Natural Disasters

Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir/

Prioritization of oil and gas facilities in urban areas using a hybrid risk assessment approach

Yasaman Ahesteh[1], Fereshteh Aslani[2]✉

1. M.A., Department of Landscape Architecture and Reconstruction, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: yasiaheste@gmail.com
2. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Landscape Architecture and Reconstruction, Faculty of Architecture and Urban Planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: f_aslani@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 19 February 2025
Received in revised form 10 March 2025
Accepted 25 March 2025
Available online 29 March 2025

Keywords:
Risk prioritization,
Oil and gas facilities,
PHAST simulation,
Expert survey,
Vulnerability reduction,
Urban resilience.

ABSTRACT

Objective: This study aims to develop an efficient, rapid, and practical method for prioritizing oil and gas facilities in urban areas to reduce vulnerability and enhance resilience against natural and human-induced hazards. The proposed four-stage framework enables accurate, swift risk assessment to facilitate effective decision-making in crisis management, urban planning, and the improvement of safety policies in the oil and gas industry.

Method: The proposed framework consists of four stages: 1) Identification of the type and quantity of hazardous materials in facilities through technical documents and field visits, 2) Analysis of past incidents using reliable reports, 3) Qualitative survey of 10 experts with over 15 years of experience, and 4) Simulation of critical scenarios using specialized PHAST software. This method combines retrospective (incident analysis) and prospective (scenario simulation) approaches. A case study was conducted on three facilities in Tehran's District 5, including two gas pressure-reduction stations (TBS) and one oil storage depot.

Results: The first stage revealed that the oil depot, storing 80,000 liters of gasoline with a low flash point, poses a higher risk than natural gas (5,000 cubic meters daily) at TBS stations. The second stage's analysis of past incidents indicated that oil depot accidents, due to thermal radiation and environmental impacts, have broader effects on urban areas. In contrast, gas station incidents are primarily confined to the facility itself. The third-stage expert survey showed that 83.75% of responses rated the oil depot as more hazardous due to the severity and extent of its consequences. The fourth stage's PHAST simulations confirmed that a gasoline tank explosion at the oil depot (with a 200-meter exclusion zone and a 400-meter heat radius) has a greater destructive impact than an explosion at a TBS station (80-meter exclusion zone and heat radius).

Conclusion: The oil depot, due to the type of materials, high storage volume, and potential for critical scenarios, requires a higher priority for safety measures. The proposed method, as a complement to HSE standards, helps optimize resource allocation to reduce risks and enhance the resilience of energy infrastructure against multiple threats, such as earthquakes, floods, and external attacks.

Cite this article: Ahesteh, Y., Aslani, F. (2025). Prioritization of oil and gas facilities in urban areas using a hybrid risk assessment approach. *Natural Disasters, 1* (1), 3-14. https://doi.org/10.22034/1.1.3

© The Author(s).
Publisher: Natural Disasters Research Institute (NDRI).
DOI: https://doi.org/10.22034/1.1.3

سوانح طبیعی
Homepage: https://disaster.ndri.ac.ir/

اولویت‌بندی تأسیسات نفت و گاز در مناطق شهری با به‌کارگیری رویکرد ترکیبی ارزیابی ریسک

یاسمن آهسته[۱]، فرشته اصلانی[۲]✉

۱. کارشناس ارشد، گروه معماری منظر و بازسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: yasiaheste@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه معماری منظر و بازسازی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: f_aslani@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۹

کلیدواژه‌ها:
اولویت‌بندی ریسک،
تأسیسات نفت و گاز،
شبیه‌سازی Phast،
نظرسنجی متخصصین،
کاهش آسیب‌پذیری،
تاب‌آوری شهری.

چکیده

هدف: این پژوهش با هدف توسعه روشی کارآمد، سریع و عملی برای اولویت‌بندی تأسیسات نفت و گاز در مناطق شهری به منظور کاهش آسیب‌پذیری و تقویت تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی و انسان‌ساخت انجام شده است. این روش با ارائه چارچوبی چهارمرحله‌ای، امکان ارزیابی دقیق و سریع ریسک‌ها را فراهم می‌کند تا تصمیم‌گیری‌های مؤثر در مدیریت بحران، برنامه‌ریزی شهری و بهبود سیاست‌های ایمنی صنعت نفت و گاز تسهیل شود.

روش پژوهش: چارچوب پیشنهادی شامل چهار مرحله است: ۱) شناسایی نوع و مقدار مواد خطرناک موجود در تأسیسات از طریق اسناد فنی و بازدیدهای میدانی، ۲) تحلیل حوادث گذشته با استفاده از گزارش‌های معتبر، ۳) نظرسنجی کیفی از ۱۰ متخصص با تجربه بیش از ۱۵ سال و ۴) شبیه‌سازی سناریوهای بحرانی با نرم‌افزار تخصصی PHAST. این روش ترکیبی از رویکردهای گذشته‌نگر (تحلیل حوادث) و آینده‌نگر (شبیه‌سازی سناریوها) است. مطالعه موردی روی سه تأسیسات در منطقه ۵ شهر تهران، شامل دو ایستگاه تقلیل فشار گاز (TBS) و یک انبار نفت، انجام شد.

یافته‌ها: مرحله اول نشان داد که انبار نفت با ذخیره ۸۰،۰۰۰ لیتر بنزین با نقطه اشتعال پایین، در مقایسه با گاز طبیعی (۵،۰۰۰ مترمکعب روزانه) در ایستگاه‌های TBS، پتانسیل خطر بیشتری دارد. تحلیل حوادث گذشته در مرحله دوم حاکی از آن بود که حوادث انبار نفت به دلیل تشعشع حرارتی و اثرات زیست‌محیطی، تأثیرات گسترده‌تری بر بافت شهری دارند، در حالی که حوادث ایستگاه‌های گاز عمدتاً محدود به تأسیسات داخلی هستند. نظرسنجی متخصصین در مرحله سوم نشان داد که ۸۳٫۷۵٪ پاسخ‌ها انبار نفت را به دلیل شدت و گستره پیامدها پرخطرتر ارزیابی کردند. شبیه‌سازی با PHAST در مرحله چهارم تأیید کرد که انفجار مخزن بنزین در انبار نفت (شعاع ممنوعه ۲۰۰ متر و شعاع گرم ۴۰۰ متر) اثرات مخرب‌تری نسبت به انفجار در ایستگاه TBS (شعاع ممنوعه و گرم ۸۰ متر) دارد.

نتیجه‌گیری: انبار نفت به دلیل نوع مواد، حجم ذخیره‌سازی بالا و احتمال وقوع سناریوهای بحرانی، اولویت بالاتری برای اقدامات ایمنی دارد. این روش پیشنهادی به‌عنوان مکملی برای استانداردهای HSE، به تخصیص بهینه منابع برای کاهش ریسک و افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های انرژی در برابر تهدیدات چندگانه مانند زلزله، سیل یا حملات خارجی کمک می‌کند.

استناد: آهسته، یاسمن؛ اصلانی، فرشته. (۱۴۰۴). اولویت‌بندی تأسیسات نفت و گاز در مناطق شهری با به‌کارگیری رویکرد ترکیبی ارزیابی ریسک. *سوانح طبیعی*، ۱ (۱)، ۳-۱۴. https://doi.org/10.22034/1.1.3

© نویسندگان.

ناشر: پژوهشکده سوانح طبیعی.

مقدمه

در دنیای پیچیده امروز، تأسیسات نفت و گاز به عنوان ستون‌های اصلی تأمین انرژی و توسعه اقتصادی عمل می‌کنند، اما هم‌زمان با ریسک‌های بالایی همراه هستند که می‌تواند منجر به حوادث فاجعه‌بار شود (Wu. Et al., 2017). اهمیت انجام این پژوهش از آنجا ناشی می‌شود که ایران به عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان نفت و گاز جهان، با چالش‌های متعددی روبرو است. همچنین، با توجه به حملات اخیر به برخی تأسیسات نفتی ایران و افزایش تهدیدات امنیتی، ضرورت ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های این تأسیسات دوچندان شده است. علاوه بر این، مخاطرات طبیعی مانند زلزله، سیل و فرونشست زمین که پتانسیل وقوع بالایی در مناطق مختلف ایران دارند، می‌توانند آسیب‌های جبران‌ناپذیری به این تأسیسات وارد کنند (Jabbari. Et al.,2021).

