Journal of Behdasht dar Arseh (i.e., Health in the Field)
Journal homepage: https://journals.sbmu.ac.ir/jhf
Vol.14, No.1, Spring 2026

Risk and consequence analysis of fire and explosion accidents in gasoline storage tanks with emphasis on domino effects in an oil facility in Tehran Province

Mahsa Rezaei[1, 2], Reza Gholamnia[1, 2], Reza Saeedi[1, 2]*

[1] Workplace Health Promotion Research Center, Research Institute for Health Sciences and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.
[2] Department of Health, Safety and Environment, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Abstract

Background and Aims: Gasoline storage tanks are among the major potential sources of fire and explosion incidents in oil facilities. This study aimed to assess the risks and consequences of fire and explosion incidents involving gasoline storage tanks and to analyze the associated domino effects at an oil facility in Tehran Province, Iran.

Materials and Methods: Leakage scenarios involving 20-mm and 150-mm openings, as well as catastrophic tank rupture, were defined. Consequence modeling was performed using PHAST software, while quantitative individual and societal risk assessments were conducted using SAFETI software. Probit model was used to analyze domino effects. All ethical requirements were observed, and the necessary approvals were obtained.

Results: PHAST modeling showed that, under the catastrophic rupture scenario, thermal radiation intensity reached 37.5 kW/m^2 and explosion overpressure reached 17 bar at a distance of 23 m from the explosion center. This overpressure represented the maximum value at the nearest evaluated distance and decreased rapidly with increasing distance, reaching 2 bar and 0.07 bar at 34 m and 120 m, respectively. The thermal radiation impact radius extended to 487 m, while the explosion overpressure extended to 363 m. The safe distances for the 20-mm leak, 150-mm leak, and catastrophic rupture scenarios were estimated at 72, 384, and 487 m, respectively. Societal risk analysis indicated that the risk was within the acceptable region for 1–6 fatalities and within the tolerable region for 7–10 fatalities. Domino-effect calculations indicated a 100% probability of failure for tanks located closest to the accident source when exposed to thermal radiation of 37.5 kW/m^2 for 2.5 min and an explosion overpressure of 17 bar at a distance of 23 m.

Conclusion: The findings indicate that effective risk management of gasoline storage tanks requires leakage prevention and control, limitation of fire propagation, and implementation of emergency response scenarios.

Keywords: Domino effect; risk assessment; oil facilities; consequence modeling; fuel storage tank.

Please cite this article as: Rezaei M, Gholamnia R, Saeedi R. Risk and consequence analysis of fire and explosion accidents in gasoline storage tanks with emphasis on domino effects in an oil facility in Tehran province. Journal of Behdasht dar Arseh 2026; 14(1):56-67. https://doi.org/10.22037/jhf.v14i1.51468

Corresponding Author: Workplace Health Promotion Research Center, Research Institute for Health Sciences and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Corresponding Author: Workplace Health Promotion Research Center, Research Institute for Health Sciences and Environment, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Email: r.saeedi@sbmu.ac.ir

Received: 13 January 2026
Accepted: 27 August 2026

فصلنامه علمی-پژوهشی
بهداشت در عرصه
دوره ۱۴ شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، صفحات ۵۶ تا ۶۷
Journal homepage: https://journals.sbmu.ac.ir/jhf

تحلیل ریسک و پیامدهای ناشی از حوادث اشتعال و انفجار مخازن بنزین با تأکید بر اثر دومینویی در یکی از تأسیسات نفتی استان تهران

مهسا رضائی[۱،۲]، رضا غلام‌نیا[۱،۲]، رضا سعیدی[۱،۲*]

[۱] مرکز تحقیقات ارتقاء سلامت محیط کار، پژوهشکده علوم بهداشتی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.
[۲] گروه سلامت، ایمنی و محیط زیست، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

مقاله پژوهشی

چکیده

زمینه و اهداف: مخازن ذخیره بنزین از مهمترین منابع بالقوه حوادث اشتعال و انفجار در تأسیسات نفتی هستند. هدف از این پژوهش، ارزیابی ریسک و پیامدهای ناشی از حوادث اشتعال و انفجار مخازن بنزین و تحلیل اثر دومینوی آن در یکی از تأسیسات نفتی در استان تهران است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، سناریوهای نشتی و گسست دیواره مخازن بنزین (نشت با قطر روزنه ۲۰ mm و ۱۵۰ و گسست فاجعه‌بار) تعریف گردید. مدلسازی پیامدها با استفاده از نرم‌افزار PHAST و ارزیابی کمی ریسک فردی و جمعی با استفاده از نرم‌افزار SAFETI انجام گردید. به منظور تحلیل اثرات دومینویی، از مدل‌های پروبیت استفاده شد. در طی انجام این مطالعه کلیه موازین اخلاقی رعایت و مجوزهای مربوطه دریافت گردید.

یافته‌ها: مدلسازی با نرم‌افزار PHAST نشان داد که در سناریوی گسست فاجعه‌بار، در شعاع ۲۳ m شدت تشعشع حرارتی تا ۳۷/۵ kw/m^2 و فشار انفجار تا ۱۷ bar می‌رسید (این مقدار مربوط به بیشینه فشار اضافه ناشی از سناریوی شکست فاجعه‌آمیز در نزدیک‌ترین فاصله بررسی شده (۲۳ متر از مرکز انفجار) بوده و نشان‌دهنده مقدار موضعی فشار در ناحیه نزدیک به منبع حادثه است و با افزایش فاصله، مقدار فشار مازاد (overpressure) به سرعت کاهش می‌یابد، به طوری‌که در فواصل ۳۴ m و ۱۲۰ به ترتیب به ۲ bar و ۰/۰۷، کاهش یافته است). و شعاع تأثیر تشعشع حرارتی تا ۴۸۷ m و انتشار فشار انفجار تا ۳۶۳ m گسترش می‌یافت. فواصل ایمن برای سناریوهای نشتی ۲۰mm و ۱۵۰ و گسست فاجعه بار به‌ترتیب ۷۲ m، ۳۸۴ و ۴۸۷ تعیین شد. طبق تحلیل ریسک جمعی در بازه ۱تا۶ نفر تلفات، ریسک در محدوده قابل قبول و برای تلفات ۷ تا ۱۰ نفر، در ناحیه قابل تحمل قرار داشت. محاسبات اثر دومینویی نشان داد که مخازن نزدیک به منبع حادثه به دلیل دریافت تشعشع ۳۷/۵ kw/m^2 به مدت ۲/۵ min و فشار انفجار ۱۷ bar در شعاع ۲۳ متری، احتمال شکست ۱۰۰ درصدی داشتند.

نتیجه‌گیری: نتایج مطالعه نشان داد که مدیریت ریسک مخازن بنزین مستلزم کنترل نشتی، محدودسازی گسترش حریق و اجرای سناریوهای واکنش اضطراری است.

کلید واژه‌ها: دومینو، اشتعال؛ ارزیابی ریسک؛ انفجار؛ تأسیسات نفت؛ رویداد؛ مدلسازی پیامد؛ مخزن ذخیره سوخت.

Please cite this article as: Rezaei M, Gholamnia R, Saeedi R. Risk and consequence analysis of fire and explosion accidents in gasoline storage tanks with emphasis on domino effects in an oil facility in Tehran province. Journal of Behdasht dar Arseh 2026; 14(1):56-67. https://doi.org/10.22037/jhf.v14i1.51468

***نویسنده مسئول:** مرکز تحقیقات ارتقاء سلامت محیط کار، پژوهشکده علوم بهداشتی و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.
Email: r.saeedi@sbmu.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۵

