Journal of Health and Safety at Work 2024; 14(3): 614-630

ORIGINAL RESEARCH PAPER

Application of Bayesian networks in fire domino effects modeling in gasoline storage tanks area

Zahra Khodabakhsh[1], Leila Omidi[1*], Khadijeh Mostafaee Dolatabad[2], Matin Aleahmad[3], Hossein Joveini[4]

[1]Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran
[2]Faculty of Management and Economics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[3]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Tehran North Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
[4]Research and Development Department, Sari Firefighting and Safety Services Organization, Mazandaran, Iran

Received: 3 - 9 - 2024 Accepted: 29 - 9 - 2024

ABSTRACT

Introduction: Domino effects are a chain of low-probability and high-consequence accidents in which a primary event (fire or explosion) in one unit causes secondary events in adjacent units. Bayesian networks have been used to model the propagation patterns of domino effects and to estimate the probability of these effects at different levels. The unique modeling and flexible structure provided by Bayesian networks allow the analysis of domino effects through a probabilistic framework, taking synergistic effects into account.

Material and Methods: Firstly, collecting the basic information related to the location of the storage tanks and determining the scenario of the accidents were done. Furthermore, the values of the heat radiation as escalation vectors in case of a fire in one tank were determined using ALOHA software. The received heat flux values were compared with the heat radiation threshold of 15 $\frac{kW}{m^2}$ and the escalation probability of the primary unit and the propagation of the initial scenario to nearby storage tanks were determined using Bayesian networks.

Results: The analysis of the heat flux values showed that among the 8 studied storage tanks, two storage tanks had the highest potential for spreading domino effects due to their location in a tank farm. Also, the implementation of Bayesian networks in GeNIe revealed that, compared to other storage tanks, the probability of domino effects propagating to other nodes is higher when a primary fire accident occurs in the two mentioned tanks, while considered as primary units.

Conclusion: Domino effect modeling and appropriate preventative measures can decrease the escalation probability in the process industries. Consideration of the synergistic effects of events at different levels by taking the escalation vectors into account leads to proper risk management and the determination of emergency response measures in storage tank farms.

Keywords: *Domino effects, Fire, Escalation vector, Bayesian networks, Storage tanks*

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Khodabakhsh Z., Omidi L., Mostafaee Dolatabad KH., Aleahmad M., Joveini H. Application of Bayesian networks in fire domino effects modeling in gasoline storage tanks area. J Health Saf Work. 2024; 14(3): 614-630.

1. INTRODUCTION

When a large fire occurs in a process industry or a tank farm, surrounding equipment may be damaged due to the heat flux received. In some cases, the failure of damaged equipment can lead to loss of containment and other accidents. Domino effects (also known as cascading effects) are a chain of low-probability, high-consequence accidents in which an initial accident (such as a fire) in a primary

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

Copyright © 2024 The Authors.
Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

unit (like a fuel storage tank) spread to nearby units through the effect of escalation vectors and create more severe consequences than the initial accident.

Process and chemical industries have large amounts of hazardous materials used for production and storage, where the statistical analysis of related historical events shows despite the low probability of occurrence, the consequences of domino events are more serious than other industrial events.

One of the important areas of domino effect assessment is risk assessment and domino effect modeling. This approach focuses on the domino effects between the primary accident and the secondary accident and even the domino effects of higher orders. The modeling of domino effect propagation patterns and the evaluation of the probabilities of these effects using the Bayesian networks (BN) have been considered by safety researchers. Therefore, the purpose of this study is to use Bayesian networks in modeling domino effects among 8 gasoline storage tanks. In this study, each tank is considered as a node and the probability of a fire domino effect between adjacent nodes (tanks) is considered as an arc. The fire spread probabilities from one tank to another depends on the intensity of the received heat flux (escalation vector).

2. MATERIAL AND METHODS

Among the techniques used to model domino effects, the Bayesian networks can more accurately identify the most likely sequence of events with respect to escalation probabilities. Advances in Bayesian networks approaches and the development of different software for Bayesian network modeling and analysis have provided a more accurate risk assessment of domino effects. Bayesian network modeling and the use of similar models facilitate the identification of spatial-temporal dependencies of domino effects and also enable the identification of the most probable sequence of events with greater accuracy.

The current study was carried out in six distinct stages, include: 1) determining the storage tanks with the greatest potential to cause damage, 2) collecting primary information related to the location of the storage tanks, 3) determining the accident scenario, 4) determining the intensity of the escalation vectors according to the accident scenario, 5) comparing the escalation vectors with the threshold value, and 6) estimating the probability of escalation of the initial scenario to the nearby storage tanks by considering the escalation vector values.

Based on the scenario considered for the accident, the type and intensity of the escalation vector resulting from the pool fire in the target tank and its effects on other storage tanks were calculated. In this study, ALOHA software was used to model the outcome of the scenario of each of the storage tanks and calculate the intensity of the heat flux (escalation vector). The heat radiation threshold for atmospheric tanks under the influence of fire was considered to be 15 $\frac{kW}{m^2}$.

