلری است و قابلیت تحلیل تغییر شکل‌های بزرگ را داراست. بااین‌حال، نیاز مداوم به بروزرسانی شبکه در این روش، زمان محاسبات را افزایش می‌دهد. به‌عنوان گزینه جایگزین، فرمولاسیون اویلری با امتیاز ۴.۰۹، عملکرد مناسبی داشته و به دلیل ثابت بودن شبکه‌بندی، برای شبیه‌سازی مسائل با نرخ کرنش پایین و تغییر شکل‌های محدود مناسب است. روش هیدرودینامیک ذرات نرم (SPH)، که یک روش بدون شبکه است، از نظر زمان و دقت تحلیل عملکرد متوسطی دارد. این روش با امتیاز ۳.۵۵، علیرغم انعطاف‌پذیری بالا و توانایی مدل‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ، به دلیل محاسبات با دقت کمتر، در جایگاه پایین‌تری قرار می‌گیرد. در مقابل، فرمولاسیون لاگرانژی با امتیاز ۲.۷۱ به دلیل مشکلات در مدل‌سازی تغییر شکل‌های شدید و محدودیت‌ها در شبیه‌سازی پدیده‌های غیرخطی نظیر موج سایه و بازتاب موج که باعث ایجاد جبهه موج ماخ می‌شود، توانایی کافی برای تحلیل این پدیده‌ها دارا نیست.

همچنین، برای مدل‌سازی بخش‌های جامد مخازن مایع، مانند دیوار، سقف و کف که اغلب از فولاد یا بتن مسلح با میله‌گرد ساخته می‌شوند، مدل‌سازی جانسون کوک با امتیاز ۴.۱۹ به‌عنوان گزینه‌ای قابل‌قبول شناخته شده است. این مدل به دلیل دقت بالا در شبیه‌سازی رفتار مکانیکی مواد تحت بارگذاری‌های مختلف و در نظر گرفتن پارامترهای نرخ کرنش، نرم‌شدگی مواد در اثر گرما و سخت‌شدگی کرنش، مورد تأیید خبرگان در تحلیل جامدات مرسوم در اثر انفجار قرارگرفته است.

نتایج فاز کمی مؤید این است که راهکارهای پیشنهادی برای تاب‌آوری مکان استقرار مخازن در فاز کیفی موردپذیرش جامعه خبرگان قرارگرفته‌اند و بر اساس تأثیرگذاری و کاربرد به ترتیب زیر اولویت‌بندی شده‌اند:

۱) پراکنده‌سازی مخازن با استفاده از روش‌های نوین (عدد قطعی ۴.۲۷): این راهکار با بهره‌گیری از الگوی تکثیر در زنجیره تأمین، باعث افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی تأمین‌کننده‌ها و تاب‌آوری مراکز توزیع راهبردی می‌شود. پراکنده‌سازی زیرساخت‌ها (مخازن)، آسیب‌پذیری آن‌ها را کاهش داده و مدیریت بهینه منابع و کارایی شبکه لجستیکی را افزایش می‌دهد. این روش با اتکا بر اصول آمادگی و پیش‌بینی تهدیدات انفجاری و سازگاری با سایر تهدیدات به مانند سیل، طوفان و زلزله، طراحی‌شده است.

۲) فاصله‌گذاری بین مخازن به منظور کاهش پرتوی تابشی آتش و اثرات موج انفجار (عدد قطعی ۴.۱۳): این راهکار به‌عنوان یک راهبرد کلیدی در مقابله با پدیده‌های اثرات زنجیره‌ای در مکان‌های انبار مخازن عمل می‌کند. با در نظر گرفتن اصل آمادگی، جذب و سازگاری با تهدیدات دیگر مانند آتش‌سوزی و زلزله، این روش نه تنها راندمان الگوهای پاسخ اضطراری را بهبود می‌بخشد، بلکه به تقویت مخازن مقاوم در برابر حوادث نیز کمک می‌کند. این راهکار با تکیه بر قانون انفجار مقیاس شده وابستگی احتمال ریسک مخازن را به یکدیگر کاهش می‌دهد.

