

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Evaluating the Effectiveness of Pressure Sensors in Mitigating the Risk of Ammonia Cargo Release in Transit: A QRA-Based Case Study in a Petrochemical Transport Company

Malihe Kolahdouzi, Yousef Najafian, Ali Karimi *

Department of Occupational Health Engineering, School of Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: 3/7/2025

Accepted: 25/9/2025

ABSTRACT

Introduction: Transporting hazardous materials is inherently associated with multiple risks that can threaten human health, the environment, property and infrastructure. The deployment and operation of ammonia tanks in various industrial projects and organizations with diverse objectives present serious safety, health and environmental challenges. Therefore, conducting risk assessment in the chemical sector is essential. This study aimed to evaluate the effectiveness of a pressure sensor in reducing the risk of ammonia cargo release during road transportation, based on Quantitative Risk Assessment (QRA) in a petrochemical transport company.

Material and Methods: This study assessed the risk of ammonia release from a pressurized tanker and investigated the risk-reducing effects of employing a pressure sensor for leak prediction. Consequence modeling and QRA were conducted using SAFETI version 9.

Results: The results showed that the installation of a pressure sensor on the ammonia tanker reduced the gas release duration from 40 to 25 minutes, which consequently decreased the volume of the leaked gas and ultimately reduced the overall risk level of accidents. This risk reduction varied between 55% and 99% under different atmospheric conditions. By decreasing the release time from 40 to 25 minutes, the lethal radius of ammonia was consistently reduced in all weather conditions. The analysis of individual risk contours in the sudden rupture scenario revealed that atmospheric conditions, particularly during winter nights, had the greatest impact on the expansion of lethal zones.

Conclusion: The use of pressure sensors and alert systems can effectively reduce individual risk level. Continuous monitoring of tank conditions and prompt alerts in the event of leaks or pressure drops enable faster response and help prevent escalation of accident consequences.

Keywords: Quantitative risk assessment (QRA), Ammonia tanker, Road transportation, SAFETI

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Kolahdouzi M., Najafian Y., Karimi A. Evaluating the Effectiveness of Pressure Sensors in Mitigating the Risk of Ammonia Cargo Release in Transit: A QRA-Based Case Study in a Petrochemical Transport Company. *J Health Saf Work.* 2025; 15(3): 501-531.

1. INTRODUCTION

Transportation of hazardous materials is one of the key stages in the supply chain of chemical, petrochemical, energy and pharmaceutical industries. Due to their specific physical or chemical properties, these materials can cause irreversible damage in the event of leakage,

explosion or contact with humans and the environment. Widespread access to roads, coupled with a lack of rail and air infrastructure, has led to the concentration of transportation in this mode. However, road transportation has its own risks, including leakage in residential areas, accidents, fires, and toxic gas emissions. Modeling tools such as SAFETI software are widely used in

* Corresponding Author Email: a_karimi@sina.tums.ac.ir

analyzing the consequences of potential accidents, including chemical spills, explosions, or fires. These tools perform quantitative risk analysis (QRA) by taking into account environmental conditions, material properties, and population density, allowing for accurate decision-making to reduce the consequences of accidents and improve transportation safety.

2. MATERIAL AND METHODS

The methodology of this study consists of 7 steps, which are explained in order.

1. Determining the purpose of the risk assessment: This study was conducted in a petrochemical transportation company in Iran. Ammonia was selected due to its toxicity, risks and higher accident rate in this group.

2. Description of the study center under review: This study quantitatively assesses the risk of ammonia spills from tankers on one of the busiest ammonia transport routes in Iran, the Shiraz-Esfahan petrochemical route. This route is considered as one of the most sensitive points for chemical spills due to its proximity to residential areas and high traffic. Based on the accidents recorded in the database of the company under study, the Buin Zahra area (between Shiraz and Isfahan), where 30% of the accidents and leaks of ammonia tankers had occurred, was determined as a high-risk area in terms of the recurrence of accidents.

3. Hazard identification: Based on past experiences and data recorded in accident databases, the most important hazards associated with road ammonia tankers include the occurrence of a complete rupture of the tanker body and leakage of the tank contents into the surrounding environment.

4. Scenario identification and analysis: In this study, scenarios were developed using information recorded in the company's database regarding past incidents (HSE reports). Ammonia leakage from

the tanker (as the most common potential incident) and sudden rupture of the tanker (worst case) were studied as the most undesirable potential incident selected.

5. Consequence Modeling: In this study, the effects of radiant heat and blast wave pressure from jet fire, spherical fire and vapor cloud explosion (VCE) were evaluated using SAFETI software version 9.

6. Determining the repeatability of scenarios: In this research, the repeatability and probability of occurrence of a leak scenario in ammonia tankers was calculated based on the database available in the company in question and past experiences over a period of 10 years.

7. Calculation and assessment of individual risk: In this stage, in order to prioritize the risk level of scenarios, the risk index was calculated using the quantitative risk assessment (QRA) method using SAFETI software.

3. RESULTS AND DISCUSSION

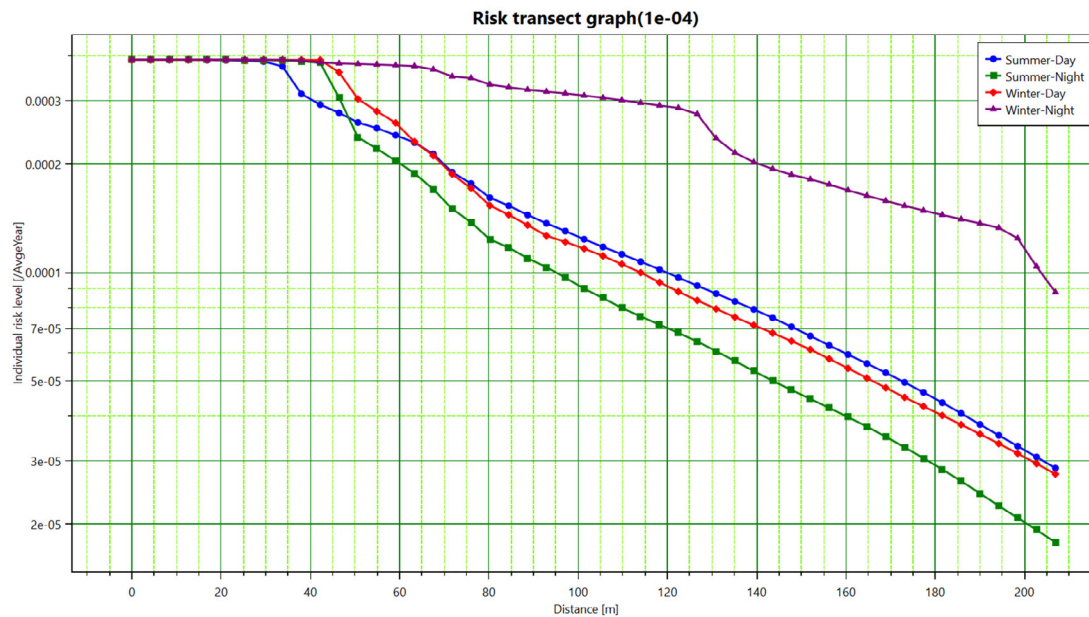
The installation of a digital pressure sensor had a significant impact on reducing the personal risk from an ammonia leakage. Reducing the response time (driver) from several minutes to less than a minute resulted in a significant drop in the concentration of toxic gas, reducing the number of areas requiring evacuation and saving lives in the surrounding areas. The results showed that this led to a reduction in the gas release time from 40 to 25 minutes, which resulted in a reduction in the volume of the leaked gas and ultimately a reduction in the level of risk of accidents. As mentioned in Table 1, this risk reduction varied between 55 to 99 percent in different weather conditions. So that it reached 99% in the summer night, which indicates the importance of rapid leakage control in reducing harmful effects. In the winter, the risk reduction was reported 72% during the day and 55% at night, which shows

Table1: Individual risk levels at 40- and 25-minute release scenarios

For a distance of 340 meters from the tanker stop				
Ratio of changes (percent)	Release in 25 min		Release in 40 min	
	Atmospheric conditions	Risk level (per year)	Atmospheric conditions	Risk level (per year)
-	Summer Day	-	Summer Day	-
99	Summer Night	3.14×10^{-15}	Summer Night	3.34×10^{-7}
72	Winter Day	1.46×10^{-6}	Winter Day	5.21×10^{-6}
55	Winter Night	2.54×10^{-4}	Winter Night	5.57×10^{-4}

Table 2: Individual risk level in the sudden rupture of an ammonia tanker

Individual risk level for sudden tanker rupture					Weather conditions/Contour radius
10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	
415	393	339	258	120	Summer Day
383	362	308	234	95	Summer Night
430	389	340	258	114	Winter Day
500	468	400	320	203	Winter Night

**Fig. 1:** Comparative chart of individual risk per risk in different weather conditions in sudden rupture

that weather conditions play an important role in the dispersion and reduction of risk. These results emphasize the importance of rapid monitoring systems, such as digital pressure sensors, which can significantly reduce response time and minimize the consequences of leaks. The sudden rupture of ammonia tankers is known as one of the most critical mechanical failure scenarios in the transportation of hazardous chemicals, which can lead to the rapid and widespread release of toxic, flammable and reactive substances. In order to more accurately evaluate the consequences of this event, the radii of individual risk contours for five annual death probability levels from 10^{-4} to 10^{-8} in four different weather conditions were analyzed and compared using SAFETI software modeling. According to the results mentioned in Table 2 and Figure 1, the greatest expansion of risk contours was observed in the winter night conditions. So that the radius at the risk level of 10^{-4} reached 203 and at the level of 10^{-8} reached 500 meters.

4. CONCLUSIONS

The present study, using consequence modeling and Quantitative Risk Assessment (QRA) with the SAFETI software, demonstrated that ammonia leakage during road transportation can have severe impacts on human health and the safety of surrounding communities, particularly under cold and stable nocturnal atmospheric conditions.

Therefore, in designing safe transportation systems for hazardous chemicals, it is essential to adopt an integrated approach that combines technical interventions (such as digital pressure sensors), environmental assessments and emergency response planning. This is particularly critical in densely populated areas and along routes near residential communities, where establishing safety zones based on combined scenarios of prolonged leaks and stable atmospheric conditions is indispensable. Moreover, the advancement of smart technologies and the application of accurate modelings can serve as effective measures to

enhance the safety of road transportation of hazardous chemicals in the country.

Future research could focus on the development of advanced modeling and artificial intelligence approaches to better predict toxic cloud behavior and assess risks under varying atmospheric conditions. Investigating the simultaneous transportation of multiple hazardous chemicals and evaluating their combined consequences, along with economic assessments of implementing innovative technologies such as digital pressure sensors and

warning systems, can provide a more comprehensive perspective on transportation safety.

5. ETHICAL CODE

IR.TUMS.SPH.REC.1402.048

6. FUNDING

This study was conducted as part of a PhD thesis in Occupational Health Engineering and was supported by Tehran University of Medical Sciences (Grant No: IR.TUMS.SPH.REC.1402.048).

ارزیابی اثربخشی سنسور فشار در کاهش ریسک رهائش محموله آمونیاک در حال حمل: یک مطالعه موردی مبتنی بر QRA در یک شرکت حمل و نقل مواد پتروشیمی

ملیحه کلاهدوزی، یوسف نجفیان، علی کریمی*

گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۳

چکیده

مقدمه: حمل و نقل مواد خطرناک همواره با خطرات متعددی همراه است که می‌تواند سلامت انسان، محیط زیست، اموال و زیرساخت‌ها را تهدید کند. توسعه و اجرای مخازن آمونیاک در پروژه‌ها و سازمان‌های صنعتی مختلف با اهداف صنعتی متفاوت، خطرات جدی در زمینه ایمنی، بهداشت و محیط زیست خواهد داشت. از این رو، ارزیابی ریسک برای بخش شیمیایی ضروری است. بنابراین هدف از این مطالعه ارزیابی اثربخشی سنسور فشار در کاهش ریسک رهائش محموله آمونیاک در حال حمل، مبتنی بر QRA در یک شرکت حمل و نقل مواد پتروشیمی می‌باشد.

روش کار: این مطالعه به ارزیابی ریسک انتشار آمونیاک از تانکر تحت فشار پرداخته و اثرات کاهشی ریسک ناشی از به‌کارگیری سنسور فشار جهت پیش بینی نشتی را مورد بررسی قرار داد. جهت مدلسازی و آنالیز پیامدها و ارزیابی کمی ریسک از نسخه ۹ نرم افزار SAFETI استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که نصب سنسور فشار روی تانکر آمونیاک منجر به کاهش زمان رهائش گاز از ۴۰ به ۲۵ دقیقه شده که پیامد آن کاهش حجم گاز نشت یافته و در نهایت کاهش سطح ریسک وقوع حوادث خواهد بود. این کاهش ریسک در شرایط مختلف جوی بین ۵۵ تا ۹۹ درصد متغیر بوده است. با کاهش زمان نشت از ۴۰ به ۲۵ دقیقه، شعاع کشندگی آمونیاک در تمام شرایط جوی به طور منظم کاهش یافت. تحلیل کانتورهای ریسک فردی در سناریوی گسست ناگهانی نشان داد که شرایط جوی به ویژه در شب‌های زمستان، بیشترین تأثیر را در گسترش نواحی کشندگی دارند.

نتیجه گیری: استفاده از سنسور فشار و سامانه‌های هشداردهنده می‌تواند به طور مؤثری در کاهش سطح ریسک فردی نقش داشته باشد. این سامانه‌ها با پایش مستمر وضعیت مخزن و اطلاع رسانی سریع در صورت بروز نشتی با افت فشار، موجب واکنش سریع تر و جلوگیری از تشدید پیامدها می‌شوند.

کلمات کلیدی: ارزیابی ریسک کمی (QRA)، تانکر آمونیاک، حمل و نقل جاده‌ای، مواد خطرناک، SAFETI

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: a_karimi@sina.tums.ac.ir

مقدمه

حمل و نقل مواد خطرناک یکی از مراحل کلیدی در زنجیره تأمین صنایع شیمیایی، پتروشیمی، انرژی و داروسازی به شمار می‌رود. این مواد به دلیل خواص فیزیکی یا شیمیایی ویژه در صورت نشت، انفجار یا تماس با انسان و محیط، می‌توانند آثار جبران ناپذیری به جا بگذارند (۱). مواد خطرناک بر اساس طبقه بندی سازمان ملل در ۹ کلاس اصلی دسته بندی می‌شوند. از جمله: مواد منفجره، گازها، مایعات و جامدات قابل اشتعال، مواد اکسیدکننده، سمی، رادیواکتیو و خورنده (۲). دسترسی گسترده به جاده ها، در کنار کمبود زیرساخت‌های ریلی و هوایی، باعث تمرکز حمل در این شیوه شده است. با این حال، حمل جاده ای خطرات خاص خود را دارد. از جمله نشت در مناطق مسکونی، تصادفات، آتش‌سوزی و انتشار گازهای سمی (۳). برای کاهش این خطرات، استفاده از تجهیزات ایمن، آموزش تخصصی رانندگان، طراحی مهندسی تانکرها، پایش و تحلیل پیامدها با ابزارهایی مانند نرم افزار SAFETI^۱ و PHAST^۲ ضروری است (۱). چنین اقداماتی نقش مهمی در پیشگیری از حوادث، آمادگی در شرایط اضطراری و افزایش ایمنی عمومی ایفا می‌کنند. حمل و نقل مواد خطرناک همواره با خطرات بالقوه و بالفعل متعددی همراه است که می‌تواند سلامت انسان، محیط زیست، اموال و زیرساخت‌ها را تهدید کند. این خطرات بسته به نوع ماده، مقدار مواد رها شده، شرایط حمل، مسیر، نوع وسیله نقلیه، دریافت کننده و حضور افراد در نزدیکی محل رهایش و مدیریت عملیات متغیر هستند (۱). بنابراین لازم است اقدامات مناسبی به منظور کاهش تأثیر و خطر وقوع آنها انجام شود. حمل و نقل آمونیاک به صورت مایع تحت فشار در تانکرهای مخصوص، یکی از فعالیت‌های رایج در صنعت پتروشیمی، کشاورزی و تولید کودهای شیمیایی است. آمونیاک یکی از گازهای سمی است که تماس مستقیم با آن می‌تواند باعث آسیب‌های جدی به سلامت افراد شود. تماس