The Bayesian networks was used to model domino effects. Storage tanks were considered as Bayesian network nodes and the escalation vectors as the arcs between adjacent nodes.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Considering that the scenario examined in the present study is a pool fire, heat radiation exceeding the threshold values can affect the adjacent tanks and cause damage to them. Based on the findings of the study, given fire at T3 (Figure

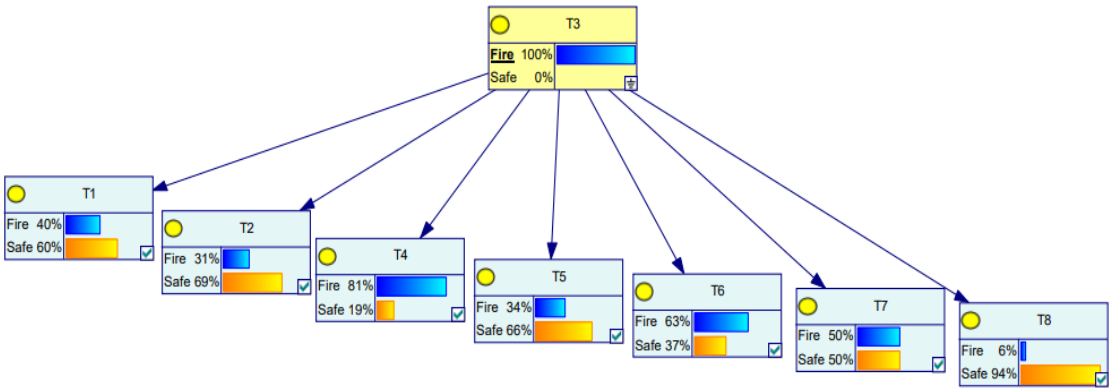


Fig. 1: Modeling of fire domino considering a primary tank fire at T3

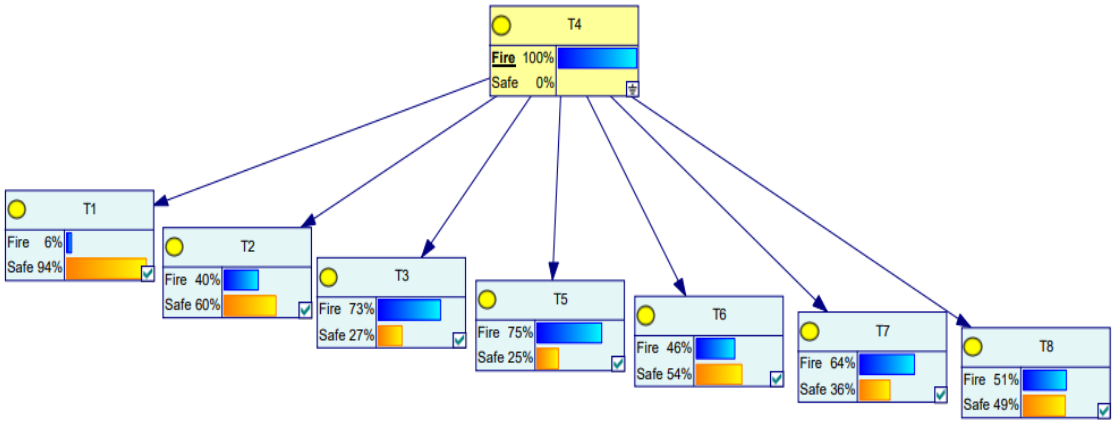


Fig. 2: Modeling of fire domino considering a primary tank fire at T4

1), tanks 4 and 6 are identified as secondary units and tanks 7, 1, 5, and 2 as tertiary units and tank 8 as a quaternary unit in the modeling of domino effects. Also, given the fire at T4 (Figure 2), tanks 5, 3, and 7 were identified as secondary units, tanks 8, 6, and 2 were identified as tertiary units and tank number 1 as a quaternary unit. Khakzad et al. (2013) developed a BN-based method for modeling domino effects in process plants, which considered process units as Bayesian network nodes and the possibility of accident propagation among adjacent nodes as Bayesian network arcs. In their approach, conditional probabilities assigned to the nodes were determined using dose-response relationships (probit models) to estimate the probability of damage to process units exposed to heat flux (in case of fire) and blast wave (in case of explosion). According to the primary fire or explosion event in a storage tank, among the two exposed tanks, the tank with the highest probability of escalation is selected as the secondary unit that enters the chain of events. Considering the possible synergistic effects between primary and secondary storage tanks, the sequence and probability of involvement of tertiary units in the chain of events can be identified similarly.

4. CONCLUSIONS

Based on the findings of the study, domino effect modeling and appropriate preventative measures can decrease the escalation probability of domino effects in the process industries. Consideration of the synergistic effects of events at different orders by considering the escalation vectors according to the distances between the process units or equipment and the inventory of chemicals in the tanks leads to proper risk management and the determination of emergency response measures in the tank farms. Based on the results and previous studies, this approach is simple but effective for providing insight into the accident propagation and domino effects and determining the fire spread probabilities in storage tanks.

5. ACKNOWLEDGMENT

This study was part of a MSc thesis supported by Tehran University of Medical Sciences (grant No: 1402-4-99-68937).

فصلنامه بهداشت و ایمنی کار جلد ۱۴/ شماره ۳/ پاییز ۱۴۰۳ صفحات ۶۱۷-۶۳۰

بکارگیری شبکه های بیزین در مدلسازی اثرات دومینوی ناشی از حریق در محوطه مخازن ذخیره سازی بنزین

زهرا خدابخش[۱]، لیلا امیدی[۱*]، خدیجه مصطفائی دولت آباد[۲]، متین آل احمد[۳]، حسین جوینی[۴]

[۱]گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
[۲]گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۳]گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران
[۴]مسئول پژوهش، تحقیق و توسعه سازمان آتش نشانی و خدمات ایمنی ساری، مازندران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۸

چکیده

مقدمه: اثرات دومینو یک زنجیره از حوادث با احتمال رخداد کم و پیامد بالا هستند که در آن یک حادثه اولیه (حریق یا انفجار) در یک واحد باعث بروز حوادث ثانویه در واحدهای مجاور می شود. شبکه های بیزین برای مدل سازی الگوهای انتشار اثرات دومینو و برای تخمین احتمال این اثرات در سطوح مختلف بکار گرفته شده اند. ساختار انعطاف‌پذیر و تکنیک‌های مدل‌سازی منحصربه‌فرد ارائه‌شده توسط شبکه های بیزین امکان تحلیل اثرات دومینو را از طریق یک چارچوب احتمالی، با در نظر گرفتن اثرات هم‌افزایی فراهم می‌سازد.