۳) مکان‌یابی مخازن با استفاده از روش‌های نوین (عدد قطعی ۳.۹۸): مکان‌یابی راهبردی مخازن بر اساس اصول آمادگی و بازیابی، موجب افزایش تاب‌آوری در برابر تهدیدات مختلف می‌شود. به‌عنوان‌مثال، قرار دادن مخازن در دامنه کوه‌ها می‌تواند از آن‌ها در برابر موشک‌های کروز و بالستیک محافظت کند و به بهبود الگوهای حمل‌ونقل و تکثیر زنجیره تأمین با توجه به موقعیت جغرافیایی مخازن کمک کند. از این رو با مهیا شدن بستر حمل‌ونقل مناسب امکان امدادرسانی و بازیابی در زمان بحران افزایش یافته و سرعت بازگشت به شرایط نرمال افزایش پیدا می‌کند. از طرف دیگر با استهلاک امواج انفجار توسط عوارض زمین امکان جذب مؤثرتر تهدیدات انفجاری افزایش پیدا می‌کند.

۴) حفاظت فیزیکی، امنیتی و ایمنی مخازن با استفاده از روش‌های نوین (عدد قطعی ۳.۹۵): این راهکار با تکیه بر اصل آمادگی و سازگاری، به کاهش تهدیدات خرابکاری و خطاهای انسانی کمک می‌کند. حفاظت فیزیکی و امنیتی مخازن با توجه به الگوهای آموزش و توانمندسازی کارکنان، توان پاسخگویی و آمادگی نیروها را در زمینه کنترل و حفظ امنیت و ایمنی مخازن بهبود می‌بخشد.

۵) استتار و اختفاء مخازن با استفاده از روش‌های نوین (عدد قطعی ۳.۹۱): استتار و اختفاء، به‌عنوان یکی از اصول کلیدی پدافند غیرعامل، با تأکید بر اصل آمادگی، نقش مهمی در کاهش تهدیدات انفجاری و افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی مانند مخازن مایع ایفا می‌کند. اقدامات استتاری و اختفاء مانند استفاده از رنگ‌های محیطی هماهنگ با طبیعت و دفن مخازن، به‌طور مؤثری قابلیت شناسایی و هدف‌گیری این سازه‌ها را کاهش می‌دهد

و درنتیجه احتمال آسیب‌های ناشی از حملات مستقیم و موج‌های انفجاری را کمتر می‌کند. در مناطقی که به دلیل نبود موانع طبیعی همچون دشت‌ها و مناطق صاف، مخازن بیشتر در معرض خطر انفجار هستند، اجرای چنین راهکارهایی به همراه شناسایی دقیق سازه‌های آسیب‌پذیر و اتخاذ تدابیر حفاظتی ضروری است. این اقدامات نه‌تنها به محافظت از زیرساخت‌های انرژی کمک می‌کنند، بلکه بخشی حیاتی از راهبردهای ملی در برابر تهدیدات نظامی و غیرنظامی به شمار می‌آیند.

۶) موانع کاهش‌دهنده موج انفجار (عدد قطعی ۳.۷۹): استفاده از موانع مذکور با رعایت اصول جذب و آمادگی، باعث افزایش تاب‌آوری مخازن در برابر تهدیدات انفجاری می‌شود. این راهکار با پیروی از الگوهای سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم، با استهلاک و افزایش فاصله ایستاده انفجار تا مخازن، تاب‌آوری را به ارمغان می‌آورد.

۷) پیش‌بینی استفاده از عایق‌های حرارتی و سردکننده‌ها (عدد قطعی ۳.۷۸): استفاده از عایق‌های حرارتی و سیستم‌های سردکننده، بر اساس اصول آمادگی، جذب و سازگاری و الگوی توسعه زیرساخت‌های مقاوم، اثرات گرمایی و تابشی مخازن آسیب‌دیده را بر دیگر مخازن کاهش می‌دهد و توانایی مقابله با تهدیدات مختلف اعم از آتش‌سوزی، زلزله و ... را بالا می‌برد. این راهکار توانایی مدیریت بحران در مکان استقرار مخازن را افزایش می‌دهد.

بر اساس نتایج، راهکارهای مقاوم‌سازی سازه مخازن با توجه به تأثیرگذاری و کاربرد به ترتیب زیر اولویت‌بندی شده‌اند:

۱) سخت‌کننده‌های دیواره (عدد قطعی ۴.۰۹): استفاده از سخت‌کننده‌های دیواره مخازن با رعایت اصول جذب، آمادگی و سازگاری با بلایای طبیعی همچون طوفان و زلزله (عدد شاخص قطعی ۳.۹۰)، نقش مهمی در ارتقای پایداری و تاب‌آوری مخازن در برابر تهدیدات انفجاری ایفا می‌کند. این راهکار با افزایش سختی دیواره مخازن ظرفیت جذب انرژی داخلی سازه مخزن را افزایش داده و باعث کاهش خسارات ناشی از بار انفجار بر مخازن می‌شود.