اولویت‌بندی تأسیسات نه تنها جان انسان‌ها و محیطزیست را حفظ می‌کند، بلکه به پایداری اقتصادی و اعتبار سازمانی کمک شایانی می‌رساند. با تمرکز بر تجربیاتی مانند حوادث گذشته در صنایع نفت ایران، این رویکرد می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری منجر شود. پژوهش‌های مشابه داخلی و خارجی متعددی در این زمینه انجام شده است. برای مثال، در پژوهشی در سطح بین‌المللی، با استفاده از روش فازی، به ارزیابی ایمنی خطوط لوله نفت و گاز پرداخته شده و ریسک‌ها بر اساس عوامل احتمالی اولویت‌بندی شده، اما تمرکز اصلی این مطالعه بر مدل‌های پیچیده کمی بود که اجرای آن‌ها زمان‌بر است (Wu. Et al., 2017).

همچنین، در پژوهشی دیگر یک مدل چند هدفه برای انتخاب بهینه اقدامات ایمنی در تأسیسات نفت و گاز ارائه شده که بر جنبه‌های محیطی تأکید داشت، اما فاقد شبیه‌سازی عملی حوادث بود (Baladeh et al., 2019). در سطح داخلی، مقاله‌ای با عنوان «شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های پروژه‌های بالادستی نفت و گاز در ایران با استفاده از قالب ساختار شکست ریسک (RBS) و تکنیک TOPSIS» رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس ساختار شکست پرداخت، اما کمتر به جنبه‌های انسان‌ساخت و طبیعی توجه کرد. همچنین، در پژوهشی دیگر، ارزیابی ریسک آتش‌سوزی و انفجار در خطوط لوله در عسلویه با روش سلسله مراتبی فازی انجام شد و ریسک‌های فنی آن اولویت‌بندی شد (Jabbari. Et al.,2021).

این پژوهش، آنچه را که در مطالعات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته، یعنی یک روش چهار مرحله‌ای ساده، سریع و ترکیبی که شامل شناسایی اولیه نوع و میزان مواد موجود، تحلیل حوادث گذشته، نظر متخصصین و شبیه‌سازی آینده‌نگرانه است، ارائه می‌دهد. برخلاف روش‌های پیچیده مانند TOPSIS یا فازی که نیاز به داده‌های گسترده و زمان طولانی دارند، این رویکرد عملی و قابل اجرا در زمان کم است و بر کاهش آسیب‌پذیری تمرکز دارد. علاوه بر این، با ادغام عوامل حساس کنونی کشور مانند حملات خارجی و مخاطرات طبیعی، نوآوری اصلی آن در فراهم کردن ابزاری برای بازسازی سریع و ایمن پس از حوادث نهفته است. این پژوهش با هدف پر کردن خلأ میان پیچیدگی مدل‌های ریاضی و نیاز به تصمیم‌گیری سریع، یک چارچوب میدانی و قابل پیاده‌سازی ارائه می‌دهد. این روش می‌تواند به عنوان مکملی برای استانداردهای موجود مانند استانداردهای HSE وزارت نفت عمل کند و به مدیران کمک کند تا ریسک‌ها را بر اساس اهمیت خطر اولویت‌بندی کنند.

یافته‌های این پژوهش که در منطقه ۵ شهر تهران بر روی دو ایستگاه تقلیل فشار گاز (TBS) و یک انبار نفت انجام شد، نشان داد که انبار نفت به دلیل وجود مواد پرخطر مانند بنزین با نقطه اشتعال پایین و حجم ذخیره‌سازی بالا (۸۰،۰۰۰ لیتر)، در مقایسه با گاز طبیعی در ایستگاه‌های TBS (۵،۰۰۰ مترمکعب روزانه)، پتانسیل خطر بیشتری دارد. تحلیل حوادث مشابه حاکی از آن بود که حوادث انبار نفت به دلیل انتشار تشعشع حرارتی و اثرات زیست‌محیطی، تأثیرات گسترده‌تری بر بافت همجوار دارند، در حالی که حوادث ایستگاه‌های گاز عمدتاً محدود به داخل تأسیسات هستند. نظرسنجی از ۱۰ متخصص با تجربه بیش از ۱۵ سال نشان داد که ۸۳٫۷۵٪ پاسخ‌ها انبار نفت را به دلیل شدت پیامدها و گستره تأثیر، پرخطرتر ارزیابی کردند. شبیه‌سازی با نرم‌افزار PHAST نیز تأیید کرد که سناریوی انفجار مخزن بنزین در انبار نفت، با شعاع ممنوعه ۲۰۰ متر و شعاع گرم ۴۰۰ متر، اثرات مخرب‌تری نسبت به انفجار در ایستگاه TBS با شعاع ممنوعه و گرم ۸۰ متر دارد.

پیشینه پژوهش

مبانی نظری این پژوهش بر پایه مفاهیم کلیدی مدیریت ریسک در صنایع نفت و گاز استوار است. مدیریت ریسک به‌عنوان

فرایندی سیستماتیک برای شناسایی، ارزیابی، کنترل و نظارت بر ریسک‌ها تعریف می‌شود که هدف آن کاهش آثار منفی و بهره‌برداری از فرصت‌ها در محیط‌های پیچیده صنعتی است (ISO 31000, 2018). در صنایع نفت و گاز، که با عملیات پرخطر مانند استخراج، حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی مواد قابل اشتعال سروکار دارند، مدیریت ریسک نقش حیاتی در حفظ ایمنی، پایداری محیطی و کارایی اقتصادی ایفا می‌کند. ریسک به‌عنوان ترکیبی از احتمال وقوع یک حادثه و شدت پیامدهای آن تعریف می‌شود که می‌تواند شامل خسارات مالی، جانی، محیطی باشد (Wu et al., 2017). ارزیابی ریسک، مرحله‌ای کلیدی در این فرایند است که شامل تحلیل کمی و کیفی ریسک‌ها برای تعیین سطح خطر آن‌ها بوده و اغلب با ابزارهایی مانند ماتریس ریسک یا روش‌های آماری انجام می‌گیرد (Askari et al., 2016).

در صنایع نفت و گاز ایران، ریسک اغلب با عوامل عملیاتی مانند نشت مواد خطرناک، شکست تجهیزات و اختلالات فرایندی همراه است و اولویت‌بندی آن به معنای رتبه‌بندی ریسک‌ها بر اساس معیارهایی مانند شدت، احتمال وقوع، گستره تأثیر و قابلیت کنترل است که به تصمیم‌گیری‌های استراتژیک کمک می‌کند. آسیب‌پذیری، درجه‌ای است که یک سیستم یا تأسیسات در برابر آسیب‌های خارجی حساس است و می‌تواند با عوامل ساختاری مانند موقعیت جغرافیایی، سن تجهیزات یا کمبود زیرساخت‌های ایمنی افزایش یابد (UNDRR, 2020). در مقابل، تاب‌آوری به توانایی سیستم برای مقاومت در برابر حوادث، جذب شوک‌ها، بازیابی سریع و تطابق با شرایط جدید اشاره دارد و شامل جنبه‌های فنی، سازمانی و اجتماعی می‌شود (Hollnagel et al., 2006). کاهش ریسک، استراتژی‌ای است که پس از ارزیابی، اقدامات پیشگیرانه مانند آموزش پرسنل، ارتقای تجهیزات و پیاده‌سازی پروتکل‌های ایمنی را برای کاهش آثار ریسک‌ها پیشنهاد می‌کند (Baladeh et al., 2019).

مخاطرات طبیعی شامل رویدادهایی مانند زلزله، که می‌تواند منجر به شکست سازه‌ها و نشت مواد سمی شود، سیل که آلودگی آب‌وخاک را افزایش می‌دهد و فرونشست زمین که پایداری تأسیسات را تهدید می‌کند، تعریف می‌شوند و در ایران به دلیل موقعیت تکتونیکی و آب‌وهوایی، احتمال رخداد بالایی دارند (Maleki et al., 2023). مخاطرات انسان‌ساخت، مانند خطاهای عملیاتی، خرابکاری، حملات خارجی یا غفلت‌های مدیریتی، به اقدامات یا غفلت‌های انسانی نسبت داده می‌شوند و می‌توانند با آموزش، سیستم‌های ایمنی پیشرفته و نظارت مداوم کاهش یابند. ریسک‌های عملیاتی در صنایع نفت و گاز، که شامل فرایندهای پیچیده مانند حفاری و پالایش است، اغلب به عواملی مانند فشار بالا، مواد قابل‌انفجار و محیط‌های پرخطر مربوط می‌شود و مدیریت آن‌ها نیازمند رویکردهای یکپارچه است (Jabbari et al., 2021).

