JOHE
Journal of Occupational Hygiene Engineering
J Occup Hyg Eng, 2022; 9(4): 267-276. Doi: 10.52547/johe.9.4.267
https://johe.umsha.ac.ir
UMSHA Press

Original Article

Assessment and Management of Health and Safety Risks in the Transportation of Hazardous Materials Using TRRI and Modeling with PHAST and Pathfinder in Tehran (Case Study: Gasoline Transportation)

Iraj Mohammadfam[1], Saeed Ghahremani Namin[2], Shahram Mahmoudi[3], Meisam Rostami[4], Hasti Borgheipour[5,*]

[1] Department of Ergonomics, Health in Emergency and Disaster Research Center, University of Social Welfare and Rehabilitation Science, Tehran, Iran
[2] Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[3] Department of HSE, MAPNA Company, Tehran, Iran
[4] Department of HSEE, MAHAN Sirjan Company, Sirjan, Iran
[5] Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Article history:
Received: 16 April 2022
Revised: 07 May 2022
Accepted: 09 May 2022
ePublished: 25 Dec 2022

***Corresponding author:** Hasti Borgheipour, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Email: hasti_bo@yahoo.com

Abstract

Background and Objective: The transportation of dangerous materials can lead to catastrophic accidents in metropolises. Assessment of the risk of transporting such materials and determination of the consequences can prevent possible accidents and consequences.
Materials and Methods: In this regard, the TRRI method was used to estimate the quantitative risk index. Assessment and analysis of determinantal damages resulting from accidents of sudden discharge of such hazardous materials were performed by PHAST software. Furthermore, Pathfinder software was used to simulate individual reactions, and manage conditions and their distance from the accident zone.
Results: Assessing the risk of transportation of jet fuel was estimated to be 144 using the TRRI method. Analysis of the consequences indicated that the sudden discharge of fuel in the first six months of the year, the consequence of the explosion of a jet fuel tanker up to a radius of 120 meters cause irreparable damage to the surrounding buildings. The findings of this simulation showed that the pool fire scenario of the people who are exposed to 12.5 kW/m2 radiation in the first and second half of the year in the sudden discharge scenario prevents the person from first or second-degree burns.
Conclusion: Considering the significant road transport of hazardous materials and the high severity of the consequences of possible accidents in the intracity transportation of jet fuel, designing a time of safe transportation of materials along with determining safer routes can reduce the risk of such incidents.

Keywords: Accident, Jet Fuel, Pathfinder, PHAST, Risk, TRRI

Please cite this article as follows: Mohammadfam I, Ghahremani Namin S, Mahmoudi Sh, Rostami M, Borgheipour H. Assessment and Management of Health and Safety Risks in the Transportation of Hazardous Materials Using TRRI and Modeling with PHAST and Pathfinder in Tehran (Case Study: Gasoline Transportation). *J Occup Hyg Eng.* 2022; 9(4): 267-276. DOI: 10.52547/johe.9.4.267

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2024-08-27]
[DOI: 10.52547/johe.9.4.267]

Copyright © 2022 Journal of Occupational Hygiene Engineering. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

JOHE
مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای
دوره ۹، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، صفحات: ۲۷۶-۲۶۷
https://johe.umsha.ac.ir
UMSHA Press

مقاله پژوهشی

ارزیابی و مدیریت خطرات ایمنی و بهداشتی حمل‌ونقل مواد خطرناک و مدل‌سازی پیامد با استفاده از روش و نرم‌افزارهای TRRI، PHAST و Pathfinder در شهر تهران (مطالعه موردی: سوخت جت)

ایرج محمدفام[۱]، سعید قهرمانی نمین[۲]، شهرام محمودی[۳]، میثم رستمی[۴]، هستی برقعی‌پور[۵،*]

[۱] گروه ارگونومی، مرکز تحقیقات سلامت در حوادث و بلایا، دانشگاه علوم توان‌بخشی و سلامت اجتماعی، تهران، ایران
[۲] گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
[۳] واحد مدیریت ایمنی بهداشت و محیط‌زیست، شرکت مپنا، تهران، ایران
[۴] واحد مدیریت ایمنی بهداشت و محیط‌زیست، شرکت ماهان سیرجان، سیرجان، ایران
[۵] گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷
تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۹
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

* **نویسنده مسئول:** هستی برقعی‌پور، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
ایمیل: hasti_bo@yahoo.com

چکیده

سابقه و هدف: حمل‌ونقل کالاهای خطرناک در شهرهای بزرگ ممکن است به بروز حوادث فاجعه‌باری منجر شود. ارزیابی خطر حمل‌ونقل این مواد و تعیین پیامدهای حاصل از حوادث احتمالی آن‌ها به پیشگیری از حوادث احتمالی و مدیریت مناسب‌تر پیامدهای آن کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه ابتدا برای برآورد شاخص کمّی خطر از روش TRRI استفاده شد. ارزیابی و تحلیل خسارت ناشی از حوادث تخلیه ناگهانی ماده خطرناک بررسی‌شده با نرم‌افزار PHAST انجام شد. برای شبیه‌سازی واکنش افراد و میزان دور شدن آن‌ها از ناحیه حادثه و مدیریت شرایط، نرم‌افزار Pathfinder به کار گرفته شد.

یافته‌ها: ارزیابی خطر حمل‌ونقل سوخت جت با استفاده از روش TRRI، خطر آن را ۱۴۴ معادل سطح خطرناک برآورد کرد. تحلیل پیامد نشان داد در سناریوی تخلیه ناگهانی سوخت در شش ماهه اول سال، پیامد انفجار تانکر سوخت جت تا شعاع ۱۲۰ متری امکان ایجاد خسارات غیر قابل جبران را به ساختمان‌های پیرامون در پی دارد. یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی نشان داد در سناریوی آتش استخری، افرادی که در سناریوی تخلیه ناگهانی در نیمه اول و دوم سال کمتر از ۲۰ ثانیه در معرض تشعشع ۱۲/۵ کیلووات بر مترمربع قرار می‌گیرند، دچار سوختگی درجه یک و دو نخواهند شد.

نتیجه‌گیری: با توجه به حمل‌ونقل قابل توجه جاده‌ای مواد خطرناک و شدید بودن پیامد حوادث احتمالی در حمل‌ونقل درون‌شهری سوخت جت، طراحی زمان حمل‌ونقل ایمن مواد به همراه تعیین مسیرهای ایمن‌تر از خطر این حوادث خواهد کاست.

واژگان کلیدی: حادثه، خطر، سوخت جت، TRRI، PHAST، Pathfinder

استناد: محمدفام، ایرج؛ قهرمانی نمین، سعید؛ محمودی، شهرام؛ رستمی، میثم؛ برقعی پور، هستی. ارزیابی و مدیریت خطرات ایمنی و بهداشتی حمل‌ونقل مواد خطرناک و مدل‌سازی پیامد با استفاده از روش و نرم‌افزارهای TRRI، PHAST و Pathfinder در شهر تهران (مطالعه موردی: سوخت جت). مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای، زمستان ۱۴۰۱؛۹(۴): ۲۷۶-۲۶۷.