روش کار: ابتدا جمع آوری اطلاعات اولیه مرتبط با جایگاه مخازن ذخیره و تعیین سناریو حادثه انجام، سپس مقادیر بردار تشدید تابش حرارتی (میزان شار گرمایی دریافتی) توسط سایر مخازن در صورت رخداد حریق در یک مخزن با استفاده از نرم افزار ALOHA تعیین گردید. مقادیر شار حرارتی دریافتی با مقدار آستانه ۱۵ کیلووات بر متر مربع مقایسه و تخمین احتمال اثرات دومینو و گسترش سناریو اولیه به مخازن مجاور با استفاده از شبکه های بیزین صورت پذیرفت.

یافته ها: یافته های حاصل از بررسی مقادیر شار حرارتی نشان داد که از میان هشت مخزن مورد مطالعه، دو مخزن با توجه به محل استقرار آن ها در محوطه مخازن دارای بیشترین پتانسیل گسترش اثرات دومینو هستند. همچنین، نتایج پیاده سازی شبکه های بیزین در نرم افزار GeNIe، نشان داد که احتمال گسترش حریق و اثرات دومینو به سایر مخازن ذخیره با وقوع رخداد حریق اولیه در دو مخزن ذکر شده و در نظر گرفتن آن ها به عنوان واحد اولیه بیش از سایر مخازن است.

نتیجه گیری: مدل‌سازی اثرات دومینو و بکارگیری اقدامات پیشگیرانه سبب کاهش احتمال تشدید اثرات دومینو می گردد. در نظر گرفتن اثرات هم‌افزایی رویدادهای مراتب مختلف از طریق در نظر گرفتن بردارهای تشدید سبب مدیریت ریسک مناسب و تعیین اقدامات پاسخ اضطراری در محوطه مخازن ذخیره می گردد.

کلمات کلیدی: *اثرات دومینو، حریق، بردار تشدید، شبکه بیزین، مخازن ذخیره سازی*

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

مقدمه

هنگامی که یک حریق بزرگ در یک صنعت فرایندی یا محوطه ذخیره‌سازی مخازن رخ می‌دهد، تجهیزات اطراف ممکن است به دلیل شار گرمایی دریافتی آسیب ببینند. در برخی موارد، خرابی تجهیزات آسیب‌دیده می‌تواند منجر به از دست دادن مهار و رخداد حوادث دیگر گردد. اثرات دومینو (که با عنوان اثرات آبشاری نیز شناخته می‌شوند)، زنجیره‌ای از حوادث با احتمال رخداد کم و پیامد بالا هستند که در آن یک حادثه اولیه (مانند حریق) در یک واحد اولیه (مانند یک مخزن ذخیره سوخت) از طریق تأثیر بردارهای تشدید به واحدهای مجاور گسترش و پیامدهای شدیدتری از حادثه اولیه ایجاد می‌نماید (۱). یک اثر دومینو دارای چندین ویژگی شامل (۱) یک حادثه اولیه که سبب رخداد سایر حوادث از طریق تشکیل زنجیره حوادث می‌شود، (۲) اثر انتشاری ایجاد شده از بردارهای تشدید ناشی از حادثه اولیه بر روی اهداف ثانویه و (۳) یک یا چند حادثه ثانویه نظیر حریق، انفجار و انتشار ماده سمی؛ می‌باشد (۲، ۳).

صنایع فرایندی و شیمیایی دارای مقادیر زیادی از مواد خطرناک هستند که به منظور تولید و ذخیره‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۴، ۵). حوادث ناشی از مواد شیمیایی معمولاً دارای پیامدهای فاجعه بار بوده و تاثیر زیادی بر تاسیسات مجاور نیز دارند (۶-۸). تجزیه و تحلیل آماری حوادث تاریخی مرتبط نیز نشان می‌دهد که با وجود احتمال رخداد کم، پیامدهای حوادث دومینو، جدی‌تر از سایر حوادث صنعتی است (۹). بر اساس مطالعه Darbra و همکاران (۲۰۱۰) در زمینه بررسی ویژگی‌های حوادث دومینو گذشته، صنایع فرایندی بویژه مخازن ذخیره‌سازی بیش از سایر صنایع در معرض اثرات دومینو قرار دارند؛ زیرا وجود مخازن حاوی مقادیر زیادی از مواد قابل اشتعال در مجاورت یکدیگر، احتمال وقوع حوادث دومینو را افزایش می‌دهد (۱۰).

تکامل حوادث دومینو، یک فرایند پویا است و شامل دو بعد زمان و مکان می‌باشد. بعد مکانی نمایانگر تنوع سناریوهای موجود در صنعت مورد بررسی و ادغام آن هاست؛ در حالی که بعد زمانی به پیچیدگی‌های فرایند تکامل حوادث می‌پردازد. بردارهای تشدید، اثرات فیزیکی مانند برخورد با آتش، غرق شدن در حریق و تابش‌های حرارتی (در صورت رخداد حریق) یا فشار بیش از حد و قطعات پرتابه (در صورت رخداد انفجار) هستند. تکامل و سرعت پیشروی موج انفجار بسیار زیاد است به گونه‌ای که در عرض چند ثانیه سبب شکست و آسیب در تجهیزات می‌شود. در حالی که فرایند تکامل حریق (تابش حرارتی) معمولاً از چند دقیقه تا چند ساعت طول می‌کشد تا سبب خرابی و نقص در تاسیسات گردد (۲). احتمال گسترش حادثه - یا احتمال تشدید - به عوامل مختلفی مانند نوع بردارهای تشدید، نوع و موجودی مواد شیمیایی، فاصله میان واحدهای اولیه و ثانویه و آسیب پذیری واحدهای ثانویه بستگی دارد (۱).