مستقیم با آمونیاک می‌تواند باعث سوختگی شیمیایی و التهاب چشم گردد (۲). استنشاق غلظت‌های بالای آمونیاک باعث تحریک سیستم تنفسی و ایجاد مشکلات تنفسی مانند سرفه، تنگی نفس و در موارد شدیدتر، ورم ریه و مرگ می‌شود (۴، ۵). آمونیاک در شرایط خاص، به ویژه در غلظت‌های بالا و در دماهای بالای ۶۵۱ درجه سانتی‌گراد، قابل اشتعال است. در نتیجه، در صورت نشت آمونیاک و تماس آن با منابع اشتعال را مانند جرقه یا شعله، ممکن است منجر به انفجار یا آتش‌سوزی شود (۶). یکی از بزرگ‌ترین خطرات حمل و نقل آمونیاک، وقوع تصادفات جاده ای است. در صورت تصادف یا واژگونی تانکرها، امکان نشت آمونیاک و انتشار آن در محیط وجود دارد. این نشت می‌تواند به سرعت منطقه ای وسیع را آلوده کرده و برای انسان‌ها و محیط زیست خطرناک باشد (۷). رانندگان و تیم‌های امدادی که با تانکرهای آمونیاک مواجهه دارند، در معرض خطرات جدی قرار دارند (۸). در حال حاضر، حوادث ناشی از نشت آمونیاک در تاسیسات صنعتی تکرار می‌شود. اداره ایمنی و بهداشت شغلی (OSHA^۳) حد مجاز قرار گرفتن در معرض آمونیاک را به طور متوسط در یک روز کاری (۸ ساعت) ۵۰ پی پی ام تعریف کرده است (۹). بنابراین به دلیل سمیت بالای آن برای انسان و محیط در هنگام وقوع نشت نیاز به مراقبت دارد (۱۰). توسعه و اجرای مخازن آمونیاک در پروژه ها و سازمان‌های صنعتی مختلف با اهداف صنعتی متفاوت، خطرات جدی در زمینه ایمنی، بهداشت و محیط زیست خواهد داشت. از این رو، ارزیابی ریسک برای بخش شیمیایی ضروری است (۱۱). از آنجا که مسیرهای حمل و نقل معمولاً مکان‌های شلوغی است، حوادث ناشی از حمل و نقل ممکن است شرایط خطرناکی را برای افراد به وجود آورد. حوادث ناشی از حمل و نقل مواد خطرناک ممکن است در محل بارگیری، محل تخلیه نهایی یا طی مسیر اتفاق بیفتد (۱۲). در ایران به دلیل مصرف بالای صنایع از آمونیاک، حمل و نقل این ماده در سراسر کشور با نرخ بالایی صورت می‌پذیرد. در نتیجه سیستم حمل و

1. Software for the Assessment of Flammable, Explosive, and Toxic Impact

2. Process Hazard Analysis Software Tool

3. Occupational Safety and Health Administration

نقش داشته، شناسایی شوند (۱۲). برخی از حوادث نشت آمونیاک در دهه‌های اخیر، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، منجر به فاجعه‌های انسانی و زیست محیطی شده‌اند. به عنوان نمونه، در سال ۲۰۱۱، نشت آمونیاک از یک تانکر حمل در استان ساموت پراکان تایلند باعث مرگ دو نفر و مصدومیت بیش از ۴۰ نفر شد (۱۵). در ایران نیز، در مهرماه سال ۱۴۰۱، در جریان تست و تعویض شیر یکی از تانکرهای واحد تولیدی اروم تریلر در ارومیه، نشت گاز آمونیاک رخ داد که موجب مسمومیت ۵۱ نفر از کارگران و اعزام آن‌ها به مراکز درمانی شد (۱۶). این حوادث اهمیت نظارت دقیق بر حمل و نقل و استفاده از ابزارهای پیش بینی و کنترل پیامد را برجسته می‌سازند. در سال‌های اخیر، چندین حادثه مهم نشت آمونیاک در ایران گزارش شده است که عمدتاً به نقص فنی، فرسودگی تجهیزات یا خطای انسانی مربوط می‌شوند. این حوادث به طور واضح نشان دهنده اهمیت ارزیابی دقیق ریسک و پیش بینی پیامدهای احتمالی نشت آمونیاک است. برای کاهش خطرات ناشی از حمل و نقل مواد خطرناک، ارزیابی دقیق ریسک و شبیه سازی سناریوهای مختلف حوادث، امری حیاتی محسوب می‌شود. ابزارهای مدل سازی مانند نرم افزار SAFETI به طور گسترده‌ای در تحلیل پیامدهای حوادث احتمالی، از جمله نشت، انفجار یا آتش‌سوزی مواد شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ابزارها با در نظر گرفتن شرایط محیطی، خصوصیات ماده و تراکم جمعیت، به تحلیل کمی ریسک (QRA⁴) پرداخته و امکان تصمیم‌گیری دقیق برای کاهش پیامدهای حوادث و ارتقاء ایمنی حمل و نقل را فراهم می‌کنند (۱۷). نرم افزار SAFETI یکی از معتبرترین و شناخته شده ترین ابزارها در این حوزه به شمار می‌رود که توسط شرکت DNV⁵ توسعه یافته است. این نرم افزار با بهره‌گیری از مدل‌های فیزیکی دقیق و داده‌های ورودی نظیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ماده، شرایط آب و هوایی، توپوگرافی منطقه و تراکم جمعیت، قادر است نواحی خطر را شناسایی کرده و

نقل این ماده با خطرات بسیاری از جمله نشتی و انتشار مواد سمی به محیط در ارتباط می‌باشد. بنابراین لازم است فرآیند انتشار آمونیاک در حمل و نقل جاده‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. تاکنون، بیشتر تحقیقات نشت آمونیاک بر نشت حین تولید یا ذخیره‌سازی در مجتمع‌های پتروشیمی متمرکز بوده است و نشت حین حمل و نقل نیاز به تحقیقات بیشتری دارد (۱۳). در این تحقیق، وضعیت در حال حرکت وسیله نقلیه بر انتشار آن تأثیر می‌گذارد که آن را به یک فرآیند پیچیده‌تر تبدیل خواهد کرد. با توجه به مدت زمان فرآیند نشتی و حرکت مخزن دارای نشتی، حوادث نشتی را می‌توان به سه نوع تقسیم کرد: نشت آنی از منبع نقطه‌ای ثابت، نشت مداوم از منبع نقطه‌ای ثابت و نشت مداوم از منبع نقطه‌ای متحرک. در مقایسه با منبع نقطه‌ای ثابت، نشت از منبع نقطه‌ای متحرک دارای ویژگی‌هایی است: توزیع غلظت گاز خطرناک نه تنها می‌تواند تحت تأثیر سرعت باد، پایداری جو و ناهمواری سطح باشد، بلکه سرعت و جهت مخزن نیز موثر است. آمونیاک پس از نشت به سرعت تبخیر می‌شود و در اثر وزش باد گسترش می‌یابد که می‌تواند بلافاصله منجر به حادثه مسمومیت افراد و گسترش در یک منطقه بزرگ شود. همچنین خطر آتش‌سوزی و انفجار آمونیاک وجود دارد (۱۳). اگرچه حمل و نقل مواد خطرناک به عنوان رویدادهایی با احتمال کم و شدت بالا طبقه‌بندی می‌شوند، اما نشت این مواد می‌تواند بیش از اندازه برای محیط زیست و سلامتی انسان‌ها مضر باشد. بعلاوه شدت برخی از این حوادث در کشورهای در حال توسعه مثل هند به صورت قابل ملاحظه‌ای بیشتر از کشورهای توسعه یافته می‌باشد. رقم تلفات در هر ۱۰۰۰۰ وسیله نقلیه در هند ۱۴ است و این در حالیست که این عدد در کشوری مثل آمریکا کمتر از ۲ می‌باشد (۱۴). با توجه به آنکه در چشم انداز سال ۲۰۳۰ توسعه پایدار مقرر شده است که کل مرگ و میرها و صدمات ناشی از حوادث ترافیکی به نصف کاهش یابد، لازم است تا دلایل متعددی از جمله انسان، وسیله نقلیه، محیط و جاده که در بروز این حوادث

4. Quantitative Risk Assessment

5. Det Norske Veritas

مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که با افزایش روزافزون حمل مواد شیمیایی از طریق جاده‌های کشور، تحلیل دقیق و پیشگیرانه در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد. با وجود اجرای مقررات سخت‌گیرانه ایمنی، تدوین آیین نامه‌های ملی و بین‌المللی و بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته شناسایی و ارزیابی خطرات مانند HAZOP⁶، FMEA⁷ و QRA، همچنان حوادث صنعتی در کشور ایران با فراوانی قابل توجهی رخ می‌دهند (۱۹). این موضوع بیانگر آن است که حتی پیشرفته‌ترین واحدهای صنعتی که از طراحی‌های نوین، فناوری‌های روز و نیروی انسانی آموزش‌دیده برخوردارند، به‌طور کامل در برابر وقوع حوادث مصون نیستند. علل این حوادث می‌تواند ترکیبی از عوامل انسانی، نقص تجهیزات، شرایط محیطی، ناهماهنگی میان سیستم‌ها و عدم اجرای کامل برنامه‌های ایمنی باشد (۲۰). این موضوع به ویژه در صنایع فرآیندی و حمل و نقل مواد شیمیایی مانند آمونیاک که دارای ریسک بالا و پیامدهای شدید هستند، از اهمیت بیشتری برخوردار است. در نتیجه توجه به ابزارها و چارچوب‌های نظری مدیریت ریسک، کافی نیست و باید نگاه سیستمی، آموزش مستمر، فرهنگ ایمنی و پایش واقعی عملکرد ایمنی نیز در برنامه‌های پیشگیرانه نهادینه شود (۲۱). بررسی مطالعات نشان داده که نصب سنسور فشار دیجیتال روی مخازن آمونیاک می‌تواند تغییرات غیرعادی فشار درون مخزن را به صورت لحظه‌ای شناسایی و از طریق نمایشگر و آلارم به راننده منتقل کند. در شرایط عادی، راننده برای تشخیص نشتی یا افزایش فشار نیاز به مشاهده ی مستقیم فشارسنج عقبه‌ای یا بروز علائم فیزیکی (مانند بوی آمونیاک یا ایجاد ابر سمی) دارد که معمولاً با تأخیر همراه است. این تأخیر موجب آزادسازی حجم بیشتری از گاز شده و در نتیجه پیامدهای انسانی و محیطی افزایش خواهد یافت. اما وجود سنسور می‌تواند موجب کاهش زمان تشخیص، کاهش زمان واکنش راننده، محدودسازی حجم نشت (کاهش فاصله

پیامدهایی مانند انفجار، آتش‌سوزی و گسترش گازهای سمی را شبیه‌سازی کرده و کانتورهای ریسک را به صورت نقشه‌های گرافیکی ترسیم نماید. این نرم افزار به طور گسترده برای ارزیابی ایمنی صنایع شیمیایی، نفت و گاز و همچنین حمل و نقل جاده‌ای، دریایی و ریلی مواد خطرناک به کار می‌رود (۱۷). از مزایای دیگر این نرم افزار میتوان به دقت بالا در شبیه‌سازی‌ها با بهره‌گیری از مدل‌های فیزیکی معتبر، نمایش گرافیکی و نقشه‌ای از ناحیه‌های خطر، کمک به تصمیم‌گیری برای مکان‌یابی ایمن تأسیسات و مسیرهای حمل و نقل، امکان ارزیابی راهبردهای کاهش ریسک اشاره کرد. در تحلیل حمل و نقل جاده‌ای مواد مانند آمونیاک، نرم افزار SAFETI می‌تواند کمک کند تا محل وقوع نشت، میزان گسترش گاز، تعداد افراد در معرض خطر و احتمال مرگ و میر را به دقت مدلسازی کرده و نقشه‌های ریسک را تولید کند. این ویژگی‌ها به کاربران اجازه می‌دهد تا شدت و گستره اثرات نشت، از جمله گسترش گاز سمی، ریسک مرگ و تخلیه اضطراری را به دقت تحلیل کنند (۱۷). مطالعات بین‌المللی انجام شده در دهه اخیر نشان می‌دهد که برای مدل‌سازی انتشار مواد خطرناک، نرم افزارهایی نظیر PHAST، ALOHA و به ویژه SAFETI، ابزارهایی پرکاربرد در تحلیل ریسک در حوزه‌های مختلف نظیر واحدهای فرایندی، خطوط لوله، حمل و نقل دریایی و جاده‌ای محسوب می‌شوند. این نرم افزارها با تکیه بر مدل‌های ترمودینامیکی و ریاضی پیشرفته، قادرند پیامدهای نشت و انتشار مواد سمی، اشتعال‌پذیر یا انفجاری را در شرایط واقعی محیطی شبیه‌سازی کنند. بررسی پژوهش‌های انجام شده در ایران نیز نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از مطالعات مرتبط با مدلسازی پیامد، متمرکز بر خطوط لوله انتقال گاز و مایعات خطرناک و نیز واحدهای فرایندی صنایع نفت، گاز و پتروشیمی بوده‌اند (۱۸). با این حال، مدلسازی پیامدهای ناشی از حوادث تانکرهای حمل و نقل جاده‌ای به ویژه با استفاده از نرم افزارهای پیشرفته‌ای مانند SAFETI، در پژوهش‌های داخلی به مراتب کمتر

6. Hazard and Operability Study
7. Failure Modes and Effects Analysis

از این مطالعه ارزیابی اثربخشی سنسور فشار در کاهش ریسک رهائش مأموله آمونیاک در حال حمل، مبتنی بر QRA در یک شرکت حمل و نقل مواد پتروشیمی می‌باشد. جهت مدلسازی و آنالیز پیامدها و ارزیابی ریسک به صورت کمی از نسخه ۹ نرم افزار SAFETI متعلق به شرکت DNV استفاده شد (۱۷).

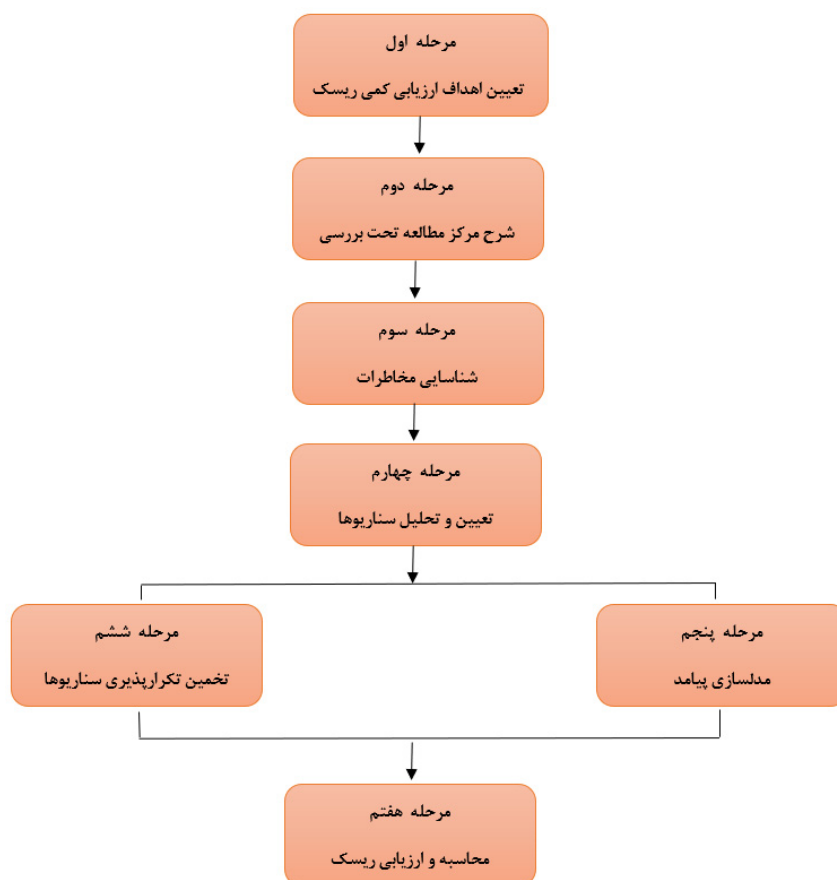
۲. شرح مرکز مطالعه تحت بررسی: در شرکت مورد پژوهش که حمل و نقل مواد پتروشیمی در آن انجام می‌شود، حدود ۵۰ درصد از مخازن تحت فشار سهم حمل و نقل گاز آمونیاک بوده و آمار حوادث و خطرات ناشی مرتبط با این ماده ی خطرناک، به دلیل افزایش فشار و به اصطلاح سوپاپ زدن رها نه ی اطمینان دوم می‌باشد. بنابراین با کاربرد گسترده آمونیاک در صنعت، ایجاد ناشی در زمان حمل و نقل جاده ای یک نگرانی بزرگ می‌باشد.