۲) دیوار محافظ بتنی (عدد قطعی ۴.۰۷): این راهکار نیز با رعایت اصول تاب‌آوری، جذب و آمادگی، نقش بسزایی در افزایش تاب‌آوری مخازن ایفا می‌کند. دیوارهای محافظ بتنی، به‌طور مؤثری در مقابله با تهدیدات انفجاری عمل می‌کنند. بااین‌حال، به دلیل پیچیدگی اجرا و هزینه‌های بالا، توجه به جنبه‌های اقتصادی و تخصیص هوشمندانه منابع اهمیت ویژه‌ای دارد. ارزیابی دقیق هزینه‌ها و منافع و برنامه‌ریزی جامع برای اجرای بهینه این راهکار ضروری است. علاوه بر این، محدودیت‌های دسترسی و تعمیر و نظارت را برای مخازن به وجود می‌آورد.

۳) تیغه‌های میراگر (عدد قطعی ۴.۰۵): تیغه‌های میراگر، با رعایت اصول جذب، آمادگی و سازگاری با زلزله و طوفان (عدد شاخص قطعی ۳.۷۷)، تاب‌آوری مخازن را در برابر تهدیدات انفجاری افزایش می‌دهند. این سیستم، به‌واسطه هزینه‌های کمتر و اثربخشی بالا، گزینه‌ای مقرون به صرفه و مناسب برای افزایش مقاومت زیرساخت‌های انرژی در برابر تهدیدات انفجاری و طبیعی است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد تیغه‌ها، تاب‌آوری مخازن و سختی مخزن را بهبود می‌بخشد (عدد قطعی ۳.۶۹) و از نظر اقتصادی به‌مراتب به صرفه‌تر از دیوارهای محافظ است.

۴) جداسازهای پایه (عدد قطعی ۳.۹۹): جداسازهای پایه، با تأکید بر اصول آمادگی، جذب و سازگاری (عدد شاخص قطعی ۴.۰۷)، تاب‌آوری مخازن را افزایش می‌دهند. بااین‌حال، این جداسازها در مقایسه با دیگر راهکارهای مقاوم‌سازی سازه مخازن، از نظر خبرگان تأثیر کمتری دارند. همچنین، میرایی جداسازها نسبت به سختی آن‌ها ارزیابی متوسطی (۳.۳۵) دریافت کرده است؛ بنابراین، بررسی مزایا، معایب و خصوصیات هر نوع جداساز برای استفاده در پایه مخازن نیازمند مطالعه و انتخاب صحیح است.

نتایج بررسی راهکارهای صیانت از مخازن مایع پس از بروز تهدیدات انفجاری و بازیابی مخازن نشان می‌دهد که خبرگان به هر سه راهکار پیشنهادی امتیاز قابل قبولی داده‌اند. این راهکارها ازنظر تأثیرگذاری به ترتیب زیر اولویت‌بندی شده‌اند:

۱) مدیریت بحران و دستورالعمل‌های از پیش تنظیم شده (۴.۲۵)

۲) هوشیاری کارکنان و آموزش آن‌ها (۴.۱۳)

۳) جانمایی و پیش‌بینی سیستم‌های اطفای حریق و حفاظت محیط‌زیستی (۳.۹۶)

تدوین دستورالعمل‌های مدیریت بحران و آموزش کارکنان، با تکیه بر اصول آمادگی و بازیابی، به جهت ارضای الگوی آموزش و توانمندسازی کارکنان حرکت می‌کند. این رویکرد موجب می‌شود تا زنجیره تأمین از اختلالات به‌سرعت عبور کرده و به‌موقع قادر به تأمین نیازها شود؛ به عبارت دیگر، با اجرای این دستورالعمل‌ها و آموزش‌های مؤثر، کارکنان در زنجیره تأمین انرژی می‌توانند به‌طور بهینه و کارآمد نیازها را تأمین کرده و بحران‌های ناگهانی را مدیریت کنند. درنتیجه، سرعت و کیفیت خدمات بهبود می‌یابد.