مقدمه

صنعت نفت به عنوان یکی از ارکان اساسی توسعه اقتصادی شناخته می‌شود و فعالیت‌های مرتبط با آن می‌تواند با خطراتی همچون آتش‌سوزی، انفجار و مواجهه با مواد سمی همراه باشد. ذخیره‌سازی غیراصولی، حمل‌ونقل نامناسب و استفاده نادرست از مواد شیمیایی می‌تواند منجر به بروز طیفی از حوادث، از آتش‌سوزی‌های جزئی تا پیامدهای گسترده انسانی و اقتصادی شود. به منظور کاهش وقوع حوادث در صنایع، شناسایی پیامدها و احتمال وقوع آن‌ها، همچنین مدل‌سازی و تعیین گستره آسیب‌پذیری و محدوده ایمن مرتبط با هر یک از پیامدهای حوادث، ضروری است [۱]. حوادث فرایندی به عنوان یکی از عوامل اصلی خسارات اقتصادی و انسانی قابل‌توجه در صنایع شناخته می‌شوند [۲]. امروزه، برخورداری از صنایع ایمن، امری ضروری است. علاوه بر این، مجاورت واحدهای صنعتی با مراکز جمعیتی می‌تواند آثار اقتصادی و اجتماعی ناشی از حوادث را افزایش دهد [۳]. پیشگیری از ریسک‌های ناشی از فناوری‌های صنعتی مستلزم آن است که سایت‌های صنعتی، پیامدهای سناریوهای مختلف حادثه را بر اساس ارزیابی ریسک پیش‌بینی و برآورد کنند [۴]. به منظور پیش‌بینی پیامدهای ناشی از انفجار و اشتعال بنزین موجود در مخازن و به‌کارگیری روش‌های پیشگیری و کنترل مهندسی، ابتدا سناریوهای احتمالی حوادث در صنایع فرایندی شناسایی می‌شوند. سپس، این سناریوها با استفاده از سامانه‌های موجود، شبیه‌سازی شده و در نهایت، پیامدهای حاصل و تأثیرات آن‌ها بر افراد، تجهیزات و اموال تعیین می‌شوند [۵]. ارزیابی پیامد و بررسی ریسک ناشی از رهایش مواد خطرناک می‌تواند زنجیره‌ای از رویدادها و پیامدها را از زمان وقوع نخستین نشت مواد تا بروز آثار قابل‌اشتعال و سمی بر جمعیت انسانی مدل‌سازی کند [۶]. عدم توانایی در کنترل مسائل پیچیده فعالیت‌های کارخانه‌های شیمیایی می‌تواند منجر به بروز خطرات جدی شود. این خطرات باید تا سطح قابل‌قبولی کاهش یابند تا امکان پیشگیری یا کنترل آن‌ها فراهم شود. ارزیابی ریسک کمی به عنوان روشی هدفمند و مؤثر برای مواجهه با پیچیدگی سیستم‌ها و دستیابی به نتایج دقیق‌تر در ارزیابی ریسک تأسیسات صنعتی پیشنهاد شده است. ارزیابی ریسک یکی از مهم‌ترین اقدامات هر سازمان برای بهبود ایمنی و اجرای اقدامات پیشگیرانه است [۷]. مسائل ایمنی باید شناسایی شوند تا از بروز حوادث احتمالی جلوگیری شود یا شدت آن‌ها کاهش یابد. ارزیابی ریسک ناشی از انتشار مواد، یکی از اقدامات مهم در فرایندهای صنعتی برای افزایش سطح ایمنی است [۸]. علاوه بر خطرات ایمنی، رهایش ترکیبات شیمیایی و قرار گرفتن افراد در معرض آن‌ها می‌تواند پیامدهای سرطان‌زا و مشکلات بهداشتی متعددی برای جامعه ایجاد کند. از جمله این پیامدها می‌توان به ابتلا به انواع سرطان‌ها و تأثیرات نامطلوب بر سیستم عصبی مرکزی و محیطی، خون، دستگاه تنفسی، کلیه، کبد و دستگاه گوارش اشاره کرد [۹]. حوادث زنجیره‌ای ناشی از مواد شیمیایی خطرناک می‌توانند تحت تأثیر اثر دومینویی قرار گیرند و به موقعیت‌های پیچیده‌ای منجر شوند که شامل آتش‌سوزی، انفجار یا رهایش مواد سمی هستند [۱۰]. در سال‌های اخیر مطالعات متعددی به ارزیابی پیامدهای ناشی از نشت، اشتعال و انفجار مخازن فرآورده‌های نفتی پرداخته‌اند. در بخش قابل توجهی از این پژوهش‌ها، نرم‌افزار PHAST برای مدل‌سازی پخش، ایجاد ابر قابل اشتعال و برآورد پیامدهای اولیه انفجار و آتش‌سوزی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین در برخی مطالعات، مدل‌های ارزیابی ریسک نظیر SAFETI برای محاسبه ریسک فردی و جمعی در محیط‌های صنعتی به کار گرفته شده است. ندین مطالعه با هدف ارزیابی ریسک کمی (QRA) و مدل‌سازی پیامدهای ناشی از نشت گاز در خطوط لوله گاز انجام شده است. از جمله این مطالعات، می‌توان به پژوهش عباسی و همکاران اشاره کرد که در آن، ریسک کمی ایستگاه‌های CNG با استفاده از شبکه بیزی فازی، نمودار Bow-tie و مدل‌سازی پیامدها ارزیابی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مقدار ریسک جمعی بر اساس روش شبکه بیزی برابر 10^{-3} و براساس روش Bow-tie، برابر 10^{-5} بود و در روش شبکه بیزی، مقدار ریسک از حد قابل قبول استاندارد فراتر رفت [۱۱]. از جمله این مطالعات می‌توان به پژوهش طاهری و همکاران در زمینه ارزیابی ریسک کمی (QRA) و تعیین محدوده‌های ایمنی مرتبط با یک مخزن تحت فشار با استفاده از نرم‌افزار PHAST اشاره کرد که در آن، بیشترین محدوده خطر در سناریوی نشت ۵۰ میلی‌متری، ۶۹۵ متر در فشار r ۰/۰۵ و در سناریوی نشت ۲۰ میلی‌متری، ۱۸۱ متر در فشار ۰/۲ بار گزارش شد [۱۲]. همچنین، Wang و همکاران با به‌کارگیری مدل اصلاح‌شده VCE در ارزیابی انفجار ناشی از نشت خطوط لوله گاز طبیعی پرفشار نشان دادند که مدل اصلاح‌شده VCE، شعاع نواحی آسیب (خفیف، شدید و مرگ) را به حدود ۲۹ درصد مقدار حاصل از مدل اولیه کاهش داده و دقت پیش‌بینی را نسبت به داده‌های تجربی افزایش می‌دهد [۱۳]. Kim و همکاران نیز در مطالعه‌ای با هدف ارزیابی ریسک کمی (QRA) برای ترکیب هیدروژن در خطوط انتقال گاز طبیعی، برد خطر آتش جت هیدروژن را حدود ۳۵۰ متر و برای گاز طبیعی بیش از ۶۰۰ متر گزارش کردند [۱۴].

بررسی پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که اکثر مطالعات، تنها یکی از این دو جنبه، یعنی ارزیابی ریسک یا مدل‌سازی پیامد، را دنبال کرده‌اند و ترکیب ارزیابی ریسک و مدل‌سازی پیامد با استفاده هم‌زمان از PHAST و SAFETI در یک چارچوب یکپارچه، کمتر مورد توجه قرار گرفته است؛ در حالی که ماهیت پیچیده حوادث مخازن بنزین، به ویژه در پالایشگاه‌های واقعی، نیازمند اتصال مستقیم مدل پیامد و ارزیابی

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

ریسک است تا تخمین‌ها به شرایط واقعی نزدیک‌تر شوند. علاوه بر این، اگرچه در برخی مطالعات به اثر دومینویی مخازن پرداخته شده است، اغلب این پژوهش‌ها یا صرفاً جنبه توصیفی داشته‌اند یا تنها یک سناریوی محدود را بررسی کرده‌اند . همچنین، محور اصلی این مطالعات، خطوط لوله گاز و ایستگاه‌های CNG بوده و مخازن ذخیره بنزین در محیط پالایشگاهی واقعی، آن‌هم با رویکرد ترکیبی PHAST-SAFETI، کمتر بررسی شده‌اند [۱۵]. از سوی دیگر، در مواردی که به اثر دومینو نیز پرداخته شده است، این تحلیل غالباً یا جنبه توصیفی داشته یا به یک سناریوی محدود اکتفا کرده و بدون تغذیه مستقیم خروجی واقعی PHAST به SAFETI انجام شده است. بنابراین، بررسی و اتصال مستقیم خروجی واقعی PHAST به مدل ریسک SAFETI، به ویژه در مخازن ذخیره مشتقات نفت، از خلأهای پژوهشی موجود به شمار می‌رود [۱۶].

با توجه به این خلأها و شکاف‌های پژوهشی، هدف این مطالعه ارائه رویکردی یکپارچه بود که در آن خروجی‌های شبیه‌سازی PHAST به طور مستقیم به مدل ریسک SAFETI تغذیه شوند تا تحلیل ریسک و پیامدهای ناشی از حوادث اشتعال و انفجار مخازن بنزین، با تأکید بر تحلیل کمی و چندسناریویی اثر دومینو، در یکی از تأسیسات نفتی استان تهران انجام گیرد. لذا، هدف این مطالعه، تحلیل ریسک و پیامدهای ناشی از حوادث اشتعال و انفجار مخازن بنزین با تأکید بر اثر دومینویی در یکی از تأسیسات نفتی استان تهران بود. در این پژوهش، یک رویکرد یکپارچه بر پایه ترکیب خروجی‌های PHAST و SAFETI و انجام تحلیل کمی و واقعی اثر دومینویی بر مبنای سناریوهای شبیه‌سازی‌شده در تأسیسات موردنظر ارائه شد.

مواد و روش‌ها

محیط انجام مطالعه

محیط انجام مطالعه، یک تانک‌فارم مجهز به دو مخزن بنزین در یکی از تأسیسات نفتی استان تهران بود. چیدمان و نقشه جانمایی مخازن در تأسیسات نفتی مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، در مجموع ۶ مخزن در این تأسیسات وجود داشت که در فواصل منظم ۲۳ و ۳۴ متر از یکدیگر قرار گرفته بودند. مخازن مورد مطالعه در مجاورت واحدهای فرایندی، خطوط انتقال سوخت و تأسیسات جانبی پالایشگاه، از جمله پمپ‌خانه و مسیرهای تردد عملیاتی، قرار داشتند. این مخازن به دلیل حجم بالای بنزین ذخیره‌شده، نزدیکی به سایر تجهیزات حساس و پتانسیل ایجاد پیامدهای شدید ناشی از اشتعال، انفجار و اثر دومینویی، به عنوان مخازن مورد مطالعه برای ارزیابی ریسک و تحلیل پیامد انتخاب شدند.

مدلسازی پیامد و تعیین سناریوها

برای مدل‌سازی پیامد از نرم‌افزار PHAST نسخه ۸/۲ استفاده شد. در این پژوهش، بنزین به عنوان ماده اصلی در حوادث اشتعال و انفجار در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه مخازن از نوع اتمسفریک بودند، گزینه مخزن ذخیره اتمسفریک به‌عنوان تجهیز اصلی انتخاب و روی نقشه اصلی جانمایی شد. اطلاعات ماده، شامل نوع، موجودی، شرایط ویژه عملیاتی و فاز ماده، وارد برنامه شد. سپس، سناریوهای موردنظر که شامل نشت در لوله ورودی به مخازن بودند، انتخاب شدند. از آنجا که خروج ماده از روزنه دارای دبی متغیر بوده و بر پارامترهایی مانند فشار و دمای کل محتویات مخزن تأثیرگذار بود، این نشتی متغیر با زمان در نظر گرفته شد و نوع تجهیز نیز «لوله کوتاه» تعیین شد.