زمانی بین شروع نشتی و اقدام راننده) و کاهش شدت پیامدها شود (۲۲-۲۴). از این و در این مطالعه هدف، ارزیابی اثربخشی سنسور فشار در کاهش ریسک رهائش مأموله آمونیاک در حال حمل، مبتنی بر QRA در یک شرکت حمل و نقل مواد پتروشیمی می‌باشد.

روش کار

روش انجام کار این مطالعه طبق دیاگرام در شکل ۱ از ۷ مرحله تشکیل شده است که به ترتیب توضیح داده می‌شود.

۱. تعیین هدف ارزیابی ریسک: این مطالعه در یکی از شرکت های حمل و نقل مواد پتروشیمی در ایران مورد بررسی قرار گرفت. آمونیاک به دلیل سمیت و خطرات و نرخ حوادث بالاتر در این مجموعه انتخاب گردید. هدف



شکل ۱: دیاگرام روش انجام کار (۲۵)

جدول ۱: اطلاعات سناریوی مطالعه

نوع تجهیز	نوع سیال	سناریوها	زمان رهايش (دقیقه)	قطر نشتی (میلیمتر)	تکرارپذیری (تعداد حادثه در سال) (yr^{-1})
تانکر	آمونیاک	نشت	۲۵	۲۰	1.7×10^{-2}
تانکر	آمونیاک	نشت	۴۰	۲۰	1.7×10^{-2}
تانکر	آمونیاک	گسست ناگهانی	-	-	3.9×10^{-4}

برای مقابله با شرایط اضطراری تعیین می‌شود (۲۷). برای انجام تحلیل کمی ریسک در حمل و نقل جاده ای مواد خطرناک، شناسایی دقیق و واقع گرایانه ی سناریوهای حادثه محور، گام بسیار مهمی محسوب می‌شود. در این مطالعه، تدوین سناریوها با استفاده از اطلاعات ثبت شده در بانک اطلاعاتی شرکت مورد مطالعه در خصوص حوادث گذشته (گزارش‌های HSE⁸) انجام شد. نشتی آمونیاک از تانکر (به عنوان رایج ترین حادثه بالقوه) و گسست ناگهانی تانکر (بدترین حالت) به عنوان نامطلوب ترین حادثه بالقوه ی انتخابی، مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، سه سناریوی اصلی به شرح جدول ۱ تدوین گردید. هر سناریو در دو فصل زمستان و تابستان و با در نظر گرفتن شرایط جوی (کلاس پایداری پاسکویل) (۲۸)، زمان وقوع (روز یا شب) و در مجموع ۶ سناریو در نرم افزار SAFETI مدلسازی شد. به منظور ارزیابی اثربخشی سنسور فشار، دو سناریوی نشت با زمان رهايش متفاوت (۴۰ دقیقه بدون سنسور و ۲۵ دقیقه با فرض هشدار زودهنگام سنسور) تعریف و مقایسه شد.

۴-۱. طبقه بندی شرایط آب و هوایی: برای تحلیل پراکندگی گازهای سمی در مدل‌های پیامدی مانند SAFETI، طبقه بندی شرایط جوی بر اساس کلاس‌های پایداری پاسکویل انجام می‌شود (۲۸). این طبقه بندی که در ابتدا برای مدل سازی پراکندگی آلاینده‌ها توسعه یافته است، شرایط مختلف جوی را از نظر پایداری لایه مرزی جو به شش دسته ی A تا F تقسیم می‌کند. کلاس‌های A تا C نشان‌دهنده شرایط ناپایدار، کلاس D خنثی و کلاس‌های E و F شرایط پایدار هستند. این تقسیم بندی

8. Health, Safety and Environment

در این مطالعه، به ارزیابی کمی ریسک نشت آمونیاک از تانکر در یکی از مسیرهای پرتردد حمل آمونیاک در ایران، یعنی مسیر پتروشیمی شیراز به اصفهان پرداخته می‌شود. این مسیر به دلیل نزدیکی به مناطق مسکونی و ترافیک بالا، یکی از نقاط حساس برای نشت مواد شیمیایی به شمار می‌رود. براساس حوادث ثبت شده در بانک اطلاعاتی شرکت مورد مطالعه، منطقه بوئین زهرا (حدفاصل شیراز و اصفهان) که ۳۰ درصد حوادث و نشتی‌های تانکرهای آمونیاک در این منطقه اتفاق افتاد، به عنوان منطقه ی با ریسک بالا از نظر تکرارپذیری حوادث تعیین گردید.

۳. شناسایی مخاطرات: براساس تجربیات گذشته و داده های ثبت شده در بانک‌های اطلاعاتی حوادث، از جمله مهمترین مخاطرات مرتبط با تانکرهای حمل و نقل جاده‌ای آمونیاک می‌توان به وقوع شکافت کامل بدنه تانکر و نشت محتویات مخزن به محیط اطراف اشاره کرد. این نوع مخاطرات به ویژه در شرایط تصادف شدید، نقص فنی در اتصالات و یا تخریب ناشی از خوردگی و فشار داخلی بیش از حد، می‌تواند منجر به انتشار سریع و ناگهانی آمونیاک شده و خطرات جدی برای سلامت انسان، محیط زیست و زیرساخت‌های شهری به دنبال داشته باشد. پیامد این رخدادها می‌تواند شامل انتشار ناگهانی گاز آمونیاک، آسیب به سلامت ساکنان اطراف، آلودگی محیطی و بحران‌های امدادی باشد (۳، ۲۶).

۴. تعیین و تحلیل سناریوها: سناریوها وقایع فرضی هستند که می‌توانند منجر به رویدادهای فرآیندی آتش سوزی، انفجار و یا رهايش مواد سمی شوند. در سناریوها واقعه اولیه، محدوده گسترش، پیامدها و نیز اقدامات لازم

جدول ۲: تعاریف پارامترهای پایداری پاسکوئیل (۲۸)

کلاس پایداری جوی	وضعیت پایداری	توصیف کلاس
A	کاملاً ناپایدار	آفتابی، باد آرام
B	نسبتاً ناپایدار	مانند A اما با آفتاب کمتر و یا باد بیشتر
C	به میزان بسیار کم ناپایدار	طوفانی / نیمه ابری
D	خنثی	آفتاب کم و باد زیاد یا ابری / شب طوفانی
E	پایدار	میزان ابری کمتر و باد کمتر از D
F	کاملاً پایدار	شیب با ابر متوسط / باد متوسط

جدول ۳: شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه (بوئین زهرا)

معیار پایداری پاسکوئیل	میانگین رطوبت (درصد)	تابش خورشید (کیلووات بر مترمربع)		سرعت باد غالب (متر بر ثانیه)		دمای اتمسفر و سطح زمین (درجه سانتیگراد)		
		شب	روز	شب	روز	شب	روز	
D	C	۲۰	۰	۱	۴	۱۷	۳۵	تابستان
F	D	۴۰	۰	۱	۱.۵	۰	۱۰	زمستان

انفجار برای آتش جت ، آتش کروی و انفجار ناشی از ابر بخار انتخاب و تحلیل شدند.

۱-۵: مدل جت فایر (Jet Fire Model): در این مطالعه، اثرات جت فایر با استفاده از مدل میلر ارزیابی شده است. برای نشی‌های افقی، رابطه (۱) طول مومنتوم شعله، رابطه (۲) بلند شدن شعله به دلیل نیروی بویانسی و رابطه (۳) زاویه بلند شدن افقی بین محور شعله و خط افق را نشان می‌دهد (۳۱).

$$B_M = \max(0, \min(e^{-0.13 Ri(L_{B0})}, 1)) L_{B0} \quad (1)$$

$$L_y = \max(0, \min(0.05 Ri(L_{B0}), 1)) \quad (2)$$

$$\delta_{horizontal} = \max\left(0, \min\left\{\sin^{-1}\left(\frac{L_y}{L_f - B_M}\right), \left(\frac{\pi}{2} - \delta_{horizontal}\right)\right\}\right) \quad (3)$$

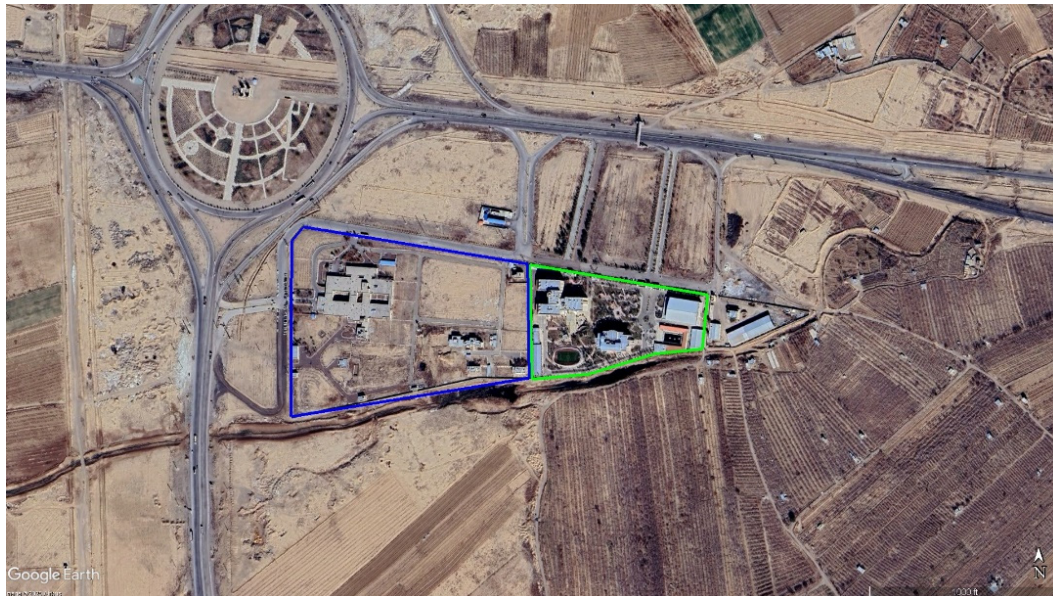
رابطه (۴) طول مرکز خط شعله افقی را نشان می‌دهد که مستقل از باد بوده و برابر با طول شعله در شرایط بدون باد (صفر باد) است. رابطه (۵) طول بخش بلند شدن شعله ناشی از تأثیر همزمان باد و نیروی بویانسی را نشان می‌دهد.

$$L_f = L_{B0} = B_M + R_L \quad (4)$$

به شدت به سرعت باد، تابش خورشید و پوشش ابری وابسته است. استفاده از این طبقه بندی در مدل سازی کمک می‌کند تا بیشترین دقت در تعیین سطح در معرض قرارگیری جمعیت انسانی فراهم شود. برای مثال، شرایط F با پایداری بالا می‌تواند منجر به تجمع غلظت آمونیاک در سطح زمین و افزایش احتمال مرگ و میر شود. (۲۹). در جدول ۲ نوع و خصوصیات مربوط به هر یک از آنها آورده شده است. شرایط آب و هوایی منطقه بوئین زهرا (شکل ۲) در دو فصل گرم و سرد در نظر گرفته شد که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. برای تعیین شرایط جوی منطقه مورد مطالعه از سالنامه هواشناسی استفاده شد. براساس معیار تقسیم بندی پاسکوئیل، کلاس پایداری F در این مطالعه به عنوان بدترین حالت بوده است

۵. مدلسازی پیامد: در این مطالعه، اثرات گرمای تابشی و فشار موج انفجار ناشی از آتش جت ، آتش کروی و انفجار ناشی از ابر بخار (VCE^۹) با استفاده از نرم افزار SAFETI نسخه ۹ مورد ارزیابی قرار گرفت (۳۰). بر این اساس، فرمول‌های محاسبه گرمای تابشی و فشار موج

9. Vapor Cloud Explosion



شکل ۲: تصویر هوایی از منطقه‌ی مورد مطالعه (بوئین زهرا)

تحقیقات علمی کاربردی هلند (TNO) استفاده شد. روش چندانرژی TNO که توسط Van den Berg توسعه یافته است، یک معادله برای محاسبه فشار بیشینه ناشی از انفجار ارائه می‌دهد. این روش، کلاس‌های مختلف انفجار را بر اساس فاصله مقیاس شده و شدت فشار بیشینه انفجار تفکیک کرده و حداکثر فشار انفجار را تعیین می‌کند. در این روش، حداکثر فشار بیشینه انفجار و فاصله به صورت پارامترهای بدون بعد مقیاس گذاری شده اند که در رابطه های (۸) تا (۱۰) نشان داده شده است (۳۱).

$$P'_s = \frac{\Delta P_s}{P_a} \quad (۸)$$

$$P'_{dyn} = \frac{P_{dyn}}{P_a} \quad (۹)$$

$$r' = \frac{r}{\left(\frac{E}{P_a}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (۱۰)$$

که در آن P'_s نشان دهنده ی فشار بیشینه جانبی مقیاس شده ΔP_s فشار بیشینه جانبی انفجار و P_a فشار مرجع یا فشار محیط و P'_{dyn} فشار دینامیکی

که در آن L_f نشان دهنده ی طول مرکز خط شعله افقی و L_{B0} ، طول شعله در شرایط بدون باد و B_M ، طول مومنتوم شعله و R_L طول بخش بلند شدن شعله می‌باشد

$$R_L = L_f - B_M \quad (۵)$$

$$L_B = \sqrt{L_y^2 + B_M^2 + (R_L \cos \delta_{horizontal})^2 + 2R_L B_M \cos \delta_{horizontal} \cos \phi_{flame}} \quad (۶)$$

که در آن L_B نشان دهنده ی طول شعله از محل نشستی تا نوک شعله می‌باشد.

و رابطه (۷) که در آن $W_{surface}$ نشان دهنده ی توان انتشار سطحی شعله افقی است. F : ضریب انتشار حرارت و $\Delta H_{c,gas}$ ، انرژی حرارتی احتراق گاز و A ، سطح شعله می‌باشد.

$$W_{surface} = \frac{Fm\Delta H_{c,gas}}{A} \quad (۷)$$

۵-۲. مدل انفجار (Explosion Model): در این مطالعه، از مدل چند انرژی (Multi-Energy) سازمان

گرفته شد. این متغیرها شامل فشار عملیاتی تانکر برابر ۲۱۸ پوند بر اینچ مربع (۱۵ بار)، دمای تانکر آمونیاک که در فشار فوق ۲۰ درجه سانتیگراد و شکل تانکر کرووی بود. حجم تانکر ۴۴۰۰۰ لیتر و قطر نشستی آن ۲۰ میلی متر بود. احتمال جرقه فوری روی مدل Transport Road Tanker تنظیم شد. ارتفاع نشت ۱ متر بوده و محل نشستی از کف تانکر در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه تانکر ۱ متر از سطح زمین فاصله دارد، ارتفاع از سطح زمین را در بدترین حالت که نزدیک ترین فاصله به زمین بود را مورد بررسی قرار دادیم. احتمال منابع جرقه ناشی از خطوط برق برای هر دو نوع حالت جاده ای و نقطه ای ۱ جرقه در هر ساعت در نظر گرفته شد. احتمال حادثه در جاده بویین زهرا ۰.۳ و احتمال نشستی تانکر آمونیاک ۰.۰۱۷ محاسبه شد. نرخ تخلیه ی آمونیاک از تانکر از ثانیه ی صفر معادل ۹,۱۳۵۰۲ کیلوگرم بر ثانیه شروع شده و در صورت ادامه ی تخلیه تا دقیقه ی ۴۰ به دبی ۶,۶۶۵۱۲ کیلوگرم بر ثانیه ادامه خواهد شد و برآورد شده است.

۶. تعیین تکرار پذیری سناریوها: در ارزیابی کمی ریسک، احتمال وقوع سناریوهای مختلف حادثه بر اساس واحد تکرارپذیری یا فرکانس وقوع (Frequency of Occurrence) بیان می شود. این شاخص معمولاً بر حسب حادثه بر سال (events/year) محاسبه می گردد و نشان می دهد که یک سناریوی خاص (مانند نشستی کوچک، نشستی بزرگ یا گسست کامل تانکر) با چه احتمالی در طول یک سال می تواند رخ دهد (۳۲). در این پژوهش، محاسبه ی تکرارپذیری و احتمال وقوع سناریوی نشت در تانکرهای آمونیاک براساس بانک اطلاعاتی موجود در شرکت مورد نظر و تجربیات گذشته در مدت زمان ۱۰ سال انجام شد که در جدول ۱ ارائه شده است.

۷. محاسبه و ارزیابی ریسک فردی: در این مرحله جهت اولویت بندی سطح خطر سناریوها، از روش ارزیابی ریسک کمی QRA با استفاده از نرم افزار SAFETI به محاسبه ی شاخص ریسک پرداخته شد (۳۱، ۳۳).