سیستم‌های اطفای حریق و حفاظت محیط‌زیستی، با رعایت اصول آمادگی، سازگاری، بازیابی و جذب و همچنین ارضای الگوهای توسعه زیرساخت‌های تاب‌آور، به افزایش تاب‌آوری

مخازن کمک می‌کنند. با پیاده‌سازی این راهکارها، توانایی زنجیره تأمین انرژی در مقابله با بحران‌ها از جمله تهدیدت انفجاری پاسخگویی به انتظارات محیط‌زیستی پاسخ می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در دنیای امروز، جوامع و زنجیره‌های تأمین با بحران‌های متعددی مواجه هستند که کارایی و پایداری آن‌ها را به خطر می‌اندازد. زنجیره تأمین انرژی یکی از ارکان مهم دنیای امروز است و مخازن مایع نقشی اساسی در پایداری و استمرار عملکرد آن ایفا می‌کنند. با توجه به گسترش تعاملات پیچیده در دنیای امروز و استفاده از جنگ به‌عنوان ابزاری در این مسیر، تهدیدات انفجاری به‌عنوان یک تهدید جدی برای مخازن مایع موجود در زنجیره تأمین انرژی شناسایی می‌شوند. در این مقاله، تلاش شده است نقشه راهی شامل راهکارهای مختلف جهت مصون‌سازی مخازن مایع در برابر تهدیدات انفجاری ارائه شود. برای دستیابی به این هدف، تحقیق آمیخته‌ای از روش‌های کمی و کیفی، مبتنی بر مطالعه اسناد کتابخانه‌ای و انجام پرسش‌نامه به روش دلفی فازی، صورت گرفته است.

نتایج نشان می‌دهد که توجه به الگوهای تاب‌آوری، از جمله: آموزش و توانمندسازی کارکنان، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و مراکز توزیع، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم، تکثیر زنجیره تأمین و پراکندگی مراکز توزیع، استفاده از روش‌های متنوع حمل‌ونقل، برنامه‌های پاسخ اضطراری و دستورالعمل‌ها، بر اساس اصول تاب‌آوری اعم از جذب، آمادگی، سازگاری و بازیابی، چهارچوبی علمی برای حرکت به سمت تاب‌آوری زنجیره تأمین انرژی با تأکید بر مخازن مایع ترسیم می‌کند. بر این اساس، راهکارهای پیشنهادی این تحقیق در این چهارچوب معرفی و تبیین شده‌اند.

راهکارهای پیشنهادی این تحقیق در سه قسمت دسته‌بندی‌شده‌اند: راهکارهای مقاوم‌سازی مکان استقرار مخازن، مقاوم‌سازی سازه مخازن و مقابله در صورت بروز تهدید و بازیابی. در زمینه مقاوم‌سازی مکان استقرار مخازن، راهکارهای زیر به ترتیب اولویت شناسایی‌شده‌اند: پراکنده‌سازی، فاصله‌گذاری، مکان‌یابی، حفاظت فیزیکی، امنیتی و ایمنی، استتار و اختفاء، موانع کاهش‌دهنده اثر انفجار و پیش‌بینی عایق‌های حرارتی و سردکننده‌ها. در مورد مقاوم‌سازی سازه مخازن، راهکارهای زیر به ترتیب اولویت شناسایی و اولویت‌بندی شده‌اند: سخت‌کننده‌های دیواره، دیوار محافظ، تیغه‌های میراگر و جداساز پایه. با وجود تمامی این اقدامات، درصورتی‌که مخازن مایع همچنان تحت تهدید و خسارت انفجار قرار گیرند، این تحقیق راهکارهای مدیریت بحران و دستورالعمل‌های از پیش تنظیم‌شده، هوشیاری و آموزش کارکنان، سیستم‌های اطفای حریق و حفاظت محیط زیستی را برای مقابله با بحران و بازیابی عملکرد مخازن پیشنهاد داده است. تعامل این راهکارها و اولویت‌بندی آن‌ها در تعامل با چهارچوب تاب‌آوری در جدول ۴ گزارش شده است.

علاوه بر موارد فوق، در این تحقیق تلاش شده است تا مدل‌سازی‌های ریاضی مختلف پدیده انفجار شناسایی و با توجه به تجربیات خبرگان اولویت‌بندی شوند تا ابزاری مناسب برای استفاده مهندسان از نقشه راه پیشنهادی معرفی گردد. نتایج نشان می‌دهد که روش لاگرانژی دلخواه اویلری (ALE) در تحلیل انفجارها دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. پس‌ازآن، روش‌های اویلری و هیدرودینامیک ذرات نرم (SPH) نیز قابلیت خوبی در شبیه‌سازی و تحلیل انفجارها از خود نشان داده‌اند. بااین‌حال، مدل لاگرانژی به تنهایی دقت کافی برای تحلیل‌های دقیق و تغییر شکل‌های بزرگ را ندارد.