پس از انجام تنظیمات، مدل‌ها شامل شرایط آب‌وهوایی (جو پایدار و ناپایدار) و تعیین سرعت باد (سرعت باد ۱/۵ و ۵m/s)، تنظیم محدوده میزان غلظت بخار منتشرشده، نمایش نوع پیامدها و ورود سایر اطلاعات، نظیر قطر داخلی مخزن، تکمیل شدند. در این مرحله، نیاز به تعیین اندازه دقیق روزنه ایجادشده بود. انتخاب قطرهای نشتی ۲۰ و ۱۵۰mm بر اساس الزامات استاندارد GS EP SAF Total۲۵۳ انجام شد. این استاندارد، قطرهای ۲۰ و ۱۵۰mm را به ترتیب به عنوان حداقل و حداکثر قطر نشتی برای تحلیل پیامد معرفی می‌کند. ازاین‌رو، این دو سناریو به‌منظور بررسی پیامدهای نشت در شرایط با شدت کم و زیاد و با هدف پوشش سناریوهای نشت با شدت‌های مختلف، از نشت‌های کوچک تا نشت‌های بزرگ، در تحلیل به‌کار گرفته شدند و برای انجام ارزیابی جامع‌تر ریسک در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند.

در مرحله بعد، مدل‌سازی پیامد که خود از چند بخش تشکیل شده است، انجام گرفت و با مدل‌سازی تخلیه آغاز شد، سپس مدل‌سازی انتشار و در نهایت مدل‌سازی پیامد انجام شد. شایان ذکر است دو حالت نماینده از شرایط جوی با هدف پوشش دامنه تغییرات و بررسی اثر آن بر عدم قطعیت نتایج انتخاب شد. شرایط 5D به‌عنوان وضعیت با اختلاط بیشتر و پراکندگی سریع‌تر بخارات و شرایط 1/5F به‌عنوان حالت پایدار جوی و سناریوی محافظه‌کارانه (بدترین حالت از نظر ماندگاری ابر بخار) در مدل‌سازی لحاظ شدند. انتخاب این دو شرایط، امکان ارزیابی حساسیت نتایج پیامد نسبت به تغییرات شرایط جوی را فراهم کرد.

به منظور بررسی اثر تغییرات پارامترهای مؤثر بر نتایج، شبیه‌سازی‌ها تحت شرایط جوی مختلف و با سرعت‌های باد متفاوت انجام شد و احتمال شکست مخازن نیز در سطوح مختلف اضافه‌فشار و تابش حرارتی محاسبه شد. این رویکرد، امکان ارزیابی تغییرپذیری نتایج و کاهش اثر عدم قطعیت ناشی از شرایط عملیاتی را فراهم کرد.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

همچنین برای بررسی حساسیت مدل، اثر تغییر پارامترهای کلیدی، شامل سرعت باد، قطر نشتی، سطوح اضافه‌فشار و تابش حرارتی، بر نتایج ارزیابی شد. نتایج نشان داد که تغییر این پارامترها موجب تغییر در محدوده پیامدها و احتمال شکست مخازن می‌شود که بیانگر حساسیت نتایج به شرایط عملیاتی و محیطی است.

مدل‌سازی این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار معتبر انجام شد که مدل‌های محاسباتی آن بر اساس روابط و مدل‌های پذیرفته شده در حوزه تحلیل پیامد توسعه یافته‌اند. با این حال، اعتبارسنجی مستقل نتایج با داده‌های میدانی یا آزمایشگاهی به دلیل محدودیت دسترسی به چنین داده‌هایی در این پژوهش انجام نشد و این موضوع به عنوان یکی از محدودیت‌های مطالعه در نظر گرفته می‌شود.

تعیین مشخصات فنی مخازن و شرایط محیطی

داده‌های اولیه شامل مشخصات فنی مخازن (مانند قطر، ارتفاع و حجم)، مشخصات فنی لوله‌های ورودی به مخازن (قطر و طول لوله)، شرایط عملیاتی (دما و فشار) و داده‌های محیطی (مانند دمای محیط، فشار هوا، سرعت و جهت باد) جمع‌آوری شد. همچنین، محدوده پروژه و تانک‌فارم (محوطه مخازن) به طور دقیق تعیین شد. این داده‌ها از طریق سنسورها و تجهیزات اندازه‌گیری، نقشه‌های ماهواره‌ای، بررسی اسناد موجود و اخذ نظر کارشناسان فنی و بهره‌برداری سایت جمع‌آوری و پس از بررسی و تأیید، به عنوان ورودی مدل استفاده شد تا در مراحل بعدی برای شبیه‌سازی حوادث احتمالی به‌کار گرفته شود. سپس، با استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری دقیق، ابعاد فیزیکی مخازن، شامل ارتفاع و قطر، تعیین شد و حجم دقیق آن‌ها محاسبه گردید. میزان بنزین ذخیره‌شده در هر مخزن نیز تعیین شد. این اطلاعات برای ارزیابی شدت پیامدهای احتمالی انفجار و اشتعال ضروری بود. سپس، سناریوهای نشت از لوله‌های ورودی به مخزن و گسست ناگهانی دیواره مخزن تعریف شدند و به همراه اطلاعات اولیه، وارد نرم‌افزار PHAST شدند.



شکل۱- نقشه جانمایی مخازن مورد مطالعه

Figure 1- Layout map of the studied storage tanks

به این ترتیب با در نظر گرفتن شرایط آب‌وهوایی منطقه تحت بررسی، که بر اساس معیار تقسیم‌بندی پاسکویل شامل کلاس‌های جوی A و B (جو ناپایدار)، C و D (جو خنثی) و E و F (جو پایدار) است، ارتفاع نقطه رهایش ماده، جهت تخلیه آن و خواص فیزیکی ماده منتشرشده، مدل‌سازی انتشار انجام شد. پس از آن، مدل‌سازی پیامد، شامل انواع آتش، انفجار و رهایش ماده، انجام گرفت و خروجی‌های آن به صورت پروفایل مکانی-زمانی، شدت تشعشع، موج انفجار و غلظت ماده مشخص شد. در مدل‌سازی تخلیه مایع، نیروی محرکه تخلیه معمولاً فشار مایع است که هنگام تخلیه به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. از آنجا که چگالی مایع هنگام تخلیه ثابت می‌ماند، رابطه (۱) برای محاسبه شدت تخلیه مایع از یک روزنه ایجادشده در بدنه مخزن ارائه شده است:

$$\dot{m} = \rho . A . C \sqrt{2\left(\frac{gcPg}{\rho} + ghL\right)} \qquad (۱)$$

که در رابطه (۱)، m دبی مواد خروجی (kg/s)، p فشار نسبی در فضای بالای مخزن، A مساحت شکاف ایجادشده (m^2)، ρ چگالی مواد (kg/m^3)، g شتاب گرانشی زمین (m/s^2)، gc ثابت گرانشی زمین ($Ns^2/kg.m$) و hL ارتفاع مایع موجود در بالای شکاف ایجادشده در مخزن (m) است.

معادله توزیع غلظت برای رهایش دائمی مواد:

$$[C](x, y, z) = \left(\frac{Qm}{2\,\pi\,.\sigma y.\sigma z\,u}\right).\exp\left[-\frac{u}{2}\left(\frac{y}{\sigma y}\right)^2\right] \times \left[\exp\left[-\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{z-H}{\sigma z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma z}\right)^2\right]\right] \qquad (۲)$$

معادله توزیع غلظت برای رهایش ناگهانی مواد:

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

$$[C](x, y, z) = \left(\frac{Qm}{2\pi . \sigma y . \sigma z\, u}\right) . \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma y}\right)^2 \times \left[\exp\left[-\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{z-H}{\sigma z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma z}\right)^2\right]\right]\right] \quad (۳)$$

که در رابطه (۲) و (۳)، Qm دبی مواد تخلیه شده به محیط (kg/s) ، Q*m کل مواد تخلیه شده به محیط (kg) ، u سرعت باد(m/s)، H ارتفاع محل رهایی(m) ، σy,σz,σx ضرایب انتشار در جهت‌های مختلف(m)،y فاصله در جهت عمود بر وزش باد (m)، z فاصله در جهت عمود بر زمین(m)، می‌باشد.

پس از آن، حالت مناسب حل انتخاب شد و مدل‌سازی تخلیه، انتشار و انواع پیامدها به منظور نمایش پیامدهای ناشی از اشتعال و انفجار انجام گرفت. بدین منظور، گزارش‌ها، نمودارهای غلظت–زمان و غلظت–فاصله، جرم باقیمانده از استخر تشکیل‌شده در اطراف مخزن، احتمال مرگ و سایر اطلاعات مورد بررسی قرار گرفت. پیامدها شامل تشعشع حرارتی ناشی از انواع آتش (آتش ناگهانی، آتش استخری و آتش کروی)، محدوده دربرگیرنده موج انفجار، محدوده حاوی غلظت‌های مختلف ماده در فواصل و زمان‌های مختلف پس از انتشار ماده و در شرایط آب‌وهوایی مختلف، و همچنین پیامدهای سمیت مواد بود. همچنین، اثرات دو سناریوی نشت و گسست ناگهانی دیواره مخازن با استفاده از نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه شد.

در مرحله بعد، با استفاده از نرم‌افزار SAFETI، با تعیین فرکانس رویداد بر اساس استاندارد OGP و تنظیم محاسبات ریسک، شامل پراکندگی جمعیت و منابع جرقه، ریسک فردی و جمعی تعیین شد. در ابتدا، نقشه تانک‌فارم و مقیاس آن در نرم‌افزار تعریف شد. سپس، مخلوط ماده، یعنی بنزین، که از بنزن با جرم مولی ۷۸/۱۱، اتانول با جرم مولی ۴۶، زایلن با جرم مولی ۱۰۶/۱۶، بوتان با جرم مولی ۵۸/۱۲، تولوئن با جرم مولی ۹۲/۱۴، هگزان با جرم مولی ۸۶/۱۷ گرم بر مول تشکیل شده است، تعریف شد. شرایط آب‌وهوایی منطقه نیز به صورت گلباد وارد نرم‌افزار شد. پس از انجام این مراحل، تجهیزات موردنظر، شامل مخازن، روی نقشه جانمایی و اطلاعات مربوط به آن‌ها تکمیل شد. سپس، فرکانس سناریو در سال، به‌عنوان نرخ تکرارپذیری وقوع سناریوهای محتمل، شامل نشت و گسست ناگهانی، بر اساس آمار و مراجع معتبر، نظیر OGP، وارد نرم‌افزار شد.