مقدمه

روند رشد فزاینده توسعه فناوری، استفاده از فرایندهای تولیدی مختلف و به تبع آن مواد اولیه گوناگون را ایجاب می‌کند. ازآنجاکه بخش قابل توجهی از مواد استفاده‌شده در بخش‌های مختلف صنعتی، تولیدی، خدماتی و غیره ماهیت خطرناک (قابل اشتعال، قابل انفجار، سمی، رادیواکتیو و اکسیدکننده) دارند، ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و استفاده از این مواد به برنامه‌ریزی ویژه نیاز دارد [۱].

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2024-08-27]
[DOI: 10.52547/johe.9.4.267]

بیش از ۹۰ درصد از جابه‌جایی کالا در کشور از طریق حمل‌ونقل جاده‌ای انجام می‌شود. بخشی از محصولات جابه‌جاشده از طریق جاده جزء کالاهای خطرناک محسوب می‌شوند که به دلیل ماهیت خاص آن‌ها لازم است تحت تدابیر ویژه‌ای جابه‌جا شوند. مواد خطرناک به موادی گفته می‌شود که برای انسان، حیوان یا محیط‌زیست مضر هستند. بر اساس طبقه‌بندی سازمان ملل متحد، این مواد در ۹ گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند که عموماً در انواع مایعات و جامدات قابل اشتعال، گازها و مواد خورنده هستند. معمول‌ترین این مواد شامل حامل‌های سوختی و گازهای گندزدای آب هستند که با تانکر حمل می‌شوند. بر اساس آمار سازمان ملل، حدود نیمی از تمام بارهایی که حمل می‌شوند، در گروه مواد خطرناک قرار می‌گیرند؛ زیرا تقریباً در همه موارد محل تولید مواد خطرناک با محل مصرف آن متفاوت است [۲].

از طرف دیگر، سال‌هاست که حوادث جاده‌ای به یکی از مهم‌ترین چالش‌ها و مشکلات اصلی کشور تبدیل شده است. حوادث حمل‌ونقل مواد خطرناک ممکن است در مبدا، مقصد یا در طول مسیر رخ دهد. در بیشتر موارد حوادثی که در زمان حمل مواد شیمیایی خطرناک روی می‌دهد، پتانسیل زیادی برای تبدیل شدن به یک فاجعه دارد. بر همین اساس، از این رویدادها به‌عنوان حوادثی با احتمال کم- پیامد زیاد (Low Probability-High Consequence) نام می‌برند. عواقب حوادث کالاهای خطرناک شامل مرگ‌ومیر، آسیب‌های جسمی، تخلیه ساکنان منطقه، خسارات مالی به اموال و دارایی‌های دولتی و خصوصی، فرسایش محیطی و اختلالات ترافیکی است. علاوه بر این، زمان رسیدن نیروهای امدادی و تخلیه افراد تحت تأثیر یک پارامتر کلیدی در تدوین برنامه تخلیه ایمن مکان‌های بزرگ و پرازدحام در شرایط اضطراری است. علت این موضوع کاهش چشمگیر خسارات جانی و اقتصادی به دلیل تخلیه سریع و ایمن در حداقل زمان ممکن است. یکی از خطرناک‌ترین مواد خطرناک که به صورت جاده‌ای بین محل تولید یا انبار فرودگاه‌ها جابه‌جا می‌شود، سوخت جت است [۳]. این ماده پتانسیل زیادی برای اشتعال و انفجار دارد و در صورت بروز حادثه حین انتقال به پیامدهای فاجعه‌باری منتهی می‌شود.

با توجه به مطالب یادشده، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی خطر حمل‌ونقل جاده‌ای سوخت جت، ارزیابی پیامدهای ناشی از نشت و تخلیه آن تحت سناریوهای مختلف و شبیه‌سازی تخلیه افراد تحت تأثیر در شرایط اضطراری است.

در این پروژه بنزین LL۱۰۰ بررسی شد که مصارف آن در فرودگاه‌های آزادی و پیام بیشتر و در فرودگاه مهرآباد کمتر است. این نوع بنزین مرغوب‌ترین بنزین هواپیمایی تولیدی کشور است که روزانه به میزان یک میلیون لیتر در پالایشگاه آبادان تولید و از طریق خط لوله به انبار ری و از آنجا به فرودگاه‌های مطالعه‌شده منتقل می‌شود. این نوع بنزین مایع شفاف آبی با بوی تند است که از برش میانی برج تقطیر در پالایشگاه به دست می‌آید و بخار آن از هوا سنگین‌تر است و در سطوح کف زمین جمع می‌شود. بخار بنزین با هوا مخلوط قابل انفجار ایجاد می‌کند. این سوخت بسیار قابل اشتعال است.

روش کار

این تحقیق در سال ۱۴۰۰ در شهر تهران انجام شد. در این پژوهش ابتدا از طریق مطالعات میدانی، بررسی اسناد و مصاحبه‌های غیرساختارمند، مواردی مثل مسیرهای حمل‌ونقل مواد شیمیایی مطالعه‌شده، ظرفیت خودروهای حامل مواد خطرناک، بررسی شرایط آب‌وهوایی منطقه، بررسی دستورالعمل‌های ایمنی حمل‌ونقل تردد، مسافت و نزدیکی به مناطق مسکونی در مسیر حمل‌ونقل، بررسی میزان حوادث اتفاق‌افتاده، بررسی دستورالعمل‌های و استانداردهای ایمنی شناسایی شد. مسیرهایی که در آن حمل‌ونقل مواد خطرناک انجام می‌شود، عموماً شرایطی دارند که دخالت زیادی در میزان خطر حوادث حمل‌ونقل این مواد دارد. در این مطالعه برای ارزیابی خطر متغیرهای مسیر حمل‌ونقل، اماکن مسکونی پیرامون، نزدیکی به زیرساخت‌های شهری، اماکن عمومی و ساختمان‌های استراتژیک در نظر گرفته شد. در گام بعد با توجه به اطلاعات در دسترس، برای اندازه‌گیری و ارزیابی خطر کمّی حمل‌ونقل مواد خطرناک از شاخص درجه‌بندی خطر حمل‌ونقل (Transportation Risk Rating Index: TRRI) استفاده شد [۴].

سپس با تعیین میانگین وزنی شاخص رتبه‌بندی خطر (Weighted Average Risk Rating Index: WARRI) با استفاده از کد[۵] NFPA704، عامل فاصله از محل مسکونی (D)، وزن مولکولی یا عامل توزیع (MW/DF) و عامل مقدار ماده شیمیایی حمل‌شده با استفاده از روش ارزیابی شاخص خطر حمل‌ونقل مواد شیمیایی (TRRI)، خطر حمل‌ونقل مواد شیمیایی از حاصل‌ضرب چهار معیار به شرح زیر تعیین شد [۶]:

۱. محاسبه شاخص درجه‌بندی میانگین وزنی خطر مواد شیمیایی: برای برآورد این عامل از میانگین وزنی هرکدام از درجه‌بندی‌های ارائه‌شده در لوزی خطر مؤسسه ملی حفاظت در برابر حریق آمریکا (NFPA) به شکل زیر استفاده شد:

$$Wi = \frac{\text{مقدار درجه‌بندی ویژه لوزی خطر}}{\text{مجموع درجه همه خطرات}}$$

$$WARRI = \Sigma(\text{درجه‌بندی ویژه لوزی خطر}) \times Wi$$

۲. میزان بار حمل‌شده توسط تانکر: این عامل تابع متغیرهایی همچون دما و فشار بود و از صفر تا ۴ به شکل کمتر از ۱۰ کیلوگرم (درجه صفر)، ۱۰ تا ۹۹ کیلوگرم (درجه ۱)، ۱۰۰ تا ۹۹۹ کیلوگرم (درجه ۲)، ۱۰۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلوگرم (درجه ۳) و بیشتر از ۵۰۰۰ کیلوگرم (درجه ۴) طبقه‌بندی می‌شود.