بر اساس آمار، حریق (عمدتاً آتش استخری) یکی از علل مهم ایجاد حوادث دومینو است، مانند حریق فاجعه باری که در سال ۱۹۹۹ در پالایشگاه نفت Tupras در کشور ترکیه رخ داد و منجر به از بین رفتن شش مخزن نفتا و ۳۰۵۰۰ تن از محصولات ذخیره گردید (۱۱). بدین ترتیب وقوع یک حریق (آتش) استخری در محوطه استقرار مخازن ذخیره مواد قابل اشتعال می‌تواند مخازن دیگر را درگیر کرده و کل صنعت را دچار مشکل نماید. به علت وجود فاصله میان مخازن، مخازن مجاور مخزن هدف اولیه[1] فقط در معرض تشعشعات (تابش) حرارتی می‌باشند. برای تعیین واحد یا مخازن مجاور تحت تاثیر حریق اولیه، مقادیر بردارهای تشدید (تابش حرارتی) انتشار یافته از مخزن هدف با مقادیر آستانه مقایسه می‌شوند. Cozzani و همکاران (۲۰۰۵) مقدار آستانه تابش حرارتی برای حریق استخری در مخازن اتمسفریک را $۱۵ \frac{kW}{m^2}$ تعیین نمودند. این مقدار از تابش حرارتی سبب ایجاد آسیب در مخازن مجاور می‌گردد (۱۲). اگر مقادیر بردار تشدید بیشتر از حد آستانه باشند، مخزن یا مخازن مجاور به عنوان واحدهای ثانویه سناریو در نظر گرفته می‌شوند (۲).

عدم قطعیت در مدل‌سازی و تحلیل اثرات دومینو تا

1. Primary unit

حدود زیادی به دلیل نادر بودن اثرات دومینو و در نتیجه ناکافی بودن داده‌های مورد نیاز برای ارزیابی‌های کمی آنها است. همچنین، یکی دیگر از دلایل شامل تصادفی بودن رویدادهای بالقوه در طول اثرات دومینو، از جمله اثرات هم افزایی و تأثیر متقابل رویدادها است. بنابراین، مدل‌سازی اثرات دومینو عمدتاً تحت مفروضات ساده‌سازی بیش از حد و با پذیرش عدم قطعیت بالای پیامدها انجام شده است. روش‌های توسعه‌یافته برای مدل‌سازی اثرات دومینو و ارزیابی ریسک را می‌توان در سه دسته کلی مدل‌های تحلیلی، مدل‌های عددی و مدل‌های گرافیکی تقسیم نمود (۱۳).

مدل‌های تحلیلی مبتنی بر پیش‌بینی احتمال تشدید بر اساس روابط تحلیلی بین شار گرمایی و آسیب‌پذیری واحدهای در معرض توسعه هستند. علیرغم ساده بودن و مقرون به صرفه بودن مدل‌های تحلیلی، مدل‌های تحلیلی معمولاً از بکارگیری مفروضات بیش از حد ساده شده رنج می‌برند و به نظر می‌رسد که اکثر آنها نمی‌توانند احتمال اثرات دومینوی درجات بالا یا اثرات هم افزایی را مشخص نمایند. این نقص نه تنها ممکن است منجر به دست کم گرفتن خطر بالقوه شود، بلکه ممکن است منجر به تخصیص نادرست اقدامات ایمنی نیز گردد (۱۴، ۱۵). مدل‌سازی عددی حریق و انفجار سبب بهبود محاسبات مربوط به شار گرمایی و احتمال خرابی مرتبط در واحدهای در معرض گردیده است. مطالعات عددی گذشته در مورد اثرات دومینو، که عمدتاً مبتنی بر کاربردهای نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD[1]) مانند Fire Dynamics Simulator بوده‌اند، از نظر محاسباتی پرهزینه و نیازمند منابع هستند و کاربردهای آن‌ها با در نظر گرفتن منابع ممکن است محدود باشد. با توجه به در نظر گرفتن محاسبات قطعی و غیراحتمالی در این مدل‌ها، مدل‌های عددی می‌بایست از طریق بکارگیری تکنیک‌های احتمالی با عدم قطعیت‌های موجود در متغیرها و سناریوهای تشدید مقابله نمایند (۱۳،۱۶). مدل‌های گرافیکی در سال‌های اخیر در مدل‌سازی و تحلیل اثرات دومینو مورد توجه محققین قرار گرفته‌اند. دلیل اصلی این محبوبیت مرتبط با ساختار مدل‌های گرافیکی است که می‌توانند اثرات دومینو را بطور گرافیکی از طریق در نظر گرفتن واحدهای فرایندی و تجهیزات به عنوان گره‌های گراف و بردارهای تشدید به عنوان کمان‌های گراف ترسیم نمایند. محاسبه مبتنی بر احتمال بیشتر مدل‌های گرافیکی یک امتیاز دیگر در مدل‌سازی اثرات دومینو توسط این مدل‌ها است که در آن عدم قطعیت‌ها نقش کلیدی در تخمین احتمالات و سناریوهای تشدید دارند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به رویکردهای مبتنی بر درخت رویداد[2]، شبکه بیزین (BN[3])، دیاگرام توالی رویداد[4]، شبکه پتری و معیارهای گراف اشاره نمود. در میان این تکنیک‌های گرافیکی، BN به دلیل توانایی آن در، در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، در نظر گرفتن وابستگی‌های متقابل و تعاملات غیرخطی و امکان به‌روزرسانی احتمالات محاسبه شده به عنوان یک تکنیک قوی برای مدل‌سازی اثرات دومینو بکار گرفته شده است (۱، ۱۳، ۱۷، ۱۸).