ریسک‌های محیطی، که شامل آلودگی ناشی از نشت نفت یا گاز است، نه‌تنها به اکوسیستم آسیب می‌رساند بلکه هزینه‌های بلندمدت اقتصادی را تحمیل می‌کند و نیازمند ارزیابی زیست‌محیطی جامع است. اولویت‌بندی تأسیسات نفتی، فرایندی است که بر اساس ارزیابی این مخاطرات، تأسیسات را رتبه‌بندی می‌کند تا منابع ایمنی به‌طور بهینه تخصیص یابد و تمرکز بر نقاط پرریسک افزایش یابد (Baladeh et al., 2019).

روش‌شناسی پژوهش

روش پژوهش ترکیبی کیفی–کمی است و بر اساس چهار مرحله ساده طراحی شده که در زمان کم قابل‌اجرا است. این روش از تجربیات حرفه‌ای در زمینه ایمنی الهام گرفته شده و هدف آن فراهم کردن ابزاری عملی برای اولویت‌بندی است. مرحله اول، شناسایی نوع و میزان مواد خطرناک موجود در تأسیسات (مانند گاز طبیعی، بنزین، گازوئیل) و میزان آن‌ها از طریق بررسی اسناد فنی، نقشه‌ها و بازدیدهای میدانی انجام می‌گیرد. این مرحله پایه‌ای است و به درک اولیه از پتانسیل خطر کمک می‌کند. مرحله دوم، بررسی گزارش حوادث مشابه از منابع معتبر مانند کتابچه «درس‌آموزی از حوادث صنعت نفت» اداره کل HSE وزارت نفت، که به تحلیل علل ریشه‌ای و پیامدها می‌پردازد. مرحله سوم پژوهش، نظرسنجی از متخصصین با رویکرد کیفی با استفاده از پرسش‌نامه مقایسه‌ای که شامل شاخص‌های مختلفی مانند تهدیدات طبیعی، انسان‌ساخت و گستره حوادث است و از ۱۰ متخصص با تجربه بالای ۱۵ سال جمع‌آوری می‌شود که ارزیابی کیفی ریسک‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد و به شناسایی جنبه‌های نادیده‌گرفته‌شده کمک می‌کند.

برای اعتبارسنجی و صحت‌سنجی پرسش‌نامه، در مرحله نخست، سؤالات پرسش‌نامه بر اساس شاخص‌های علمی تدوین

گردید. سپس، نسخه اولیه پرسش‌نامه به‌صورت پایلوت در اختیار سه نفر از متخصصان قرار گرفت و با دریافت نظرات و پیشنهادهای آن‌ها، اصلاحات لازم اعمال شد. در ادامه، پرسش‌نامه نهایی میان ۱۰ نفر از کارشناسان حوزه‌های شهرسازی، مهندسی عمران، مدیریت بحران، HSE و ایمنی توزیع شد. روایی[1] و پایایی[2] پرسش‌نامه نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل آماری انجام‌شده نشان داد که نرخ ناسازگاری پاسخ‌ها در سطح قابل‌قبول بوده و خطای حداکثر ۵ درصد به دست آمد که از منظر علمی مطلوب تلقی می‌شود.

مرحله چهارم، شبیه‌سازی سناریوهای بحرانی با نرم‌افزار تخصصی PHAST است. نرم‌افزار PHAST یک ابزار تخصصی برای انجام تحلیل‌های لایه‌ای خطرات فرایندی و ارزیابی ریسک در صنایع شیمیایی و تولید است. این نرم‌افزار به مهندسان و تحلیلگران کمک می‌کند تا سناریوهای مختلف خطر، ازجمله نشت مواد شیمیایی، انفجار و آتش‌سوزی را شبیه‌سازی و ارزیابی کنند. این نرم‌افزار به کاربران اجازه می‌دهد که داده‌های مربوط به سناریوهای خاص مانند مقدار، نوع و شرایط محیطی مواد خطرناک را وارد کنند و بر اساس این اطلاعات، نتایج و پیش‌بینی‌های دقیقی را تولید کنند. این نرم‌افزار شامل ماژول‌های مختلفی برای مدل‌سازی نشت، پراکندگی مواد، آثار بر روی انسان و محیطزیست و ارزیابی گزینه‌های کاهش خطر است (TNO, 2016). این نرم‌افزار برای ارزیابی سناریوهای بدبینانه، داده‌هایی مانند جهت باد، شیب زمین و نوع مواد را در نظر می‌گیرد.

داده‌ها از نقشه‌های جغرافیایی، گزارش‌های رسمی و نظر متخصصین جمع‌آوری شده و تحلیل با ابزارهای آماری و نرم‌افزاری انجام گرفته است. در این پژوهش، روش گذشته‌نگرانه که درس‌آموزی از تجربیات گذشته است با رویکردهای آینده‌نگرانه یعنی شبیه‌سازی با نرم‌افزار PHAST ترکیب شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیبی از روش‌های ساده و ترکیبی، می‌تواند در زمان کم، اولویت‌بندی مؤثری ارائه دهد و به کاهش ریسک در صنایع پرخطر کمک کند. درنهایت، این چهارچوب نظری بر پایه تجربیات بنا شده و تأکید دارد که مدیریت ریسک نه‌تنها پیشگیری‌کننده است، بلکه به بازیابی سریع پس از حوادث نیز کمک می‌رساند.

روش پیشنهادی در این پژوهش به دلیل طراحی ساده، سرعت بالای اجرا و قابلیت پیاده‌سازی در بازه‌های زمانی کوتاه، به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری‌های فوری در مدیریت بحران تأسیسات نفت و گاز در مناطق شهری مطرح است. این روش با ارائه یک چهارچوب چهار مرحله‌ای شامل شناسایی مواد خطرناک، تحلیل حوادث گذشته، نظرسنجی از متخصصین و شبیه‌سازی سناریوهای بحرانی، امکان ارزیابی سریع ریسک‌ها را فراهم می‌کند و می‌تواند به مدیران در اولویت‌بندی اقدامات ایمنی کمک کند. بااین‌حال، این روش با محدودیت‌های قابل‌توجهی مواجه است که می‌تواند بر دقت و جامعیت نتایج تأثیر بگذارد. یکی از مهم‌ترین این محدودیت‌ها، وابستگی شدید به دسترسی به داده‌های دقیق و جامع از اسناد فنی و گزارش‌های حوادث گذشته است. در بسیاری از مناطق، به‌ویژه در کشورهای درحال‌توسعه مانند ایران، این داده‌ها ممکن است به‌صورت ناقص، پراکنده یا حتی غیرقابل‌دسترس باشند، که این موضوع می‌تواند فرایند تحلیل اولیه مواد خطرناک موجود در تأسیسات و بررسی حوادث مشابه را با چالش‌های جدی مواجه کند و درنتیجه، کیفیت ارزیابی ریسک را تحت تأثیر قرار دهد.

علاوه بر این، مرحله نظرسنجی کیفی از متخصصین، هرچند دیدگاه‌های ارزشمند و تخصصی را در فرایند اولویت‌بندی وارد می‌کند، با محدودیت‌هایی همراه است که می‌تواند اعتبار نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. این نظرسنجی‌ها ممکن است تحت تأثیر سوگیری‌های شناختی، مانند اثر هاله (که در آن قضاوت کلی یک متخصص تحت تأثیر یک ویژگی خاص قرار می‌گیرد) یا تمایل به اجماع در میان گروه‌های کوچک متخصصین، قرار گیرند. این سوگیری‌ها می‌توانند به انحراف در ارزیابی‌های کیفی منجر شوند، به‌ویژه زمانی که تعداد متخصصین شرکت‌کننده محدود باشد. چنین محدودیت‌هایی نیازمند توجه دقیق در طراحی پرسش‌نامه‌ها و انتخاب متخصصین با تنوع تجربی و دیدگاه‌های مختلف است تا اطمینان حاصل شود که نتایج به‌دست‌آمده تا حد امکان بی‌طرفانه و قابل‌اعتماد باشند.