۳. فاصله مناطق مسکونی: هرچقدر فاصله تانکرهای حامل مواد

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2024-08-27]

[DOI: 10.52547/johe.9.4.267]

شیمیایی از اولین منطقه مسکونی کمتر باشد، خطر بیشتری برای افراد مستقر در آن منطقه خواهد داشت. این عامل از صفر تا ۴ به‌صورت بیشتر از ۱۰ هزار متـر (درجـه صـفر)، ۵۰۰۱ تا ۱۰ هزار متر (درجه ۱)، ۱۵۰۱ تا ۵ هزار متر (درجه ۲)، ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متر (درجه ۳) و کمتر از ۵۰۰ متر (درجه ۴) تقسیم‌بندی می‌شود.

۴. وزن مولکولی یا عامل توزیع: میزان انتشار بخار به‌صورت غیرمستقیم تابع چگالی است که آن نیز تـابع وزن مولکولی ماده است؛ بنابراین، هرچه وزن مولکولی ماده بیشتر باشد، سطح خطر حمل‌ونقل مواد نیز بیشتر خواهد شد. این عامل از صفر تا ۴ به‌صورت کمتر از ۱۵ گرم بر مول (درجه صـفر)، ۱۵ تـا ۲۲ گرم بر مول (درجه ۱)،۲۳ تا ۳۳ گرم بر مول (درجه ۲)،۳۴ تا ۴۵ گرم بر مول (درجه ۳) و بیشتر از ۴۵ گرم بر مول (درجه ۴) طبقه‌بندی می‌شود.

درنهایت شاخص خطر حمل‌ونقل خطرنـاک در چهار سـطح کم (۰ تا ۶۴)، متوسط (۶۵ تـا ۱۲۸)، خطرناک (۱۲۹ تا ۱۹۲) و بسیار خطرناک (۱۹۳ تا ۲۵۶) طبقه‌بندی شد.

در مرحله بعد برای شبیه‌سازی پیامد سناریوهای حوادث احتمالی در مسیر حمل‌ونقل از نرم‌افزار PHAST نسخه ۸/۲۲/۱۷/۰ استفاده شد. در این خصوص سناریوهای محتمل (تصادفات جاده‌ای) مسیرها مشخص و با تعیین اطلاعات مختلف ورودی مانند وضعیت‌های مختلف آب‌وهوایی، شب یا روز بودن زمان بروز حادثه، تعیین نشت و انفجار یا آتش‌سوزی، پیامدهای مختلف حوادث محتمل حمل‌ونقل مواد شیمیایی تعیین شد. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار PHAST پیامدهای احتمالی نظیر میزان آسیب‌های انسانی در اثر میزان شار حرارتی بر اساس کیلووات بر مترمربع در سناریوهای آتش‌سوزی و همچنین میزان افزایش فشار در سناریوهای انفجار و آسیب‌های انسانی حاصل از آن تعیین شد. در مرحله نهایی با توجه به میزان ترافیک، زمان و نحوه اقدام واکنش در برابر شرایط اضطراری توسط سازمان آتش‌نشانی و اورژانس شرایط با استفاده از نرم‌افزار Pathfinder شبیه‌سازی شد.

در این ابزار (نرم‌افزار) ابتـدا شرایطی برگزیده شد که تا حد امکان به واقعیت نزدیک باشد و با در نظر گرفتن ویژگـی‌هـای نفرات پیرامون حادثه و رفتـار آن‌هـا، تخمینی از مدت زمانی ارائه دهد که چقدر طول می‌کشد تا این افراد در مسیرهای پیاده‌رو، داخل خودرو، داخل ساختمان‌ها پس از دیدن حادثه یا شنیدن آن، خودرو یا ساختمان را بعد از انجـام کارهـای اولیـه بـرای واکنش (زمان تأخیر) تخلیه کنند. در این نرم‌فزار به‌منظور تعیین مدل‌های تخلیه به اطلاعات در زمینه ویژگـی‌هـای ساکنان، نفرات سوار در خودرو، اقدامات آن‌ها در طول تخلیـه، تـأخیری کـه ممکـن است رخ دهد و سرعت حرکت انواع مختلـف نفرات نیـاز بود. برخی از داده‌های بررسی‌شده در این نرم‌افزار عبارت بود از:

الف- زمان پیش از حرکت: افراد در فرایند آگاه شدن از وضعیت اضطراری فوراً واکنش نشان نمی‌دهند. لذا زمان اتلاف بین زمانی که برای اولین بار درباره حادثه به مردم هشدار داده می‌شوند و زمانی که شروع به ترک محل می‌کنند، شامل زمانی است که افراد برای تخلیه آماده می‌شوند.

ب- سرعت راه رفتن: تعیین سرعت حرکت افراد روی انواع مختلفی از سطوح، بالا و پایین رفتن از پله‌ها، عبور از موانع ترافیکی، عبور از مسیر جوی‌ها و عبور از میان خودروها تحت درجات مختلف ازدحام و برای افراد با طیف وسیعی از توانایی فیزیکی در نظر گرفته می‌شود.

ج- ویژگی‌های کاربران فضا: انواع ویژگی‌های خاص افرادی که در طول تخلیه درگیر می‌شوند، زمان ترک را تحت تأثیر قرار می‌دهد که شامل سن، جنس، درجه‌های آموزش، آشنایی و غیره است و برای محاسبه تفاوت در واکنش‌ها میان افراد مختلف کاربرد دارد.

د- اقدامات در طول تخلیه: مجموعه اقدامات کاربران است که زمان تخلیه افراد را از محل استقرار آن‌ها افزایش می‌دهد.

هـ- اثر انسداد در مسیر تخلیه: عواملی که موجب تأخیر یا انسداد مسیرهای تخلیه می‌شود.

و- تصمیم برای انتخاب خروجی‌ها: تصمیماتی که مسیرهای تخلیه را تعیین می‌کند و زمان تخلیه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتایج

ارزیابی خطر حمل‌ونقل سوخت جت با استفاده از روش TRRI و داده‌های جدول ۱، خطر آن را معادل ۱۴۴ برآورد کرد که در طبقه خطرناک قرار می‌گیرد. با توجه به تردد کامیون‌های حامل مخازن سوخت هواپیما در شهر تهران برای ارائه خدمات، تعیین پیامدهای احتمالی حوادث مرتبط با این ماده خطرناک ضرورت بیشتری پیدا می‌کند.