مدلسازی اثرات دومینو، سبب توسعه استراتژی ایده آل جهت اطفاء حریق در مخازن می‌گردد. به طور همزمان، مخازن در حال سوختن می‌بایست اطفاء و مخازن تحت تاثیر بردارهای تشدید (تابش حرارتی) می‌بایست خنک گردند تا حریق کنترل و احتمال گسترش حریق کاهش یابد. استراتژی‌های مرتبط با کنترل حریق‌های صنعتی شامل (۱) غیرفعال (passive) که در آن مخازن در حال سوختن بدون هیچ مداخله‌ای رها می‌شوند تا بسوزند (معمولاً در صورت رخداد حریق‌های فورانی (jet fires))، (۲) تدافعی (defensive) که در آن مخازن در معرض بردارهای تشدید ناشی از اثرات دومینو با استفاده از آب خنک می‌شوند و (۳) تهاجمی (offensive) که در آن تلاش می‌شود تا مخازن در حال سوختن را با استفاده از فوم خاموش کنند، می‌باشند. در طول یک استراتژی تهاجمی؛ شار گرمایی تابش شده از یک مخزن در حال سوختن که در حال اطفاء نیز است، به تدریج کاهش می‌یابد تا زمانی که آتش کاملاً خاموش شود.

1. Computational fluid dynamics

2. Event tree
3. Bayesian network (BN)
4. Event sequence diagram

یکی دیگر از حوزه‌های مهم ارزیابی اثرات دومینو، ارزیابی ریسک، به ویژه ارزیابی کمی ریسک است. این رویکرد بر روی اثرات دومینو میان حادثه اولیه و حادثه ثانویه و حتی اثرات دومینوی سطوح بالاتر تمرکز دارد. مدل‌سازی الگوهای انتشار اثرات دومینو و ارزیابی احتمالات این اثرات با استفاده از BN توسط محققین حوزه ایمنی مورد توجه قرار گرفته است (۱). بنابراین، هدف از مطالعه حاضر بکارگیری شبکه‌های بیزین در مدلسازی اثرات دومینو در میان ۸ مخزن از مخازن ذخیره فرآورده‌های نفتی (بنزین) در یکی از انبارهای نفت کشور است. در این مطالعه هر یک از مخازن به عنوان گره و امکان گسترش حریق میان گره‌های مجاور (مخازن) به عنوان کمان در نظر گرفته شده است. امکان گسترش حریق از یک مخزن به مخزن دیگر وابسته به شدت شار گرمایی دریافتی (بردار تشدید) است.

روش کار

در میان تکنیک‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی و ارزیابی خطر اثرات دومینو، شبکه بیزین می‌تواند با دقت بیشتری محتمل‌ترین توالی رویدادها را با توجه به احتمالات تشدید شناسایی نماید. پیشرفت در رویکردهای BNو توسعه نرم‌افزارهای مختلف برای مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل BN، ارزیابی ریسک دقیق‌تری از اثرات دومینو را فراهم نموده است (۱، ۱۳، ۱۹). مدل‌سازی BNو بکارگیری مدل‌های مشابه، شناسایی وابستگی‌های مکانی- زمانی اثرات دومینو را تسهیل و همچنین امکان شناسایی محتمل‌ترین توالی رویدادها را با دقت بیشتری میسر می‌سازد. شبکه بیزین یک مدل و نمایش گرافیکی از رابطه میان متغیرها می‌باشد. این شبکه‌ها که گراف‌های جهت‌دار غیرحلقوی هستند، از نظریه بیز برای بروزرسانی احتمالات استفاده و برای محاسبه توزیع احتمال توام از مجموعه‌ای از متغیرها بهره می‌گیرند (۲۰).

بطور کلی پژوهش حاضر در شش مرحله کلی به انجام رسیده است که شامل: ۱) تعیین مخازن ذخیره دارای بیشترین پتانسیل ایجاد آسیب، ۲) جمع‌آوری اطلاعات اولیه مرتبط با جایگاه مخازن ذخیره، ۳) تعیین سناریو حادثه، ۴) تعیین شدت بردارهای تشدید با توجه به سناریو حادثه، ۵) مقایسه بردارهای تشدید با مقدار آستانه و ۶) تخمین احتمال تشدید سناریو اولیه به مخازن مجاور با در نظر گرفتن مقادیر بردار تشدید می‌باشد. تشریح مراحل مذکور در ادامه ارائه گردیده است.

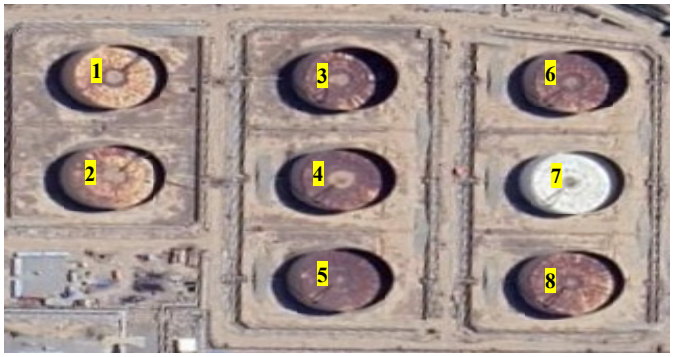
مرحله اول: تعیین مخازن ذخیره دارای بیشترین پتانسیل ایجاد آسیب