اولویت‌بندی تأسیسات

در این بخش، اولویت‌بندی تأسیسات نفتی در منطقه ۵ شهر تهران به‌عنوان نمونه انجام می‌شود. منطقه ۵ در غرب و شمال غرب

1. Validity
2. Reliability

کلان‌شهر تهران واقع شده است. این منطقه از شمال به رشته‌کوه البرز، از جنوب به بزرگراه شهید لشگری و میدان آزادی، از شرق به بزرگراه اشرفی اصفهانی و بزرگراه محمدعلی جناح و منطقه ۲ و از غرب به منطقه ۲۲ شهر تهران محدود است. این منطقه دسترسی خوبی به شبکه بزرگراهی تهران دارد، به بزرگراه‌های همت، حکیم، آبشناسان، باکری، ستاری، شیخ فضل‌الله نوری، اشرفی اصفهانی و جناح دسترسی دارد.

در این منطقه دو ایستگاه تقلیل فشار گاز (TBS) و یک انبار نفت موردبررسی قرار گرفته که در ادامه در چهار مرحله اولویت‌بندی می‌شوند. باتوجه‌به شکل ۱، این روش چهار مرحله‌ای شامل شناسایی نوع و میزان مواد خطرناک موجود در تأسیسات، تحلیل گزارش حوادث مشابه، نظرسنجی متخصصین و شبیه‌سازی سناریوهای بحرانی با نرم‌افزار تخصصی PHAST است.

شکل ۱. مراحل اولویت‌بندی تأسیسات اولویت‌بندی تأسیسات نفت و گاز

شناسایی نوع و میزان مواد خطرناک موجود در تأسیسات

شناسایی نوع مواد موجود و میزان آن‌ها در تأسیسات نفت و گاز، به‌عنوان اولین مرحله از فرایند اولویت‌بندی، نقش کلیدی در ارزیابی ریسک ایفا می‌کند. این مرحله با هدف درک دقیق پتانسیل خطر مواد ذخیره‌شده و تأثیرات احتمالی آن‌ها بر ایمنی محیط هم‌جوار انجام می‌شود. شناسایی مواد شامل بررسی نوع مواد شیمیایی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها، حجم ذخیره‌سازی و شرایط نگهداری است که ازطریق اسناد فنی، نقشه‌های مهندسی و بازدیدهای میدانی گردآوری می‌شود. این اطلاعات پایه‌ای برای تحلیل ریسک‌های مرتبط با هر تأسیسات فراهم می‌آورد و به تعیین میزان خطرناک بودن هر ماده کمک می‌کند.

در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز (TBS) موردبررسی، گاز طبیعی با فشار بالا (تقریباً ۱۰۰۰ psi) ذخیره و منتقل می‌شود. حجم تقریبی گاز طبیعی در این ایستگاه‌ها روزانه حدود ۵۰۰۰ مترمکعب است که در سیستم‌های توزیع فشار بالا جریان دارد. گاز طبیعی به دلیل ویژگی‌های قابل اشتعال و پتانسیل انفجار در صورت نشت، ماده‌ای پرریسک محسوب می‌شود، اما سیستم‌های کنترلی مانند شیرهای قطع اضطراری و طراحی محصور ایستگاه‌ها، گستره تأثیرات احتمالی را محدود می‌کند. این اطلاعات بر اساس اسناد فنی ایستگاه‌ها و استانداردهای طراحی تأسیسات گازی استخراج شده است.

در مقابل، انبار نفت موردمطالعه دارای سه نوع فراورده نفتی شامل گازوئیل، نفت سفید و بنزین است. این انبار دارای ۵ مخزن گازوئیل با مجموع ظرفیت ۱۰۰۰۰۰ لیتر، ۳ مخزن نفت سفید با ظرفیت کلی ۶۰۰۰۰ لیتر و ۳ مخزن بنزین با ظرفیت مجموع ۸۰۰۰۰ لیتر است. هر یک از این مواد ویژگی‌های شیمیایی متفاوتی دارند که بر سطح ریسک آن‌ها تأثیر می‌گذارد. گازوئیل با نقطه اشتعال بالاتر، کمتر از بنزین مستعد انفجار است، اما در صورت نشت می‌تواند آلودگی زیست‌محیطی گسترده‌ای ایجاد کند. نفت سفید نیز خطرات مشابهی دارد، اما بنزین به دلیل نقطه اشتعال پایین و قابلیت اشتعال سریع، به‌عنوان پرریسک‌ترین ماده شناخته می‌شود. این ویژگی‌ها، همراه با حجم بالای ذخیره‌سازی، بنزین را به ماده‌ای با پتانسیل بالای خطر تبدیل کرده است که در صورت وقوع حادثه، می‌تواند منجر به آتش‌سوزی‌های وسیع و انفجارهای مخرب شود.

شناسایی این مواد بر اساس اسناد فنی، گزارش‌های عملیاتی و استانداردهای ذخیره‌سازی فراورده‌های نفتی انجام گرفت.

تحلیل نشان داد که بنزین موجود در مخازن انبار نفت، به دلیل ویژگی‌های شیمیایی (نقطه اشتعال پایین و سرعت انتشار شعله بالا) و حجم ذخیره‌سازی قابل‌توجه، بالاترین پتانسیل خطر را در مقایسه با گاز طبیعی در ایستگاه‌های TBS دارد. این امر انبار نفت را به تأسیساتی با اولویت بالا برای اقدامات ایمنی و مدیریت ریسک تبدیل می‌کند. درنتیجه، در این مرحله، انبار نفت به دلیل وجود بنزین و حجم ذخیره‌سازی آن، نسبت به ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز در منطقه، ازنظر ریسک اولویت بالاتری دارد و نیازمند توجه ویژه در برنامه‌ریزی‌های ایمنی است.

تحلیل گزارش حوادث مشابه

گزارش حوادث در این مطالعه به‌صورت خلاصه و بدون ذکر جزئیات محرمانه ارائه می‌شود تا امنیت تأسیسات حفظ گردد. تمرکز اصلی این بخش بر تحلیل حوادث گذشته و اولویت‌بندی تأسیسات نفتی بر اساس سطح خطر آن‌ها برای بافت هم‌جوار است. این رویکرد با هدف درس‌آموزی از حوادث و شناسایی نقاط ضعف در فرایندهای عملیاتی و ایمنی انجام می‌گیرد. گزارش‌ها از منابع معتبر مانند کتابچه «درس‌آموزی از حوادث صنعت نفت» استخراج شده‌اند و اطلاعات حساس مانند موقعیت دقیق تأسیسات حذف شده است.

در حادثه نخست، در یک ایستگاه تقلیل فشار گاز واقع در ورودی یک شهر، نشت گاز از فلنج‌های بخش کاهش فشار منجر به انفجار و آتش‌سوزی در اتاقک ایستگاه شد. اپراتور پس از باز کردن شیر ورودی، پس از حدود ۳۰ ثانیه متوجه نشت گاز شد و سریعاً شیر را بست. بااین‌حال، به دلیل تجمع ابر گازی در محوطه، هنگام خروج از اتاقک انفجار رخ داد. اپراتور با استفاده از کپسول آتش‌نشانی موجود، آتش را خاموش کرد، اما دچار سوختگی جزئی شد. علل اصلی این حادثه شامل در سرویس نبودن سیستم کنترل قطع جریان گاز و استفاده از تجهیزات غیراستاندارد بود. پیامدها شامل سوختگی درجه سوم دست و صورت اپراتور (که به‌صورت سرپایی درمان شد) و خسارت جزئی به عایق و رنگ مسیر فلنج‌ها بود.