در گام بعد، اطلاعات مربوط به ریسک، شامل منابع جرقه و پراکندگی جمعیت، وارد نرم‌افزار شد. منابع جرقه شامل تردد خودروهای مجموعه به صورت تعداد خودرو در ساعت و میانگین سرعت حرکت آن‌ها، احتمال وجود افراد سیگاری، احتمال وجود کابل برق و احتمال وجود جریان برق در کابل‌ها بود. در بخش پراکندگی جمعیت، مناطق شهری مجاور واحد مورد مطالعه روی نقشه با ابعاد مشخص تعیین شدند. در این بخش، منطقه باقرشهر با ۶۴۸۲۶ نفر جمعیت ساکن و منطقه گلحصار با ۱۲۹۰۰ نفر جمعیت ساکن، بر اساس آمار رسمی پایگاه‌های سلامت منطقه، در نظر گرفته شدند. همچنین، مناطق تأسیساتی اطراف مخازن مورد مطالعه که افراد شاغل در آن‌ها حضور دارند، روی نقشه با ابعاد مشخص تعیین شدند. سپس، با ورود تعداد جمعیت مناطق مذکور به برنامه، تنظیم محاسبات ریسک تکمیل شد.

در مرحله بعد، تمامی تجهیزات، شامل مخازن و لوله‌های ورودی به مخازن، فهرست شدند و حالت حل اختصاصی مربوط به ریسک انتخاب شد تا محدوده ریسک‌ها به دست آید. سپس، با توجه به ریسک مبنا، قابل‌پذیرش یا غیرقابل‌پذیرش بودن ریسک ناشی از سناریوهای تعیین‌شده برای افراد آن منطقه ارزیابی شد. در نهایت، کانتورهای ریسک فردی برای تعیین محدوده‌های تحت تأثیر در مناطق شهری و صنعتی، روی نقشه‌های نمایش مکانی مشخص شدند.

ارزیابی ریسک فردی

نتایج حاصل از ریسک ناشی از حوادث اشتعال و انفجار مخازن به صورت کانتورهای ریسک نمایش داده می‌شود. برای تعیین نتایج حاصل از ارزیابی ریسک در قالب نمودارهای موردنظر، از مفهوم ریسک فردی ویژه مکانی استفاده می‌شود. این نوع ریسک به معنای تکرارپذیری شرایطی است که در آن، فردی که به طور پیوسته در یک مکان ثابت حضور دارد، در اثر وقوع یک حادثه دچار آسیب‌های جدی می‌شود. همچنین، فرض بر این است که افرادی که در معرض خطر قرار می‌گیرند، امکان فرار ندارند و در فضای باز و به صورت حفاظت نشده حضور دارند.

به کمک مقادیر ریسک فردی ویژه مکانی در نقاط مختلف، نتایج حاصل از ریسک فردی به صورت شمارنده‌های ریسک فردی محاسبه می‌شود که تا حدی بیانگر نتایج به دست‌آمده تحت شرایط محافظه‌کارانه نیز هستند [۱۷].

ارزیابی ریسک جمعی

برای نمایش ریسک جمعی ناشی از یک حادثه، از نمودارهای تکرارپذیری–تعداد تلفات استفاده شد. نمودارهای F-N به طور صریح رابطه میان تکرارپذیری تجمعی و تعداد تلفات را بیان می‌کنند. نمودار لگاریتمی F-N معمولاً به دلیل تفاوت در تعداد تلفات و تکرارپذیری رویدادها در مقادیر مختلف، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ریسک جمعی بیانگر احتمال وقوع تعداد مشخصی تلفات در اثر وقوع یک حادثه مشخص است.

این نوع ریسک شامل دو معیار است که در منحنی مربوطه، به صورت دو گراف با شیب‌های مساوی نمایش داده می‌شوند: ۱) حداقل معیار قابل‌قبول (زردرنگ) و ۲) حداکثر معیار قابل‌قبول (قرمزرنگ). این دو گراف ثابت هستند و گراف مربوط به ریسک جمعی نیز به آن‌ها اضافه می‌شود (سبزرنگ). بنابراین، در مجموع، سه گراف در منحنی مربوطه رسم می‌شود. اگر گراف ریسک جمعی پایین‌تر از حداقل معیار قابل‌قبول قرار گیرد، ریسک قابل‌پذیرش است و اگر بالاتر از حداکثر معیار قابل‌قبول قرار گیرد، ریسک غیرقابل‌پذیرش خواهد بود.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

معیارهای ریسک در نمودار F-N به سه بخش تقسیم می‌شوند:
ناحیه ریسک غیرقابل‌قبول: ناحیه‌ای است که دارای ریسک بالایی بوده و باید ریسک آن کاهش یابد یا فعالیت یا فرایند متوقف شود.
ناحیه ALARP: در این ناحیه، سطح ریسک به‌گونه‌ای است که باید تا حد قابل‌قبول کاهش یابد. در این حالت، اولویت‌بندی پیشنهادها و راهکارهای کاهش ریسک باید براساس امکانات و هزینه‌های مربوط به آن‌ها انجام شود.
ناحیه ریسک قابل‌قبول: در این ناحیه، سطح ریسک پایین است و نیازی به در نظر گرفتن اقدامات بیشتر برای کاهش ریسک وجود ندارد.
پس از تعیین ریسک ناشی از وقوع سناریوهای محتمل، مقادیر بدست‌آمده با معیارهای قابل‌قبول مقایسه می‌شوند تا نیازمندی‌های کاهش ریسک تعیین شود و بر اساس ارزیابی انجام‌شده درباره تمهیدات موردنیاز، تصمیم‌گیری لازم برای انجام اقدامات مناسب به منظور کاهش ریسک صورت گیرد.

تحلیل اثر دومینو

برای محاسبه اثر دومینوی هر مخزن بر مخازن مجاور، از توابع پروبیت به صورت مجزا برای اثر حرارتی و فشار استفاده شد. به منظور انجام این تحلیل، ابتدا میزان فشار و حرارت واردشده به مرکز هر یک از مخازن مجاور با استفاده از نرم‌افزار PHAST به دست آمد و سپس مقادیر حاصل در روابط مربوط به توابع پروبیت قرار گرفت تا مقدار تابع پروبیت تعیین شود. در ادامه، احتمال شکست مخازن با محاسبه تابع توزیع تجمعی نرمال یا پارامتر فی (ϕ) متناظر با مقدار پروبیت بدست آمد.

به منظور ارزیابی و تحلیل پدیده دومینویی ناشی از انفجار و اشتعال در مخازن ذخیره بنزین، رویکردی ترکیبی شامل محاسبه پارامترهای فیزیکی موج انفجار و حرارت و بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی پروبیت به‌کار گرفته شد. در این روش، ابتدا خروجی‌های مدل‌سازی پیامد حاصل از نرم‌افزار PHAST، شامل شدت موج انفجار و حرارت در فواصل مختلف از منبع اولیه حادثه، استخراج شد. این داده‌ها، شامل بیشینه فشار بیش‌ازحد و شدت حرارت در نقاط مختلف پیرامون منبع حادثه، به عنوان ورودی اصلی تحلیل اثر دومینو مورد استفاده قرار گرفتند.

محاسبه اثر دومینوی ناشی از موج انفجار و فشار بیش از حد

در گام نخست، موقعیت و فواصل دقیق مخازن ذخیره از یکدیگر با استفاده از نقشه جانمایی سایت پالایشگاه و داده‌های نقشه‌برداری تعیین شد. فاصله هر مخزن از محل حادثه اولیه، به عنوان منبع موج انفجار، به صورت خطی و با استفاده از نقشه‌های Google Earth محاسبه شد تا امکان تطابق این فواصل با خروجی‌های مدل‌سازی پیامد فراهم شود. سپس، برای هر مخزن مجاور، فشار بیش‌ازحد ناشی از موج انفجار که در فاصله مخزن هدف از منبع اولیه حادثه پیش‌بینی شده بود، تعیین شد. این فشارها به‌عنوان شاخص کمی شدت اثر انفجار بر مخزن هدف در نظر گرفته شدند.

در ادامه، به منظور برآورد احتمال شکست مکانیکی مخازن تحت تأثیر فشارهای ایجادشده، از توابع پروبیت استفاده شد. توابع پروبیت به عنوان روابط آماری مبتنی بر داده‌های تجربی و آزمایشگاهی، امکان برآورد احتمال وقوع یک پیامد خاص، مانند پارگی یا شکست سازه‌ای، را بر اساس شدت اثر فیزیکی واردشده فراهم می‌کنند. تابع پروبیت مورد استفاده در این مطالعه به صورت زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$P=\phi(Y) \quad (۴)$$

$$Y=a+b\cdot\ln(P) \quad (۵)$$

که در روابط فوق، (a) و (b) ضرایب تجربی تابع پروبیت بر اساس نوع سازه و داده‌های مرجع، (p) میزان فشار واردشده در فاصله موردنظر و (P) احتمال وقوع پیامد یا شکست مکانیکی مخزن است. مقدار (Y) محاسبه‌شده، سپس با استفاده از تابع توزیع تجمعی نرمال (ϕ) به احتمال وقوع پیامد تبدیل شد. به این ترتیب، برای هر مخزن در معرض موج انفجار، احتمال شکست محاسبه شد و مقادیر حاصل به عنوان شاخص احتمال وقوع اثر دومینوی ناشی از حادثه اولیه در نظر گرفته شدند. بر این اساس، مخزن هدف به عنوان یک منبع ثانویه بالقوه حادثه در نظر گرفته شد که در صورت شکست می‌توانست موجب آغاز زنجیره دومینویی حوادث شود. این فرایند برای کلیه مخازن مجاور و در معرض اثر حادثه تکرار شد تا احتمال شکست مخازن و گسترش احتمالی اثر دومینویی در واحد عملیاتی مورد مطالعه تعیین شود.