طبق مطالعه Zheng و همکاران، ۳۰٪ حوادث صنعتی مربوط به واحدهای فرایندی صنعت نفت می‌باشد. همچنین ۷۶٪ حوادث این صنایع مربوط به مخازن ذخیره نفت، بنزین، سوخت دیزل، LPG و ترکیبات بنزن است (۲۱). صنعت فرایندی مورد مطالعه حاوی ۵۰ مخزن ذخیره بنزین، نفت سفید (Kerosene)، نفت کوره و سایر فرآورده‌های نفتی می‌باشد. از آنجایی که هدف مطالعه، بررسی اثرات دومینو در مخازن می‌باشد، بر اساس نظر کارشناسان واحد فرایند و بهره برداری و کارشناسان HSE صنعت مورد مطالعه؛ ۸ مخزن ذخیره‌سازی بنزین به دلیل دارا بودن بیشترین ظرفیت ذخیره‌سازی و در نظر گرفتن فواصل میان مخازن و جانمایی آن‌ها به عنوان جایگاه مخازن مورد مطالعه در نظر گرفته شدند. شکل ۱ نمایی از جایگاه مخازن مورد بررسی را نشان می‌دهد.

مرحله دوم: جمع‌آوری اطلاعات اولیه مرتبط با جایگاه مخازن ذخیره

در این مرحله کلیه پارامترها و داده‌های سیستم در راستای اهداف مطالعه به طور دقیق توسط تیمی متشکل از رئیس عملیات و کارشناسان فرایند و ایمنی، شناسایی و مورد تحلیل قرار گرفتند. مطالعه حاضر بر روی مخازن ذخیره‌سازی بنزین انجام گردید. تمامی این مخازن از نوع اتمسفریک[1] و سقف شناور[2] می‌باشند. حجم کلیه مخازن مورد مطالعه ۲۱۰۰۰ مترمکعب، قطر آن‌ها ۴۴ متر و ارتفاع آن‌ها ۱۴ متر است.

1. Atmospheric
2. Floating roof



شکل ۱: جانمایی مخازن مورد مطالعه

جدول ۱: اطلاعات مرتبط با شرایط جوی محل مورد مطالعه

سرعت باد (میانگین)	۶ ($\frac{m}{s}$)
جهت وزش باد	جنوب شرقی
ارتفاع اندازه گیری سرعت باد	۱۰ متر
دمای هوا	۳۵°C
کلاس پایداری	D
رطوبت نسبی (میانگین)	۵۰٪
میزان پر بودن مخازن	۷۶٪

مرحله سوم: تعیین سناریو حادثه

در صنایع فرایندی، سناریو یک واقعه است که می‌تواند منجر به رخداد یکی از مخاطرات فرایندی مانند رخداد حریق، انفجار و انتشار ماده سمی شود (۲۲). در این گام، با توجه به نوع تجهیزات مورد مطالعه، نوع ماده شیمیایی و همچنین شرایط فیزیکی و عملیاتی آن‌ها، سناریو حادثه برای همه مخازن به صورت حریق استخری ناشی از پارگی مخزن (storage tank rupture) از فاصله ۱ متری از کف مخزن در نظر گرفته شده است. براساس اسناد طراحی و شرایط عملیاتی محل مورد مطالعه، شرایط جوی بر اساس اطلاعات مندرج در جدول شماره ۱ مورد نظر قرار گرفت.

مرحله چهارم: تعیین شدت بردارهای تشدید با توجه به سناریوی حادثه

در این مرحله، براساس سناریو در نظر گرفته شده برای حادثه، نوع و شدت بردار تشدید حاصل از وقوع حریق استخری در مخزن هدف و اثرات آن بر روی سایر مخازن محاسبه گردید. برای مدلسازی پیامد سناریو و محاسبه شدت بردارهای تشدید از نرم‌افزار ALOHA استفاده شد. ناحیه خطر مربوط به تابش حرارتی سناریو با استفاده از نرم‌افزار ALOHA مشخص گردید و با استفاده از نرم‌افزار MARPLOT بر روی نقشه جانمایی مخازن منطبق گردید. مقدار آستانه تشدید برای مخازن اتمسفریک تحت تاثیر حریق ۱۵ $\frac{kW}{m^2}$ در نظر گرفته شد (۱۵، ۲۳).

مرحله پنجم: مقایسه بردارهای تشدید با مقدار آستانه

در این گام تاثیر وقوع حادثه اولیه در هر مخزن بر روی سایر مخازن و امکان ایجاد سناریوهای ثانویه و شدت یافتن حادثه مورد بررسی قرار گرفت. جهت شناسایی تجهیزات هدف احتمالی و تعیین تاثیرپذیری آن‌ها از طریق بردارهای تشدید تابش حرارتی، مقایسه شار حرارتی دریافتی با مقدار آستانه ۱۵ $\frac{kW}{m^2}$ انجام پذیرفت. در مواردی که Q_{ij}

(مقدار شار گرمایی که مخزن j در اثر وقوع حریق در مخزن i دریافت می‌کند) بزرگتر یا مساوی مقدار آستانه بود، مخزن j هدف احتمالی سناریو حریق در مخزن i در نظر گرفته شد.

مرحله ششم: تخمین احتمال تشدید سناریو اولیه به مخازن مجاور با درنظر گرفتن بردار تشدید

در این مرحله از BN برای مدلسازی اثرات دومینو استفاده گردید. مخازن به عنوان گره‌های شبکه بیزین و اثر انتشاری بردارهای تشدید میان گره[1]های مجاور به عنوان کمان‌های جهت دار[2] در نظر گرفته شدند. BN وابستگی‌های محلی را برای فاکتورسازی توزیع احتمال توام مجموعه‌ای از متغیرهای تصادفی $U=\{X_1,X_2,\ldots,X_n\}$ به عنوان ضرب احتمالات شرطی گره‌های فرزند با توجه به گره‌های والد آنها در نظر می‌گیرد (رابطه ۱).