حادثه دوم در یک انبار نفت رخ داد، جایی که تصمیم به تعمیرات اساسی و جایگزینی مخزن قدیمی بنزین با مخزن جدید گرفته شد. به دلیل نشتی جزئی در شیر ورودی مخزن قدیمی، مواد هیدروکربنی به‌صورت پراکنده در اطراف مخزن نشت کرد. در روز حادثه، مجوز جوشکاری صادر شد، اما به دلیل غفلت از مسیر تخلیه و عدم رعایت الزامات ایمنی، آتش‌سوزی وسیعی رخ داد. شعله‌ها تا شعاع ۱۰۰ متری مخزن گسترش یافت و اجازه حضور آتش‌نشانان را نداد. پس از دو ساعت تلاش چند ایستگاه آتش‌نشانی، آتش مهار شد. علل این حادثه شامل نشت مایعات هیدروکربنی، انجام عملیات گرم (جوشکاری) بدون رعایت ایمنی و ضعف در بازرسی فنی روزانه بود. پیامدها شامل سوختگی شدید دو نفر (بستری دوهفته‌ای)، شکستگی پای یک کارگر به دلیل پرش از داربست، خسارت عمده به محیطزیست و فضای سبز اطراف و آسیب به تجهیزات و اتصالات مخزن بود (Ministry of Petroleum, 2019).

تحلیل این دو حادثه نشان داد که حوادث انبار نفت آثار گسترده‌تری بر محیط هم‌جوار دارند. درحالی‌که حادثه ایستگاه TBS عمدتاً به خسارت‌های محدود و داخلی منجر شد، حادثه انبار نفت به دلیل انتشار تشعشع حرارتی و تأثیر بر کاربری‌های اطراف، پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی شدیدتری داشت. این تفاوت در گستره تأثیر، ضرورت اولویت‌بندی تأسیسات پرخطر مانند انبارهای نفت را در برنامه‌ریزی‌های ایمنی و کاهش ریسک برجسته می‌کند.

نظرسنجی از متخصصین با رویکرد کیفی

نظرسنجی از متخصصین به‌عنوان یکی از مراحل کلیدی در فرایند اولویت‌بندی تأسیسات نفت و گاز، با هدف دریافت دیدگاه‌های کارشناسی در خصوص میزان خطرناک بودن تأسیسات برای بافت شهری هم‌جوار انجام شد. این روش که بر اساس رویکردهای کیفی و پرسش‌نامه‌های مقایسه‌ای طراحی شده است، امکان ارزیابی جامع و چندجانبه ریسک‌ها را فراهم می‌کند. در این مطالعه، پرسش‌نامه‌ای مقایسه‌ای میان دو نوع تأسیسات موجود در منطقه ۵ شهر تهران، یعنی انبار نفت و ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز تهیه شد و از ۱۰ متخصص با حداقل ۱۵ سال تجربه در حوزه مهندسی نفت، ایمنی صنعتی و مدیریت ریسک نظرخواهی شد. این متخصصین از میان کارشناسان صنعت نفت، اساتید دانشگاهی و مشاوران HSE انتخاب شدند تا تنوع دیدگاه‌ها تضمین شود. پرسش‌نامه شامل ۱۶ سؤال بود که جنبه‌های مختلف ریسک، ازجمله تهدیدات طبیعی و انسان‌ساخت، گستره تأثیر حوادث و

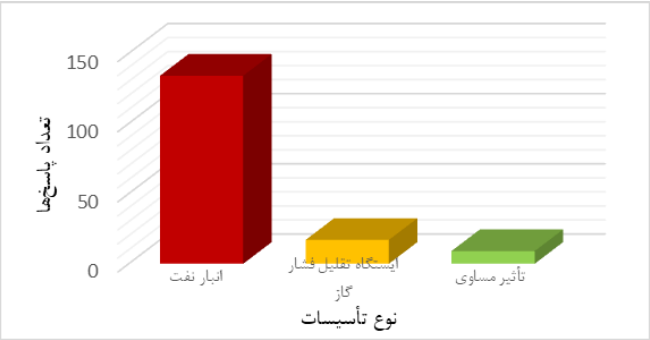
ملاحظات عملیاتی و سازمانی را پوشش می‌دهد.

جدول ۱، نتایج نظرسنجی را نشان می‌دهد که در آن پاسخ‌ها به سه دسته تقسیم شده‌اند: انبار نفت، ایستگاه تقلیل فشار گاز (TBS) و تأثیر مساوی. هر سؤال به‌گونه‌ای طراحی شده که اثرگذاری پیامدهای احتمالی حوادث بر بافت شهری هم‌جوار را مقایسه کند. معیارهای ارزیابی شامل عواملی مانند وسعت تأسیسات، فرایندهای کاری، تعداد نیروی انسانی، نوع تجهیزات و پتانسیل تأثیرگذاری بر محیط اطراف است. برای اطمینان از دقت، پرسش‌نامه پیش از توزیع نهایی در یک مرحله آزمایشی بررسی شده و سؤالات با مشورت متخصصین اصلاح شدند.

جدول ۱. نظرسنجی مقایسه‌ای در اولویت‌بندی تأسیسات نفت و گاز

ردیف	سؤال	انبار نفت (نفر)	ایستگاه تقلیل فشار گاز TBS (نفر)	تأثیر مساوی (نفر)
۱	بیشترین تهدیدات طبیعی محتمل باتوجه‌به وسعت و فرایندهای کاری	۱۰	–	–
۲	بیشترین تهدیدات انسان‌ساخت محتمل (خطای انسانی، تکنیکالی، سهوی، فرایندی) باتوجه‌به تعداد نیروی کاری، وسعت، فرایندهای کاری، تجهیزات و غیره	۱۰	–	–
۳	بیشترین تنوع/ انواع حوادث	۱۰	–	–
۴	گستره پیشرفت حوادث	۱۰	–	–
۵	امکان توسعه و تأثیرگذاری حوادث به خارج از فنس یا دیوار مجموعه	۱۰	–	–
۶	اهمیت خدمات‌دهی در تأمین انرژی سطح منطقه	۳	۶	۱
۷	میزان جمعیت مورد تأثیر حوادث در درون و بیرون مجموعه	۵	۴	۱
۸	زمان بیشتر برای مدیریت حوادث/ شرایط اضطراری	۱۰	–	–
۹	نیاز بیشتر به همکاری نهادها و سازمان‌ها در زمان بروز حوادث	۷	۲	۱
۱۰	زمان بازگشت به شرایط اولیه (بازیابی)– ظرفیت بازگشت‌پذیری	۱۰	–	–
۱۱	تأثیر حوادث در حفظ اعتبار سازمانی	۳	۳	۴
۱۲	میزان خسارت ایجادشده در درون و برون‌سازمانی در زمان بروز حوادث	۱۰	–	–
۱۳	تأثیرپذیری از حوادث طبیعی (زلزله، سیل، فرونشست و غیره)	۱۰	–	–
۱۴	زمان ساخت مجدد در صورت تخریب کامل	۱۰	–	–
۱۵	طبقه‌بندی امنیتی و محدوده مجاز دسترسی	۶	۲	۲
۱۶	با در نظر گرفتن همه جوانب فوق، به نظر شما کدام تأسیسات خطر بیشتری برای بافت شهری هم‌جوار آن است؟	۱۰	–	–
	جمع کل	۱۳۴	۱۷	۹

باتوجه‌به شکل ۲، نتایج نظرسنجی نشان داد که از مجموع ۱۶۰ پاسخ (۱۶ سؤال × ۱۰ متخصص)، ۱۳۴ پاسخ (معادل ۸۳/۷۵ درصد) انبار نفت را به‌عنوان تأسیسات پرخطرتر شناسایی کردند، درحالی‌که تنها ۱۷ پاسخ (معادل ۱۰/۶۲ درصد) ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز را پرخطرتر دانستند و ۹ پاسخ (معادل ۵/۶۳ درصد) معتقد بودند که هر دو تأسیسات خطر یکسانی دارند. این نتایج حاکی از اجماع قوی میان متخصصین است که انبار نفت به دلیل عواملی مانند حجم بالای مواد قابل اشتعال (به‌ویژه بنزین)، گستره وسیع‌تر تأثیر حوادث و پتانسیل خسارات زیست‌محیطی و انسانی، خطر بیشتری برای بافت شهری هم‌جوار دارد. به‌ویژه، سؤالات مرتبط با تهدیدات طبیعی و انسان‌ساخت، گستره پیشرفت حوادث و تأثیر بر جمعیت اطراف، همگی به اتفاق آرا انبار نفت را پرریسک‌تر ارزیابی کردند.



