

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 Mohammadfam¹, Saeed Ghahremani Namin², Shahram Mahmoudi³, Meisam Rostami⁴, 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

Abstract

Article history:

Received: 16 April 2022

Revised: 07 May 2022

Accepted: 09 May 2022

ePublished: 25 Dec 2022

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

***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

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



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 برقی‌پور^{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 مهنا، 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

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 کمی 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

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 برقی‌پور، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکز، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

ایمیل: hasti_bo@yahoo.com

استناد: محمدفام، ایرج؛ قهرمانی نمین، سعید؛ محمودی، شهرام؛ رستمی، میثم؛ برقی‌پور، 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): ۲۶۷-۲۷۶.

مقدمه

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].

روند رشد فزاینده توسعه فناوری، استفاده از فرایندهای تولیدی مختلف و به تبع آن مواد اولیه گوناگون را ایجاد می‌کند. از آنجاکه بخش قابل توجهی از مواد استفاده‌شده در بخش‌های مختلف

هوا سنگین تر است و در سطوح کف زمین جمع می شود. بخار بنزین با هوا مخلوط قابل انفجار ایجاد می کند. 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 مصاحبه های غیرساختارمند، مواردی مثل مسیرهای حمل و نقل مواد شیمیایی مطالعه شده، ظرفیت خودروهای حامل مواد خطرناک، بررسی شرایط آب و هوایی منطقه، بررسی دستورالعمل های ایمنی حمل و نقل تردد، مسافت و نزدیکی به مناطق مسکونی در مسیر حمل و نقل، بررسی میزان حوادث اتفاق افتاده، بررسی دستورالعمل های و استانداردهای ایمنی شناسایی شد. مسیرهایی که در آن حمل و نقل مواد خطرناک انجام می شود، عموماً شرایطی دارند که دخالت زیادی در میزان خطر حوادث حمل و نقل این مواد دارد. در این مطالعه برای ارزیابی خطر متغیرهای مسیر حمل و نقل، اماکن مسکونی پیرامون، نزدیکی به زیرساخت های شهری، اماکن عمومی و ساختمان های استراتژیک در نظر گرفته شد. در گام بعد با توجه به اطلاعات در دسترس، برای اندازه گیری و ارزیابی خطر کمی حمل و نقل مواد خطرناک از شاخص درجه بندی خطر حمل و نقل (Transportation Risk Rating Index: TRRI) استفاده شد [۴].

سپس با تعیین میانگین وزنی شاخص رتبه بندی خطر (Weighted Average Risk Rating Index: WARRI) با استفاده از کد [۵] NFPA 704، عامل فاصله از محل مسکونی (D)، وزن مولکولی یا عامل توزیع (MW/DF) و عامل مقدار ماده شیمیایی حمل شده با استفاده از روش ارزیابی شاخص خطر حمل و نقل مواد شیمیایی (TRRI)، خطر حمل و نقل مواد شیمیایی از حاصل ضرب چهار معیار به شرح زیر تعیین شد [۶]:

۱. محاسبه شاخص درجه بندی میانگین وزنی خطر مواد شیمیایی: برای برآورد این عامل از میانگین وزنی هر کدام از درجه بندی های ارائه شده در لوزی خطر مؤسسه ملی حفاظت در برابر حریق آمریکا (NFPA) به شکل زیر استفاده شد:

$$W_i = \frac{\text{مقدار درجه بندی ویژه لوزی خطر}}{\text{مجموع درجه همه خطرات}}$$

$$WARRI = \sum (W_i \times \text{درجه بندی ویژه لوزی خطر})$$

۲. میزان بار حمل شده 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) طبقه بندی می شود.