$$P(U)=(X_1,X_2,\ldots,X_n)=\prod_{i=1}^{n}P(X_i|pa(X_i)) \qquad (۱)$$

که در این رابطه $P(U)$ توزیع احتمال توام متغیرها و $pa(X_i)$ مجموعه والد متغیر X_i است. بر اساس رویکرد آموزشی مدلسازی اثرات دومینو ناشی از حریق با استفاده از شبکه‌های بیزین که توسط خاکزاد در سال ۲۰۲۱ (۱۳) ارائه شده است، در این مطالعه فرض گردید که احتمال تشدید برای آتش سوزی یک مخزن را می‌توان از رابطه ۲ تخمین زد که در این رابطه P_{ij} احتمال تشدید حادثه اولیه و Q_{ij} مقدار شار گرمایی است که مخزن j در اثر وقوع حریق در مخزن i دریافت می‌کند (۲۴). در صورت رخداد حریق در بیش از یک مخزن، Q_{ij} دریافتی از مخازن مجاور با یکدیگر جمع می‌گردند. با توجه به میزان تابش حرارتی دریافتی، جدول احتمال شرطی هر مخزن با در نظر گرفتن میزان تابش حرارتی دریافتی از مخزن در حال سوختن ترسیم گردید. با پیاده‌سازی BN در نرم‌افزار مدل‌سازی شبکه بیزین، GeNIe، احتمال گسترش حریق به هر مخزن ذخیره بر اساس احتمالات محاسبه شده بر اساس میزان تابش حرارتی دریافتی بررسی گردید.

$$P_{ij}=1-\frac{15}{Q_{ij}} \qquad (۲)$$

بردارهای تشدید بسیار بالاتر از حدود آستانه به اندازه کافی قوی فرض می‌شوند که آسیب قابل توجهی به واحدهای مجاور وارد کنند. برای برآورد احتمال اثرات دومینو، باید احتمال آسیب واحدهای هدف محاسبه شود. روش‌های مختلفی برای محاسبه احتمال آسیب پیشنهاد شده است که از میان آن‌ها می‌توان به روش Eisenberg (۱۹۷۵) (۲۵) و مدل Cozzani و همکاران (۲۰۰۵) (۱۵) اشاره نمود. توابع پروبیت به دلیل سادگی و انعطاف پذیری بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با استفاده از توابع Probit، ابتدا مقدار Probit (Y)، از طریق رابطه $Y=a+b\ln(EV)$ محاسبه می‌شود که در این رابطه EV بزرگی بردار تشدید یا یک پارامتر مرتبط است و a و b ضرایب ثابت هستند. با تعیین Y، احتمال آسیب (P) را می‌توان به صورت $P=\phi(Y-5)$ محاسبه کرد، که در آن ϕ تابع چگالی تجمعی یک توزیع نرمال استاندارد است. رابطه ۳ مدل‌های آسیب‌پذیری را بر اساس یک همبستگی ساده‌شده برای تخمین زمان تا شکست (time to failure (ttf)) نشان می‌دهد.

$$Y=12.54-1.847\ln(ttf) \quad \text{Probit model} \qquad (۳)$$

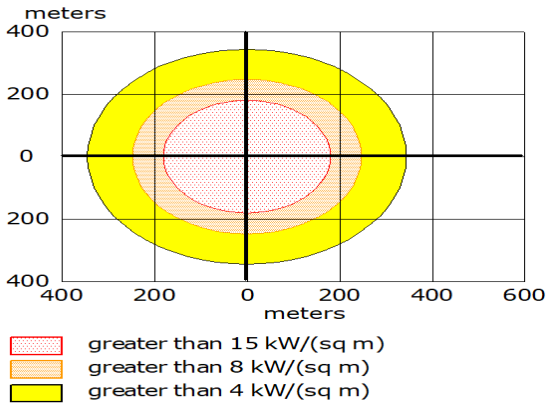
$$ln(ttf)=-1.13ln(Q)-2.67\times10^{-5}V+9.9 \quad \text{ttf correlation}$$

که در رابطه ۲، ttf نشان‌دهنده زمان شکست (ثانیه) است. Q شار گرمایی دریافتی توسط مخزن (بر حسب کیلووات بر مربع)، V حجم مخزن (بر حسب متر مکعب) و Y نشان‌دهنده مقدار Probit است (۲۶). احتمال رخداد آتش استخری در واحد اولیه ($1.E-05$) در نظر گرفته شد (۲۷).

1. Node
2. Directed arcs

جدول ۲: مقادیر تابش حرارتی $\left(\frac{kW}{m^2}\right)$ دریافتی مخزن T_j از مخزن در حریق T_i

$T_i \downarrow$ $T_{j\rightarrow}$	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1		۷۰	۴۰	۳۲	۱۶	۱۱	۹	**۷**
T2	۵۲		۲۵	۳۶	۲۸	۸	۹	**۸**
T3	۲۵	۲۲		۷۸	۲۳	۴۰	۳۰	**۱۶**
T4	۱۶	۲۵	۵۷		۶۲	۲۸	۴۱	**۳۱**
T5	۹	۱۶	۱۶	۵۰		۱۵	۲۲	**۳۸**
T6	۷	۷	۲۶	۲۴	۱۳		۸۰	**۲۵**
T7	۶	۷	۱۶	۲۴	۱۸	۵۷		**۷۵**
T8	۵	۶	۱۱	۱۷	۲۴	۱۷	۵۰	