شکل ۲. نتایج نظرسنجی اولویت‌بندی تأسیسات نفت و گاز

تحلیل دقیق‌تر نتایج نشان می‌دهد که در سؤال ششم (اهمیت خدمات‌دهی در تأمین انرژی)، ایستگاه‌های TBS به دلیل نقش حیاتی در توزیع گاز، ازنظر برخی متخصصین اولویت بیشتری داشتند، اما این موضوع تأثیر محدودی بر ارزیابی کلی خطر داشت. همچنین، در سؤال یازدهم (تأثیر بر اعتبار سازمانی)، چهار متخصص معتقد بودند که هر دو تأسیسات اثر یکسانی دارند، که نشان‌دهنده اهمیت نسبی هر دو در زنجیره تأمین انرژی است. بااین‌حال، در سؤالات کلیدی مانند امکان توسعه حوادث به خارج از تأسیسات و میزان خسارات، انبار نفت به‌طور قاطع به‌عنوان پرخطرتر شناخته شد. این یافته‌ها بر ضرورت تمرکز بر اقدامات ایمنی و مدیریت ریسک در انبارهای نفت تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی‌های ایمنی باید باتوجه‌به ویژگی‌های خاص هر تأسیسات، مانند نوع مواد و موقعیت جغرافیایی، تنظیم شوند.

شبیه‌سازی سناریوهای بحرانی با نرم‌افزار تخصصی PHAST

برای انتخاب پرخطرترین تأسیسات ازنظر تأثیر بر بافت هم‌جوار، باید سناریوهای محتمل هر بخش به‌دقت بررسی شوند. در این راستا، باید سناریویی که بیشترین تأثیرگذاری را دارد، انتخاب گردد. در ایستگاه تقلیل فشار گاز، بدترین سناریو می‌تواند انفجار و آتش‌سوزی ناشی از نشت گاز درون ایستگاه باشد، به‌ویژه درصورتی‌که تمام سیستم‌های ایمنی به‌خوبی عمل نکنند یا در صورت وجود عملیات خرابکارانه که این وضعیت می‌تواند تأثیرات جدی بر محدوده اطراف ایستگاه داشته باشد. از سوی دیگر، در مورد انبار نفت، محصول بنزین به‌عنوان پرریسک‌ترین ماده شناخته می‌شود و بدترین سناریو در این تأسیسات انفجار و آتش‌سوزی مخزن بنزین است که عواقب ناگواری را برای محیط اطراف به همراه خواهد داشت که در این بخش سناریوها توسط نرم‌افزار شبیه‌سازی PHAST ارائه شده است. به‌منظور برآورد میزان آسیب‌پذیری در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، در ادامه آثار فشار ناشی از انفجار و تأثیرات تابش حرارتی موردبررسی قرار گرفته است.

جدول ۲، آثار فشار انفجار (به واحد psi و bar) و بر تأسیسات، تجهیزات و نیروی انسانی را نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، فشارهای مختلف انفجار تأثیرات متفاوتی دارند. در فشار ۱ psi (0.07 bar)، آستانه آسیب جانی مشاهده می‌شود. با افزایش فشار به ۲/۵ psi (0.18 bar)، احتمال ۱ درصد پارگی پرده گوش و آسیب به تابلوهای برق و ابزار دقیق وجود دارد. در فشار ۴/۵ psi (0.32 bar)، پایه‌های نگه‌دارنده لوله و ترانسفورماتورها دچار آسیب می‌شوند. فشار ۶ psi (0.42 bar) منجر به تخریب کامل ساختمان‌ها و آسیب به سیستم‌ها می‌شود. در فشار ۸ psi (0.56 bar)، ۷۰ درصد احتمال تلفات در فضای باز وجود دارد و ژنراتورها و الکتروموتورها آسیب می‌بینند. نهایتاً، در فشار ۱۲ psi (0.84 bar)، محرک‌های دیزل ژنراتور دچار خسارت می‌شوند. این جدول نشان‌دهنده افزایش شدت خسارت با افزایش فشار انفجار است.

جدول ۲. آثار فشار انفجار

Target Type	OP	psi	۱	۲/۵	۴/۵	۶	۸	۱۲
		bar	۰/۰۷	۰/۱۸	۰/۳۲	۰/۴۲	۰/۵۶	۰/۸۴
آستانه آسیب جانی			X					
یک درصد احتمال پارگی پرده گوش				X				
تابلو برق و ابزار دقیق				X				
پایه نگه‌دارنده لوله و ترانسفورماتور					X			
۷۰ درصد احتمال تلفات در فضای باز						X		
تخریب کامل ساختمان‌ها						X		
فیلتر و سیستم‌ها						X		
ژنراتور و الکتروموتور							X	
محرک دیزل ژنراتور								X

جدول ۳، آثار شدت‌های مختلف تابش حرارتی (بر حسب kW/m^2) ناشی از آتش‌سوزی را ارائه می‌دهد. شدت تابش ۳۷/۵ kW/m^2 باعث آسیب به تجهیزات فرایندی می‌شود. در شدت ۱۲/۵ kW/m^2، حداقل انرژی لازم برای اشتعال چوب و ذوب شدن لوله‌های پلاستیکی فراهم می‌شود. شدت ۹/۵ kW/m^2 پس از ۸ ثانیه آستانه درد را ایجاد کرده و پس از ۲۰ ثانیه سوختگی درجه دوم به دنبال دارد. شدت ۴ kW/m^2 در صورت عدم دسترسی به پناهگاه تا ۲۰ ثانیه، در افراد ایجاد درد می‌کند و ممکن است منجر به سوختگی درجه دوم و تاول زدن پوست شود، اما میزان مرگ‌ومیر صفر است. درنهایت، شدت ۱/۶ kW/m^2 حتی

در مواجهه طولانی‌مدت هیچ‌گونه ناراحتی ایجاد نمی‌کند. این جدول نشان‌دهنده رابطه مستقیم شدت تابش حرارتی با میزان خسارت به تجهیزات و سلامت انسان است.

جدول ۳. آثار تابش حرارتی

تأثیر مشاهده‌شده	شدت تابش حرارتی (kW/m2)
آسیب به تجهیزات فرایندی	۳۷/۵
حداقل انرژی لازم برای اشتعال چوب، ذوب شدن لوله‌های پلاستیکی	۱۲/۵
آستانه درد پس از ۸ ثانیه؛ سوختگی درجه دوم پس از ۲۰ ثانیه	۹/۵
ایجاد درد در افراد درصورتی‌که نتوانند تا ۲۰ ثانیه به پناه برسند احتمال تاول زدن پوست (سوختگی درجه دوم)؛ بدون مرگ‌ومیر	۴
هیچ ناراحتی (حتی در مدت‌زمان طولانی) ایجاد نمی‌کند	۱/۶

در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز، بدترین سناریو ممکن، انفجار و آتش‌سوزی است که می‌تواند به دلایل مختلفی بروز کند. برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار PHAST نیاز به اطلاعات و مشخصاتی مثل ماده شیمیایی، دمای محیط، سرعت باد، شیب زمین و غیره است که در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ٤. مشخصات سناریو ایستگاه تقلیل فشار گاز

پارامتر	توضیح	مقدار نمونه	واحد
ماده شیمیایی	نوع گاز اصلی در ایستگاه (معمولاً متان به‌عنوان نماینده گاز طبیعی)	متان (Methane)	-
حجم گاز نشتی	مقدار تقریبی گاز تجمع یافته قبل از انفجار (بر اساس زمان کوتاه نشتی)	۵۰	کیلوگرم
فشار گاز	فشار ورودی گاز در ایستگاه تقلیل فشار	۱۷/۲	بار (bar)
دمای محیط	دمای متوسط محیط جغرافیایی	۲۵	درجه سانتی‌گراد (°C)
سرعت باد	سرعت باد غالب در منطقه	۳	متر بر ثانیه (m/s)
جهت باد	جهت غالب باد برای شبیه‌سازی پراکندگی	غرب به شرق	-
کلاس پایداری جوی	کلاس پایداری اتمسفر (برای مدل‌سازی پراکندگی)	D (خنثی)	-
شیب زمین	شیب متوسط زمین اطراف ایستگاه	۰ (مسطح)	درجه
نوع حادثه	مدل سناریو در PHAST	انفجار بخار ابر با آتش‌سوزی بعدی	-
زمان نشتی	مدت‌زمان نشتی تا بسته شدن شیرها	۳۰	ثانیه
مقاومت سازه	مقاومت دیواره‌های اتاقک ایستگاه	بتن تقویت‌شده (محدود به تخریب داخلی)	-
شعاع شبیه‌سازی	حداکثر شعاع محاسبه‌شده برای آسیب	۲۰۰	متر
مدل حرارتی	مدل برای محاسبه تشعشع حرارتی	Jet Fire یا Flash Fire	-
عوامل ایمنی	فرض عدم عملکرد کامل سیستم‌های ایمنی (برای بدترین سناریو)	عدم بسته شدن شیرها	-