تحقیق حاضر دید کلی به موضوع دارد و محدودیت‌هایی در خصوص مخازن در مقیاس پروژه دارد؛ بنابراین، لازم است مهندسان چشم‌انداز، اطلاعات و راهکارهای موجود درباره مخازن مایع را از این تحقیق احصاء کرده و آن‌ها را بر اساس پروژه‌های خود شخصی‌سازی کنند. با توجه به محدودیت‌های این تحقیق، انتظار می‌رود در آینده پژوهش‌هایی پیرامون موارد زیر انجام شود:

۱) تحقیقات جامع در خصوص بررسی و شناسایی مکان‌های راهبردی برای مخازن در کشور.
۲) بررسی کارایی راهکارهای پیشنهادی مقاوم‌سازی سازه مخازن برای انواع مخازن با سیالات، سازه‌ها و اشکال مختلف از نظر تحلیل دینامیکی تا دید دقیق‌تری نسبت به استفاده از آن‌ها ارائه گردد.
۳) مطالعات پیرامون ابزار و روش‌های الزامی کردن و دستورالعملی کردن این نقشه راه برای استفاده در سطح کشور.

جدول ۴. راهکارهای مقابله با تهدیدات انفجاری برای مخازن مایع به ترتیب اولویت هر بخش

بخش	اولویت	راهکار	اصول تاب‌آوری	الگو
مقاوم‌سازی مکان استقرار مخازن	۱	پراکنده‌سازی	آمادگی، سازگاری	تکثیر زنجیره تأمین و پراکندگی مراکز توزیع، افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و مراکز توزیع استراتژیک
	۲	فاصله‌گذاری	آمادگی، جذب، سازگاری	برنامه‌های پاسخ اضطراری و پروتکل‌ها

	۳	مکان‌یابی	آمادگی، بازیابی	استفاده از روش‌های متنوع حمل‌ونقل، تکثیر زنجیره تأمین و پراکندگی مراکز توزیع
	۴	حفاظت فیزیکی، امنیتی و ایمنی	آمادگی، سازگاری	آموزش و توانمندسازی کارکنان
	۵	استتار و اختفاء	آمادگی	سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم و فناوری‌های نوین
	۶	موانع کاهش‌دهنده اثر انفجار	جذب، آمادگی	سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم و فناوری‌های نوین
	۷	پیش‌بینی عایق‌های حرارتی و سردکننده‌ها	آمادگی، جذب، سازگاری	سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم و فناوری‌های نوین
مقاوم‌سازی سازه مخازن	۱	سخت‌کننده‌های دیواره	جذب، آمادگی، سازگاری	سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم و فناوری‌های نوین
	۲	دیوار محافظ	جذب، آمادگی	سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم و فناوری‌های نوین
	۳	تیغه‌های میراگر	جذب، آمادگی، سازگاری	سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم و فناوری‌های نوین
	۴	جداساز پایه	جذب، آمادگی، سازگاری	سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم و فناوری‌های نوین
مقابله در صورت بروز تهدید انفجاری	۱	مدیریت بحران و دستورالعمل‌های پیش تنظیم شده	آمادگی، بازیابی	آموزش و توانمندسازی کارکنان
	۲	هوشیاری و آموزش کارکنان	آمادگی، بازیابی	آموزش و توانمندسازی کارکنان
	۳	سیستم‌های اطفاء حریق و حفاظت محیط زیستی	آمادگی، بازیابی، سازگاری، جذب	سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم و فناوری‌های نوین

References

[1] Abedini, M., Zhang, C., Mehrmashhadi, J., & Akhlaghi, E. (2020). Comparison of ALE, LBE and pressure time history methods to evaluate extreme loading effects in RC column. *Structures*, 28, 456 466.

[2] Aghahosseini Ashkavandi, M., Rezaei Dolatabadi, H., & Nili Pourtabatabaei, S. A. (2016). The impact of human resource agility on crisis management: A case study of blood transfusion in Isfahan and three other disaster prone provinces in the country. *Crisis Management*, 5(10), 41 49. [In Persian]

[3] Baghbani, H. (2021). Strategic plan for fortifying the air bases of the armed forces of the Islamic Republic of Iran against electromagnetic threats (Published Doctoral Dissertation). *Supreme National Defense University*, Tehran, Iran. [In Persian]

[4] Bahadori, A. (2020). Waste management in the chemical and petroleum industries. John Wiley & Sons Ltd.

[5] Balaraju, B., & Manchalwar, A. (2021). Performance of elevated water tank staging with base isolation under blast loading. *E3S Web of Conferences*, 309, 01134.