مقیاس شده و P_{dyn} فشار دینامیکی انفجار و r فاصله و E انرژی آزاد شده در انفجار و r' نشان دهنده ی فاصله ی مقیاس شده از مرکز انفجار می باشد.

۳-۵. مدل آتش کرووی (Fireball): در این مطالعه، اثرات آتش کرووی با استفاده از مدل های دینامیکی مارتینسن و مارکس، ارزیابی شد. شعاع آتش کرووی در زمان سپری شده با رابطه ۱۱ بیان می شود (۳۱).

$$r_{fireball} = 4.332 M^{\frac{1}{4}} t^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

$$fort \leq t_{lo}$$

که در آن $r_{fireball}$ نشان دهنده ی شعاع آتش کرووی در زمان t و M ، جرم سوخت شرکت کننده در احتراق (کیلوگرم) می باشد.

توان تابشی سطحی بر اساس همبستگی رابرت (Robert's correlation) پیشنهاد شده است، که دارای حد بالای ۴۰۰ کیلووات بر مترمربع می باشد. توان تابشی سطحی با رابطه ی ۱۲ بیان می شود.

$$E_{fireball} = MIN(0.0118 f M^{\frac{1}{12}} \Delta H_c, 400,000) \quad (12)$$

که در آن f نشان دهنده ی ضریب انتشار تابشی و ΔH_c گرمای احتراق/سوخت بر حسب ژول بر کیلوگرم و M جرم سوخت شرکت کننده در احتراق (کیلوگرم) است این پژوهش یک مطالعه ی موردی در یکی از صنایع حمل و نقل مواد پتروشیمی است که سناریوی نشت به صورت واقعی در آن اتفاق افتاده است و بر همین اساس برای شبیه سازی سناریوهای تعریف شده در مطالعه، اطلاعات ورودی نرم افزار که شامل اطلاعات مربوط به تانکر و محیط هستند، از حوادث گذشته در آن صنعت گردآوری شد. لازم به ذکر است که در این مبحث، بدترین حالت های سناریوها مورد بررسی قرار گرفت. متغیرهای ورودی، برای دو نوع شرایط جاده ای (مسیر حرکت تانکر) و نقطه ای (محل توقف تانکر) در نظر

جدول ۴: مقایسه ی شعاع تابش حرارتی آتش کروی در شرایط جوی مختلف در سناریوی گسست ناگهانی

تابش حرارتی آتش کروی در سناریوی گسست ناگهانی							
شرایط جوی	قطر آتش کروی (متر)	تابش حرارتی					
		فاصله(متر)		سطح (کیلووات بر مترمربع)			
روز تابستان	۶۸	۹۷	۱۸۳	۳۲۹	۳۷.۵	۱۲.۵	۴
شب تابستان	۶۸	۱۰۳	۱۹۸	۳۴۶	۳۷.۵	۱۲.۵	۴
روز زمستان	۶۸	۱۰۰	۱۹۲	۳۴۲	۳۷.۵	۱۲.۵	۴
شب زمستان	۶۸	۱۰۸	۲۰۰	۳۵۲	۳۷.۵	۱۲.۵	۴

یافته ها

۱- تحلیل پیامد سناریوهای گسست ناگهانی:

۱-۱: تابش حرارتی آتش کروی در سناریوی گسست ناگهانی: این تحلیل بر اساس داده های حاصل از مدلسازی آتش کروی در نرم افزار SAFETI نسخه ی ۹ انجام شده و هدف آن بررسی میزان گسترش تابش حرارتی در شرایط جوی مختلف بود. با فرض ثبات قطر آتش کروی (۶۸ متر)، شعاع گسترش حرارت برای سه سطح بحرانی (۳۷.۵، ۱۲.۵ و ۴ کیلووات بر متر مربع) (۳۱، ۳۴) در چهار سناریوی مختلف جوی تحلیل شد. قطر آتش کروی ثابت بوده، یعنی جرم آزاد شده و نوع ماده در تمام سناریوها یکسان است. تفاوت در گسترش حرارت به خاطر شرایط جوی مانند دمای محیط، چگالی هوا، سرعت باد و تابش خورشید است. طبق جدول ۴، بیشترین گسترش حرارتی مربوط به شرایط شب زمستان بوده که در آن تابش حرارتی تا فاصله ۳۵۲ متری برای سطح ۴ کیلووات بر مترمربع ادامه داشته است. کمترین شعاع حرارتی مربوط به روز تابستان بوده است. تفاوت بین شعاع ها در حد ۱۰ تا ۲۵ متر بود اما در سناریوهای پرجمعیت یا نزدیک مناطق مسکونی، همین اختلاف می تواند برای محدوده ی تخلیه اضطراری-فاصله ایمن از مراکز حساس و دقت طراحی سیستم هشدار، تعیین کننده باشد. برای طراحی سناریوهای پاسخ اضطراری، استفاده از مقادیر شعاع در شرایط شب زمستان پیشنهاد می شود، زیرا نمایانگر بدترین حالت گسترش حرارت تشعشی در این حادثه فاجعه بار است.

۱-۲: انفجار بخار ابر (VCE) در سناریوی گسست

۷-۱. تحلیل ریسک فردی (IR¹⁰ Analysis): ریسک فردی بیانگر احتمال مرگ و میر در یک موقعیت مکانی مشخص است که با ضرب فراوانی رخدادهای تعریف شده بر اساس سناریوهای حادثه در احتمال وقوع مرگ و میر ناشی از آن رخدادها محاسبه می شود. مقدار IR(x,y) (نشان دهنده احتمال کلی مرگ و میر در یک نقطه مشخص با مختصات (x, y) است و طبق رابطه (۱۳) بیان می شود. برای محاسبه ریسک فردی در نقطه ای به موقعیت جغرافیایی x, y و ناشی از پیامد نهایی i از رابطه (۱۴) استفاده شده است (۳۱).

$$IR_{X,y} = \sum_{i=1}^n IR_{X,y,i} \quad (13)$$

$$IR_{X,y,i} = fiPfi \quad (14)$$

که در آن IR_{x, y}: ریسک فردی کل در نقطه ای به موقعیت جغرافیایی x و y (احتمال کشته شدن یک نفر در سال)

IR_{x, y, i}: ریسک فردی در نقطه ای به موقعیت جغرافیایی X و Y و ناشی از پیامد نهایی i (احتمال کشته شدن یک نفر در سال)

n: تعداد پیامدهای نهایی ناشی از هر حادثه و fi میزان تکرار پذیری پیامد نهایی i ناشی از یک حادثه در سال و P fi احتمال مرگبار بودن پیامد نهایی i ناشی از یک حادثه در موقعیت جغرافیایی X و Y نشان می دهد.

10. Individual Risk

جدول ۵: مقایسه ی شعاع فشار موج انفجار در شرایط جوی مختلف در سناریوی گسست ناگهانی

فشار موج انفجار (Overpressure) در سناریوی گسست ناگهانی						
موج انفجار						شرایط جوی
سطح (بار)			فاصله(متر)			
۰.۰۲۰۶۸	۰.۱۳۷۹	۰.۲۰۶۸	۴۸۵	۱۱۸	۱۰۰	روز تابستان
۰.۰۲۰۶۸	۰.۱۳۷۹	۰.۲۰۶۸	۴۹۰	۱۲۰	۹۷	شب تابستان
۰.۰۲۰۶۸	۰.۱۳۷۹	۰.۲۰۶۸	۴۷۳	۱۱۵	۹۴	روز زمستان
۰.۰۲۰۶۸	۰.۱۳۷۹	۰.۲۰۶۸	۶۰۱	۱۴۱	۱۱۳	شب زمستان

جدول ۶: مقایسه ی شعاع کشندگی آمونیاک در شرایط جوی مختلف در سناریوی گسست ناگهانی

سمیت آمونیاک در سناریوی گسست ناگهانی						
کشندگی						شرایط جوی
سطح کشندگی (درصد)			فاصله(متر)			
۱۰	۵۰	۹۰	۲۷۷	۱۷۵	۷۶	روز تابستان
۱۰	۵۰	۹۰	۲۷۵	۱۸۵	۹۱	شب تابستان
۱۰	۵۰	۹۰	۳۰۰	۲۰۸	۱۰۷	روز زمستان
۱۰	۵۰	۹۰	۳۵۰	۲۵۶	۱۵۲	شب زمستان

تاثير قابل توجهی بر گسترش پیامدها دارد.

۱-۳: سمیت گاز آمونیاک در سناریوی گسست ناگهانی: داده ها حاکی از آن است که شعاع گسترش آمونیاک در سه سطح کشندگی (۹۰٪، ۵۰٪ و ۱۰٪) (۳۶) تحت چهار وضعیت جوی مختلف بوده اند. نتایج حاصل از مدل سازی نشان داد که شب زمستان خطرناکترین وضعیت برای انتشار گاز سمی آمونیاک بود (جدول ۶). در این حالت، گاز تا فاصله ی ۳۵۰ متری از محل نشت همچنان دارای قدرت کشندگی ۱۰ درصد بود. شرایط جوی پایدار و عدم تلاطم هوا در شب زمستان منجر به افزایش گسترش افقی ابر سمی شده و خطرات بیشتری را برای افراد ساکن در مناطق اطراف ایجاد می کند. از سوی دیگر، روز تابستان دارای کمترین شعاع کشندگی بود که ناشی از پراکندگی بهتر گاز در اثر جریان های همرفتی و تلاطم جوی در طول روز است. بنابراین در طراحی سناریوهای اضطراری و تعیین محدوده ی تخلیه، باید شب زمستان به عنوان سناریوی مرجع در نظر گرفته شود.

ناگهانی: در این مدل در کلیه سناریوها، فشارهای مرجع برای ارزیابی اثرات انفجار به شرح زیر در نظر گرفته شدند: ۰,۲۰۶۸ بار به عنوان آستانه تخریب شدید و آسیب های کشنده، ۰,۱۳۷۹ بار به عنوان سطح آسیب متوسط و ۰,۰۲۰۶۸ بار به عنوان آستانه اثرات جزئی نظیر شکست شیشه ها و آسیب های خفیف انسانی (۳۱، ۳۵). نتایج جدول ۵ نشان داد که شب زمستان بیشترین گسترش موج انفجار را دارد. در این حالت، فشار ۰,۰۲۰۶۸ بار تا فاصله ی ۶۰۱ متری از محل انفجار گسترش یافت. این پدیده به دلیل پایداری بیشتر جو در شب زمستان و کاهش اختلاط عمودی هوا و احتباس بیشتر بخار آمونیاک اتفاق افتاده است. کمترین شعاع گسترش موج انفجار در شرایط روز زمستان مشاهده شد. با توجه به این نتایج، در طراحی محدوده ی ایمنی و تخلیه اضطراری برای انفجار بخار ابر، پیشنهاد می شود سناریوی شب زمستان به عنوان بدترین حالت در نظر گرفته شود. در مجموع، این نتایج نشان می دهد که شرایط جوی به ویژه در شب های زمستان،

جدول ۷: تابش حرارتی آتش فواره‌ای (Jet Fire) در سناریوی نشت ۴۰ و ۲۵ دقیقه

تابش حرارتی آتش فواره‌ای (Jet Fire) در سناریوی نشت ۴۰ و ۲۵ دقیقه ای							
شرایط جوی	قطر آتش فواره ای(متر)	تابش حرارتی					
		فاصله (متر)			سطح (کیلووات بر مترمربع)		
روز تابستان	۴۲.۸	-	۴۴	۵۵	۳۷.۵	۱۲.۵	۴
شب تابستان	۴۲.۸	-	۴۹	۵۹	۳۷.۵	۱۲.۵	۴
روز زمستان	۴۲.۸	-	۵۳	۶۲	۳۷.۵	۱۲.۵	۴
شب زمستان	۴۲.۸	-	۶۳	۷۰	۳۷.۵	۱۲.۵	۴

۲- تحلیل پیامد سناریوهای نشت:

۲-۱: تابش حرارتی آتش فواره ای (Jet Fire) در سناریوی نشت ۴۰ و ۲۵ دقیقه ای: تحلیل‌ها طبق جدول ۷ نشان داد که شدت تابش حرارتی حاصل از پدیده ی آتش جت (Jet Fire) بسته به شرایط جوی (روز و شب، فصل تابستان و زمستان) تفاوت قابل توجهی داشته است. برای بررسی اثرات حرارتی، سه سطح مرجع تابش مطابق با استانداردهای ایمنی و بهداشت حرفه ای در نظر گرفته شد. ۳۷.۵ کیلووات بر مترمربع (خسارت به واحدها و تجهیزات فرایندی، ایجاد مرگ آنی برای افراد در معرض)، ۱۲.۵ کیلووات بر مترمربع (حداقل انرژی لازم برای ایجاد جرقه در پالت های چوبی و ذوب شدن مواد پلاستیکی) و ۴ کیلووات بر مترمربع (ایجاد درد در افرادی که حداقل ۲۰ ثانیه در معرض آن باشند و سوختگی درجه اول) (۳۱، ۳۷). در میان چهار وضعیت جوی بررسی شده، مقایسه شرایط نشان داد که بیشترین فاصله اثرگذاری تابش حرارتی مربوط به شب زمستان است؛ به طوریکه شدت تابش (۴ کیلووات بر مترمربع) تا فاصله ۷۰ متر از منبع حادثه گسترش یافته است. این فاصله در شب تابستان و روز زمستان به ترتیب ۵۹ و ۶۲ متر و در روز تابستان ۵۵ متر بوده است. نتایج بیانگر آن است که شرایط جوی به ویژه پایداری جوی شبانه در زمستان باعث تشدید اثرات حرارتی و افزایش شعاع اثرگذاری آتش فواره‌ای شده است. مقایسه نتایج حاصل از سناریوهای نشت ۴۰ و ۲۵ دقیقه‌ای نشان داد که شعاع اثرگذاری حرارتی آتش فواره‌ای در هر دو حالت تقریباً یکسان است. این موضوع بیانگر آن است که مدت زمان

نشت تأثیر چشمگیری بر ابعاد شعله و شعاع حرارتی ندارد. در هر دو سناریو، شرایط جوی نقش اصلی را در تغییر شعاع حرارتی ایفا کرد. در شب زمستان، بیشترین اثرگذاری حرارتی مشاهده شد (فاصله ۷۰ متر). در مقابل، در روز تابستان حداقل شعاع اثرگذاری (۵۵ متر) ثبت شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدت زمان نشت (۲۵ یا ۴۰ دقیقه) اثر معناداری بر افزایش شعاع حرارتی آتش فواره ای نداشت. شرایط جوی (پایداری جوی شبانه و دمای پایین در زمستان) مهم‌ترین عامل افزایش شعاع اثرگذاری حرارتی بوده است. این تحلیل تطبیقی نشان داد که حتی در سناریوهای با زمان نشت کوتاه تر، خطر حرارتی برای انسان‌ها و تجهیزات در اطراف محل حادثه ثابت باقی می‌ماند و تنها شدت تابش در نزدیکی کانون حادثه می‌تواند اندکی متأثر از تغییر مدت زمان نشت شود.