محاسبه اثر دومینوی ناشی از تابش حرارتی

هنگامی که یک مخزن دچار حریق می‌شود، تابش حرارتی قابل‌توجهی به محیط پیرامون منتقل می‌کند. شدت این تابش به عواملی مانند شدت تابش منبع و فاصله تا مخزن دریافت‌کننده وابسته است و می‌تواند موجب افزایش دمای پوسته مخازن مجاور شود. با افزایش دما، خواص مکانیکی فولاد، از جمله استحکام آن، کاهش می‌یابد. در صورت تداوم مواجهه و رسیدن دمای پوسته به مقادیر بحرانی، ظرفیت تحمل فشار داخلی مخزن کاهش یافته و احتمال پارگی یا ترکیدگی آن افزایش می‌یابد. شکست مخزن می‌تواند به رهایش ناگهانی مواد خطرناک و ایجاد آتش‌سوزی یا انفجارهای ثانویه منجر شود و در نتیجه، زنجیره دومینویی حادثه را گسترش دهد.

برای ارزیابی کمی این پدیده، از توابع پروبیت استفاده شد که با در نظر گرفتن شدت تابش حرارتی و مدت‌زمان مواجهه، احتمال شکست مخزن را برآورد می‌کنند. علاوه بر احتمال شکست، زمان تا شکست نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا تعیین بازه زمانی بحرانی بین آغاز مواجهه با تابش حرارتی و وقوع شکست، امکان برنامه‌ریزی برای اقدامات اضطراری و پیشگیری از گسترش حادثه را فراهم می‌کند.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

تابع پروبیت مورد استفاده در این مطالعه به شکل زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$Y=a+b\cdot\ln(ttf/60) \quad (۶)$$

$$\ln(ttf) = -1.13\ln(I)-2.667\times10^{-5}V+9.877 \quad (۷)$$

$$TTF = e^{\ln(ttf)} \quad (۸)$$

که در روابط فوق، a و b ضرایب تجربی تابع پروبیت بر اساس نوع سازه و داده‌های مرجع و I میزان تشعشع حرارتی وارد شده در فاصله مدنظر می‌باشد. مقدار Y محاسبه شده سپس به وسیله روابط استاندارد تبدیل پروبیت به احتمال وقوع پیامد، به احتمال شکست مکانیکی مخزن (P) تبدیل گردید که امکان بیان نتیجه به صورت درصد احتمال وقوع حادثه را فراهم می‌آورد.

یافته‌ها

بر اساس نتایج مدل‌سازی پیامدها، شدت و شعاع تابش حرارتی ناشی از حریق استخری ناگهانی و ثانویه در کلاس‌های پایداری جوی D و F اختلاف اندکی داشتند. در هر دو شرایط، شدت تابش حرارتی در محدوده kw/m^2 ۴ تا ۳۷/۵ و شعاع تحت تأثیر حدود ۱۶۰ m تا ۴۸۰ به دست آمد.

در سناریوی گسست ناگهانی مخزن شماره ۱، محدوده غلظت‌های قابل اشتعالLFL و UFL در شرایط جوی 5D به ترتیب ۶۷۹۷ppm در فاصله ۳۱۹m و ۱۳۵۹۴ppm در فاصله ۲۳۶m به دست آمد، در حالی که در شرایط F ۱/۵، مقدار LFL تا ۳۶۷m گسترش یافت. همچنین شعاع موج انفجار در فشارهای ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۰۲ بار در شرایط 5 D به ترتیب ۷۰m، ۸۵ و ۳۶۳ و در شرایط ۱/۵F برابر ۶۸m، ۸۴ و ۳۵۶ بود. در نشتی با قطر ۲۰ mm، شعاع اثر حرارتی به نوع حادثه وابسته بود. در حریق فورانی، شعاع اثر برای شدت تابش $12/5\ kw/m^2$ حدود 5متر و برای $4\ kw/m^2$ بین۶ تا ۷ متر بدست آمد. در حریق استخری ناگهانی، این مقادیر برای شدت $12/5\ kw/m^2$ به ۹ تا ۱۱ متر و برای $4\ kw/m^2$ به حدود ۱۵ متر افزایش یافت و در برخی موارد احتمال مرگ به 100درصد رسید. شعاع اثر مربوط به حریق استخری برای شدت‌های $37/5\ kw/m^2$، ۱۲/۵ و ۴ به ترتیب ۱۸ m تا ۲۷ ، ۳۸ m تا ۴۱ و ۵۷ m تا۶۵ به دست آمد و در این سناریو نیز احتمال مرگ در محدوده نزدیک به مخزن به ۱۰۰ درصد رسید.

نتایج انتشار ابر گازی نشان داد که اگرچه مقادیر LFL و UFL به ترتیب برابر ۶۷۹۷ppm و ۱۳۵۹۴ بودند، اما به دلیل کوچک بودن قطر نشتی، شعاع انتشار آن‌ها محدود بود. در شرایط جوی ۱/۵F، غلظت LFL تا حدود ۲۲m و UFL تا حدود ۱۵m از محل نشتی گسترش یافت که بیانگر محدود بودن حجم گاز آزادشده است. با این حال، تشکیل مخلوط قابل اشتعال در محدوده نزدیک به مخزن، ضرورت استفاده از سامانه‌های آشکارساز گاز و حذف منابع اشتعال را نشان می‌دهد.

تحلیل موج انفجار در شرایط ۱/۵F نیز نشان داد که فشارbar ۰/۲ تا شعاع ۳۰ m ، فشار ۰/۱bar تا۲۳ m و فشار ۰/۰۲ bar تا ۷۲m گسترش می‌یابد. در بررسی نشتی با قطر ۱۵۰mm، شعاع اثر حرارتی برای شدت‌های $37/5\ kw/m^2$، ۱۲/۵ و ۴ به ترتیب ۲۰m تا ۲۴، ۲۶m تا ۲۸ و ۳۳m تا ۳۶ به دست آمد.

در حریق استخری ناگهانی، شعاع اثر حرارتی افزایش قابل ملاحظه‌ای داشت به طوری که برای شدت‌های $37/5\ kw/m^2$، ۱۲/۵ و۴ به ترتیب۳۰mتا ۳۹، ۵۴m تا ۶۰ و ۸۵m تا ۸۸ گزارش شد. همچنین در برخی سناریوها احتمال مرگ۱۰۰ درصد ثبت شد که بیانگر تمرکز بالای انرژی حرارتی و خطر جدی برای افراد و تجهیزات مجاور مخزن است.

شدیدترین پیامدها مربوط به حریق استخری ثانویه بود، به‌گونه‌ای که شعاع اثر برای شدت‌های $37/5\ kw/m^2$، ۱۲/۵و ۴ به ترتیب ۱۴۱m تا ۱۴۳، ۲۲۲mتا ۲۳۳ و ۳۵۰ mتا ۳۸۴ به دست آمد. همچنین احتمال مرگ ۱۰۰د رصد در شعاع ۱۴۹m تا ۱۵۲ مشاهده شد که نشان می‌دهد در نشتی‌های وسیع، وقوع حریق استخری ثانویه می‌تواند در مدت کوتاهی بخش وسیعی از واحد فرآیندی را تحت تأثیر قرار داده و پیامدهای شدید انسانی و تجهیزاتی ایجاد کند. این نتایج، ضرورت استفاده از سامانه‌های تشخیص سریع نشتی، قطع اضطراری جریان و اجرای تمهیدات مناسب مدیریت شرایط اضطراری را نشان می‌دهد.

نتایج انتشار ابر گازی نیز نشان داد که نشتی ۱۵۰mm موجب تشکیل ابر قابل‌اشتعال با گستره قابل توجهی می‌شود. مقایسه شرایط جوی 5D وF ۱/۵ نشان داد که پایداری جو نقش مهمی در رفتار انتشار گاز دارد. در شرایط 5D، به دلیل تلاطم بیشتر و اختلاط سریع‌تر هوا، غلظت LFL(۶۷۹۷ ppm) تا فاصله ۶۸m و غلظت (۱۳۵۹۴ ppm) UFL تا فاصله ۳۶m متر گسترش یافت.

در شرایط جویF ۱/۵، به دلیل پایداری بالای جو، کاهش تلاطم و محدود بودن اختلاط هوا، ابر گازی در مجاورت زمین ماندگارتر بوده و شعاع انتشار آن به طور قابل توجهی افزایش یافت. در این شرایط، غلظت LFL(۶۷۹۷ ppm) تا فاصله ۲۰۳m و غلظت UFL (13594 ppm) تا فاصلهm ۱۵۰ گسترش یافت.

در شرایط 5D، شعاع اثر برای فشارهای bar ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۰۲ به ترتیبm ۲۵۰ ، ۲۶ و ۶۱ به دست آمد.

شعاع موج انفجار برای فشارهایbar ۰/۲، ۰/۱و ۰/۰۲ به ترتیب ۳۰m، ۳۶ و ۱۰۰ به دست آمد. بیشترین اختلاف بین دو کلاس جوی در فشار ۰/۰۲bar مشاهده شد، به طوری‌که شعاع اثر در شرایط ۱/۵F حدود ۳۹m بیشتر از شرایط 5D بود.

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

در گسست ناگهانی مخزن شماره ۲، در شرایط F ۱/۵، شعاع اثر برای شدت‌های kw/m^2 ۳۷/۵، ۱۲/۵و۴ به ترتیب ۱۷۶m، ۲۸۵و۴۶۰ و در شرایط 5D از 200m تا ۴۵۵ متغیر بود. همچنین شعاع خطر در شرایط احتمال مرگ ۱۰۰ درصد بین ۱۸۰m تا ۲۰۱ قرار داشت .