۳. فاصله مناطق مسکونی: هرچقدر فاصله تانکرهای حامل مواد

بیش از ۹۰ درصد از جابه جایی کالا در کشور از طریق حمل و نقل جاده ای انجام می شود. بخشی از محصولات جابه جاشده از طریق جاده جزء کالاهای خطرناک محسوب می شوند که به دلیل ماهیت خاص آن ها لازم است تحت تدابیر ویژه ای جابه جا شوند. مواد خطرناک به موادی گفته می شود که برای انسان، حیوان یا محیط زیست مضر هستند. بر اساس طبقه بندی سازمان ملل متحد، این مواد در ۹ گروه اصلی طبقه بندی می شوند که عموماً در انواع مایعات و جامدات قابل اشتعال، گازها و مواد خورنده هستند. معمول ترین این مواد شامل حامل های سوختی و گازهای گندزاد آب هستند که با تانکر حمل می شوند. بر اساس آمار سازمان ملل، حدود نیمی از تمام بارهایی که حمل می شوند، در گروه مواد خطرناک قرار می گیرند؛ زیرا تقریباً در همه موارد محل تولید مواد خطرناک با محل مصرف آن متفاوت است [۲].

از طرف دیگر، سال هاست که حوادث جاده ای به یکی از مهم ترین چالش ها و مشکلات اصلی کشور تبدیل شده است. حوادث حمل و نقل مواد خطرناک ممکن است در مبدأ، مقصد یا در طول مسیر رخ دهد. در بیشتر موارد حوادثی که در زمان حمل مواد شیمیایی خطرناک روی می دهد، پتانسیل زیادی برای تبدیل شدن به یک فاجعه دارد. بر همین اساس، از این رویدادها به عنوان حوادثی با احتمال کم - پیامد زیاد (Low Probability-High Consequence) نام می برند. عواقب حوادث کالاهای خطرناک شامل مرگ و میر، آسیب های جسمی، تخلیه ساکنان منطقه، خسارات مالی به اموال و دارایی های 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 مکان های بزرگ و پر ازدحام 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 خطرناک ترین مواد خطرناک که به صورت جاده ای بین محل تولید یا انبار فرودگاه ها جابه جا می شود، سوخت جت است [۳]. این ماده پتانسیل زیادی برای اشتعال و انفجار دارد و در صورت بروز حادثه حین انتقال به پیامدهای فاجعه باری منتهی می شود.

با توجه به مطالب یادشده، هدف اصلی این پژوهش ارزیابی خطر حمل و نقل جاده ای سوخت جت، ارزیابی پیامدهای ناشی از نشت و تخلیه آن تحت سناریوهای مختلف و شبیه سازی تخلیه افراد تحت تأثیر در شرایط اضطراری است.

در این پروژه بنزین LL۱۰۰ بررسی شد که مصارف آن در فرودگاه های آزادی و پیام بیشتر و در فرودگاه مهرآباد کمتر است. این نوع بنزین مرغوب ترین 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 فرودگاه های مطالعه شده منتقل می شود. این نوع بنزین مایع شفاف آبی با بوی تند است که از برش میانی برج تقطیر در پالایشگاه به دست می آید و بخار آن از

شیمیایی از اولین منطقه مسکونی کمتر باشد، خطر بیشتری برای افراد مستقر در آن منطقه خواهد داشت. این عامل از صفر تا ۴ به صورت بیشتر از ۱۰ هزار متر (درجه صفر)، 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) تقسیم بندی می شود.

۴. وزن مولکولی یا عامل توزیع: میزان انتشار بخار به صورت غیرمستقیم تابع چگالی است که آن نیز تابع وزن مولکولی ماده است؛ بنابراین، هرچه وزن مولکولی ماده بیشتر باشد، سطح خطر حمل و نقل مواد نیز بیشتر خواهد شد. این عامل از صفر تا ۴ به صورت کمتر از ۱۵ گرم بر مول (درجه صفر)، ۱۵ تا 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) طبقه بندی می شود.

در نهایت شاخص خطر حمل و نقل خطرناک در چهار سطح کم (۰ تا ۶۴)، متوسط (۶۵ تا ۱۲۸)، خطرناک (۱۲۹ تا ۱۹۲) و بسیار خطرناک (۱۹۳ تا ۲۵۶) طبقه بندی شد.