۲-۳: فشار موج انفجار (Overpressure) در سناریوهای نشت ۴۰ و ۲۵ دقیقه ای: در این مدل، تأثیر موج انفجار در سه سطح فشاری (۰.۲۰۶۸، ۰.۱۳۷۹ و ۰.۰۲۰۶۸ بار) در چهار وضعیت جوی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است (۳۱، ۳۷). نتایج طبق جدول ۸ نشان داد که فشار بیش از حد ناشی از انفجار بخار ابری (VCE) بسته به شرایط جوی، تفاوت‌های قابل توجهی در شعاع اثر دارد. بین چهار سناریوی بررسی شده، بیشترین شعاع اثر در نشت ۴۰ و ۲۵ دقیقه ای، مربوط به شب زمستان بود که مربوط به فشار آستانه‌ای (۰.۲۰۶۸ بار) به صورت ملموس تحت تأثیر شرایط جوی قرار گرفته است. به طوریکه، در شرایط شب زمستان این شعاع تا

جدول ۸: مقایسه ی ناحیه فشار موج انفجار در شرایط جوی مختلف در سناریوی نشت ۴۰ و ۲۵ دقیقه ای

فشار موج انفجار (Overpressure) در سناریوی نشت ۴۰ و ۲۵ دقیقه ای						
شرایط جوی			فاصله (متر)			سطح موج انفجار (بار)
روز تابستان	۲۲	۲۵	۴۴	۰.۲۰۶۸	۰.۱۳۷۹	۰.۰۲۰۶۸
شب تابستان	۲۳.۵	۲۵	۴۵	۰.۲۰۶۸	۰.۱۳۷۹	۰.۰۲۰۶۸
روز زمستان	۲۳	۲۵	۴۶	۰.۲۰۶۸	۰.۱۳۷۹	۰.۰۲۰۶۸
شب زمستان	۲۳	۲۵.۵	۴۷	۰.۲۰۶۸	۰.۱۳۷۹	۰.۰۲۰۶۸

جدول ۹: نواحی کشندگی ناشی از سمیت آمونیاک در سناریوی نشت ۴۰ دقیقه ای

سمیت آمونیاک در سناریوی نشت ۴۰ دقیقه ای						
شرایط جوی	کشندگی					
	فاصله (متر)			سطح کشندگی (درصد)		
روز تابستان	۱۳۴	۱۸۲	۲۲۵	۹۰	۵۰	۱۰
شب تابستان	۱۵۴	۲۰۲	۲۵۸	۹۰	۵۰	۱۰
روز زمستان	۱۷۰	۲۲۸	۲۸۳	۹۰	۵۰	۱۰
شب زمستان	۱۹۵	۳۱۰	۴۲۱	۹۰	۵۰	۱۰

۱۳۴، ۱۸۲ و ۲۲۵ متر گسترش یافتند. افزایش شعاع‌های کشندگی در شب زمستان را می‌توان ناشی از پایداری بیشتر لایه‌های جوی، کاهش دمای محیط، و افزایش چگالی گاز آمونیاک دانست. این شرایط موجب ماندگاری بیشتر گاز در نزدیکی سطح زمین، کاهش نرخ اختلاط با هوا و در نتیجه افزایش مدت تماس افراد با گاز سمی می‌گردد. تفاوت میان شب و روز به ویژه در زمستان، قابل توجه است. به عنوان نمونه، سطح ۵۰ درصد در روز زمستان برابر ۲۲۸ متر بوده در حالیکه همین ناحیه در شب زمستان به ۳۱۰ متر افزایش یافته که نشان دهنده افزایش حدود ۳۶ درصدی شعاع اثر متوسط مرگ و میر فقط به دلیل تغییرات زمانی (روز به شب) در یک فصل ثابت است. با توجه به جدول ۱۰ در سناریوی نشت ۲۵ دقیقه ای آمونیاک، بین سناریوهای مختلف شب زمستان خطرناک ترین وضعیت از منظر گسترش سمیت محسوب شد. در این شرایط، شعاع ناحیه ۹۰ درصد به ۱۵۳ متر، ۵۰ درصد به ۲۷۰ متر و ۱۰ درصد به ۳۷۵ متر افزایش یافت. این اعداد نشان دهنده گسترش وسیع نواحی

۴۷ متر افزایش یافت در حالی که در روز تابستان ۴۴ متر بوده است. در نتیجه مشخص شد که شرایط جوی به ویژه شب و زمستان تأثیر بیشتری بر افزایش پیامدها نسبت به مدت زمان نشت داشته است.

۲-۴: سمیت آمونیاک در سناریوی نشت ۴۰ و ۲۵ دقیقه ای: براساس جدول ۹ در سناریوی نشت مداوم آمونیاک به مدت ۴۰ دقیقه، نتایج نشان داد که میزان گسترش ناحیه‌های کشندگی به شدت تحت تأثیر شرایط جوی از جمله دما و پایداری اتمسفری قرار دارد. در این تحلیل، سه سطح استاندارد کشندگی (۵۰٪، ۹۰٪ و ۱۰۰٪) بر اساس درصد مرگ و میر در معرض آمونیاک در نظر گرفته شد (۳۶). بر اساس خروجی‌ها، بیشترین میزان گسترش ناحیه‌های کشندگی مربوط به شب زمستان بود. در این شرایط، شعاع منطقه ای که با احتمال ۹۰ درصد منجر به مرگ شد تا ۱۹۵ متر از محل نشتی گسترش یافته است و همین طور سطوح ۵۰ و ۱۰ درصد به ترتیب تا ۳۱۰ و ۴۲۱ متر ادامه یافته اند. در مقابل، در شرایط روز تابستان همین نواحی به ترتیب فقط تا

جدول ۱۰: نواحی کشندگی ناشی از سمیت آمونیاک در سناریوی نشت ۲۵ دقیقه ای

سمیت آمونیاک در سناریوی نشت ۲۵ دقیقه ای						
کشندگی						شرایط جوی
سطح کشندگی(درصد)			فاصله(متر)			
۱۰	۵۰	۹۰	۲۱۱	۱۶۸	۱۱۸	روز تابستان
۱۰	۵۰	۹۰	۲۳۵	۱۸۸	۱۳۵	شب تابستان
۱۰	۵۰	۹۰	۲۶۰	۲۰۹	۱۴۶	روز زمستان
۱۰	۵۰	۹۰	۳۷۵	۲۷۰	۱۵۳	شب زمستان

حفظ جان افراد در مناطق اطراف شد. بر اساس مقایسه سناریوها، استفاده از سیستم پایش فشار می تواند یکی از کلیدی ترین عوامل در ارتقاء ایمنی حمل و نقل جاده ای مواد خطرناک به ویژه آمونیاک باشد. در سناریوی اول این پژوهش، به دلیل نبود سیستم پایش لحظه ای (سنسور فشار)، نشت گاز برای مدت ۴۰ دقیقه ادامه داشته است. با توجه به فشار تانکر (۱۵ بار) و قطر نشتی (۲۰ میلی متر)، میزان تخلیه آمونیاک قابل توجه بود. در سناریوی دوم، با نصب سنسور فشار دیجیتال سوزنی روی تانکر که به صورت لحظه ای فشار داخلی را مانیتور می کند، به محض افت ناگهانی فشار، هشدار به راننده یا مرکز کنترل داده شده و سریعاً اقدامات کنترلی انجام می گردد.

در این مطالعه فاصله بررسی، ۳۴۰ متر از محل توقف تانکر (دانشگاه آزاد اسلامی بوبین زهرا) در دو زمان رهایش گاز (۴۰ و ۲۵ دقیقه) در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل سطح ریسک (فردی) انتشار آمونیاک از تانکر در فاصله ۳۴۰ متری از محل توقف، نشان دهنده تاثیر چشمگیر کاهش زمان رهایش گاز بر سطح ریسک (فردی) حوادث بود. نصب سنسور فشار دیجیتال روی تانکر آمونیاک باعث شد که در صورت بروز نشت، سیستم به سرعت متوجه افت فشار شده و اقدامات کنترلی لازم انجام شود. نتایج نشان داد که این امر منجر به کاهش زمان رهایش گاز از ۴۰ به ۲۵ دقیقه شده که پیامد آن کاهش حجم گاز نشت یافته و در نهایت کاهش سطح ریسک وقوع حوادث بوده است. همانگونه که در جدول ۱۱ ذکر شده، این کاهش ریسک در شرایط مختلف جوی

تهدیدکننده حیات حتی در نشت نسبتاً کوتاه مدت (۲۵ دقیقه ای) بود. چنین گسترشی به پدیده های جوی مانند پایداری زیاد لایه های اتمسفری، سرمای محیط و کاهش اختلاط عمودی گاز با هوا مربوط است که موجب می شود آمونیاک در نزدیکی سطح زمین باقی مانده و به صورت مؤثری وارد سیستم تنفسی افراد شود. در مقابل، در روز تابستان، شعاع ۹۰ درصد تنها ۱۱۸ متر بوده که در مقایسه با ۱۵۳ متر در شب زمستان، کاهش قابل توجهی داشته است (حدود ۲۳ درصد). همچنین شعاع در سطح ۱۰ درصد در روز تابستان ۲۱۱ متر بود که نسبت به ۳۷۵ متر در شب زمستان حدود ۴۳ درصد کمتر بوده است. این اختلاف ها ناشی از افزایش دما، تلاطم جو و پراکندگی سریع تر گاز در روزهای گرم بوده که سبب کاهش غلظت آمونیاک در مسیر گسترش می گردد. روند مشاهده شده در داده ها، نشان داد که با گذار از روز به شب و از تابستان به زمستان، شعاع هر سه سطح کشندگی به طور منظم افزایش یافته است. این روند تصاعدی اهمیت در نظر گرفتن سناریوهای فصلی و زمانی در تحلیل ریسک سلامت انسانی را به خوبی روشن می کند.

۳- نتایج ریسک فردی:

بر اساس نتایج ارزیابی ریسک کمی (QRA) با استفاده از نرم افزار SAFETI، مشخص شد که نصب سنسور فشار دیجیتال، تأثیر قابل توجهی بر کاهش ریسک فردی ناشی از نشت آمونیاک داشته است. کاهش زمان واکنش (راننده) از چند دقیقه به کمتر از یک دقیقه، موجب افت چشمگیر در غلظت گاز سمی، کاهش مناطق نیازمند تخلیه و

جدول ۱۱: سطوح ریسک فردی (بار در سال) در رهايش ۴۰ و ۲۵ دقیقه

به ازای فاصله ۳۴۰ متری (دانشگاه آزاد اسلامی) از محل توقف تانکر				
رهايش ۴۰ دقیقه		رهايش ۲۵ دقیقه		نسبت تغییرات (درصد)
سطح ریسک (بار در سال)	شرایط جوی	سطح ریسک (بار در سال)	شرایط جوی	-
-	روز تابستان	-	روز تابستان	-
۳.۳۴×۱۰^{-۷}	شب تابستان	۳.۱۴×۱۰^{-۱۵}	شب تابستان	۹۹
۵.۲۱×۱۰^{-۶}	روز زمستان	۱.۴۶×۱۰^{-۶}	روز زمستان	۷۲
۵.۵۷×۱۰^{-۴}	شب زمستان	۲.۵۴×۱۰^{-۴}	شب زمستان	۵۵

توجه برش عرضی ریسک در تمام شرایط جوی شد. این کاهش یعنی منطقه تاثیرگذاری خطر نشت، کوچکتر شده و در نتیجه ایمنی مناطق اطراف جاده افزایش یافته است. کاهش برش عرضی ریسک جاده ای باعث کاهش احتمال در معرض قرار گرفتن افراد و اماکن حساس در مسیر حمل و نقل آمونیاک می شود. نصب سنسور فشار که باعث واکنش سریع تر و کنترل به موقع نشتی شد، به طور مستقیم ایمنی جامعه و محیط زیست را بهبود می بخشد. تفاوت درصد کاهش در شرایط جوی مختلف، بیانگر مدیریت شرایط محیطی به همراه سیستم های کنترلی هوشمند است.

-تحلیل تغییرات برش عرضی سطح ریسک جاده ای در سطح احتمال 10^{-5} با کاهش زمان رهايش

طبق نتایج ذکر شده در جدول ۱۲، در شرایط جوی روز تابستان، برش عرضی ریسک از ۱۵۲ به ۱۲۳ متر کاهش یافت که نشان دهنده ی کاهش ۲۰ درصدی بود. این موضوع بیانگر اثر مثبت کاهش زمان نشت در شرایط پایدار و دمای بالا است که منجر به محدود شدن منطقه پرخطر شده است. در شب تابستان، کاهش برش عرضی از ۳۱۳ به ۲۷۰ متر معادل ۱۶ درصد بود که نشان داد سنسور فشار با افزایش سرعت واکنش، ایمنی محیط پیرامون را بهبود بخشید. در شرایط روز زمستان، کاهش برش عرضی ۱۲ درصد بوده که به دلیل وزش باد بیشتر و پراکندگی بهتر گاز، تاثیر کاهش زمان نشت کمی کمتر از

بین ۵۵ تا ۹۹ درصد متغیر بوده است. به طوریکه در شرایط جوی شب تابستان به ۹۹ درصد رسیده که حاکی از اهمیت بسیار بالای کنترل سریع نشت در کاهش اثرات مخرب بود. در فصل زمستان کاهش ریسک به ترتیب ۷۲ درصد در روز و ۵۵ درصد در شب گزارش شد که نشان داد شرایط جوی نقش مهمی در پراکندگی و در نهایت کاهش ریسک ایفا می کند. این نتایج بر اهمیت سیستم های پایش سریع، مانند سنسور فشار دیجیتال تاکید دارد که می تواند به طور چشمگیری زمان واکنش را کاهش داده و پیامدهای ناشی از نشت را به حداقل برساند. با توجه به آنالیزهای صورت گرفته مشخص شد که در شرایط جوی شب زمستان که شرایط جوی پایدارتر بوده، ماندگاری گاز در منطقه بیشتر شده و کاهش سطح ریسک حدود ۵۵ درصد بوده که نسبت به شرایط جوی ناپایدارتر یعنی روز زمستان و تابستان میزان کاهش، کمتر محاسبه گردید. این میزان کاهش اگرچه کمتر از دو حالت قبلی بود، اما همچنان اهمیت بالای نصب سیستم های پایش و کنترل سریع را در کاهش پیامدهای ناشی از نشت تایید می کند. برش عرضی ریسک جاده ای، نشان دهنده فاصله ی عرضی در اطراف جاده است که در آن، سطح ریسک حوادث قابل توجه است. این مقدار منطقه ای را مشخص می کند که در صورت بروز نشتی، پیامدهای خطرناک برای افراد و محیط پیرامونی وجود دارد. بررسی ها نشان داد که کاهش زمان رهايش نشت از ۴۰ به ۲۵ دقیقه (ناشی از نصب سنسور فشار)، باعث کاهش قابل

جدول ۱۲: تغییرات برش عرضی سطح ریسک جاده ای در سطح احتمال 10^{-5} در دو زمان رهایش ۴۰ و ۲۵ دقیقه

سطح ریسک جاده ای 10^{-5}				
رهایش ۴۰ دقیقه		رهایش ۲۵ دقیقه		نسبت تغییرات(درصد)
برش عرضی (متر)	شرایط جوی	برش عرضی (متر)	شرایط جوی	-
۱۵۲	روز تابستان	۱۲۳	روز تابستان	۲۰
۳۱۳	شب تابستان	۲۷۰	شب تابستان	۱۶
۳۹۱	روز زمستان	۳۴۷	روز زمستان	۱۲
۶۵۰	شب زمستان	۵۶۵	شب زمستان	۱۴

جدول ۱۳: تغییرات برش عرضی سطح ریسک جاده ای در سطح احتمال 10^{-6} در دو زمان رهایش ۴۰ و ۲۵ دقیقه

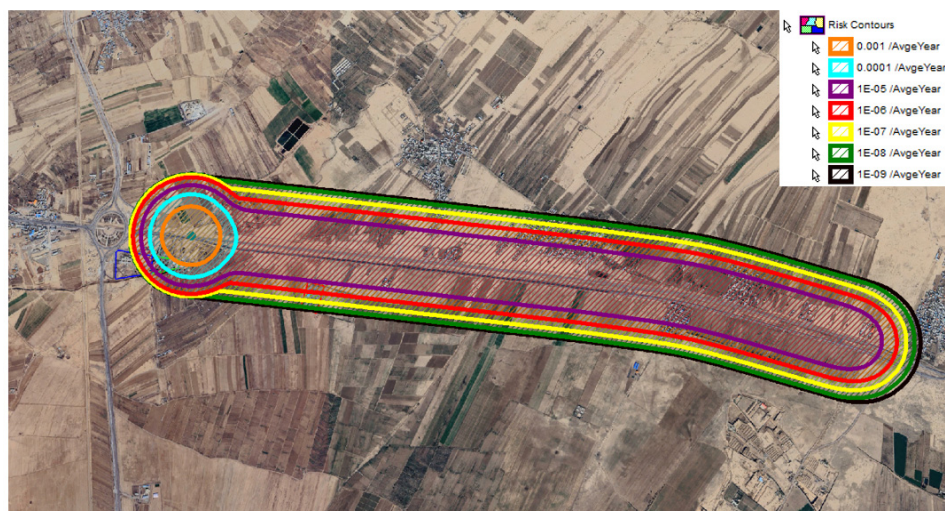
سطح ریسک جاده ای 10^{-6}				
رهایش ۴۰ دقیقه		رهایش ۲۵ دقیقه		نسبت تغییرات(درصد)
برش عرضی (متر)	شرایط جوی	برش عرضی (متر)	شرایط جوی	-
۴۰۰	روز تابستان	۳۶۲	روز تابستان	۱۰
۴۸۳	شب تابستان	۴۴۰	شب تابستان	۹
۵۵۱	روز زمستان	۵۰۱	روز زمستان	۱۰
۸۸۵	شب زمستان	۷۹۲	شب زمستان	۱۱