جدول۱: جدول تعیین خطر حمل‌ونقل مواد شیمیایی خطرناک در شهر تهران

عامل خطر	سوخت هواپیما
میانگین وزنی شاخص رتبه‌بندی خطر (WARRI)	۲/۲۵
عامل فاصله از محل مسکونی (D)	۴
وزن مولکولی یا عامل توزیع (MW/DF)	۴
عامل مقدار ماده حمل‌ونقل‌شده (Q)	۴
خطر حمل‌ونقل مواد شیمیایی (TRI)	۱۴۴

برای مدل‌سازی پیامدها با بررسی سناریوهای مختلف و در نظر گرفتن عوامل اثرگذار بر حوادث احتمالی سناریوی زیر انتخاب شد.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2024-08-27]

[DOI: 10.52547/johe.9.4.267]

جدول ۲: سناریو منتخب برای آنالیز پیامد و ۳پیامدهای احتمالی

ماده شیمیایی	سناریو	مقدار نشتی (اینچ)	دمای نگهداری (درجه سانتی‌گراد)	فشار تانکر (barge)	ارتفاع نشتی (متر)	ظرفیت تانکر (مترمکعب)	مقدار ماده شیمیایی (مترمکعب)
تخلیه ناگهانی	--------	دمای محیط	صفر	۱/۵	۱۹	۱۵/۲	
سناریوی محتمل	انفجار (Explosion)	آتش استخری (Pool Fire)	آتش لحظه‌ای (Flash Fire)	انتشار (Despertion)			
تخلیه ناگهانی	ندارد	✓	✓	✓	-----		

در ادامه کار، تمام مسیرهای حمل مواد شیمیایی خطرناک در شهر تهران از محل بارگیری تا تخلیه بررسی شد. بر اساس پارامترهای وجود مراکز خدمات شهری (بیمارستان‌ها، هتل‌ها، مدارس، ادارات دولتی، ارگان‌های نظامی و غیره)، ابنیه، تمرکز جمعیت و زمان پاسخگویی مراکز آتش‌نشانی به حوادث، محل‌های بروز سناریوهای بررسی‌شده تعیین و محل بروز سناریوها مطابق جدول ۳ مشخص شد.

نتایج مدل‌سازی سناریوی منتخب در جدول ۴ خلاصه شده است.

در سناریوی تخلیه ناگهانی سوخت هواپیما در اثر تصادف منجر به پاره شدن تانکر یا واژگونی آن در شش ماهه اول سال، پیامد انفجار تانکر (بخارات بنزین) تا شعاع ۱۲۰ متری امکان ایجاد خسارات غیر قابل جبران به ساختمان‌های پیرامون و پارگی پرده گوش افراد در محدوده مذکور است و تا شعاع ۱۵۰ متری امکان ایجاد خسارات قابل جبران به ساختمان‌ها، تخریب سازه‌های سبک، شکستن شیشه پنجره‌ها است. در این خصوص ساختمان‌های مسکونی نیروی هوایی، ایستگاه BRT، مراکز تجاری و همچنین مراکز صنعتی (پمپ بنزین، نمایندگی خدمات خودرویی، گاراژهای حمل‌ونقل باری و غیره) در شعاع ۱۴۰ متری محل وقوع سناریو هستند. پیامد آتش ناگهانی تا شعاع ۱۷/۵ متری که خودروهای داخل خیابان، اماکن تجاری، ایستگاه BRT و معابر را دربردارد و موجب تلفات جانی می‌شود (شکل ۱). پیامد آتش استخری تا شعاع ۳۳ متری شدت تشعشع ۱۲/۵ کیلووات بر مترمربع را ایجاد می‌کند که سبب ایجاد سوختگی درجه یک و دو در افرادی می‌شود که حداقل ۲۰ ثانیه در معرض آن قرار می‌گیرند. همچنین این شدت تشعشع حداقل انرژی لازم را برای ایجاد جرقه در مواد چوبی و ذوب مواد پلاستیکی در پی دارد و خودروها، ایستگاه BRT، مراکز تجاری و صنعتی و عابران خیابان در پیرامون این محدوده قرار دارند. در این راستا درصد تلفات جانی در شعاع ۳۱ متری ۱۰ درصد و در شعاع ۳۹ متری ۱ درصد است (شکل ۲).

جدول ۳: اطلاعات فنی سناریوها

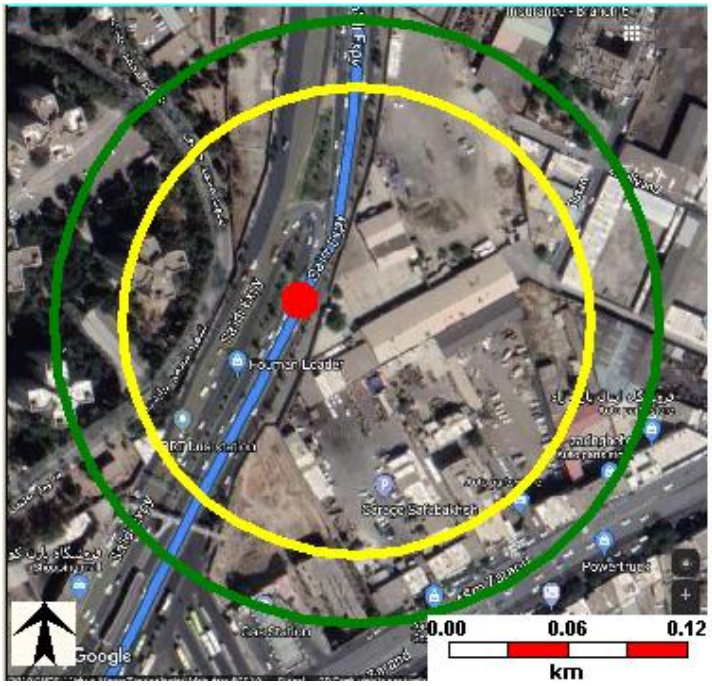
نام ماده خطرناک	محل بارگیری و تخلیه	مکان‌های مهم	فاصله تا ایستگاه آتش‌نشانی (متر)	ملاحظات
سوخت هواپیما	انبار ری - فرودگاه مهرآباد	ساختمان‌های مسکونی نیروی هوایی، ایستگاه BRT، مراکز تجاری و صنعتی (پمپ بنزین، نمایندگی خدمات خودرویی، گاراژهای حمل‌ونقل باری و غیره	۱۵۰۰	۱- مسیر راه‌آهن تهران - تبریز ۲- اماکن (تجاری) با بافت قدیمی