در مرحله بعد برای شبیه سازی پیامد سناریوهای حوادث احتمالی در مسیر حمل و نقل از نرم افزار PHAST نسخه ۸/۲۲/۱۷/۰ استفاده شد. در این خصوص سناریوهای محتمل (تصادفات جاده ای) مسیرها مشخص و با تعیین اطلاعات مختلف ورودی مانند وضعیت های مختلف آب و هوایی، شب یا روز بودن زمان بروز حادثه، تعیین نشت و انفجار یا آتش سوزی، پیامدهای مختلف حوادث محتمل حمل و نقل مواد شیمیایی تعیین شد. در ادامه با استفاده از نرم افزار PHAST پیامدهای احتمالی نظیر میزان آسیب های انسانی در اثر میزان شار حرارتی بر اساس کیلووات بر مترمربع در سناریوهای آتش سوزی و همچنین میزان افزایش فشار در سناریوهای انفجار و آسیب های 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 آتش نشانی و اورژانس شرایط با استفاده از نرم افزار Pathfinder شبیه سازی شد.

در این ابزار (نرم افزار) ابتدا شرایطی برگزیده شد که تا حد امکان به واقعیت نزدیک باشد و با در نظر گرفتن ویژگی های نفرت پیرامون حادثه و رفتار آن ها، تخمینی از مدت زمانی ارائه دهد که چقدر طول می کشد تا این افراد در مسیرهای پیاده رو، داخل خودرو، داخل ساختمان ها پس از دیدن حادثه یا شنیدن آن، خودرو یا ساختمان را بعد از انجام کارهای اولیه برای واکنش (زمان تأخیر) تخلیه کنند. در این نرم افزار به منظور تعیین مدل های تخلیه به اطلاعات در زمینه ویژگی های ساکنان، نفرت سوار در خودرو، اقدامات آن ها در طول تخلیه، تأخیری که ممکن است رخ دهد و سرعت حرکت انواع مختلف نفرت نیاز بود. برخی از داده های بررسی شده در این نرم افزار عبارت بود از:

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

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

ج- ویژگی های کاربران فضا: انواع ویژگی های خاص افرادی که در طول تخلیه درگیر می شوند، زمان ترک را تحت تأثیر قرار می دهد که شامل سن، جنس، درجه های آموزش، آشنایی و غیره است و برای محاسبه تفاوت در واکنش ها میان افراد مختلف کاربرد دارد.

د- اقدامات در طول تخلیه: مجموعه اقدامات کاربران است که زمان تخلیه افراد را از محل استقرار آن ها افزایش می دهد. ه- اثر انسداد در مسیر تخلیه: عواملی که موجب تأخیر یا انسداد مسیرهای تخلیه می شود.

و- تصمیم برای انتخاب خروجی ها: تصمیماتی که مسیرهای تخلیه را تعیین می کند و زمان تخلیه را تحت تأثیر قرار می دهد.

نتایج

ارزیابی خطر حمل و نقل سوخت جت با استفاده از روش TRRI و داده های جدول ۱، خطر آن را معادل ۱۴۴ برآورد کرد که در طبقه خطرناک قرار می گیرد. با توجه به تردد کامیون های حامل مخازن سوخت هواپیما در شهر تهران برای ارائه خدمات، تعیین پیامدهای احتمالی حوادث مرتبط با این ماده خطرناک ضرورت بیشتری پیدا می کند.

جدول ۱: جدول تعیین خطر حمل و نقل مواد شیمیایی خطرناک در شهر تهران

عامل خطر	سوخت هواپیما
میانگین وزنی شاخص رتبه بندی خطر (WARRI)	۲/۲۵
عامل فاصله از محل مسکونی (D)	۴
وزن مولکولی یا عامل توزیع (MW/DF)	۴
عامل مقدار ماده حمل و نقل شده (Q)	۴
خطر حمل و نقل مواد شیمیایی (TRI)	۱۴۴

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

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

ماده شیمیایی	سناریو	مقدار نشتی (اینچ)	دمای نگهداری (درجه سانتی گراد)	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 (Despersion)			
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