شد. این تغییر، ناشی از مداخله کنترلی سیستم سنسور فشار دیجیتال و هشدار زودهنگام بوده است. طبق جدول ۱۳ در شرایط روز تابستان برش عرضی ریسک از ۴۰۰ به ۳۶۲ متر کاهش یافت که معادل ۱۰ درصد کاهش بود. در شب تابستان، این مقدار از ۴۸۳ به ۴۴۰ متر رسید که ۹ درصد کاهش را نشان داد. همچنین در روز زمستان کاهش از ۵۵۱ به ۵۰۱ متر (معادل ۱۰ درصد) و در شب زمستان کاهش از ۸۸۵ به ۷۹۲ متر (معادل ۱۱ درصد) ثبت شد. این کاهش در تمامی شرایط جوی، اثربخشی مستقیم سامانه هشدار و قطع اضطراری ناشی مبتنی بر سنسور فشار را در محدودسازی منطقه تحت تأثیر و افزایش ایمنی مسیر حمل و نقل آمونیاک اثبات می‌کند. کاهش محدوده ی ریسک به معنای کمتر شدن جمعیت در معرض، کاهش تهدید برای تأسیسات حساس پیرامون جاده و در نتیجه ارتقای سطح ایمنی عمومی است. این

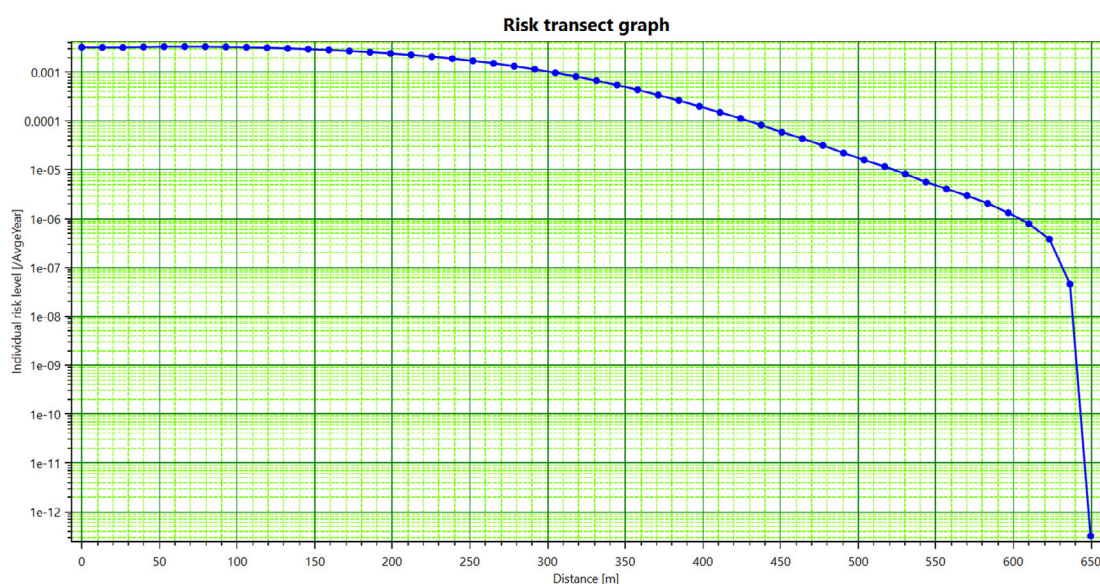
سایر شرایط بود. در نهایت، در شب زمستان برش عرضی ریسک از ۶۵۰ به ۵۶۵ متر کاهش یافته که معادل ۱۴ درصد و اهمیت وجود سیستم‌های کنترل سریع را در شرایط جوی پیچیده تایید می‌کند. به طور کلی این نتایج اهمیت به کارگیری فناوری های نوین مانند سنسور فشار دیجیتال برای پایش و کنترل سریع ناشی در تانکرهای مواد خطرناک را به وضوح نشان می‌دهد.

-تحلیل تغییرات برش عرضی سطح ریسک جاده ای در سطح احتمال 10^{-6} با کاهش زمان رهایش

بر اساس نتایج مدل سازی نرم افزار SAFETI، در سطح احتمال 10^{-6} که بیانگر ریسک پایین تر اما دارای اهمیت در تحلیل ایمنی است، مشاهده شد که کاهش زمان رهایش آمونیاک از ۴۰ به ۲۵ دقیقه، منجر به کاهش قابل توجه در برش عرضی سطح ریسک جاده‌ای



شکل ۳: سطح ریسک فردی در رهائش ۴۰ دقیقه و در شب زمستان

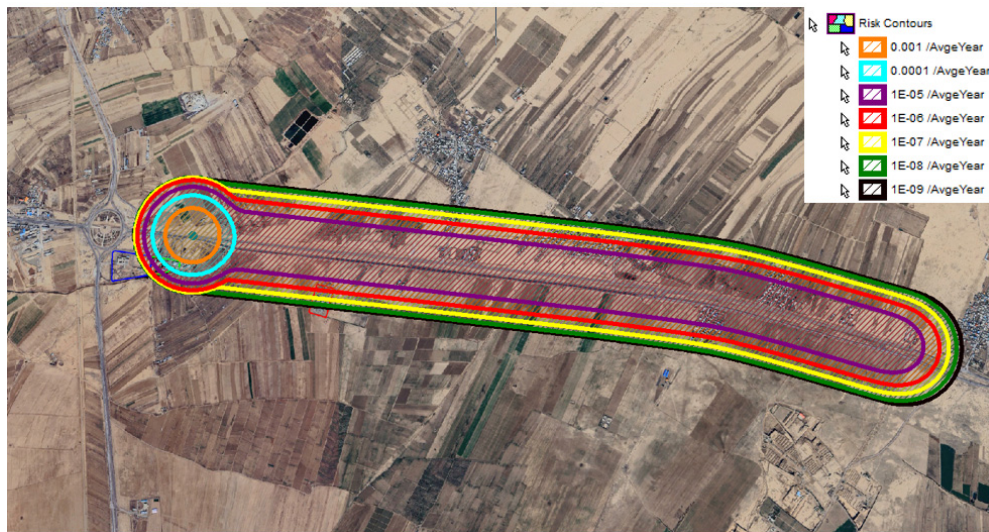


شکل ۴: نمودار مقطع عرضی سطح ریسک فردی در رهائش ۴۰ دقیقه و شب زمستان

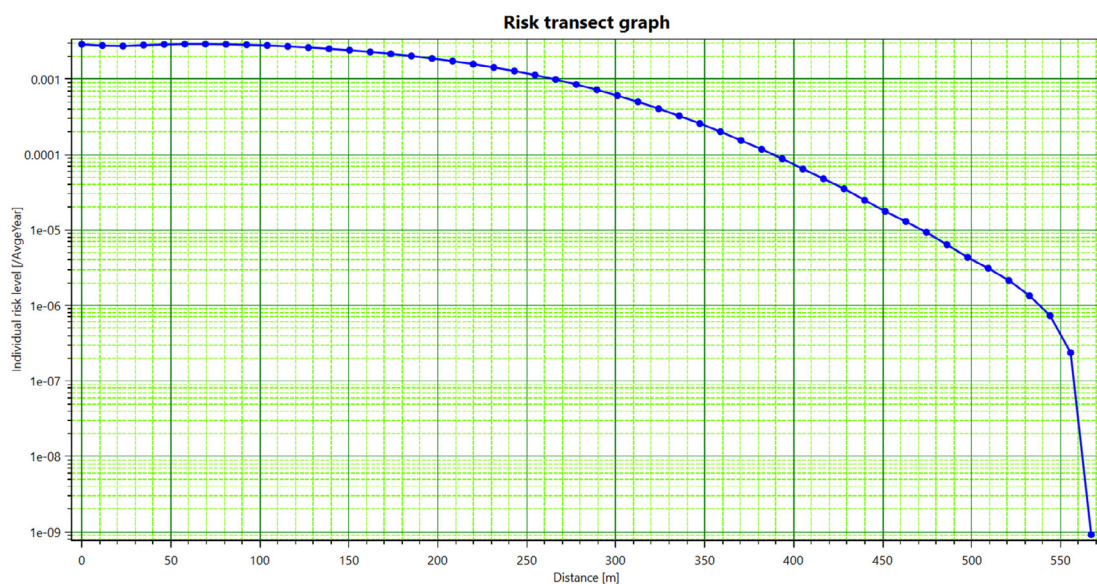
مقایسه سطح ریسک جاده ای در سطوح احتمال 10^{-5} و 10^{-6}

مقایسه دو سطح ریسک جاده ای 10^{-5} و 10^{-6} و در شرایط مختلف جوی و در دو حالت قبل و بعد از کاهش زمان رهائش (از ۴۰ به ۲۵ دقیقه)، نشان داد که نصب سنسور فشار و کاهش زمان رهائش، هم در سطوح

یافته نشان داد که حتی در سطوح ریسک پایین نیز، بهره‌گیری از فناوری‌های پایش سریع و هوشمند می‌تواند نقش مهمی در کاهش پیامدهای حوادث مواد خطرناک ایفا کند. بنابراین توصیه می‌شود استفاده از این سامانه ها به عنوان یک استاندارد ایمنی در ناوگان حمل مواد شیمیایی پرخطر مانند آمونیاک مدنظر قرار گیرد.



شکل ۵: سطح ریسک فردی در رهائش ۲۵ دقیقه و شب زمستان

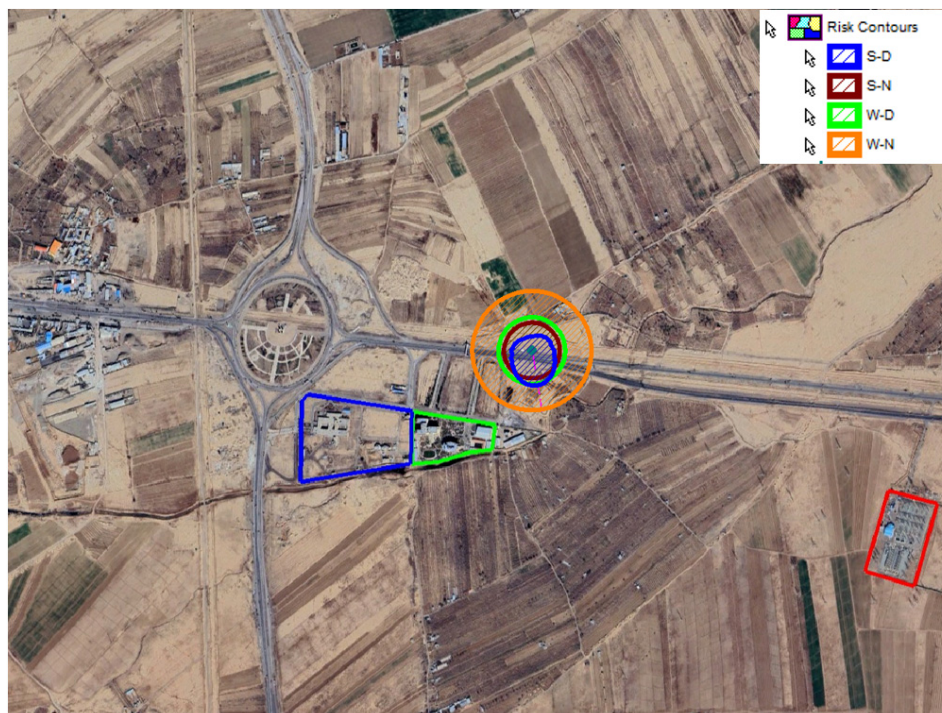


شکل ۶: نمودار مقطع عرضی سطح ریسک فردی در رهائش ۲۵ دقیقه و شب زمستان

سطوح بالاتر احتمال (مانند) نمایانگر مناطق با خطر بالاتر هستند که به کاهش زمان رهائش حساس ترند.

-مقایسه تأثیر کاهش زمان رهائش گاز آمونیاک بر سطح ریسک جاده ای در سطوح احتمال 10^{-5} و 10^{-6} به منظور ارزیابی کمی تأثیر به کارگیری سنسور فشار دیجیتال بر کاهش پیامدهای نشت گاز آمونیاک،

ریسک بالا (حوادث شدیدتر) و هم در سطوح ریسک پایین (پراکندگی وسیع تر)، اثربخشی عملی و قابل توجهی داشته است. این موضوع تأکید می کند که کنترل زمان نشت، یک راهکار بنیادی برای مدیریت ریسک در حمل و نقل جاده ای مواد خطرناک است. میزان کاهش برش عرضی ریسک در سطح 10^{-5} به طور متوسط بیشتر از سطح 10^{-6} بود. این موضوع طبیعی است، زیرا



شكل ۷: مقايسه ی كانتورهای ريسك فردی به ازای ريسك 10^{-4} در شرایط جوی مختلف در گسست ناگهانی

متر کاهش یافت (معادل ۱۱ درصد). این تفاوت در درصد کاهش نشان داد که سطح ریسک 10^{-5} نسبت به کاهش زمان رهايش حساس تر بوده و ناحیه پرخطر در این سطح به صورت محسوسی کوچک تر شده است. با این حال اهمیت کاهش ریسک در سطح 10^{-6} نیز بسیار بالا بود، زیرا این سطح معرف نواحی دورتری از منبع نشت بوده که ممکن است شامل مناطق مسکونی، مراکز درمانی و یا سایر زیرساخت های حیاتی باشد. در مجموع، نتایج نشان داد که نصب سنسور فشار دیجیتال و در نتیجه کاهش مدت زمان نشت، منجر به کاهش مؤثر وسعت منطقه خطر در هر دو سطح ریسک شده است. این کاهش در هر دو بعد افقی (برش عرضی) و عمودی (سطح احتمال) تأثیرگذار بوده و نقشی اساسی در کاهش تماس جمعیت با گاز، کاهش تلفات احتمالی و ارتقاء سطح ایمنی حمل و نقل جاده ای مواد خطرناک ایفا می کند. بنابراین توصیه می شود که استفاده از چنین فناوری های هوشمندی به عنوان بخشی از سیاست های کنترلی پیشگیرانه در حمل

و سناریو با زمان رهايش ۴۰ دقیقه (در حالت فاقد سنسور) و ۲۵ دقیقه (در حالت دارای سنسور) در نرم افزار SAFETI مدل سازی شد. نتایج در دو سطح احتمال ریسک جاده ای 10^{-5} و 10^{-6} به تفکیک شرایط جوی مقایسه شدند. در سطح ریسک 10^{-5} ، که بیانگر ناحیه ای با احتمال خطر نسبتاً بالا است، کاهش زمان رهايش باعث شد میانگین برش عرضی ناحیه پرخطر در تمامی شرایط جوی بین ۱۲ تا ۲۰ درصد کاهش یابد. به عنوان مثال، در شرایط روز تابستان، برش عرضی از ۱۵۲ به ۱۲۳ متر کاهش یافت (معادل ۲۰ درصد)، و در شب زمستان از ۶۵۰ به ۵۶۵ متر رسید (معادل ۱۴ درصد). در سطح ریسک 10^{-6} ، که نمایانگر پراکندگی گاز در نواحی دورتر با احتمال کمتر ولی همچنان معنادار بوده است، کاهش زمان رهايش موجب کاهش ۹ تا ۱۱ درصدی برش عرضی ناحیه پرخطر شد. در همین راستا، در شرایط روز تابستان، برش عرضی از ۴۰۰ به ۳۶۲ متر رسید (معادل ۱۰ درصد کاهش) و در شب زمستان از ۸۸۵ به ۷۹۲

و نقل جاده ای مواد شیمیایی پرخطر مانند آمونیاک به کار گرفته شود.