[6] 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.

[7] Bohara, R. P., Linforth, S., Nguyen, T., Ghazlan, A., & Ngo, T. (2023). Anti blast and impact performances of auxetic structures: A review of structures, materials, methods, and fabrications. *Engineering Structures*, 276, 115377.

[8] Chen, C., Reniers, G., Yang, M. (2022). Safety and Security of Domino Effects in the Process Industry: The State of the Art. In: Integrating Safety and Security Management to Protect Chemical Industrial Areas from Domino Effects. Springer Series in Reliability Engineering. *Springer*, Cham, (pp. 1 48).

[9] Dadkhah, H., & Mohebbi, M. (2023). Effect of stand off distance on blast fragility of steel moment resisting buildings. *Structures,* 51, 1694 1705.

[10] Ding, L., Khan, F., Guo, X., & Ji, J. (2021). A novel approach to reduce fire induced domino effect risk by leveraging loading/unloading demands in chemical industrial parks. Process Safety and Environmental Protection, 146, 610 619.

[11] Ding, Y., Li, B., Lu, Y., Yang, M., Zhang, J., Li, Q., & Liu, K. (2024). Study on tank damage and response of adjacent tanks in full time domain of detonation. Heliyon, 10(4), e24147.

[12] Edwards, J. (2023). *The role of employee engagement in crisis management*. Preparis.

[13] Farahmandpey, S., Broumand, P., Mehrab Amiri, S., & Reza Shekari, M. (2023). On the nonlinear dynamic analysis of annular baffled steel containers isolated by bearings. *Structures*, 56, 105012.

[14] Federal Emergency Management Agency. (2003). *Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings (FEMA 426)*. U.S. Department of Homeland Security.

[15] Ge, Q., & Weng, D. (2013). *Performance assessment of conventional and base isolated extra large LNG storage tank for blast loadings* (MCEER 13 0010). Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo.

[16] Gedikli, A., & Ergüven, M. E. (1999). Seismic analysis of a liquid storage tank with a baffle. *Journal of Sound and Vibration*, 223(1), 141 155.

[17] Ghasemi, A. M., & Nourai, F. (2017). A framework for minimizing domino effect through optimum spacing of storage tanks to serve in land use planning risk assessments. *Safety Science*, 97, 20 26.

[18] Hosseini, S. E. A., & Beskhyroun, S. (2023). Fluid storage tanks: A review on dynamic behaviour modelling, seismic energy dissipating devices, structural control, and structural health monitoring techniques. *Structures*, 49, 537 556.

[19] Hung, C. W., Tsai, Y. K., Chien, L. K., & Pi, S. J. (2024). Numerical study of a near field explosion using arbitrary Lagrangian–Eulerian mapping technique. *International Journal of Protective Structures*, 15(2), 316 336.

[20] Isaac, O. S., Alshammari, O. G., Pickering, E. G., Clarke, S. D., & Rigby, S. E. (2023). Blast wave interaction with structures – An overview. *International Journal of Protective Structures*, 14(4), 584 630.

[21] Jindra, D., Hradil, P., & Kala, J. (2024). Finite element analysis of concrete *slab exposed to high velocity pressure wave – simplified vs.* smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. *MATEC Web Conf.*, 396, 05005.

[22] Jing, W., Feng, J., Cheng, X., & Yang, W. (2024). Seismic Response Reduction of Liquid Storage Tank Using a Passive System Based on Improved Tuned Mass Damper. *International Journal of Structural Stability & Dynamics*, 24(2).

[23] Kangda, M. Z., & Bakre, S. (2018). The effect of LRB parameters on structural responses for blast and seismic loads. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(4), 1761 1776.

[24] Katsaliaki, K., Galetsi, P., & Kumar, S. (2022). Supply chain disruptions and resilience: A major review and future research agenda. *Annals of Operations Research*, 319(1), 965 1002.

[25] Keshavarz Mirza Mohammadi, P., Khalilpour, S. H., & Sareh, P. (2023a). Simulating the response of buried structures to external blast loads: Methods, challenges, and advances. *Engineering Reports*, 5(6), e12607.