باتوجه‌به سیستم‌های ایمنی موجود در اتاقک، در صورت نشت گاز، شیرهای مسیر نشتی به‌سرعت بسته می‌شوند و این امر باعث کاهش میزان گاز نشتی می‌شود؛ اما باتوجه‌به زمان کوتاه نشتی و حجم گاز تجمع‌یافته، سناریوی انفجار ایستگاه، هرچند با کمترین احتمال، به‌عنوان بدترین سناریو شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است که باتوجه‌به فشار گاز و مقاومت دیواره‌های اتاق ایستگاه، میزان تخریب معمولاً بیش از تجهیزات و ساختمان ایستگاه نخواهد بود. در این سناریو باتوجه‌به شکل ۳، شعاع آسیب ممنوعه (قرمز) و شعاع منطقه گرم (سبز) هر دو ۸۰ متر و شعاع ثانوی (سرد)، ۱۶۰ متر است که به دلیل استحکام دیواره‌ها، شعاع محدوده ممنوعه (قرمز) و منطقه گرم (سبز) برابر شده است. این نقشه، باتوجه‌به اطلاعات موجود و مشخص کردن داده‌هایی مانند جهت باد، شیب زمین، منطقه جغرافیایی، نوع و میزان مواد شیمیایی موجود در این تأسیسات و غیره شبیه‌سازی شده است.

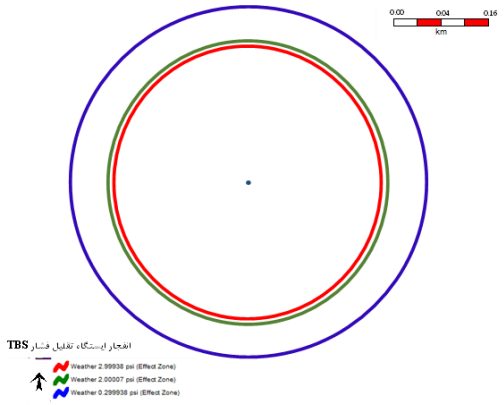
انبار نفت موردبررسی، دارای یازده مخزن برای ذخیره‌سازی سه نوع فراورده نفتی شامل گازوئیل، نفت سفید و بنزین است. بدترین سناریو در خصوص مخازن بنزین، انفجار مخزن ذخیره‌سازی آن به علت عواملی چون بمب‌گذاری، نشت شدید و همچنین آتش‌سوزی است که ممکن است ناشی از عوامل طبیعی یا انسان‌ساخت باشد. انفجار مخزن به دو پدیده خطرناک منجر می‌شود.

نخست، موج انفجار که می‌تواند خرابی‌های جدی را بر روی ساختمان‌ها و تأسیسات هم‌جوار ایجاد کند و دوم، تشعشع حرارتی که در صورت افزایش به بیش از ۴ KW/m^2، می‌تواند منجر به سوختگی انسان‌ها و در شدت‌های بالاتر، به مرگ آن‌ها منجر شود. برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار PHAST نیاز به اطلاعات و مشخصاتی مثل ماده شیمیایی، دمای محیط، سرعت باد، شیب زمین و غیره است که در جدول ۵ ارائه شده است.

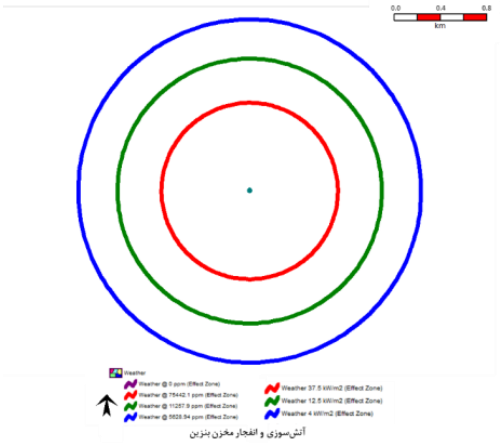
در شکل ۴، شعاع ممنوعه (قرمز) این تأسیسات ۲۰۰ متر است که می‌تواند به خطر جدی برای جان انسان‌ها و آسیب‌های جبران‌ناپذیری منجر شود. شعاع ۲۰۰ تا ۴۰۰ متر به‌عنوان شعاع گرم (سبز) در نظر گرفته می‌شود که امکان آسیب به افراد و تأسیسات در آن وجود دارد. همچنین، شعاع سرد (آبی) ۴۰۰ تا ۸۰۰ متر مناسب برای استقرار گروه‌های امداد و نجات محسوب می‌شود. تشعشع حرارتی نیز در شعاع ممنوعه و شعاع گرم بالای $4KW/m^2$ بوده و می‌تواند منجر به سوختگی و مرگ در انسان‌ها شود.

جدول ۵. مشخصات سناریوی انبار نفت

پارامتر	توضیح	مقدار نمونه	واحد
ماده شیمیایی	نوع فراورده نفتی پرریسک (بنزین)	بنزین (Gasoline)	-
حجم مخزن	ظرفیت تقریبی مخزن بنزین	۲۵۰۰۰	مترمکعب (m^3)
دمای ذخیره‌سازی	دمای متوسط ماده در مخزن	۲۰	درجه سانتی‌گراد (°C)
فشار مخزن	فشار داخلی مخزن (معمولاً اتمسفری)	۱	بار (bar)
سرعت باد	سرعت باد غالب در منطقه	۳	متر بر ثانیه (m/s)
جهت باد	جهت غالب باد برای شبیه‌سازی پراکندگی	غرب به شرق	-
کلاس پایداری جوی	کلاس پایداری اتمسفر (برای مدل‌سازی پراکندگی)	F (پایدار)	-
شیب زمین	شیب متوسط زمین اطراف انبار	۲	درجه
نوع حادثه	مدل سناریو در PHAST	انفجار ابر بخار با آتش‌سوزی استخری (Pool Fire)	-
نرخ نشتی	نرخ تقریبی نشتی شدید منجر به انفجار	۱۰۰	کیلوگرم بر ثانیه (kg/s)
منبع احتراق	فرض وجود عوامل طبیعی یا انسان‌ساخت (مانند بمب‌گذاری)	احتراق فوری	-
شعاع شبیه‌سازی	حداکثر شعاع محاسبه‌شده برای آسیب	۱۰۰۰	متر
آستانه تشعشع حرارتی	حداقل شدت حرارتی برای آسیب (سوختگی یا مرگ)	۴	کیلووات بر مترمربع (kW/m^2)
تعداد مخازن	تعداد مخازن بنزین در انبار (برای ارزیابی زنجیره‌ای)	۳ مخزن از ۱۱ مخزن	-



شکل ۳. سناریو انفجار ایستگاه تقلیل فشار گاز با نرم‌افزار PHAST



شکل ٤. آتش‌سوزی و انفجار مخزن بنزین انبار نفت با نرم‌افزار PHAST

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای دو سناریو نشان می‌دهد که بدترین سناریو مربوط به مخزن انبارش بنزین، آثار مخرب‌تری بر روی تأسیسات هم‌جوار نسبت به بدترین سناریو ایستگاه تقلیل فشار گاز دارد. این سناریو ازنظر شدت وقوع، تأثیرات بیشتری را به همراه می‌آورد. در حادثه مربوط به مخزن بنزین، هر دو پدیده انفجاری و تشعشع حرارتی به شکل قابل‌توجهی شدیدتر از سناریوی ایستگاه تقلیل فشار گاز هستند؛ بنابراین، نیاز به تدابیر حفاظتی و ایمنی بیشتری برای نگهداری و

مدیریت مخازن بنزین در انبار نفت احساس می‌شود. درنهایت، جدول ۶ خلاصه‌ای از نتایج مراحل اولویت‌بندی این تأسیسات را نشان می‌دهد.