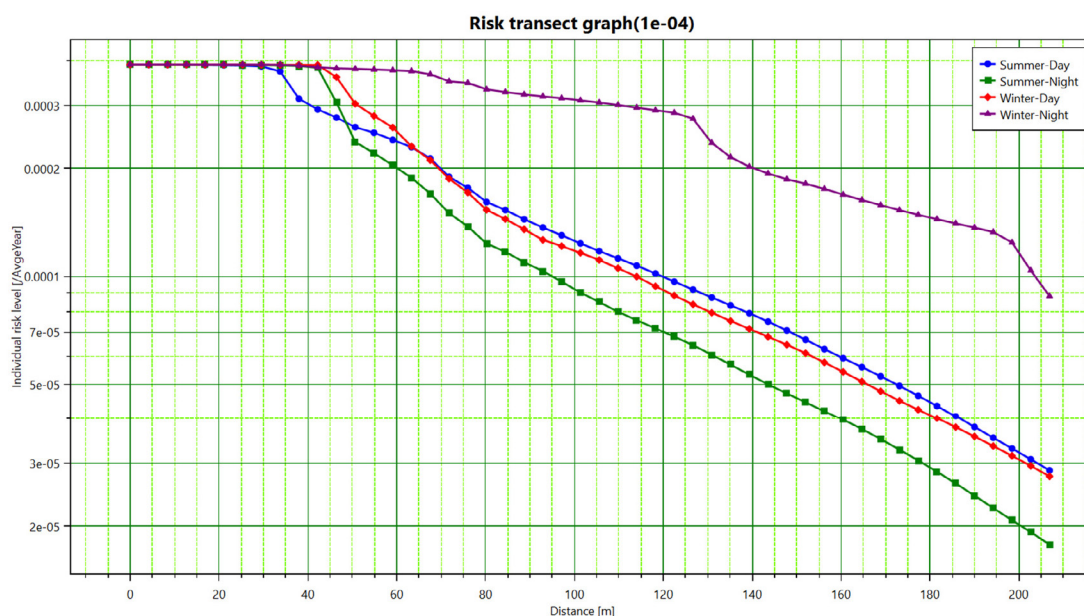
-تحلیل کانتورهای ریسک فردی در سناریوی وقوع گسست ناگهانی تانکر آمونیاک

گسست ناگهانی تانکرهای حاوی آمونیاک به عنوان یکی از بحرانی ترین سناریوهای شکست مکانیکی در حمل و نقل مواد شیمیایی شناخته می‌شود که می‌تواند منجر به آزادسازی سریع و گسترده ماده سمی، قابل اشتعال و واکنش پذیر گردد. در این مطالعه، به منظور ارزیابی دقیق تر پیامدهای این رخداد، شعاع کانتورهای

ریسک فردی برای پنج سطح احتمال مرگ سالانه از 10^{-4} تا 10^{-8} در چهار وضعیت جوی مختلف با استفاده از مدل سازی در نرم افزار SAFETI تحلیل و مقایسه شد. طبق نتایج ذکر شده ی این بخش از مطالعه در جدول ۱۴ و شکل ۸ (نمودار مقایسه ای ریسک فردی به ازای ریسک 10^{-4} در شرایط جوی مختلف در گسست ناگهانی)، بیشترین گسترش کانتورهای ریسک در شرایط شب زمستان مشاهده شد. طوری که شعاع در سطح ریسک 10^{-4} به ۲۰۳ متر و در سطح 10^{-8} به ۵۰۰ متر رسید. این نتایج با پایداری شدید جو، لایه‌های وارونگی دما و کاهش تلاطم و اختلاط گاز

جدول ۱۴: سطح ریسک فردی در گسست ناگهانی تانکر آمونیاک

سطح ریسک فردی به ازای گسست ناگهانی تانکر					شرایط جوی / شعاع کانتور
10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	
۴۱۵	۳۹۳	۳۳۹	۲۵۸	۱۲۰	روز تابستان
۲۸۳	۳۶۲	۳۰۸	۲۳۴	۹۵	شب تابستان
۴۳۰	۳۸۹	۳۴۰	۲۵۸	۱۱۴	روز زمستان
۵۰۰	۴۶۸	۴۰۰	۳۲۰	۲۰۳	شب زمستان



شکل ۸: نمودار مقایسه ای ریسک فردی به ازای ریسک 10^{-4} در شرایط جوی مختلف در گسست ناگهانی

جدول ۱۵: سطوح ریسک فردی و معیارهای پذیرش (۲۵)

ردیف	سطوح ریسک فردی	توضیح اثرات	معیارهای پذیرش
۱	10^{-3}	اثرات کشنده تقریباً محتمل برای افراد در معرض	غیر قابل قبول
۲	10^{-4} تا 10^{-3}	احتمال بالای اثرات شدید بر سلامت انسان	قابل قبول با کنترل ریسک اضافی
۳	10^{-5} تا 10^{-4}	اثرات متوسط بر سلامت انسان	قابل قبول با رعایت اقدامات استاندارد
۴	10^{-6} تا 10^{-5}	اثرات خفیف یا جزئی	قابل قبول
۵	$> 10^{-6}$	اثرات ناچیز یا تقریباً صفر	قابل قبول

بحث

در کشور ایران به دلیل مصرف بالای صنایع از آمونیاک، حمل و نقل این ماده در سراسر کشور با نرخ بالایی صورت می‌پذیرد. در نتیجه سیستم حمل و نقل این ماده با خطرات بسیاری از جمله نشتی و انتشار مواد سمی به محیط در ارتباط می‌باشد. بنابراین لازم است فرآیند انتشار آمونیاک در حمل و نقل جاده ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. تاکنون، بیشتر تحقیقات نشت آمونیاک بر نشت حین تولید یا ذخیره سازی در مجتمع های پتروشیمی متمرکز بوده است و نشت حین حمل و نقل کمتر مورد توجه بوده و نیاز به تحقیقات بیشتری دارد (۱۳). در این پژوهش، وضعیت در حال حرکت وسیله نقلیه بر انتشار آن تأثیر می‌گذارد که آن را به یک فرآیند پیچیده تر تبدیل خواهد کرد. در شرکت مورد پژوهش که حمل و نقل مواد پتروشیمی در آن انجام میشود، حدود ۵۰ درصد از مخازن تحت فشار سهم حمل و نقل گاز آمونیاک بوده و آمار حوادث و خطرات این ماده ی خطرناک مرتبط با نشتی به دلیل افزایش فشار و به اصطلاح سوپاپ زدن رهانه ی اطمینان دوم بوده است. بنابراین با کاربرد گسترده آمونیاک در صنعت، ایجاد نشتی در زمان حمل و نقل جاده ای یک نگرانی بزرگ می‌باشد. زیرا هنگامی که نشت در فرآیند حمل و نقل جاده ای رخ دهد، آسیب جدی به محیط اطراف نیز وارد می‌کند. بنابراین لازم است فرآیند انتشار آمونیاک در حمل و نقل جاده ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد (۱۳). برای کاهش خطرات ناشی از حمل و نقل مواد خطرناک، ارزیابی دقیق ریسک و شبیه سازی سناریوهای مختلف حوادث، امری

با هوا قابل تبیین است. چنین شرایطی موجب می‌شود گاز سمی در نزدیکی سطح زمین باقی مانده و منجر به افزایش قابل توجه خطر برای افراد حاضر در فواصل دورتر گردد. در شرایط روز تابستان، شعاع ریسک 10^{-4} فقط ۱۲۰ متر بود. در حالیکه همین مقدار در شب زمستان تقریباً ۷۰ درصد بیشتر (۲۰۳ متر) ثبت شده است. این اختلاف نشان می‌دهد که تغییر شرایط جوی می‌تواند سطح ایمنی را به طور جدی تحت تأثیر قرار دهد. شعاع کانتور 10^{-5} در روز تابستان و زمستان هر دو برابر ۲۵۸ متر گزارش شده اند. این امر احتمالاً بیانگر غالب بودن ویژگی‌های ذاتی منبع حادثه (نظیر فشار شکست، جرم آمونیاک آزاد شده یا انرژی داخلی ذخیره شده در مخزن) نسبت به تفاوت‌های جوی در این سطح ریسک خاص است. با توجه به اینکه شعاع ریسک قابل قبول عمومی (10^{-6}) در شب زمستان به ۴۰۰ متر رسیده، هرگونه برنامه ریزی برای مکان یابی مناطق مسکونی، طراحی حریم ایمنی یا سیاست‌های اضطراری باید بر اساس چنین سناریوی بحرانی تنظیم شود. تحلیل کانتورهای ریسک فردی نشان داد که در صورت وقوع گسست ناگهانی تانکر آمونیاک، شب های زمستانی پرخطرترین شرایط از نظر گسترش مرگ فردی هستند. شعاع نواحی با ریسک بالا (10^{-4}) بسته به شرایط جوی می‌تواند از کمتر از ۱۰۰ متر تا بیش از ۲۰۰ متر متغیر باشد. در طراحی حریم ایمنی، نقشه ی شهرک‌های مجاور و تعیین فاصله مجاز از جاده حمل مواد خطرناک، باید به اثر شرایط محیطی و زمان حادثه بسیار توجه شود.

حیاتی محسوب می‌شود. ابزارهای مدل سازی مانند نرم افزار SAFETI به طور گسترده‌ای در تحلیل پیامدهای حوادث احتمالی، از جمله نشت، انفجار یا آتش‌سوزی مواد شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۷). بررسی پژوهش‌های انجام شده در ایران نشان داد که بخش عمده‌ای از مطالعات مرتبط با مدلسازی پیامد، متمرکز بر خطوط لوله انتقال گاز و مایعات خطرناک و نیز واحدهای فرایندی صنایع نفت، گاز و پتروشیمی بوده‌اند. با این حال، مدلسازی پیامدهای ناشی از حوادث تانکرهای حمل و نقل جاده‌ای به ویژه با استفاده از نرم افزارهای پیشرفته‌ای مانند SAFETI، در پژوهش‌های داخلی به مراتب کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که با افزایش روزافزون حمل مواد شیمیایی از طریق جاده‌های کشور، تحلیل دقیق و پیشگیرانه در این زمینه ضروری به نظر می‌رسد (۱۹).

بنابراین مطالعه‌ی حاضر به طور خاص به ارزیابی اثربخشی سنسورهای فشار در کاهش ریسک رهایش محموله آمونیاک، با روش ارزیابی ریسک کمی (QRA) و با استفاده از نرم افزار SAFETI در تانکرهای حامل آمونیاک حین حمل و نقل جاده‌ای در ایران متمرکز شد. طبق یافته‌های مطالعه، نصب سنسور فشار دیجیتال و سامانه‌های هشدار در تانکرهای آمونیاک، تأثیر قابل توجهی بر کاهش سطح ریسک فردی و گسترش مناطق تحت تأثیر نشت گاز دارد. کاهش زمان رهایش گاز از ۴۰ به ۲۵ دقیقه باعث محدود شدن برش عرضی ریسک و کاهش شعاع کانتورهای مرگ فردی در شرایط جوی مختلف شد؛ به طوری که در شب تابستان کاهش ریسک تا ۹۹ درصد و در شب زمستان ۵۵ درصد گزارش شد. تحلیل برش عرضی ریسک نشان داد که در شرایط روز تابستان برش ۲۰ درصد و در شب زمستان ۱۴ درصد کاهش یافت. این نتایج اهمیت کنترل سریع نشتی و نقش شرایط جوی، از جمله دما، باد و پایداری جو در پراکندگی گاز و کاهش ریسک را به وضوح نشان می‌دهد. مطالعه همچنین نشان داد که شب‌های زمستان به دلیل پایداری شدید جوی، لایه‌های وارونگی دما و کاهش اختلاط گاز

با هوا، خطرناک‌ترین شرایط برای گسترش ابر سمی و افزایش شعاع مناطق کشنده هستند.

طبق بررسی‌های انجام شده مشخص شد که نصب سنسور فشار دیجیتال بر روی تانکرهای حمل آمونیاک می‌تواند نقش مهمی در کاهش زمان واکنش راننده به شرایط اضطراری ایفا کند. در شرایط متعارف، راننده برای تشخیص افزایش فشار یا نشتی نیازمند مشاهده مستقیم فشارسنج عقبه‌ای یا بروز نشانه‌های فیزیکی نظیر بوی آمونیاک و تشکیل ابر سمی است؛ این امر معمولاً با تأخیر زمانی همراه بوده و در نتیجه حجم بیشتری از گاز در محیط آزاد خواهد شد. با به کارگیری سنسور فشار دیجیتال و انتقال لحظه‌ای اطلاعات به نمایشگر و سیستم هشدار در کابین راننده، این فاصله زمانی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و امکان اقدام سریع‌تر برای مهار نشتی یا توقف تانکر فراهم می‌شود و این راهکار، تأثیر قابل توجهی بر کاهش ریسک فردی ناشی از نشت آمونیاک داشته است.

یافته‌های این پژوهش با نتایج تحقیقات بین‌المللی هم‌خوانی دارد. به عنوان نمونه، مطالعه‌ی Kim & Jeong (۲۲) در سال ۲۰۲۴ نشان داد که در حوادث نشت آمونیاک از مخازن دریایی، آزادسازی گاز با سرعت بسیار بالا رخ داده و تأخیر در واکنش می‌تواند به افزایش قابل توجه حجم انتشار و گسترش اثرات سمی منجر شود. همچنین، پژوهش انجام شده توسط Sivaraman و همکاران در سال ۲۰۲۴ در خصوص پدیده‌ی Flash Boiling و بازبایی فشار در مخازن آمونیاک (۲۳) بیان می‌کند که حتی تأخیرهای چند ثانیه‌ای در شناسایی و واکنش می‌توانند الگوی انتشار و شدت پیامدها را تغییر دهند. این موضوع به طور مستقیم اهمیت وجود سیستم‌های هشدار لحظه‌ای را تأیید می‌کند. علاوه بر این، تحقیق Chung و همکاران در سال ۲۰۲۲ (۲۴) در زمینه ارزیابی ایمنی آتش در ذخیره‌سازی آمونیاک تحت فشار، بر خطرات بالقوه انفجار و آتش‌سوزی تأکید داشته و پایش پیوسته‌ی فشار را از الزامات حیاتی ایمنی معرفی کرده است.

کشندگی دارند. در حالیکه نشت در زمان مشابه در روزهای تابستان منجر به پراکندگی کمتر گاز سمی شده است، اما در شب‌های سرد و پایدار، پایداری جو باعث ماندگاری بیشتر گاز در لایه‌های نزدیک به زمین و در نتیجه تشدید پیامدهای سمی شده است. این الگو در مطالعات مشابه همچون پروژه‌ی QRA انجام شده بر کشتی‌های سوخت رسان آمونیاک (۴۰) نیز مشاهده شده است، جایی که سه عامل اصلی شامل دمای پایین محیط، سرعت کم باد و تأخیر در اعلام هشدار اولیه به‌عنوان عوامل اصلی افزایش خطر شناسایی شدند.

مطالعات مروری مرتبط نیز بر ضرورت استفاده از سامانه‌های پیشگیرانه همچون سنسورهای فشار دیجیتال، آلارم‌های هوشمند و سیستم‌های پایش مرکزی تأکید داشته‌اند. در مطالعه‌ای تحت عنوان ارزیابی ایمنی ذخیره‌سازی آمونیاک به‌عنوان سوخت در کشتی‌ها با روش‌های QRA و Bayesian که در سال ۲۰۲۵ منتشر شد (۴۱)، تحلیل خطرات به روش HAZOP برای شناسایی مسیرهای ریسک و مدل‌سازی وابستگی وقایع با شبکه بیزی (Bayesian Network) انجام شد. تحلیل Bayesian نشان داد که بیشترین احتمال نشت در مراحل سوخت‌گیری اولیه و تغییرات دمایی تانک‌ها رخ می‌دهد. ریسک مرگ برای خدمه کشتی در صورت وقوع نشت بدون هشدار، ۱ در ۳۰۰۰ در هر بار عملیات بوده و با اجرای سناریوی استفاده از فشارسنج و آلارم، ریسک به ۱ در ۵۰۰۰ کاهش یافت. مطالعه حاضر نیز هم‌راستا با تحقیقات پیشین، نشان داد که ترکیب سیستم هشدار فشار دیجیتال با درک دقیق از شرایط جوی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه پیامدهای نشت آمونیاک گردد. از این رو، پیشنهاد می‌شود در طراحی سامانه‌های هوشمند حمل مواد خطرناک، مدلی ترکیبی از تحلیل شرایط محیطی، طول زمان نشت و مانیتورینگ پیوسته فشار مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد نه تنها از وقوع فجایع جلوگیری کرده بلکه در صورت بروز حادثه، مدت زمان واکنش شرایط اضطراری را به حداقل خواهد رساند. در سال ۲۰۲۳، پروژه‌ای تحت عنوان تحلیل جامع ایمنی برای استفاده از آمونیاک به‌عنوان سوخت دریایی،

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات فوق نشان می‌دهد که به کارگیری سنسور فشار دیجیتال در حمل و نقل جاده‌ای آمونیاک نه تنها از منظر کاهش زمان واکنش راننده، بلکه از نظر محدودسازی حجم نشت و کاهش دامنه پیامدهای سمی و انفجاری دارای اهمیت اساسی است. علاوه بر ابعاد ایمنی، نصب سنسور فشار دارای پیامدهای عملی و اقتصادی قابل توجهی خواهد بود. این سیستم‌ها امکان پایش بی وقفه، ثبت دقیق داده‌ها و واکنش سریع در شرایط بحرانی را فراهم می‌کنند. از نظر اقتصادی، کاهش حجم گاز نشت یافته و محدود شدن شعاع مناطق تحت تأثیر، کاهش تهدید برای جمعیت و تأسیسات حساس پیرامون جاده و کاهش خسارات احتمالی، توجیهی منطقی برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پایش سریع و هوشمند ایجاد می‌کند. نکته متمایز این مطالعه، تمرکز بر کاربرد عملی فناوری پایش فشار در شرایط واقعی حمل و نقل جاده‌ای و تحلیل پیامدها با استفاده از نرم افزار SAFETI است.