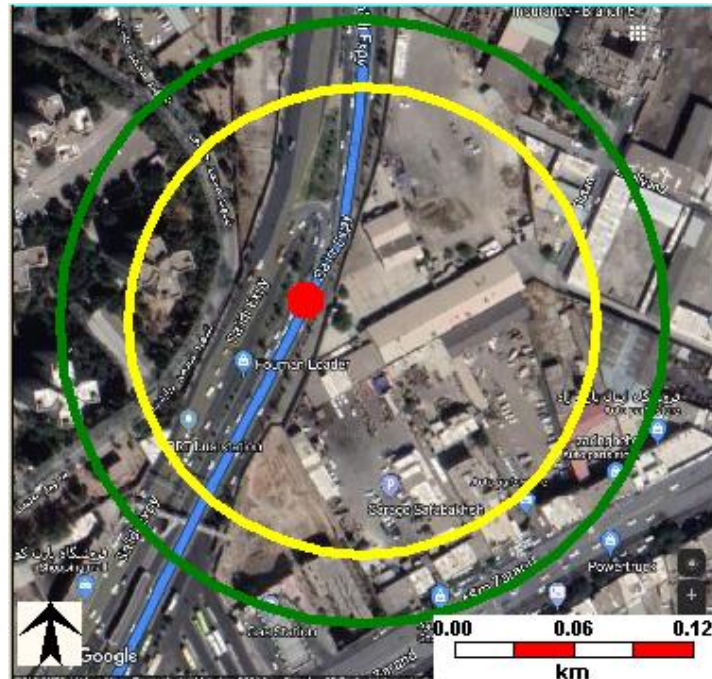
ساختمان‌های مسکونی نیروی هوایی، ایستگاه BRT، مراکز تجاری و همچنین مراکز صنعتی (پمپ بنزین، نمایندگی خدمات خودرویی، گاراژهای حمل‌ونقل باری و غیره) در شعاع ۱۴۰ متری محل وقوع سناریو هستند. پیامد آتش ناگهانی تا شعاع ۱۷/۵ متری که خودروهای داخل خیابان، اماکن تجاری، ایستگاه BRT و معابر را دربردارد و موجب تلفات 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

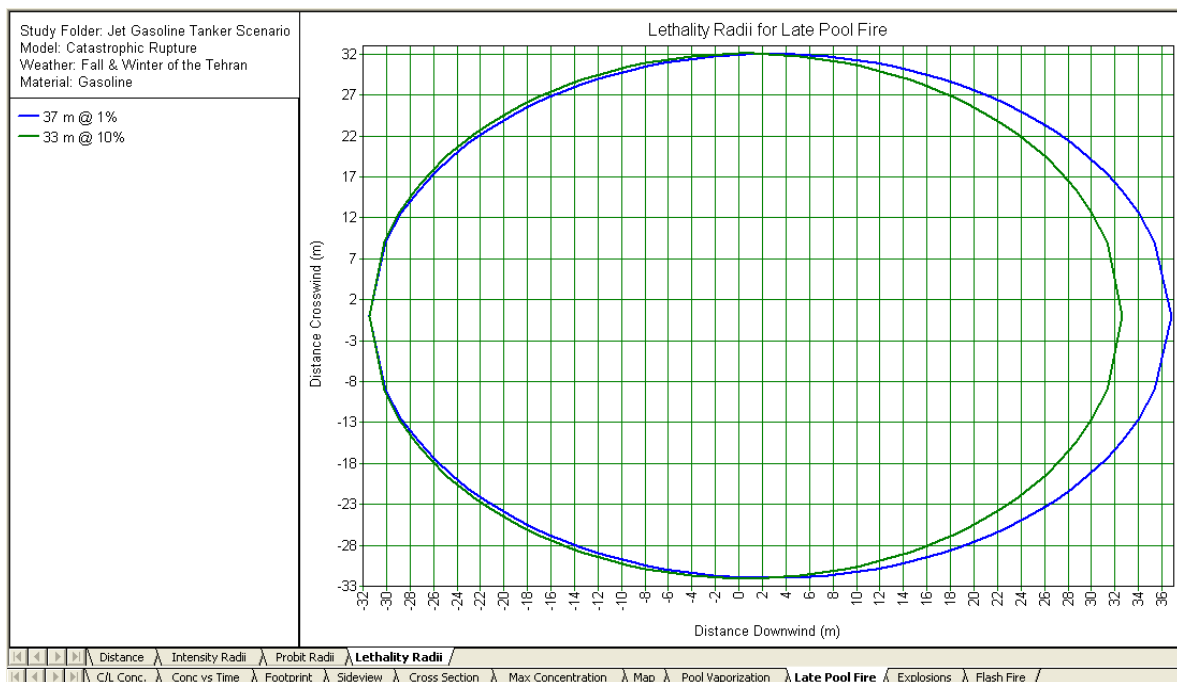
نام ماده خطرناک	محل بارگیری و تخلیه	مکان‌های مهم	فاصله تا ایستگاه آتش‌نشانی (متر)	ملاحظات
سوخت هواپیما	انبار ری - فرودگاه مهرآباد	ساختمان‌های مسکونی نیروی هوایی، ایستگاه BRT، مراکز تجاری و صنعتی (پمپ بنزین، نمایندگی خدمات خودرویی، گاراژهای حمل‌ونقل باری و غیره)	۱۵۰۰	۱- مسیر راه آهن تهران - تبریز ۲- اماکن (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		
تراز اول (متر)	تراز دوم (متر)	تراز اول (متر)	تراز دوم (متر)	پیامد
120 m @ 0.2068 bar	150 m @ 0.1379 bar	148 m @ 0.2068 bar	175 m @ 0.1379 bar	انفجار (Explosion)
17.5 m @ 100% LFL	27.5 m @ 50% LFL	25 m @ 100% LFL	35 m @ 50% LFL	آتش لحظه‌ای (Flash 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	آتش استخری (Pool Fire)
10 % @ 31 m	1 % @ 39 m	10 % @ 33 m	1 % @ 37 m	درصد تلفات احتمالی