جدول ۴: تایج تحلیل سناریو منتخب در دو نیمه سال

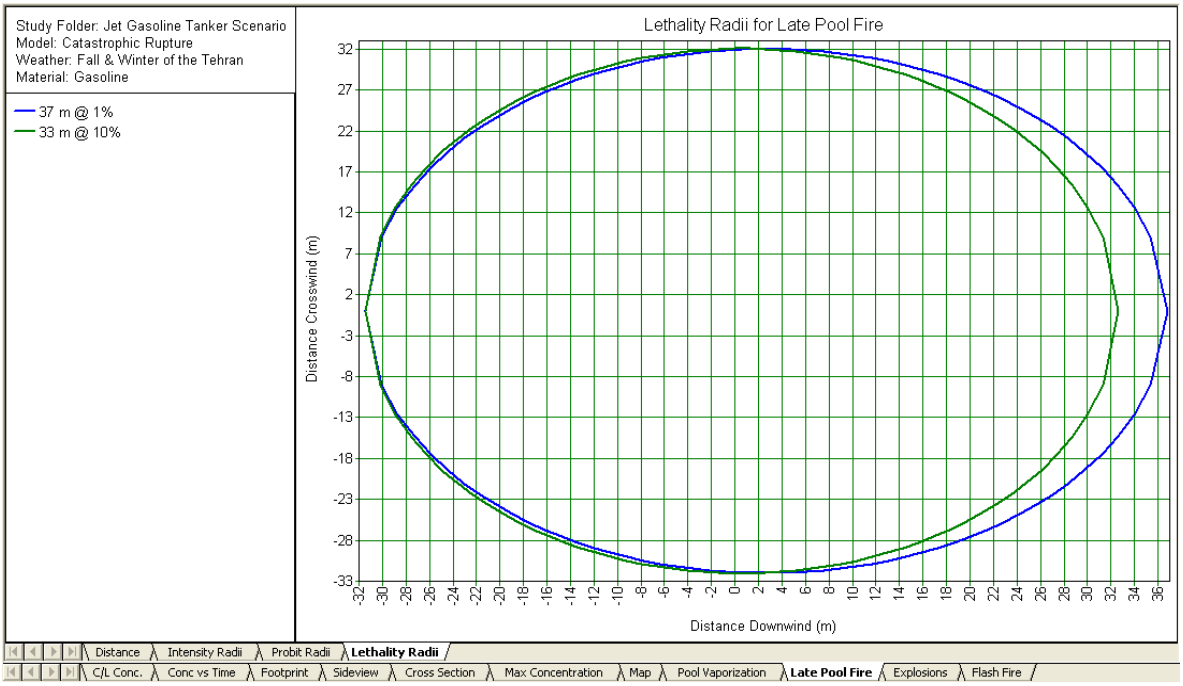
تخلیه ناگهانی (Catastrophic Rupture)				
	آب‌وهوای نیمه اول سال		آب‌وهوای نیمه دوم سال	
پیامد	تراز اول (متر)	تراز دوم (متر)	تراز اول (متر)	تراز دوم (متر)
انفجار (Explosion)	120 m @ 0.2068 bar	150 m @ 0.1379 bar	148 m @ 0.2068 bar	175 m @ 0.1379 bar
آتش لحظه‌ای (Flash Fire)	17.5 m @ 100% LFL	27.5 m @ 50% LFL	25 m @ 100% LFL	35 m @ 50% LFL
آتش استخری (Pool Fire)	33 m @ 12.5Kw/m^2	87 m @ 4 Kw/m^2	33 m @ 12.5Kw/m^2	77 m @ 4 Kw/m^2
درصد تلفات احتمالی	10 % @ 31 m	1 % @ 39 m	10 % @ 33 m	1 % @ 37 m

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2024-08-27]

[DOI: 10.52547/johe.9.4.267]



شکل۱: توزیع ترازهای موج انفجار پس از وقوع سناریوی تخلیه ناگهانی در نیمه دوم سال



شکل۲: درصد تلفات انسانی مناطق محصور در آتش استخری پس از وقوع سناریوی تخلیه ناگهانی در نیمه دوم سال

در اثر وقوع سناریوی منتخب در نیمه دوم سال، پیامد انفجار تانکر (بخارات سوخت جت) تا شعاع ۱۴۸ متری امکان ایجاد خسارات غیر قابل جبران به ساختمان‌های پیرامون و پارگی پرده گوش افراد در محدوده مذکور است و تا شعاع ۱۷۵ متری امکان ایجاد خسارات قابل جبران به ساختمان‌ها، تخریب سازه‌های سبک، شکستن شیشه پنجره‌ها است. در این خصوص ساختمان‌های مسکونی نیروی هوایی، ایستگاه BRT، مراکز تجاری و صنعتی (پمپ بنزین، نمایندگی خدمات خودرویی، گاراژهای حمل‌ونقل باری و غیره) در حریم شعاع ۱۴۸ متری محل وقوع سناریو هستند.

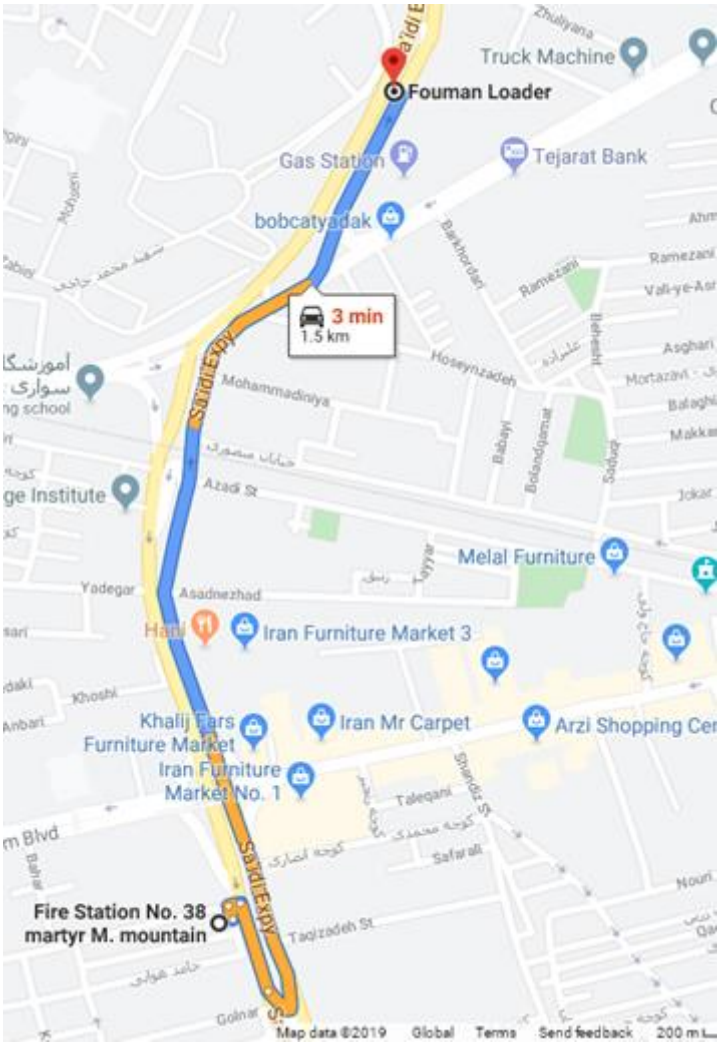
پیامد آتش ناگهانی تا شعاع ۳۵ متری که خودروهای داخل خیابان، اماکن تجاری، ایستگاه BRT و معابر را دربردارد، موجب تلفات جانی می‌شود. پیامد آتش استخری تا شعاع ۳۳ متری شدت تشعشع ۱۲/۵ کیلووات بر مترمربع را ایجاد می‌کند که سبب ایجاد سوختگی درجه یک و دو در افرادی می‌شود که حداقل ۲۰ ثانیه در معرض آن قرار می‌گیرند. همچنین این شدت تشعشع حداقل انرژی لازم را برای ایجاد جرقه در مواد چوبی و ذوب مواد پلاستیکی

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2024-08-27]
[DOI: 10.52547/johe.9.4.267]

دارد و خودروها، ایستگاه BRT، مراکز تجاری و صنعتی و عابران خیابان پیرامون این محدوده قرار دارند. در این راستا درصد تلفات جانی در شعاع ۳۳ متری ۱۰ درصد و در شعاع ۳۷ متری ۱ درصد است.