تحلیل مقایسه‌ای سناریوهای نشت نشان داد که افزایش مدت زمان نشت، عامل مهمی در افزایش پیامدهای سمی دارد اما این اثر در شرایط جوی مختلف شدت متفاوتی خواهد داشت. این نکته با یافته‌های مطالعات سال ۲۰۲۴ و ۲۰۲۵ در خصوص نشت آمونیاک در شرایط مختلف آب و هوایی سازگار است (۳۸، ۳۹). بنابراین در طراحی سیستم‌های پایش، هشدار و تخلیه، باید هر دو پارامتر «زمان نشت» و «شرایط محیطی» همزمان مد نظر قرار گیرند. کاهش شعاع نواحی کشنده و کاهش سطح ریسک در نزدیکی شهرک‌های مسکونی، بیانگر اهمیت استفاده از فناوری‌های پیشگیرانه و پایش لحظه‌ای شرایط مخزن است. این یافته با نتایج مطالعه‌ی J. Kwak و همکاران (۳۳) که در آن به کاهش ریسک با استفاده از شیر قطع کن دوگانه در ایستگاه سوخت‌گیری هیدروژن اشاره شد، همسو است.

تحلیل کانتورهای ریسک فردی در سناریوی گسست ناگهانی تانکر نشان داد که شرایط جوی، به ویژه در شب‌های زمستان، بیشترین تأثیر را در گسترش نواحی

محدودیت‌ها و پیشنهادات برای مطالعات آینده

با وجود اهمیت یافته‌های این مطالعه، چند محدودیت کلیدی وجود دارد که باید مد نظر قرار گیرد. تحلیل سناریوها مبتنی بر داده‌های مدل سازی و نرم افزار SAFETI بوده و ممکن است برخی عوامل واقعی محیطی یا رفتاری راننده در شرایط میدانی را به طور کامل بازتاب ندهد. مطالعه محدود به حمل و نقل جاده ای آمونیاک و شرایط جوی مشخص بوده و تعمیم نتایج به سایر مواد شیمیایی خطرناک یا شرایط آب و هوایی متفاوت نیازمند دقت است. با توجه به این محدودیت‌ها، تحقیقات آینده می‌توانند بر توسعه ی مدل‌های پیشرفته تر شبیه سازی دینامیکی و هوش مصنوعی برای پیش‌بینی دقیق تر رفتار ابر سمی و ارزیابی ریسک متمرکز شوند. همچنین، بررسی حمل و نقل همزمان چند ماده شیمیایی خطرناک، تحلیل پیامدهای ترکیبی آن‌ها، ارزیابی اقتصادی پیاده سازی فناوری‌های نوین و مطالعات میدانی برای ارزیابی عملکرد واقعی سنسورهای فشار و سامانه‌های هشدار در شرایط حمل و نقل واقعی، می‌تواند دیدگاه جامع تری از ایمنی و مدیریت ریسک ارائه دهد. بررسی اثرات روانی و اجتماعی حوادث بر جوامع مجاور نیز می‌تواند به طراحی راهکارهای مدیریت ریسک جامع کمک کند.

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهاد می‌گردد که در طراحی و اجرای سیاست‌های ایمنی ملی برای حمل و نقل مواد شیمیایی خطرناک، نصب سنسورهای فشار دیجیتال و سامانه‌های هشدار در تانکرها به عنوان یک الزام قانونی مد نظر قرار گیرد. علاوه بر این، تدوین حریم‌های ایمنی مبتنی بر سناریوهای ترکیبی شامل نشتی طولانی مدت و شرایط جوی پایدار، برنامه‌ریزی دقیق واکنش اضطراری، آموزش جامع رانندگان و نیروهای امدادی و به‌کارگیری فناوری‌های هوشمند پایش و مدل‌سازی پیشرفته و سیاست‌گذاری قانونی، می‌تواند گامی مؤثر در کاهش ریسک و ارتقای ایمنی و افزایش تاب آوری سیستم حمل و نقل جاده‌ای مواد شیمیایی در کشور محسوب شود.

با روش ارزیابی ریسک کمی QRA با استفاده از نرم افزار SAFETI روی کشتی‌هایی با طراحی مختلف انجام شد و ریسک فردی و اجتماعی محاسبه گردید. در بدترین سناریوها (گسست ناگهانی)، احتمال مرگ فوری در فاصله ۱۸۰-۳۲۰ متری از نشت بحرانی برآورد شد. تحلیل‌ها نشان داد که ۳ عامل اصلی دمای محیط بالا، سرعت باد کم و تأخیر در اعلام هشدار اولیه در افزایش ریسک مؤثر بودند. در این پژوهش نیز یکی از پیشنهادات به عنوان اقدام کاهش دهنده ی ریسک، استفاده از سامانه کنترل فشار خودکار و مانیتورینگ در کابین کشتی بوده است (۴۲).

در پژوهش حاضر، نتایج به دست آمده از مدلسازی پیامد و تحلیل ریسک کمی نشان داد که نصب سنسور فشار دیجیتال در تانکرهای حمل آمونیاک، می‌تواند نقش مهمی در کاهش ریسک فردی و کنترل پیامدهای ناشی از نشت این ماده خطرناک ایفا کند.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با بهره‌گیری از مدل سازی پیامد و تحلیل کمی ریسک (QRA) به‌وسیله نرم افزار SAFETI، نشان داد که نشت آمونیاک در فرآیند حمل و نقل جاده‌ای می‌تواند پیامدهای جدی بر سلامت انسان و ایمنی جامعه اطراف داشته باشد، به ویژه در شرایط جوی سرد و پایدار شبانه. نتایج حاکی از آن است که افزایش مدت زمان نشت، شعاع نواحی کشندگی و گسترش ابر سمی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد، اما این اثر در مواجهه با پایداری جو، شدت بیشتری پیدا خواهد کرد. به عبارت دیگر، شرایط محیطی به ویژه دما، سرعت باد و زمان حادثه (شب یا روز) در توسعه ی ناحیه پرخطر، نقشی مهم دارند. تحلیل سناریوهای مختلف نشان داد که استفاده از سنسور فشار دیجیتال و سامانه‌های هشداردهنده می‌تواند به طور مؤثری در کاهش سطح ریسک فردی نقش داشته باشد. این سامانه‌ها با پایش مستمر وضعیت مخزن و اطلاع رسانی سریع در صورت بروز نشتی یا افت فشار، موجب واکنش سریع تر و جلوگیری از تشدید پیامدها خواهند شد.

تطبیق آن‌ها با سناریوهای بحرانی ترکیبی نظیر نشت طولانی مدت در شب‌های سرد و پایدار.

۵-آموزش تخصصی به رانندگان و پرسنل حمل مواد خطرناک در زمینه کار با تجهیزات پایش، تشخیص نشتی و اقدامات فوری در شرایط اضطراری.

۶-تدوین دستورالعمل ملی برای نصب تجهیزات ایمنی اجباری نظیر سنسور فشار، آلامر، سیستم خاموش‌کن خودکار و GPS در ناوگان حمل مواد خطرناک.

۷-توسعه بانک اطلاعاتی ملی از حوادث حمل و نقل مواد شیمیایی برای انجام تحلیل‌های ریسک منطقه‌ای و ارتقاء برنامه ریزی راهبردی.

≡ کد اخلاق

این پژوهش با دریافت کد اخلاق به شماره IR.TUMS.SPH.REC.1402.048 انجام شده است.

با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای ارتقاء ایمنی در حمل و نقل جاده‌ای آمونیاک و کاهش پیامدهای ناشی از نشت آن ارائه می‌گردد:

۱-استفاده از سنسورهای فشار دیجیتال با قابلیت هشدار لحظه‌ای در تانکرهای حمل آمونیاک به منظور شناسایی سریع افت فشار و جلوگیری از نشت گسترده ماده خطرناک.

۲-طراحی و پیاده سازی سامانه‌های مانیتورینگ هوشمند جهت پایش مستمر وضعیت تانکر، انتقال اطلاعات به کابین راننده و مرکز کنترل اضطراری.

۳-درنظر گرفتن شرایط جوی در تحلیل ریسک و طراحی حریم ایمنی، به ویژه در مناطق پرجمعیت یا نزدیک به شهرک‌های مسکونی که آسیب پذیری بالاتری دارند.

۴-بازنگری در برنامه‌های واکنش اضطراری موجود و

≡ REFERENCES

1. European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR). Geneva: United Nations Economic Commission for Europe (UNECE); 2023.
2. (PHMSA) USDOTPaHMSA. Hazardous Materials Regulations (49 CFR Parts 100–185). Washington, DC: U.S. Government Publishing Office; 2022.
3. (IATA) IATA. Dangerous Goods Regulations. 64th ed. Montreal, Canada: IATA; 2023.
4. (OSHA) USOSaHA. Ammonia and Hazardous Chemical Safety: Protective Measures and Guidelines for Workers. Washington, DC: U.S. Department of Labor; 2022.
5. Ali MXM, Juhari ML, Arifin K, Abas A, Ramli DRD, Zulkifli SS. Ammonia Leakage and Safety Research: A Century of Progress, Present Risks, and Future Directions through a Bibliometric Lens. PaperASIA. 2025;41(3b):355-73.
6. (NFPA) NFPA. Fire Hazards and Safety Guidelines for Ammonia Transport. Quincy, MA: NFPA; 2022.
7. Council NS. Hazardous Materials Transportation Safety: Ammonia. Itasca, IL: National Safety Council; 2022.
8. (OSHA) OSHA. Emergency Response to Ammonia Leaks in Transport. Washington, DC: U.S. Department of Labor; 2022.
9. Hung T-T, Chung M-H, Lin G-S, Shen C-Y. Piezoelectric microsensor for selective detection of low concentrations of ammonia. Solid State Electron. 2021;186:108191.
10. Saabas D, Lee J. Recovery of ammonia from simulated membrane contactor effluent using bipolar membrane electrodialysis. J Memb Sci. 2022;644:120081.
11. He J, Yang L, Ma Y, Yang D, Li A, Huang L, et al. Simulation and application of a detecting rapid response model for the leakage of flammable liquid storage tank. Process Saf Environ Prot. 2020;141:390-401.
12. Gholamizadeh K, Rostami C, Zarei E, Yazdi M, Moslem S. Advancing Hazardous Materials Transport Safety: Systematic Insights on Risks, Challenges, and Research Gaps. J Saf Sci Resil. 2025;100226.
13. Skarsvåg HL, Fyhn EH, Aasen A. Influence of ammonia-water fog formation on ammonia dispersion from a

- liquid spill. *J Loss Prev Process Ind.* 2024;92:105446.
14. Guo J, Luo C. Risk assessment of hazardous materials transportation: A review of research progress in the last thirty years. *J Traffic transport eng (English edition).* 2022;9(4):571-90.
15. Nakyai T, Phatrabuddha S, Homsri P, Phatrabuddha N. Risk assessment of ammonia leakage by fault tree analysis: Case study in the ice manufacture, Chonburi province. *F1000Research.* 2025;14:192.
16. Boukan Mukryan. Death of 51 workers in the Aromiyeh psychiatric hospital. Boukan Mukryan. 2022 Oct 19 [accessed 2023 Nov 10]. Available from: <https://www.boukanmukryan.ir/1401/07/27/-را-در-مسمومیت-۵۱-کارگر-روانه-بیما>.
17. GL D. SAFETI Technical Reference Manual. 2022.
18. Pouyadian M, Ashouri M, Eidani S, Madvari RF, Laal F. A systematic review of consequence modeling studies of the process accidents in Iran from 2006 to 2022. *Heliyon.* 2023;9(2).
19. Sadeghi F, Dehdashti A, Gilani N, Fatemi F, Alizadeh SS, Khoshmanesh B. Prediction of time in industrial chemical accidents: A survival analysis. *Work.* 2023;74(3):1115-24.
20. Schmitz P, Reniers G, Swuste P, van Nunen K. Predicting major hazard accidents in the process industry based on organizational factors: A practical, qualitative approach. *Process Saf Environ Prot.* 2021;148:1268-78.
21. Shipping LsRMDHMMMCfZC. Human Factors Considerations: Ammonia Fuel End-of-Stage Report. London; 2023.
22. Kim D, Jeong B. Investigation on toxicity of ammonia releasing from storage tank onboard through CFD simulations. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping.* 2024;8(1-2):2339342.
23. Sivaraman S, Makarov D, Molkov V. Flash boiling and pressure recovery phenomenon during venting from liquid ammonia tank ullage. *Process Saf Environ Prot.* 2024;182:880-93.
24. Chung YH, Lee W-J, Kang J, Yoon SH. Fire safety evaluation of high-pressure ammonia storage systems. *Energies.* 2022;15(2):520.
25. (CCPS) CfCPS. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. 2nd ed. New York: AIChE; 2023.
26. (EPA) USEPA. Risk Management Program Guidance for Offsite Consequence Analysis. Washington, DC; 2025.
27. de Azevedo JPA, de Souza Jr MB, Pinto JC. Process hazard analysis based on modeling and simulation tools. *Processes.* 2022;10(2):386.
28. Suyut NSM, Majnis MF, Malik STA. Flammable Gas Dispersion Modelling on an Offshore Platform. *Progress in Energy and Environment.* 2024:28-42.
29. Sato T, Nakayama H. Numerical simulations of convective boundary layers under different stability categories of the Pasquill-Gifford chart. *SOLA.* 2024;20:371-7.
30. Digital Solutions D. PHAST™ & SAFETI™ Release Notes: Version 9.0. December 2023.
31. Kwak H, Kim M, Min M, Park B, Jung S. Assessing the quantitative risk of urban hydrogen refueling station in Seoul, South Korea, using SAFETI model. *Energies.* 2024;17(4):867.
32. Nashira A, Nugrahani AP, Rahmah AU, Cahyono T. Quantitative Risk Assessment of Ammonia Release from Storage Tanks Using RISKCURVES Software. *Engineering Proceedings.* 2025;84(1):80.
33. Kwak J, Lee H, Park S, Park J, Jung S. Risk assessment of a hydrogen refueling station in an urban area. *Energies.* 2023;16(9):3963.
34. Wang K, Hu Q, Qian X, Li M, Shi T. Cause analysis and damage mechanism of explosive destruction with case investigation involving LPG tank trailer. *Engineering Failure Analysis.* 2022;133:106002.
35. Khodadadi-Mousiri A, Yaghoot-Nezhada A, Sadeghi-Yarandi M, Soltanzadeh A. Consequence modeling and root cause analysis (RCA) of the real explosion of a methane pressure vessel in a gas refinery. *Heliyon.* 2023;9(4).
36. ABS VZ, ABS SH, Maccari A, TUD GT, TWI XC, UOS MMP, et al. NH3CRAFT-SAFE AND EFFICIENT STORAGE OF AMMONIA WITHIN SHIPS.
37. Jang H, Mujeeb-Ahmed M, Wang H, Park C, Hwang I, Jeong B, et al. Safety evaluation on ammonia-fueled ship: Gas dispersion analysis through vent mast. *Int J Hydrogen Energy.* 2024;83:1060-77.
38. Duong PA, Kim HJ, Ryu BR, Kang H. A quantitative risk analysis during truck-to-ship ammonia bunkering. *Sustainability.* 2024;16(5):2204.

39. Lankahaluge AS, Graham T, Wang H, Bashir M, Blanco-Davis E, Wang J. Formal Safety Assessment for Ammonia Fuel Storage Onboard Ships Using Bayesian Network. *J Mar Sci Eng*. 2025;13(4).
40. Abubakirov R, Yang M, Scarponi GE, Moreno VC, Reniers G. Towards risk-informed design and operation of ammonia-powered ships: Critical aspects and prospective solutions. *Ocean Eng*. 2024;314:119753.
41. Lankahaluge AS, Graham T, Wang H, Bashir M, Blanco-Davis E, Wang J. Formal Safety Assessment for Ammonia Fuel Storage Onboard Ships Using Bayesian Network. *J Mar Sci Eng*. 2025;13(4):768.
42. Shipping LsRMM-KMCfZC. Recommendations for Design and Operation of Ammonia-Fueled Vessels Based on Multi-disciplinary Risk Analysis. London: Lloyd's Register; 2023.