شکل ۱: توزیع ترازهای موج انفجار پس از وقوع سناریوی تخلیه ناگهانی در نیمه دوم سال



شکل ۲: درصد تلفات انسانی مناطق محصور در آتش استخری پس از وقوع سناریوی تخلیه ناگهانی در نیمه دوم سال

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

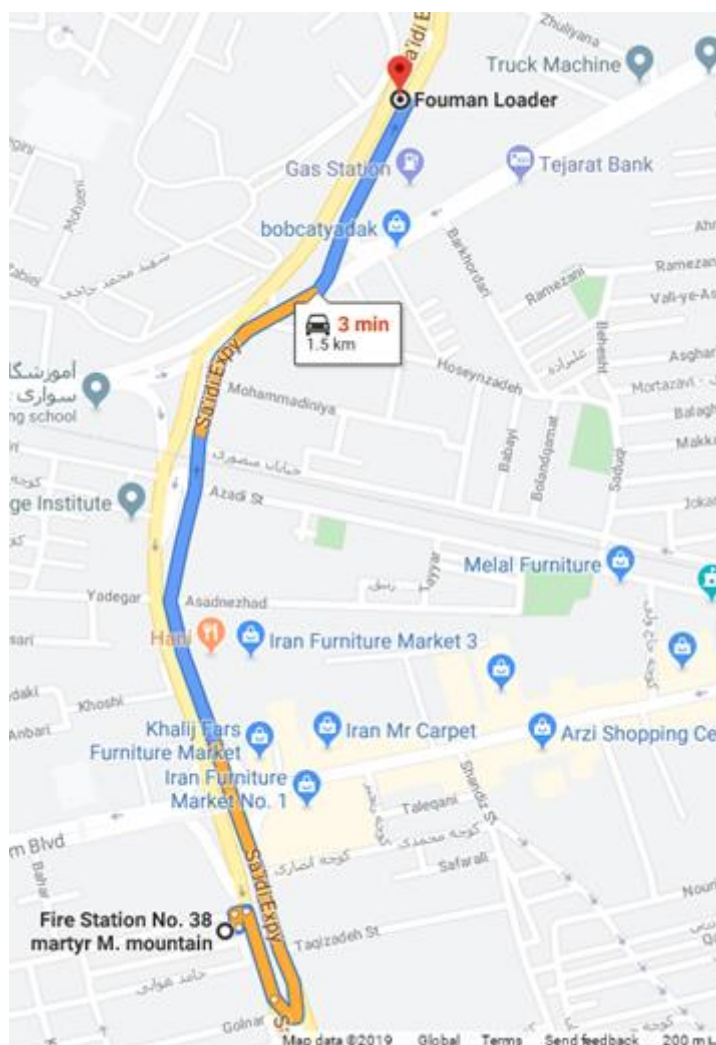
در اثر وقوع سناریوی منتخب در نیمه دوم سال، پیامد انفجار تانکر (بخارات سوخت جت) تا شعاع ۱۴۸ متری امکان ایجاد خسارات غیر قابل جبران به ساختمان‌های پیرامون و پارگی پرده گوش افراد در محدوده مذکور است و تا شعاع ۱۷۵ متری امکان ایجاد خسارات قابل جبران به ساختمان‌ها، تخریب سازه‌های سبک، شکستن شیشه پنجره‌ها است.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