سازمان آتش‌نشانی تهران حوزه‌های عملیاتی هریک از ایستگاه‌های خود را مشخص کرده است که مطابق با اطلاعات سایت آتش‌نشانی و خدمات ایمنی شهرداری تهران، ارائه خدمات اضطراری در محل تحلیل سناریو در بزرگراه آیت‌الله سعیدی به عهده ایستگاه شماره ۳۸ آتش‌نشانی(چهارراه یافت آباد) است. فاصله تقریبی برآوردشده از ایستگاه شماره ۳۸ آتش‌نشانی تا محل بروز سناریوی منتخب حدود ۱۵۰۰ متر است (شکل ۳) که طی بررسی‌های انجام‌شده در زمان‌های مختلف در طول هفته و زمان‌های مختلف طی روز، میانگین سرعت حرکت خودروهای امدادی از ایستگاه آتش‌نشانی شماره ۳۸ حدود ۳۰ کیلومتر بر ساعت برآورد شد که با این سرعت حدود ۳ دقیقه تا محل بروز سناریوی منتخب زمان صرف می‌شود، ولی به دلیل عبور مسیر یادشده از خط آهن تهران – تبریز، به زمان برآوردشده ۳ دقیقه نیز اضافه می‌شود که در بدترین شرایط، زمان رسیدن گروه آتش‌نشانی به محل بروز حادثه در سناریوی مذکور ۶ دقیقه است. لذا تمام اقدامات مورد نیاز در محل بروز سناریو بعد از گذشت زمان مذکور آغاز می‌شود.

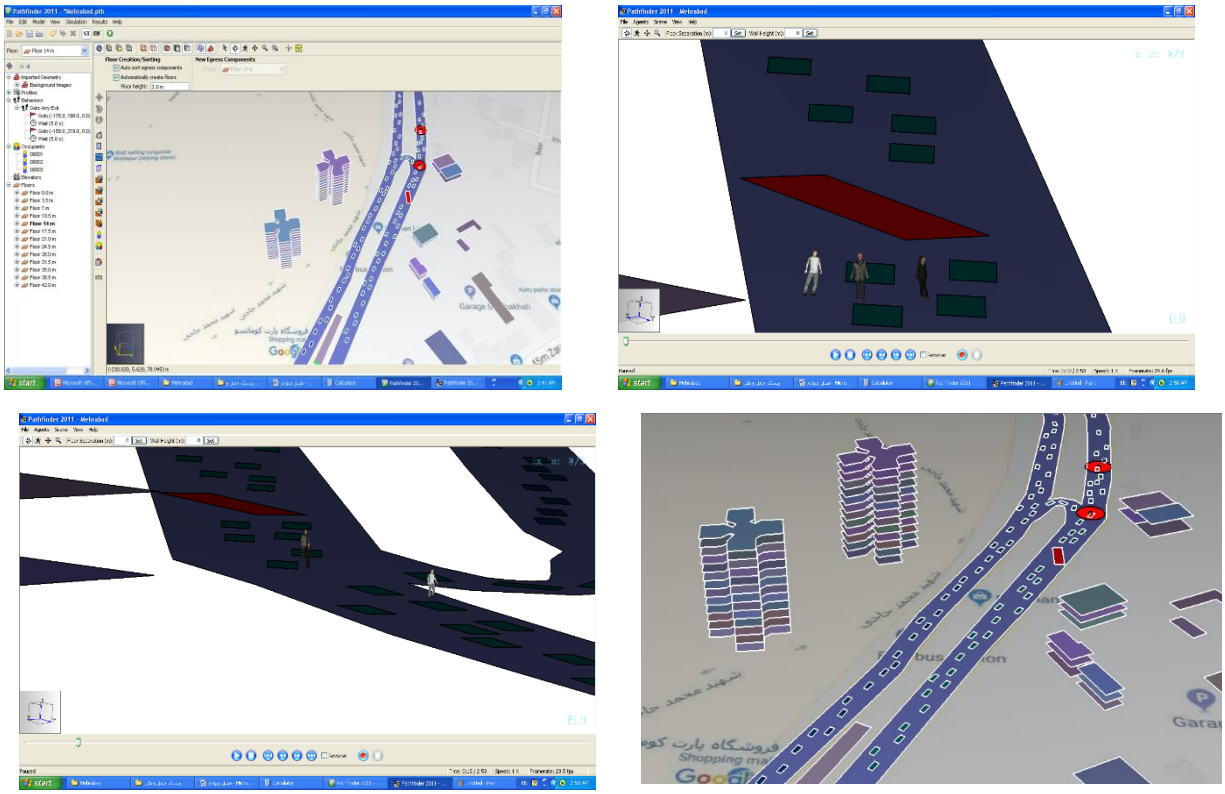
زمان برآوردشده در میزان خسارات واردشده به ساختمان‌ها و نفرات پیرامون محل وقوع سناریو مؤثر است. در این خصوص در زمان محاسبه فرار نفرات پیرامون محل وقوع حادثه با توجه به اثرات پیامد سناریو با نرم‌افزار Pathfinder شبیه‌سازی شد. در این خصوص نرم‌افزار میانگین سرعت هر فرد بالغ را ۱/۱۹ متر بر ثانیه در نظر می‌گیرد، ولی سرعت واقعی نفرات تابعی از جنسیت، تداخل نفرات در حال فرار، موانع پیش رو مانند خودروها و موانع ترافیکی است. در این خصوص ۳ نفر با مشخصات یک فرد جوان با سرعت دویدن ۳ متر بر ثانیه، یک پیرمرد با سرعت دویدن ۱ متر بر ثانیه و یک زن میان‌سال با سرعت دویدن ۱/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد (شکل ۴). در این سناریو، زمان تقریبی دور شدن این نفرات از محل حادثه در محیط شبیه‌ساز فرار اضطراری با سرعت حدود ۱/۵ متر بر ثانیه برآورد شد. در وضعیت تخریب ناگهانی تانکر حامل سوخت جت در سناریوی آتش استخری در نیمه اول و دوم سال، نتایج جدول ۵ برآورد شد.