در حریق استخری ناگهانی، شعاع اثر حرارتی برای شدت‌ها $5\ kw/m^2$ ۳۷/، ۱۲/۵ و ۴ در شرایط D ۵ به ترتیب ۱۹۸m، ۲۹۶ و ۴۶۲ و در شرایط ۱/۵F برابر با ۱۷۰m، ۲۷۶ و۴۶۰ به دست آمد. بررسی انتشار ابر گازی ناشی از گسست ناگهانی نشان داد که شرایط F ۱/۵ بحرانی‌تر از 5D است. در شرایط 5D، محدوده LFL (۶۷۹۷ ppm) تا فاصله ۳۱۳m و UFL (۱۳۵۹۴ ppm) تا فاصله 230m گسترش یافت، در حالی که در شرایط F ۱/۵ این مقادیر به ترتیب به ۳۵۶m و۲۹۰ رسید. بنابراین، پایداری بیشتر جو موجب افزایش ماندگاری و گسترش افقی ابر قابل‌اشتعال می‌شود. در تحلیل موج انفجار گسست ناگهانی، تفاوت بین شرایط جوی محدود بود. شعاع اثر فشارهای bar ۰/۲، ۰/۱و۰/۰۲ در شرایط 5D به ترتیب ۷۰m، ۸۵ و ۳۵۶ و در شرایط ۱/۵F به ترتیب ۷۱m، ۸۵ و ۳۳۸ ثبت شد. بیشترین توسعه موج مربوط به فشار ۰/۰۲bar بود.

در حریق استخری ناگهانی مربوط به نشتی 20mm ، بیشترین شعاع مربوط به شدت kw/m^2 ۳۷/۵، در شرایط 5D و حدود ۱۴۸m بود، در حالی که در سایر شدت‌ها شعاع اثر بین ۱۱ m تا ۱۵ قرار داشت. در حریق استخری ثانویه نیز شعاع تابش حرارتی بین 22m تا ۶۵ تغییر کرد و احتمال مرگ ۱۰۰ درصد در فاصله ۲۴m مشاهده شد.

در نشتی ۱۵۰ mm در حریق فورانی، شعاع اثر حرارتی بین ۲۰m تا ۳۷ بود و احتمال مرگ ۱۰۰ درصد در شعاع‌های ۲۰m و ۲۵ ثبت شد. در حریق استخری ناگهانی، شعاع اثر بین 28m تا ۸۵ و در حریق استخری ثانویه بین ۱۳۶m تا ۳۸۲ تغییر کرد.

انتشار ابر گازی در نشتی ۱۵۰mm نیز نشان داد که در شرایط 5D، مقادیر LFL و UFL به ترتیب در فاصله‌های 68m و ۳۱ و در شرایط ۱/۵F در فاصله‌های m ۲۰۰ و ۱۴۶ مشاهده شدند.

در موج انفجار ناشی از نشتی mm ۱۵۰، در شرایط 5D شعاع فشارهای bar ۰/۱،0/2 و۰/۰۲ به ترتیب ۲۶m، ۲۹ و ۶۰ و در شرایط ۱/۵F به ترتیب ۳۲m، ۳۴ و ۹۸ به دست آمد.

نتایج تحلیل ریسک فردی با استفاده از نرم‌افزار SAFETI و نقشه‌های کانتور ریسک نشان می‌دهد که تا شعاع حدود ۲۰۶ متری از مخازن، سطح ریسک فردی در حد ۱×۱۰^{-۶} قرار دارد. در ارزیابی ریسک جمعی براساس منحنی FN مشخص شد که در بازه تلفات ۱ تا ۶ نفر، ریسک در محدوده قابل‌قبول قرار دارد؛ اما برای تلفات ۷ تا ۱۰ نفر، ریسک در ناحیه قابل‌تحمل است.

برای بررسی اثر دومینویی، از داده‌های خروجی PHAST و SAFETI و توابع پروبیت استفاده شد. تحلیل پروبیت برای فشار موج انفجار در سناریوی گسست فاجعه‌بار نشان داد که فشار 17بار در شعاع ۲۳ m منجر به Y = 16 و احتمال شکست ۱۰۰ درصد می‌شود.

همچنین در فواصل دورتر که فشار به حدود ۲۰۰۰۰۰ پاسکال می رسد، مقدار Y = 10/82 همچنان نشان‌دهنده احتمال شکست کامل است. تنها در فشارهای بسیار پایین‌تر مانند ۲۰۰۰ پاسکال، مقدار Y =-0/41 و احتمال شکست ۳۴ درصد ثبت شد که نشان می‌دهد ریسک آسیب به مخازن در این ناحیه کاهش می‌یابد.

در ارزیابی تابش حرارتی نیز مشخص شد که در شدت kw/m^2 ۳۷/۵ ، زمان تا شکست مخزن حدود ۱۴۵ ثانیه (۲/۴ دقیقه) بوده و مقدار پروبیت Y =۲/۶۴ احتمال ۱۰۰ درصد شکست را نشان می‌دهد. برای شدت kw/m^2 ۱۲/۵ زمان TTF به ۵۲۶ ثانیه (۸/۴ دقیقه) افزایش یافته و احتمال شکست به ۱۰۰درصد می‌رسد. در شدت $4\ kw/m^2$، زمان TTF حدود ۳۰ دقیقه است و مقدار Y = ۱۶/۰۴ بنابراین احتمال شکست ۱۰۰درصد می‌باشد. در ارزیابی لوله ورودی به مخزن با توجه به حجم آن که ۰/۶۸ مترمکعب می‌باشد، در شدت حرارتی به ترتیب ($۳۷/۵$و$۱۲/۵$و$۴kw/m^2$)، احتمال شکست نیز ۱۰۰ درصد، ۱۰۰ درصد و ۳۴ درصد نشان داده شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مخازن نزدیک به منبع حادثه مانند مخزن شماره ۱ در سناریوی گسست فاجعه‌بار به دلیل دریافت همزمان تابش حرارتی $۳۷/۵kw/m^2$ به مدت حدود ۲/۵ دقیقه و فشار انفجار ۱۷ بار، با احتمال شکست ۱۰۰ درصدی مواجه هستند. در مقابل، مخازن دورتر مانند مخازن «نفت یورو» به دلیل کاهش شدت حرارت و فشار، احتمال شکست کم تا متوسط دارند.

بحث

این پژوهش با هدف ارزیابی جامع ریسک و پیامدهای ناشی از حوادث اشتعال و انفجار در مخازن بنزین و تحلیل اثرات دومینویی آنها در یکی از تأسیسات نفتی واقع در استان تهران انجام شد. با بهره‌گیری از ابزارهای پیشرفته مدل‌سازی نظیر نرم‌افزارهای PHAST و SAFETI، و با استفاده از داده‌های میدانی جمع‌آوری شده از تأسیسات مورد مطالعه، سناریوهای محتمل حوادث شامل نشتی با قطرهای ۲۰ و ۱۵۰ میلی‌متر و گسست فاجعه‌بار مخازن مورد بررسی قرار گرفت. تفاوت مشاهده شده بین سناریوهای مختلف ناشی از تفاوت در نرخ آزادسازی سوخت، حجم ماده قابل اشتعال وارد شده به محیط و مکانیزم انتقال حرارت است. افزایش قطر نشتی موجب افزایش دبی خروجی، تشکیل ابر گازی بزرگ‌تر و افزایش احتمال وقوع VCE و پیامدهای حرارتی شدیدتر شد. همچنین شرایط جوی پایدار (۱/۵ F) به دلیل کاهش اختلاط و ماندگاری بیشتر بخارات سوخت، موجب افزایش محدوده اشتعال نسبت به شرایط D ۵ گردید. به منظور ارزیابی چیدمان مخازن، نتایج حاصل از تحلیل پیامد با الزامات فاصله‌گذاری مندرج در استاندارد NFPA ۳۰ مقایسه شد. بر اساس این استاندارد، حداقل فاصله بین دو مخزن مجاور

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

برابر با یک ششم مجموع قطر دو مخزن در نظر گرفته می‌شود. با توجه به قطر ۵۳ متری هر یک از مخازن، حداقل فاصله موردنیاز حدود۱۷/۷ متر محاسبه شد، در حالی که فاصله واقعی بین دو مخزن ۲۳ متر است. بنابراین، از نظر حداقل فاصله‌گذاری، چیدمان موجود با معیار استاندارد مطابقت دارد. با این حال، نتایج تحلیل پیامد نشان داد که در سناریوی گسست فاجعه‌بار، شعاع اثرات حرارتی و انفجار به مراتب بزرگ‌تر از فاصله بین مخازن بوده و احتمال وقوع اثر دومینو همچنان وجود دارد. این موضوع نشان می‌دهد که رعایت حداقل فواصل استاندارد به تنهایی برای کنترل سناریوهای شدید کافی نبوده و استفاده از لایه‌های حفاظتی تکمیلی و سامانه‌های کاهش ریسک ضروری است. لازم به ذکر است که به منظور مدلسازی رهایش گازها در نرم افزار PHASTاز مدلهای گاوسی استفاده شده است[۱۹].

تحلیل‌های کمی و کیفی انجام شده، نتایج زیر را به دست آورد:

شناسایی و مدل‌سازی سناریوهای حادثه: سناریوهای تعریف‌شده شامل نشتی‌های کوچک (۲۰mm)، نشتی‌های بزرگ (۱۵۰mm)، و گسست فاجعه‌بار مخازن بنزین بود. شبیه‌سازی‌های انجام شده با نرم‌افزار PHAST نشان داد که گسست فاجعه‌بار به دلیل انتشار حجم عظیمی از مواد قابل اشتعال، شدیدترین پیامدها را از جمله حریق‌های ناگهانی، حریق‌های استخری ناگهانی و ثانویه، و انفجارهای ناشی از ابر گازی (VCE) در پی دارد. همچنین نشتی‌های ذکر شده با توجه به ماهیت نشت مواد از تجهیزات که اثرگذار بر ایجاد حریقی متفاوت است علاوه بر رخدادهای ناشی از گسست فاجعه بار، باعث رویدادی نظیر حریق فورانی نیز گردیده است. تحلیل‌های نرم‌افزار SAFETI، نتایج پیامدهای فوق را با ارزیابی ریسک فردی و جمعی تکمیل نموده و امکان برآورد دقیق‌تر مخاطرات را فراهم آورد.