[26] Keshavarz MirzaMohammadi, P., Khalilpour, S. H., & Sareh, P. (2023b). Multi layer configurations of modular protective walls for enhancing the shielding performance of blast shelters. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1 14.
[27] Keshavarz Ghorabaee, M. (2021). Assessment of distribution center locations using a multi expert subjective–objective decision making approach. *Scientific Reports*, 11(1), 19461.
[28] Kong, D. (2021). Chapter eleven Uncertainty in domino effects analysis. In F. Khan, V. Cozzani, & G. Reniers (Eds.), *Methods in Chemical Process Safety* (Vol. 5, pp. 365 394).
[29] Latifi, S., Rahali, H., Yadavari, H., Saadi, H., & Shahrestani, S. A. (2018). Identification and explanation of the implementation stages of protective agriculture development in Iran with a fuzzy Delphi approach. *Iranian Journal of Biosys*tems *Engineering (Iranian Agricultural Sciences)*, 49(1), 107 120. [In Persian]
[30] Liu Lastres, B., Wen, H., & Okumus, F. (2023). Examining employees' affective and behavioral responses to internal crisis communication in times of COVID 19. *International Journal of Hospitality Management*, 111, 103494.
[31] Lu, S., Wang, W., Chen, W., Ma, J., Shi, Y., & Xu, C. (2019). Behaviors of thin walled *cylindrical shell* storage tank under blast impacts. *Shock and Vibration*, 2019(1), 6515462.
[32] Ministry of Energy. (2016). *Standards and criteria for the design and calculation of underground water tanks* (Publication No. 123). Tehran, Iran. [In Persian]
[33] Mittal, V., Chakraborty, T., & Matsagar, V. (2014). Dynamic analysis of liquid storage tank under blast using coupled Euler–Lagrange formulation. *Thin Walled Structures*, 84, 91 111.
[34] Naz, F., Kumar, A., Majumdar, A., & Agrawal, R. (2022). Is artificial intelligence an enabler of supply chain resiliency post COVID 19? An exploratory state of the art review for future research. *Operations Management Research*, 15(1 2), 378 398.
[35] Noroozinejad Farsangi, E., Takewaki, I., Yang, T. Y., Astaneh Asl, A., & Gardoni, P. (Eds.). (2019). *Resilient structures and infrastructure*. Springer Singapore.
[36] Onal, S., Zhu, W., & Das, S. (2023). Order picking heuristics for online order fulfillment warehouses with explosive storage. *International Journal of Production Economics*, 256, 108747.
[37] Ortega Bastida, M. E., Caro, F., Olhager, J., & Thurer, M. (2023). A systematic review of resilience definitions, dimensions and approaches in OM and SC research. *International Journal of Production Research*, 61(5), 1473 1489.
[38] Padmanabhi, R., Richmond, M., Naran, B., Bagnera, E., & Stout, S. (2022). *Tracking investments in climate resilient infrastructure: Building resilience against floods and droughts*. Climate Policy Initiative.
[39] Pal, R., Torstensson, H., & Mattila, H. (2014). Antecedents of organizational resilience in economic crises: An empirical study of Swedish textile and clothing SMEs. *International Journal of Production Economics,* 147, 410 428.
[40] Parhizkar, T., Ahmadi, R., & Badsar, S. A. (2018). Analysis of effective factors in the development of protective agriculture (Case Study: Mazandaran Province). *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 48(1), 171 181. https
[41] Penadés, M. C., Núñez, A. G., & Canós, J. H. (2017). From planning to resilience: The role (and value) of the emergency plan. *Technological Forecasting and Social Change*, 121, 17 30.
[42] Qin, H., Liu, Y. L., Tian, Z. L., Liu, W. T., & Wang, S. P. (2024). Numerical investigation of the underwater explosion of a cylindrical explosive with the Eulerian finite element method. *Physics of Fluids*, 36(1).
[43] Ren, Y., Xue, M. A., & Lin, P. (2023). Experimental study of sloshing characteristics in a rectangular tank with elastic baffles. *Journal of Fluids and Structures*, 122, 103984.
[44] Sahoo, S. S., Swain, A. K., & Sawant, V. A. (2024*).* Dynamic response of steel with aluminum foam based sandwich panels under blast loading. *In book Dynamic Behavior of Soft and Hard Materials*, Volume 2. Singapore.
[45] Sambucci, M., Savoni, F., & Valente, M. (2023). Aerogel Technology for Thermal Insulation of Cryogenic Tanks—Numerical Analysis for Comparison with Traditional Insulating Materials. *Gels*, 9(4), 307.
[46] Savrukoğlu, İ., & Aslantas, K. (2023). Investigation of numerical methods SPH, ALE, coupled MM ALE with LBE, and CONWEP empirical method for simulation of the spherical free air blast loading using LS Dyna. *Journal of Materials and Mechatronics*: A, 4(1), 64 86.
[47] Sharari, N., Fatahi, B., Hokmabadi, A., & Xu, R. (2022). Seismic resilience of extra large LNG tank built on liquefiable soil deposit capturing soil pile structure interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(7), 3385 3441.
[48] Shirbhate, P. A., & Goel, M. D. (2021). A critical review of blast wave parameters and approaches for blast load mitigation. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(3), 1713 1730.
[49] Sullivan, K., Pezzola, G., Hoemann, J., & Mahmoud, H. (2024). Small scale airblast testing for the assessment of multiple perimeter wall barriers on shock wave propagation. *Process Safety and Environmental Protection*, 186, 1076 1086.