شکل ۳: تصویرماهواره‌ای از مسیر خودروهای امدادی از ایستگاه شماره ۳۸ آتش‌نشانی به محل بروز سناریو

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2024-08-27]

[DOI: 10.52547/johe.9.4.267]



شکل ۴: تصاویر از شبیه‌ساز Pathfinder در سناریوی منتخب

مطابق شکل ۴، حداقل زمان رسیدن گروه امدادی به محل حادثه حدود ۶ دقیقه است. بر اساس جدول ۵، تمام افرادی که در سناریوی منتخب آتش استخری با تأخیر در وضعیت‌های تخلیه ناگهانی در نیمه اول و دوم سال که در معرض تشعشع ۱۲/۵ کیلووات بر مترمربع قرار گرفته‌اند، به دلیل زمان بیشتر از ۲۰ ثانیه دچار سوختگی درجه یک و دو خواهند شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش احتمال آسیب‌های انسانی با وجود کاهش ظرفیت تانکر و قطر تخلیه در اثر بروز آتش استخری است.

جدول ۵: نتایج شبیه‌سازی فرار سناریوی منتخب با نرم‌افزار Pathfinder

آتش استخری (Pool Fire)					
پیامد	زمان وقوع	فواصل و زمان	میانگین سرعت فرار (متر بر ثانیه)	شارحرارتی (کیلووات بر مترمربع)	
				۱۲/۵	۳۷/۵
تخلیه ناگهانی (Catastrophic Rupture)	نیمه اول سال	شعاع فرار (متر)	۱/۵	۳۳	۱۳
		میانگین زمان فرار محاسبه‌شده (ثانیه)		۱۶/۳	۸/۷
	نیمه دوم سال	شعاع فرار (متر)		۳۳	۱۳
		میانگین زمان فرار محاسبه‌شده (ثانیه)		۱۶/۳	۸/۷

بحث

در این مطالعه برای ارزیابی خطر حمل‌ونقل مواد خطرناک از شاخص درجه‌بندی خطر حمل‌ونقل استفاده شد. Rao و همکاران در سال ۲۰۰۴ این روش ارائه دادند [۷]. جهانگیری و همکاران در مطالعه خود از این روش برای ارزیابی خطر حمل‌ونقل مواد شیمیایی در مسیرهای منتهی به یک پایانه باربری استفاده کردند [۴]. در این تحقیق راحتی دسترسی به اطلاعات مورد نیاز برای برآورد خطر و سهولت محاسبات سطح خطر از نقاط قوت این روش ذکر شد [۴].

تحلیل پیامدهای احتمالی ناشی از انفجار تانکر سوخت هواپیما از طریق مدل‌سازی پیامد با استفاده از نرم‌افزار PHAST انجام شد. موحد و همکاران از این روش برای مدل‌سازی نحوه انتشار میعانات گازی از مخازن ذخیره‌سازی در یک صنعت پالایش گاز و ارزیابی پیامد آن استفاده کردند [۸]. یافته‌های آن‌ها نشان داد در شرایط بالفعل شدن سناریوی تعریف‌شده، تا فاصله ۴۹۰ متری از محل مخازن که مرکز کنترل و برخی از مسیرها را شامل می‌شود، تحت تأثیر حوادث احتمالی قرار می‌گیرد.

در مطالعه دیگر کمائی و همکاران برای بررسی مخزن کروی

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2024-08-27]

[DOI: 10.52547/johe.9.4.267]

گاز نفتی مایع‌شده تحت فشار در ناحیه مخازن یک پالایشگاه از رویکرد مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار PHAST بهره بردند [۹]. خروجی این مطالعه به تعریف ۴۳ مورد اقدامات کنترلی برای پیشگیری از ایجاد پدیده BLEVE و ۳۱ مورد اقدامات کنترلی برای کاهش پیامد و اثرات منتهی شد.

خرم در پژوهش خود برای مدل‌سازی پیامدهای رهایش عوامل سیانوژن در حریم نیروگاه اتمی بوشهر از نرم‌افزارهای ALOHA، PHAST و WISER استفاده کرد [۱۰]. نتایج مدل‌سازی این مطالعه نشان داد در غلظت‌های کم نرم‌افزار ALOHA قادر به ارائه نتایج نیست و مدل سازی با استفاده نرم‌افزارPHAST نتایج قابل قبول‌تری ارائه می‌دهد.

علاوه بر موارد یادشده، مطالعات متعدد دیگری نیز بر مفید و کاربردی بودن استفاده از نرم‌افزار PHAST برای مدل‌سازی پیامدهای ناشی از انفجار و رهایش انواع مواد شیمیایی تأکید می‌کنند [۱۱-۱۳].

در مطالعه حاضر، سناریوث محتمل تخلیه ناگهانی سوخت جت با سه پیامد انفجار، آتش استخری و آتش لحظه‌ای در دو نیمه سال بررسی شد. بر اساس مقایسه نتایج، بدترین سناریوی تخلیه ناگهانی سوخت جت در اثر تصادف منجر به پاره شدن تانکر یا واژگونی آن در دو فصل پاییز و زمستان است که به انفجار می‌انجامد. در این نوع حادثه تا شعاع ۱۴۸ متری امکان ایجاد خسارات غیرقابل‌جبران به ساختمان‌های پیرامون و پارگی پرده گوش افراد در محدوده مذکور و تا شعاع ۱۷۵ متری امکان ایجاد خسارات قابل جبران به ساختمان‌ها، تخریب سازه‌های سبک و شکستن شیشه پنجره‌ها وجود دارد. زیاد بودن خسارات پیامدها در فصول سرد سال همانند نتایج پژوهش‌های Bouafia [۱۴]، Barjoee [۱۵]، Yoon [۱۶] و Yarandi [۱۷] است. دلیل اصلی این موضوع، تغییرات محیطی ایجادشده نظیر درجه حرارت محیط است که جزء پارامترهای اثرگذار در تشدید پیامدهای حادثه است.

در مقایسه سه پیامد انفجار، آتش استخری و آتش لحظه‌ای، خسارت‌بارترین پیامد در هر دو فصل سرد و گرم سال انفجار است. این یافته مشابه یافته‌های Sajid [۱۸]، Kumar [۱۹]، MacCarthy [۲۰]و Mohammadfam [۲۱] بود.

در سناریوی آتش استخری که در آن فرار و دور شدن افراد از محل حادثه اهمیت زیادی دارد، یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار Pathfinder معلوم کرد تمام افرادی که در سناریوی تخلیه ناگهانی در نیمه اول و دوم سال کمتر از ۲۰ ثانیه در معرض تشعشع ۱۲/۵ کیلووات بر مترمربع قرار می‌گیرند، دچار سوختگی درجه یک و دو نخواهند شد. استفاده از این نرم‌افزار در شبیه‌سازی فرار افراد در شرایط اضطراری در پژوهش‌های متعدد استفاده و بر مفید بودن آن تأکید شده است[۲۲-۲۴]. محدودیت اصلی این مطالعه دشوار بودن دستیابی به داده‌های مربوط به مسیر و زمان‌های حمل‌ونقل ماده مطالعه‌شده بود.

نتیجه‌گیری

با توجه به حمل‌ونقل قابل توجه جاده‌ای مواد خطرناک و زیاد بودن شدت پیامد حوادث احتمالی، طراحی زمان حمل‌ونقل این مواد به همراه تعیین مسیرهای ایمن‌تر و نظارت دقیق بر آن به همراه ارائه آموزش‌های مداوم به رانندگان کالاهای یادشده و تجهیز کامیون‌های حمل مواد به تجهیزات ایمنی مرتبط از وقوع این حوادث و در صورت بروز حوادث احتمالی، از شدت پیامدهای آن خواهد کاست.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از رانندگان تانکرهای حمل سوخت جت که در این طرح همکاری کردند، نهایت سپاس و قدرانی را دارند.