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.

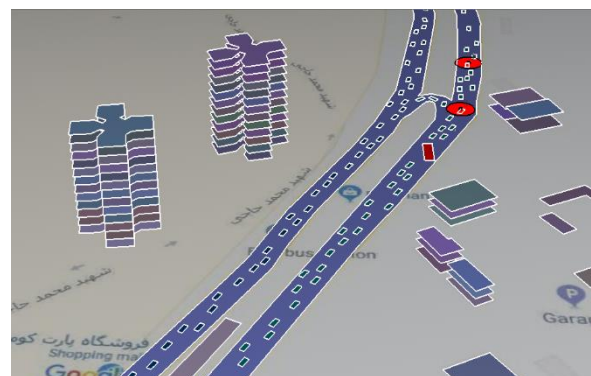
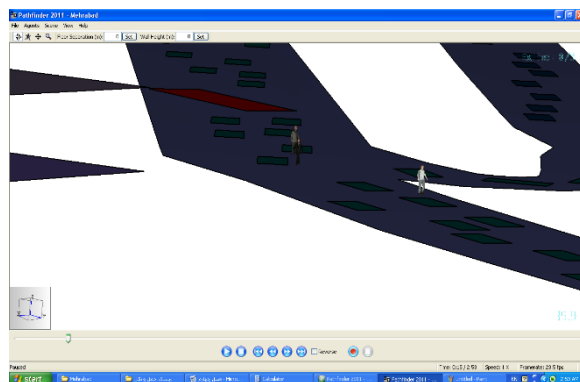
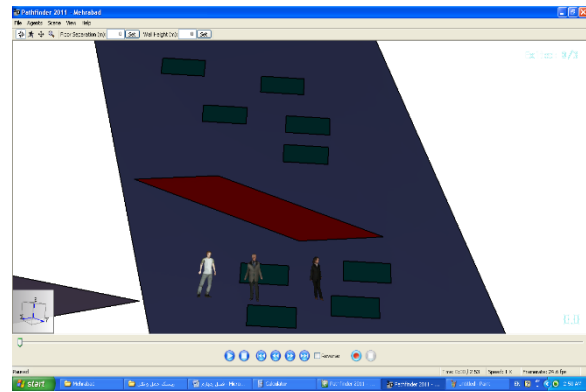
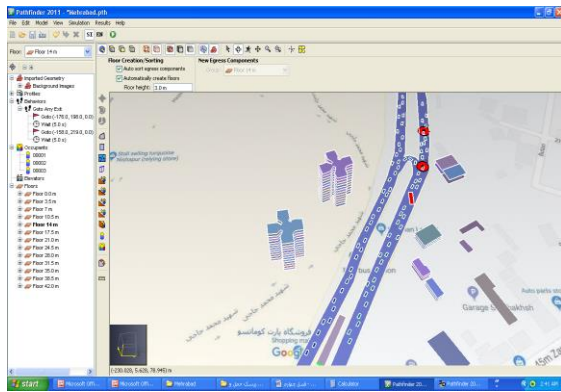
زمان برآورد شده در میزان خسارات وارد شده به ساختمان‌ها و نفرت پیرامون محل وقوع سناریو مؤثر است. در این خصوص در زمان محاسبه فرار نفرت پیرامون محل وقوع حادثه با توجه به اثرات پیامد سناریو با نرم‌افزار Pathfinder شبیه‌سازی شد. در این خصوص نرم‌افزار میانگین سرعت هر فرد بالغ را $1/19$ متر بر ثانیه در نظر می‌گیرد، ولی سرعت واقعی نفرت تابعی از جنسیت، تداخل نفرت 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 $1/5$ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد (شکل ۴). در این سناریو، زمان تقریبی دور شدن این نفرت از محل حادثه در محیط شبیه‌ساز فرار اضطراری با سرعت حدود $1/5$ 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.