[50] Tang, Y., Liu, A., Zhao, C., Ren, P., & Guo, Z. (2023). Effect of baffles on hydrodynamic ram and damage of storage tank under fragment impact. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95(2), 332 344.
[51] TM 5 1300. (1990). *Structures to resist the effects of accidental explosions*. US Army Corps of Engineers.
[52] *Tolani*, S., Bharti, S. D., Shrimali, M. K., & Vern, S. (2022). *Performance of base isolated RC building under surface blast loading*. In Resilient Infrastructure. Singapore.
[53] Toplu, E., & Kırtel, O. (2023). Performance of base isolated RC school building under blast loading. *Applied Sciences*, 13(9), 5529.
[54] Tortorella, G. L., Prashar, A., Antony, J., Fogliatto, F. S., Gonzalez, V., & Godinho Filho, M. (2023). Industry 4.0 adoption for healthcare supply chain performance during COVID 19 pandemic in Brazil and India: The mediating role of resilience abilities development. *Operations Management Research*, 17(2), 389 405.
[55] Trávníček, P., Kotek, L., Junga, P., Koutný, T., Novotná, J., & Vítěz, T. (2019). Prevention of accidents to storage tanks for liquid products used in agriculture. *Process Safety and Environmental Protection*, 128, 193 202.
[56] U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2020). USACE guide to resilience practices. U.S. Army Corps of Engineers: Washington, D.C.
[57] U.S. Headquarters Department of the Army. (2022). Petroleum supply operations (Army Techniques Publication No. 4 43). *Washington*, DC.
[58] Villar, A., Paladini, S., & Buckley, O. (2023). Towards supply chain 5.0: Redesigning supply chains as resilient, sustainable, and human centric systems in a post pandemic world. *Operations Research Forum*, 4(3), 60.
[59] Wamba, S. F., & Queiroz, M. M. (2022). A framework based on blockchain, artificial intelligence, and big data analytics to leverage supply chain resilience considering the COVID 19. *IFAC PapersOnLine*, 55(10), 2396 2401.
[60] Wang, Z., Hu, K., & Zhao, Y. (2022). Doom roof steel tanks under external explosion: Dynamic responses and anti explosion measures. *Journal of Constructional Steel Research*, 190, 107118.
[61] Wang, Z. H., Jiang, S. C., Bai, W., & Li, J. X. (2023). Liquid sloshing in a baffled rectangular tank under irregular excitations. *Ocean Engineering*, 278, 114472.
[62] Ying ,L, Dakun ,L , Y. Liu, Y, Shou. (2023). Digitalization for supply chain resilience and robustness: The roles of collaboration and formal contracts. *Frontiers of Engineering Management*, 10(1), 5 19.
[63] Yu, Z., Li, Z., & Ma, L. (2023). Strategies for the Resilience of Power Coal Supply Chains in Low Carbon Energy Transition: A System Dynamics Model and Scenario Analysis of China up to 2060. *Sustainability*, 15(9), 7154.
[64] Zakrisson, B., Wikman, B., & Häggblad, H. Å. (2011). Numerical simulations of blast loads and structural deformation from near field explosions in air. *International Journal of Impact Engineering*, 38(7), 597 612.
[65] Zhang, H., Song, C., Wang, M., & Zhong, J. (2023). On the dynamic response of rectangular liquid storage structure subjected to blast induced ground shock. *Engineering Structures*, 285, 116071.
[66] Zhang, N., Klippel, H., Afrasiabi, M., Röthlin, M., Kuffa, M., Bambach, M., & Wegener, K. (2023). Hybrid SPH FEM solver for metal cutting simulations on the GPU including thermal contact modeling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 41, 311 327.
[67] Zhou, X. Q., & Hao, H. (2008). Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. *International Journal of Impact Engineering*, 35(5), 363 375.
[68] Zighami, A. (2021, September 25). *Untold stories of the oil war during the eight year Sacred Defense.* *Shana News Agency*. [In Persian]