تضاد منافع

مطالعه حاضر هیچ‌گونه تضادی با منافع نویسندگان نداشته است.

ملاحظات اخلاقی

در این پژوهش ملاحظات اخلاقی مورد نظر کمیته اخلاق دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز به طور کامل رعایت گردید.

سهم نویسندگان

ایرج محمدفام طراحی مطالعه و همکاری در تدوین مقاله، سعید قهرمانی نمین اجرای مطالعه، شهرام محمودی هریس و میثم رستمی تحلیل یافته ها و هستی برقعی پور اجرای مطالعه و نگارش مقاله

حمایت مالی

هزینه‌های مالی این طرح به عهده نویسندگان بوده است

REFERENCES

1. Mohammadfam I, Kalatpour O, Gholamizadeh K. Evaluation of health consequences in chemicals road transport accidents using a fuzzy approach. *JOHE*. 2019; **6**(3):1-8. DOI: 10.52547/johe.6.3.1
2. Azar A, Saffarzadeh M, Ehsani A. Designing Mathematical Routing Model of Hazardous Materials Transportation (Case Study: the Fars Province Road Network). *J Civ Eng*. 2013;**12**(4):27-35.
3. Aderibigbe A. Root cause analysis of a jet fuel tanker accident. *Int J Appl Eng.* 2017;**12**(24):14974-83.
4. Jahangiri M, Jamshidi H. Chemical transportation risk assessment in the pass leading to amirkabir terminal at Shiraz city. *IOH*. 2016;**13**(4):23-30.
5. Head GL, Wagner III BC. The NFPA 704 diamond. *Prof Saf*. 1995;**40**(12):20.
6. Mohammadfam I, Zarei E, Yazdi M, Gholamizadeh K. Quantitative risk analysis on rail transportation of hazardous materials. *Math Probl Eng*. 2022;**2022**. DOI: 10.1155/2022/6162829
7. Rao KR, Rao SV, Chary V. Estimation of risk indices of chemicals during transportation. *Process Saf Prog.* 2004;**23**(2):149-54. DOI: 10.1002/prs.10012
8. Movahed AR, Jahani F, Parvini M, Shakib M. Consequence analysis of gas condensate leakage in a

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2024-08-27]

[DOI: 10.52547/johe.9.4.267]

gas refinery to develop an emergency response plan. *J Occup Hyg Eng.* 2019;**6**(2):1-8. DOI: 10.29252/johe.6.2.1
9. Kamaei M, Alizadeh SS, Keshvari A, Kheyrkhah Z, Moshashaei P. Risk assessment and consequence modeling of BLEVE explosion wave phenomenon of LPG spherical tank in a refinery. *J Health Saf Work.* 2016;**6**(2):10-24.
10. Khorram R. Modeling the consequences release of cyanogen agents in bushehr nuclear power plant neighborhood using PHAST, ALOHA and WISER software. *IOH*. 2020;**17**(4):1-3.
11. Soltanzadeh A, Mahdinia M, Golmohammadpour H, Pourbabaki R, Mohammad-Ghasemi M, Sadeghi-Yarandi M. Evaluating the potential severity of biogas toxic release, fire and explosion: consequence modeling of biogas dispersion in a large urban treatment plant. *Int J Occup Saf Ergon.* 2022:1-12. PMID: 35152844 DOI: 10.1080/10803548.2022.2041846
12. Ramezanifar E, Gholamizadeh K, Mohammadfam I, Mirzaei Aliabadi M. Risk assessment of methanol storage tank fire accident using hybrid FTA-SPA. *PLoS One.* 2023;**18**(3):e0282657. PMID: 36888639 DOI: 10.1371/journal.pone.0282657
13. James S, Renjith VR. Risk assessment and vulnerability analysis of liquefied natural gas (LNG) regasification terminal. *Process Integr Optim Sustain.* 2021;**5**:99-121. DOI: 10.1007/s41660-020-00138-3
14. Bouafia A, Bougofa M, Rouainia M, Medjram MS. Safety risk analysis and accidents modeling of a major gasoline release in petrochemical plant. *J Fail Anal Preven.* 2020;**20**(2):358-69. DOI: 10.1007/s11668-020-00826-9
15. Barjoee SS, Elmi MR, Varaoon VT, Keykhosravi SS, Karimi F. Hazards of toluene storage tanks in a petrochemical plant: modeling effects, consequence analysis, and comparison of two modeling programs. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2022;**29**(3):4587-615. PMID: 34414542 DOI: 10.1007/s11356-021-15864-5
16. Yoon S, Yun J, Han J, Jung S. Risk analysis of transporting hazardous substances in harbor using modeling program. *JOET*. 2018;**32**(4):272-8. DOI: 10.26748/KSOE.2018.6.32.4.272
17. Yarandi MS, Karimi A. Evaluation of consequence modeling of fire and explosion on methane storage tanks in a CNG refueling station. *SBMU*. 2018;**6**(4):236-47.
18. Sajid Z, Khan MK, Rahnama A, Moghaddam FS, Vardhan K, Kalani R. Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling and Analysis of Hydrocarbon Vapor Cloud Explosions (VCEs) in Amuay Refinery and Jaipur Plant Using FLACS. *Processes*. 2021;**9**(6):960. DOI: 10.3390/pr9060960
19. Kumar T, Mohsin R, Majid ZA, Ghafir MFA, Wash AM. Experimental optimisation comparison of detonation characteristics between leaded aviation gasoline low lead and its possible unleaded alternatives. *Fuel*. 2020;**281**: 118726.
20. MacCarthy G, Asamoah C, Ephraim B, Alekhin V, Poluyan L. Analyzing domino effects occurring on gasoline storage tanks at the bulk oil storage and transportation (BOST) Depot. Russ. *J Build Constr Archit.* 2019;**5**(2):1-10.
21. Mohammadfam I, Kalatpour O, Gholamizadeh K. Quantitative assessment of safety and health risks in HAZMAT road transport using a hybrid approach: a case study in Tehran. *ACS*. 2020; **27**(4):240-50.
22. Khan RM, Bhuiyan SAM, Haque FM, Wasi M, Rahman MA. Effects of unsafe workplace practices on the fire safety performance of ready-made garments (RMG) buildings. *Saf Sci.* 2021;**144**:105470.
23. Jia H, Taheri B. Model identification of solid oxide fuel cell using hybrid Elman Neural Network/Quantum Pathfinder algorithm. *Energy Rep.* 2021;**7**:3328-37. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.05.070
24. Mei Y, Ye Y, Deng X. A Paradigm of Intelligent evacuation route decision for metro station emergence based on social media. *Int J Performability Eng.* 2020;**16**(9):1416-23. DOI: 10.23940/ijpe.20.09.p10.14161423

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2024-08-27]

[DOI: 10.52547/johe.9.4.267]