پیامدهای حرارتی و انفجاری: نتایج مدل‌سازی نشان داد که شدت تشعشع حرارتی در سطوح4kw/m2 ، ۱۲/۵، و ۳۷/۵ و فشار مازاد انفجار تا ۱۷bar در نزدیکی منبع حادثه، پتانسیل بالایی برای ایجاد خسارات جانی، ساختاری، و زیست‌محیطی دارند. در سناریوی گسست فاجعه‌بار، شعاع تأثیر تشعشع حرارتی تا ۴۸۷ m و موج انفجار تا شعاع ۳۶۳m در شرایط جوی مختلف (۱/۵F و 5D) گزارش شد. این دامنه‌ها نشان‌دهنده گستردگی بالای تأثیر حوادث بر تجهیزات مجاور، زیرساخت‌ها، و واحدهای کاری اطراف تأسیسات است.

ارزیابی ریسک فردی و جمعی: تحلیل ریسک فردی با استفاده از نرم‌افزار SAFETI و تولید نقشه‌های کانتور ریسک نشان داد که تا شعاع ۲۰۷ متری مخازن، ریسک فردی در سطح ۶-1e قرار دارد که در سطح معیار پذیرش (۶-1e) بوده و احتمال آسیب جدی به افراد وجود دارد. این امر ضرورت اقدامات کنترلی فوری را برجسته می‌سازد. تحلیل ریسک جمعی با ترسیم منحنی FN نشان داد که در بازه ۱ تا ۶ نفر تلفات، ریسک در محدوده قابل‌قبول است، اما برای تلفات ۷ تا ۱۰ نفر، ریسک در ناحیه قابل تحمل قرار دارد و نیازمند اقدامات پیشگیرانه و کاهش دهنده‌ی آسیب و مخاطرات است. عدم عبور منحنی FN از خط معیار قرمز نشان‌دهنده نبود ریسک غیرقابل‌قبول است، که حاکی از سطح ایمنی کنترل شده در تأسیسات مورد مطالعه است.

تحلیل اثر دومینو: با استفاده از توابع پروبیت و داده‌های حاصل از PHAST و SAFETI، اثر دومینویی حوادث بررسی شد. محاسبات پروبیت برای فشار مازاد انفجار و تشعشع حرارتی نشان داد که:

برای فشار موج انفجار: در سناریوی گسست فاجعه‌بار، فشار ۱۷ بار در شعاع ۲۳ متری منجر به Y = ۱۶و احتمال شکست ۱۰۰درصد = P می‌شود. در فواصل دورتر که موج فشار انفجار، کمتر است مانند ۲۰۰۰۰۰Pa، Y = 10/82 و 100درصد = P یعنی احتمال شکست همچنان بالا است، اما در فشارهای پایین‌تر (۲۰۰۰Pa، Y = −۰/۴۱و ۳۴درصد = P) کاهش می‌یابد.

برای تشعشع حرارتی: در شدت ۳۷/۵ kw/m²، زمان تا شکست (ttf) ۱۴۵/۳، ثانیه (۲/۴۲ دقیقه)، Y = ۲/۶۴و ۱۰۰درصد =P برای مخازن با حجم ۳۰۰۰۰m³ ، در شدت ۱۲/۵ kw/m²، ۵۲۶/۸۹ ثانیه (۸/۳۹ دقیقه) = ttf، Y= ۱۰/۸۲ و ۱۰۰درصد =P، در شدت ۴kw/m²، ۱۸۲۶ ثانیه (۳۰ دقیقه)= ttf ، Y=۱۶/۰۴و ۱۰۰درصد = P این محاسبات نشان داد که مخازن نزدیک‌تر به منبع حادثه (مانند مخزن شماره ۱ در سناریوی گسست فاجعه‌بار) به دلیل دریافت تشعشع حرارتی۲kw/m ۳۷/۵ به مدت ۲/۵دقیقه و فشار انفجار ۱۷bar در شعاع ۲۳ متری، احتمال شکست ۱۰۰ درصدی دارند. مخازن دورتر (مانند مخازن نفت یورو) به دلیل کاهش شدت تشعشع و فشار، احتمال شکست کمتری (متوسط تا پایین) داشتند. این یافته‌ها بر نقش کلیدی عوامل محیطی (نظیر جهت باد و پایداری جوی) و طراحی تأسیسات (مانند فاصله بین مخازن) در کاهش یا تشدید اثرات دومینویی تأکید دارد.

تعیین شعاع ایمن: شعاع ایمن برای کاهش ریسک‌های جانی و خسارات ساختاری بر اساس شدت تشعشع حرارتی و فشار انفجار محاسبه شد. برای سناریوهای نشتی ۲۰mm، ۱۵۰ mmو گسست فاجعه‌بار، شعاع‌های ایمن به ترتیب حداقل ۷۲m، ۳۸۴، و ۴۸۷ تعیین شدند. این شعاع‌ها با توجه به شرایط جوی و نوع حادثه متغیر بوده و به‌عنوان مبنایی برای طراحی فواصل ایمنی، جانمایی پناهگاه‌ها، و برنامه‌ریزی اضطراری پیشنهاد می‌شوند. ارزیابی شرایط تأسیسات: تأسیسات مورد مطالعه به دلیل مجاورت با مناطق مسکونی پرجمعیت، تراکم بالای تجهیزات، و ذخیره‌سازی حجم عظیم مواد قابل اشتعال (۳۰ میلیون لیتر بنزین در مخازن اتمسفریک)، در معرض ریسک‌های قابل‌توجهی قرار دارد. تحلیل‌های این پژوهش نشان داد که فقدان فواصل ایمنی کافی، نبود سیستم‌های کنترلی پیشرفته، و شرایط اقلیمی منطقه می‌توانند پتانسیل حوادث دومینویی را به طور قابل‌توجهی افزایش دهند. با این حال، استفاده از ابزارهای مدل‌سازی پیشرفته امکان

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

پیش‌بینی دقیق پیامدها و ارائه راهکارهای مؤثر برای کاهش ریسک را فراهم کرده است. این مطالعه با ارائه یک رویکرد یکپارچه و مبتنی بر داده‌های علمی، نه تنها به شناسایی و تحلیل ریسک‌های مرتبط با حوادث فرآیندی در تأسیسات نفتی پرداخت، بلکه با تمرکز بر اثرات دومینویی و ارزیابی ریسک‌های فردی و جمعی، گامی مؤثر در جهت ارتقای ایمنی و کاهش مخاطرات جانی، مالی، و زیست محیطی برداشت. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی برای سیاست‌گذاری‌های ایمنی، طراحی برنامه‌های مدیریت بحران، و هدایت تحقیقات آینده در صنعت نفت و گاز مورد استفاده قرار گیرد شایان ذکر است با وجود کاربرد گسترده نرم‌افزارهای PHAST و SAFETIدر ارزیابی پیامد و ریسک، این مطالعه دارای محدودیت‌هایی از جمله به فرض ثابت بودن شرایط جوی در طول حادثه، عدم لحاظ تغییرات زمانی سرعت و جهت باد، وابستگی نتایج به دقت پارامترهای ورودی و عدم بررسی کامل رفتار دینامیکی فرآیند پس از وقوع حادثه می‌باشد. همچنین مدل‌سازی اثر دومینو بر اساس سناریوهای بحرانی انجام شده و عدم قطعیت‌های مرتبط با شرایط واقعی بهره‌برداری می‌تواند بر نتایج نهایی اثرگذار باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج مدل‌سازی پیامد و ریسک در مخازن بنزین پالایشگاه نشان داد که رفتار حریق‌ها، الگوی انتشار بخار و دامنه موج انفجار به طور مستقیم تحت تأثیر اندازه نشتی، نوع سناریوی حادثه و شرایط پایداری جو قرار دارند. در این مطالعه مشخص شد که حریق استخری ثانویه، شدیدترین پیامدها را ایجاد کرده و در نشتی‌های بزرگ مقیاس (۱۵۰mm)، شعاع اثرگذاری حرارتی آن می‌تواند تا چند صد متر گسترش یافته و عملاً کل واحد فرآیندی را در معرض آسیب جدی قرار دهد. این موضوع نشان‌دهنده آن است که نشتی‌های بزرگ بدون گسست کامل، توان ایجاد پیامدهای هم سطح با حوادث ماژور را دارند و باید در تحلیل‌های ریسک به عنوان سناریوهای بحرانی مدنظر قرار گیرند.

مقایسه شرایط جوی 5D و 1/5F نیز روشن ساخت که در نشتی‌های کوچک، تأثیر کلاس پایداری محدود بوده و شعاع پیامد تفاوت چشمگیری ندارد، اما در نشتی‌های بزرگ مقیاس، پایداری زیاد موجب حفظ غلظت‌های قابل‌اشتعال در فواصل دورتر شده و دامنه هر دو پیامد حرارتی و انفجاری را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در شرایط F ، طول ابر قابل‌اشتعال در برخی موارد تا سه برابر حالت D افزایش یافته که این مسئله خطر انفجار در نقاط دورتر و افزایش احتمال اثر دومینویی را تشدید می‌کند.

بررسی موج انفجار نشان داد که با کاهش فشار از ۰/۲ bar به ۰/۰۲ bar، اگرچه شدت آسیب سازه‌ای کاهش می‌یابد، اما شعاع اثرگذاری به طور قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. این الگو اهمیت فاصله‌گذاری ایمن بین تجهیزات و لزوم رعایت استانداردهای طراحی در واحدهای ذخیره‌سازی را برجسته می‌سازد. همچنین مشخص شد که در شرایط پایداری F 1/5، دامنه انتشار موج در تمامی سطوح فشار، بزرگتر از حالت 5D بوده و خطرات دوربرد انفجاری افزایش می‌یابد.