جدول ٦. نتایج مراحل اولویت‌بندی تأسیسات نفت و گاز

ردیف	روش مقایسه	نتیجه مقایسه
۱	شناسایی نوع و میزان مواد خطرناک موجود در تأسیسات	انبار نفت به دلیل وجود بنزین با نقطه اشتعال پایین و حجم ذخیره‌سازی بالا (۸۰،۰۰۰ لیتر)، در مقایسه با گاز طبیعی در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز (۵،۰۰۰ مترمکعب روزانه)، پتانسیل خطر بیشتری دارد و ازنظر ریسک اولویت بالاتری برای اقدامات ایمنی دارد.
۲	تحلیل گزارش حوادث مشابه	باتوجه‌به نتیجه دو حادثه، مشخص شد که تأثیرات مخرب حادثه ایستگاه گاز بیشتر باعث تخریب خود ایستگاه می‌شود و اثر کمی بر محیط هم‌جوار می‌گذارد، درحالی‌که حادثه انبار نفت به دلیل انتشار تشعشع حرارتی و تأثیرات زیست‌محیطی، آثار گسترده‌تری بر بافت هم‌جوار دارد.
۳	نظرسنجی از متخصصین با رویکرد کیفی	در نظرسنجی انجام‌شده میان متخصصین، از مجموع ۱۶۰ مورد، ۱۳۴ نفر (معادل ۸۳/۷۵ درصد) انبار نفت را پرخطرتر ارزیابی کردند. همچنین ۹ نفر (حدود ۵/۶۲ درصد) معتقد بودند که خطر هر دو تأسیسات برابر است. در مقابل، تنها ۱۷ نفر (معادل ۱۰/۶۲ درصد) ایستگاه تقلیل فشار گاز را پرخطرتر دانستند.
۴	شبیه‌سازی سناریوهای بحرانی با نرم‌افزار تخصصی PHAST	در شبیه‌سازی نرم‌افزاری با نرم‌افزار PHAST، مشخص شد دامنه تأثیرگذاری حوادث انبار نفت (شعاع ممنوعه ۲۰۰ متر و شعاع گرم ۴۰۰ متر) به‌مراتب بیشتر از ایستگاه تقلیل فشار گاز (شعاع ممنوعه و گرم ۸۰ متر) است و آثار انفجار و تشعشع حرارتی بنزین شدت و گستره بیشتری دارد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارائه روشی ساده، ترکیبی و کاربردی برای اولویت‌بندی تأسیسات نفت و گاز در مناطق شهری، توانست نشان دهد که با استفاده از یک چهارچوب چهار مرحله‌ای شامل شناسایی مواد خطرناک، تحلیل حوادث گذشته، نظرسنجی متخصصین و شبیه‌سازی سناریوهای بحرانی با نرم‌افزار PHAST، می‌توان در مدت‌زمان کوتاه، ارزیابی مؤثری از ریسک تأسیسات حیاتی انجام داد. یافته‌های مطالعه موردی روی دو ایستگاه تقلیل فشار گاز و یک انبار نفت در منطقه ۵ شهر تهران، به‌وضوح نشان داد که انبار نفت به دلیل وجود حجم زیاد بنزین با ویژگی‌های فیزیکی–شیمیایی پرخطر، در تمامی مراحل ارزیابی (ازجمله گستره اثر، شدت پیامدها و احتمال وقوع) از سطح ریسک بالاتری برخوردار است. تحلیل حوادث گذشته نیز مؤید آن بود که تأثیرات مخرب حوادث در انبار نفت نه‌تنها به خود تأسیسات بلکه به محیط اطراف نیز گسترش می‌یابد، درحالی‌که حوادث ایستگاه‌های گاز، بیشتر محدود به تأسیسات داخلی هستند. همچنین، نتایج نظرسنجی از متخصصین نشان داد که اکثریت قاطع (بیش از ۸۰ درصد) انبار نفت را پرخطرتر ارزیابی کردند. شبیه‌سازی با PHAST نیز شعاع تأثیر گسترده‌تر و شدت بالاتر آثار تشعشع حرارتی و موج انفجار در سناریوی انفجار مخزن بنزین را تأیید کرد.

چهارچوب پیشنهادی این پژوهش ابزاری کارآمد برای مدیران شهری، مسئولان ایمنی صنعت نفت و نهادهای تصمیم‌گیر در حوزه مدیریت بحران فراهم می‌کند. این روش با امکان ارزیابی سریع و ساده ریسک‌ها، به تخصیص بهینه منابع برای اقدامات پیشگیرانه و کاهش آسیب‌پذیری تأسیسات کمک می‌کند. برای مثال، تمرکز بر ارتقای سیستم‌های ایمنی در انبارهای نفت، مانند نصب حسگرهای پیشرفته نشت‌یابی و تقویت دیواره‌های مقاوم در برابر انفجار، می‌تواند خطرات را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. همچنین، این چهارچوب می‌تواند به‌عنوان مکملی برای استانداردهای موجود HSE در وزارت نفت مورداستفاده قرار گیرد و با ارائه اولویت‌بندی دقیق، به برنامه‌ریزی شهری و مدیریت بحران در مناطق پرخطر کمک کند. این روش به‌ویژه در شرایط اضطراری، مانند تهدیدات امنیتی یا سوانح طبیعی، امکان تصمیم‌گیری سریع و مؤثر را برای حفاظت از جان شهروندان و محیط‌زیست فراهم می‌آورد.

برای توسعه این پژوهش، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آتی بر بررسی دقیق‌تر محدودیت‌های روش پیشنهادی، ازجمله دسترسی به داده‌های جامع و کاهش سوگیری‌های شناختی در نظرسنجی متخصصین، تمرکز کنند. همچنین، گسترش مطالعه به سایر مناطق شهری با ویژگی‌های جغرافیایی و جمعیتی متفاوت می‌تواند به تعمیم‌پذیری نتایج کمک کند. استفاده از روش‌های پیشرفته‌تر شبیه‌سازی، مانند مدل‌های دینامیکی مبتنی بر هوش مصنوعی و ادغام داده‌های بلادرنگ از حسگرهای تأسیسات می‌تواند دقت ارزیابی‌ها را افزایش دهد. علاوه بر این، بررسی تأثیرات بلندمدت حوادث بر اکوسیستم‌های شهری و تحلیل هزینه–فایده اقدامات ایمنی پیشنهادی، می‌تواند به تدوین سیاست‌های جامع‌تر در مدیریت ریسک تأسیسات نفت و گاز منجر شود.

References

Askari, M.M., Sadeghi Shahdani, M., Seiflou, S. (2016). Identifying and prioritizing upstream oil and gas projects in Iran Based on Risk Breakdown Structure (RBS) and TOPSIS Technique. qjerp, 2016; 24 (78) :57-96 (in Persian).

Eslami Baladeh, A., Cheraghi, M., Khakzad, N. (2019). A multi-objective model to select sustainability actions in the oil and gas industry. *Journal of Process Safety and Environmental Protection*, Vol.125, 71-82.

Hollnagel, E., Woods, D., Leveson, N. G. (2006). Resilience Engineering: Concepts and Precepts. Ashgate Publishing.

ISO 31000. (2018). Risk management — Guidelines. International Organization for Standardization.

Jabbari, M., Gholamnia, R., Esmaeili, R., Kouhpaee, H., Pourtaghi, Gh. (2021). Risk assessment of fire, explosion and release of toxic gas of Siri–Assalouyeh sour gas pipeline using fuzzy analytical hierarchy process. Journal of Heliyon, Vol.7.

Maleki, M. H., Zare Bahnamiri, M. J., Ghotbi Vayeghan, B., Ali Adeli, O., Hasankhani, F. (2023). Identifying and Prioritizing Risks Related to Time Delays in Oil and Gas Projects. Petroleum Business Review, Vol.7.

TNO. (2016). PHAST User Manual.

UNDRR. (2020). Disaster Risk Reduction Terminology. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

Wu, J., Zhou, R., Xu, Sh., Wu, Zh. (2017). Safety assessment of pipelines using Bayesian network and fuzzy logic. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.46.

Ministry of Petroleum, General Directorate of HSE. (2019). Lessons Learned from Oil Industry Incidents. Tehran: Ministry of Petroleum Publications (in Persian).

DOI: https://doi.org/10.22034/1.1.3