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 برآورد شده از ایستگاه شماره ۳۸ آتش‌نشانی تا محل بروز سناریوی منتخب حدود ۱۵۰۰ متر است (شکل ۳) که طی بررسی‌های انجام شده 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 یاد شده از خط آهن تهران - تبریز، به زمان برآورد شده ۳ دقیقه نیز اضافه می‌شود که در بدترین شرایط، زمان رسیدن گروه آتش‌نشانی



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



شکل ۴: تصاویر از شبیه ساز Pathfinder در سناریوی منتخب

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.

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

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)	شماره‌های شایستگی (کیلووات بر مترمربع)
تخلیه ناگهانی (Catastrophic Rupture)	نیمه اول سال	شعاع فرار (متر)	۱/۵	۳۷/۵ ۱۲/۵ ۴
		میانگین زمان فرار محاسبه شده (ثانیه)		۱۳ ۳۳ ۸۷
	نیمه دوم سال	شعاع فرار (متر)		۸/۷ ۱۶/۳ ۴۸
		میانگین زمان فرار محاسبه شده (ثانیه)		۱۳ ۳۳ ۷۷
				۸/۷ ۱۶/۳ ۴۵

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

در این مطالعه برای ارزیابی خطر حمل و نقل مواد خطرناک از شاخص درجه‌بندی خطر حمل و نقل 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 حمل و نقل 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].

بحث

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 قدردانی 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 محمدمفام طراحی مطالعه و همکاری در تدوین مقاله، سعید قهرمانی نمین اجرای مطالعه، شهرام محمودی هریس و میثم رستمی تحلیل یافته‌ها و هستی برقی پور اجرای مطالعه و نگارش مقاله

حمایت مالی

هزینه‌های مالی این طرح به عهده نویسندگان بوده است

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 رهاش عوامل سیانوژن در حریم نیروگاه اتمی بوشهر از نرم‌افزارهای PHAST، ALOHA و WISER استفاده کرد [۱۰]. نتایج مدل‌سازی این مطالعه نشان داد در غلظت‌های کم نرم‌افزار ALOHA قادر به ارائه نتایج نیست و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار PHAST 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 رهاش انواع مواد شیمیایی تأکید می‌کنند [۱۱-۱۳].

در مطالعه حاضر، سناریو 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 غیرقابل جبران 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]، Barjoe [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

REFERENCES

- 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
- 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.
- Aderibigbe A. Root cause analysis of a jet fuel tanker accident. *Int J Appl Eng*. 2017;12(24):14974-83.
- Jahangiri M, Jamshidi H. Chemical transportation risk assessment in the pass leading to amirkabir terminal at Shiraz city. *IOH*. 2016;13(4):23-30.
- Head GL, Wagner III BC. The NFPA 704 diamond. *Prof Saf*. 1995;40(12):20.
- 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
- 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
- Movahed AR, Jahani F, Parvini M, Shakib M. Consequence analysis of gas condensate leakage in a

- gas refinery to develop an emergency response plan. *J Occup Hyg Eng*. 2019;**6**(2):1-8. DOI: [10.29252/johe.6.2.1](https://doi.org/10.29252/johe.6.2.1)
9. Kamaei M, Alizadeh SS, Keshvari A, Kheyrikhah 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](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35152844/) DOI: [10.1080/10803548.2022.2041846](https://doi.org/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](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36888639/) DOI: [10.1371/journal.pone.0282657](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.1007/s11668-020-00826-9)
 15. Barjoe 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](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34414542/) DOI: [10.1007/s11356-021-15864-5](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.23940/ijpe.20.09.p10.14161423)