در مجموع، یافته‌ها تأکید می‌کنند که:

۱. نوع رویداد حادثه (فورانی، استخری ناگهانی، استخری ثانویه) تعیین‌کننده اصلی شدت پیامدهاست.

۲. نشتی‌های بزرگ (۱۵۰mm) دارای پتانسیل ایجاد پیامدهای فاجعه‌بار بوده و باید در طراحی سیستم‌های ایمنی، به عنوان سناریوهای بدترین حالت لحاظ شوند.

۳. پایداری جوی F 1/5 بدترین شرایط برای انتشار بخار، تشکیل ابر قابل انفجار و افزایش شعاع موج است.

۴. نتایج مدل‌سازی PHAST و SAFETI قابلیت اتکای بالایی داشته و مبنای مناسبی برای تحلیل دومینو، مدیریت بحران، طراحی سیستم‌های تشخیص و اطفا، و تعیین فواصل ایمن فراهم می‌کنند.

این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مدیریت ریسک مخازن بنزین نیازمند تمرکز ویژه بر کنترل نشتی، کاهش حجم سوخت آزادشده، محدودسازی گسترش حریق استخری، پایش لحظه‌ای شرایط جوی و اجرای سناریوهای واکنش اضطراری است. استناد به نتایج این پژوهش می‌تواند در تدوین استراتژی‌های پیشگیرانه، کاهش تلفات انسانی و کاهش خسارات تجهیزاتی نقش کلیدی ایفا کند.

مقایسه سناریوهای مختلف نشان داد که با افزایش شدت رخداد از نشتی ۲۰ میلی‌متری به نشتی ۱۵۰ میلی‌متری و سپس گسست فاجعه‌بار، شدت پیامدها به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. در میان سناریوهای بررسی‌شده، گسست فاجعه‌بار بحرانی‌ترین وضعیت را ایجاد کرد؛ به طوری‌که بیشترین شعاع اثر تشعشع حرارتی (۴۸۷ متر)، بیشترین شعاع موج انفجار (۳۶۳ متر) و بالاترین احتمال وقوع اثر دومینو با احتمال شکست ۱۰۰ درصد برای مخزن مجاور را به همراه داشت. در مقابل، نشتی ۲۰ میلی‌متری کمترین محدوده خطر را ایجاد کرد و شعاع ایمن آن ۷۲ متر برآورد شد، در حالی که این مقدار برای نشتی ۱۵۰ میلی‌متری به ۳۸۴ متر افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که حریق استخری ثانویه در تمامی سناریوها شدیدترین پیامد حرارتی را نسبت به حریق فورانی و حریق استخری ناگهانی ایجاد کرد و شرایط جوی پایدار (F 1/5) نیز با افزایش محدوده ابر قابل‌اشتعال، در اغلب سناریوها موجب تشدید خطر انفجار نسبت به شرایط 5D شد. بنابراین، اندازه نشتی، نوع پیامد حادثه و شرایط جوی سه عامل اصلی تعیین‌کننده شدت پیامدها و احتمال وقوع اثر دومینو در این مطالعه بودند.

به طور کلی، نتایج این تحلیل‌ها اهمیت عوامل محیطی مانند جهت و سرعت باد، کلاس پایداری جوی و همچنین عوامل طراحی نظیر

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

فاصله‌گذاری مناسب بین مخازن را در کاهش یا تشدید اثر دومینویی به خوبی نشان می‌دهد.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان تحلیل ریسک و پیامدهای ناشی از حوادث اشتعال و انفجار مخازن بنزین با تأکید بر اثر دومینویی در یکی از تأسیسات نفتی استان تهران می‌باشد. بدین‌وسیله از حمایت دانشکده بهداشت و ایمنی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی و پرسنل محترم تاسیسات نفتی مورد مطالعه برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که در تدوین این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافعی وجود نداشته است.

تامین مالی مقاله

این پژوهش بدون دریافت حمایت مالی از سازمان یا نهاد خاصی انجام شده است.

ملاحظات اخلاقی

مقاله حاضر با کد اخلاق IR.SBMU.PHNS.REC.1403.141 بخشی از نتایج پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان تحلیل ریسک و پیامدهای ناشی از حوادث اشتعال و انفجار مخازن بنزین با تأکید بر اثر دومینویی در یکی از تأسیسات نفتی استان تهران در گروه سلامت، ایمنی و محیط زیست، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی می‌باشد.

مشارکت مولفین

تمامی نویسندگان در طراحی مطالعه، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج و تدوین و ویرایش مقاله مشارکت داشته‌اند.

استفاده از هوش مصنوعی

در تهیه و تدوین این مقاله، از ابزار هوش مصنوعی (Chat GPT) به منظور بهبود نگارش، ویرایش زبانی و اصلاح ساختار متن استفاده شده است. مسئولیت صحت داده‌ها، نتایج، تحلیل‌ها و محتوای نهایی مقاله بر عهده نویسندگان است.

References

1- Ramezani Khoshnameh MK, Mirza Ebrahim Tehrani M, Babayi Mesdaraghi Y. Risk assessment of releasing flammable material from liquefied petroleum gas tanks by Bowtie method and vulnerability zoning by PHAST software. Occupational Hygiene and Health Promotion 2019; 3(1):36–50 (In Persian). https://doi.org/10.18502/ohhp.v3i1.963

2- Zaroushani V, Mirzakhani H, Khajehnasiri F. Investigating effective parameters in hazardous areas of city gas station (CGS), through modeling using PHAST software. Iranian Journal of Chemical Engineering (IJChE) 2022; 19(4):38–51. https://doi.org/10.22034/ijche.2023.369154.1463

3- Pouyakian M, Ashouri M, Eidani S, Madvari RF, Laal F. A systematic review of consequence modeling studies of the process accidents in Iran from 2006 to 2022. Heliyon 2023; 9(2). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13550

4-Pandya N, Gabas N, Marsden E. Sensitivity analysis of Phast's atmospheric dispersion model for three toxic materials (nitric oxide, ammonia, chlorine). Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2012; 25(1):20–32. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.06.015

5- Novak-Pintarič Z. Assessment of the consequences of accident scenarios involving dangerous substances. Process Safety and Environmental Protection 2007; 85(1):23–38. https://doi.org/10.1205/psep06014

6- Witlox HW, Fernández M, Harper M, Oke A, Stene J, Xu Y. Verification and validation of Phast consequence models for accidental releases of toxic or flammable chemicals to the atmosphere. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2018; 55:457–70. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.07.014

7- Bahmani R, Pouyakyan M, Khodakarim S, Bidel H, Salehi-Sahlabadi A, Jafari MJ. Risk assessment and consequence analysis of fire and explosion in a vinyl chloride monomer tank by PHAST. Journal of Safety Promotion and Injury Prevention 2021; 8(4):208–18 (In Persian). https://doi.org/10.22037/meipm.v8i4.30783

8- Mousavi J, Parvini M. Analyzing effective factors on leakage-induced hydrogen fires. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2016; 40:29–42. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.12.002

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.

9- Khodadadi-Mousiri A, Yaghoot-Nezhada A, Sadeghi-Yarandi M, Soltanzadeh A. Consequence modeling and root cause analysis (RCA) of the real explosion of a methane pressure vessel in a gas refinery. Heliyon 2023; 9(4). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14628

10- He Z, Weng W. Synergic effects in the assessment of multi-hazard coupling disasters: Fires, explosions, and toxicant leaks. Journal of Hazardous Materials 2020; 388. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121813

11- Abbasi Kharajou B, Ahmadi H, Rafiei M, Moradi Hanifi S. Quantitative risk estimation of CNG station by using fuzzy bayesian networks and consequence modeling. Scientific Reports 2024; 14. https://doi.org/10.1038/s41598-024-54842-y

12- Taheri A, Beryani AA, Motavassel M, Nassab EA. Integrated quantitative explosion risk assessment and safety zone delineation applied in a pressure vessel adopting PHAST numerical simulation approach: An Iranian case analysis. Results in Engineering 2025; 26. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105581

13- Wang S, Wang G, Liu D, Liu C. Application of the improved vapor cloud explosion model to leakage explosion evaluation of high-pressure natural gas pipelines. Petroleum Science and Technology 2023; 41(2):214–29. https://doi.org/10.1080/10916466.2022.2042016

14- Kim WJ, Park Y, Park DJ. Quantitative risk assessments of hydrogen blending into transmission pipeline of natural gas. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2024; 91. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105412

15- Mirzakhani H, Zarvanshani V, Ahmadi S. The influence of climate change on the modeling of fire and explosion risk consequences in a City Gas Station (CGS). Journal of Health in the Field 2020; 8(2):44–56 (In Persian). https://doi.org/10.22037/jhf.v8i2.30676

16- Pourbabaki R, Karimi A, Yazdanirad S. Modeling the consequences and analyzing the dangers of carbon disulfide emissions using ALOHA software in an oil refinery. Journal of Health in the Field 2018; 6(3):1–9 (In Persian). https://doi.org/10.22037/jhf.v6i3.22012

17- Gholamnia R, Amirsalari Fard F, Khaloo Sh, Saeedi R. Identifying and prioritizing the main factors and components affecting health, safety and environment (HSE) motivation in the construction industry using fuzzy Delphi and network analysis process (ANP) methods. Journal of Health in the Field. 2022; 10(2):20–29 (In Persian). https://doi.org/10.22037/jhf.v10i2.39513

18- Reniers G, Cozzani V, editors. Domino effects in the process industries: Modelling, prevention and managing. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2013. https://doi.org/10.1016/C2011-0-00004-2

19- Sadeghi Yarandi M, Mahdinia M, Barazadeh J, Soltanzadeh A. The modeling of toxic consequence of ammonia release in industrial refrigerators. Journal of Health in the Field 2020; 8(3):18–31 (In Persian). https://doi.org/10.22037/jhf.v8i3.32508

این کار از مجوز Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0) تبعیت می‌کند.