شکل ۲: ناحیه خطر مربوط به بروز آتش استخری در مخزن شماره ۳

یافته ها

۱. نتایج حاصل از مدلسازی پیامد و تعیین مخازن هدف

از طریق مدل‌سازی سناریوی حریق تعریف شده، مقادیر بردارهای تشدید در هر مخزن با استفاده از نرم‌افزار ALOHA محاسبه گردید. جدول شماره ۲ مقادیر شار حرارتی دریافتی هر مخزن را نشان می‌دهد. بر اساس مطالعات گذشته مقدار آستانه تشدید برای مخازن اتمسفریک در معرض حریق استخری جهت ایجاد آسیب و ایجاد اثرات دومینو در مخازن مجاور ۱۵ $\frac{kW}{m^2}$ می‌باشد. بنابراین مخزن یا مخازنی که مقادیر شار گرمایی بیش از حد آستانه را تابش می‌کنند به عنوان بحرانی‌ترین مخازن در نظر گرفته می‌شوند. طبق جدول شماره ۲ مخازن شماره ۳ و ۴ به تمامی مخازن مجاور تابش حرارتی بیشتر از ۱۵ $\frac{kW}{m^2}$ ساطع می‌نمایند. بنابراین این دو مخزن به عنوان مخازن بحرانی در صنعت مورد مطالعه در نظر گرفته شدند. شکل ۲ ناحیه خطر مربوط به تابش حرارتی برای مخزن شماره ۳، که با استفاده از نرم‌افزار ALOHA بدست آمده را نشان می‌دهد.

۲. نتایج حاصل از تخمین احتمال تشدید سناریو اولیه به مخازن مجاور با درنظر گرفتن بردار تشدید

در این مرحله با توجه به رابطه $P_{ij}=1-\frac{15}{Q_{ij}}$، مقادیر احتمال تشدید حریق در تمامی مخازن محاسبه گردید. نتایج حاصل از محاسبات نیز با تایید یافته‌های مرحله آنالیز پیامد نشان می‌دهد که از میان ۸ مخزن مورد مطالعه، مخازن شماره ۳ و ۴ دارای بیشترین پتانسیل گسترش اثرات دومینو هستند. بنابراین احتمال گسترش اثرات دومینو با در نظر گرفتن رخداد حریق در این مخازن مورد بررسی قرار گرفت. جدول شماره ۳ جدول احتمال شرطی مخزن شماره ۴ با در نظر گرفتن رخداد

حریق اولیه در مخزن شماره ۳ (T3 = fire) و جدول شماره ۴ جدول احتمال شرطی مخزن شماره ۵ با در نظر گرفتن رخداد حریق اولیه در مخزن شماره ۴ (T4 = fire) را نشان می‌دهند.

با پیاده‌سازی BN در نرم‌افزار GeNIe، احتمال گسترش حریق و اثرات دومینو به سایر مخازن ذخیره محاسبه شد. بر اساس شکل ۳ در صورت رخداد حریق در مخزن شماره ۳، مخازن شماره ۴ ($T4 = fire = 0.81$) و ۶ ($T6 = fire = 0.63$) به عنوان واحدهای ثانویه (secondary units) و مخازن شماره ۷ ($T7 = fire = 0.50$)، ۱ ($T1 = fire = 0.40$)، ۵ ($T5 = fire = 0.34$) و ۲ ($T2 = fire = 0.31$) به عنوان واحدهای tertiary (مرتبه سوم) و مخزن شماره ۸ ($T8 = fire = 0.06$) به عنوان واحد quaternary (مرتبه چهارم) شناسایی گردیدند.

بر اساس شکل ۴ در صورت رخداد حریق در مخزن شماره ۴، مخازن شماره ۵ ($T5 = fire = 0.75$)، ۳ ($T3 = fire = 0.73$) و ۷ ($T7 = fire = 0.64$) به عنوان واحدهای ثانویه (secondary units) و مخازن شماره ۸ ($T8 = fire = 0.51$)، ۶ ($T6 = fire = 0.46$) و ۲ ($T2 = fire = 0.40$) به عنوان واحدهای tertiary و مخزن شماره ۱ ($T1 = fire = 0.06$) به عنوان واحد quaternary (مرتبه چهارم) شناسایی گردیدند.

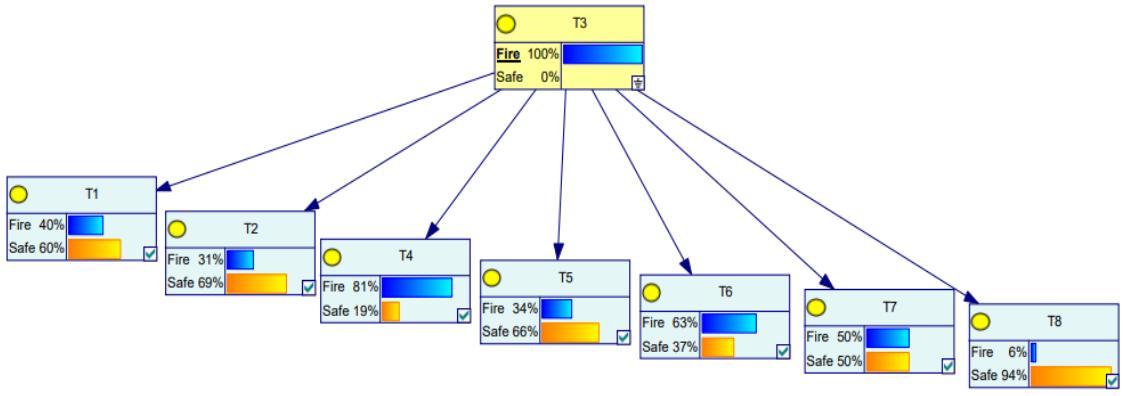
جدول شماره ۵ جدول احتمال شرطی مخزن ۵ با در نظر گرفتن رخداد حریق همزمان در مخازن شماره ۳ و ۴ را نشان می‌دهد. همچنین بر اساس شکل ۵، در صورت

جدول ۳: جدول احتمال شرطی مخزن شماره ۴ با توجه به رخداد حریق در مخزن شماره ۳

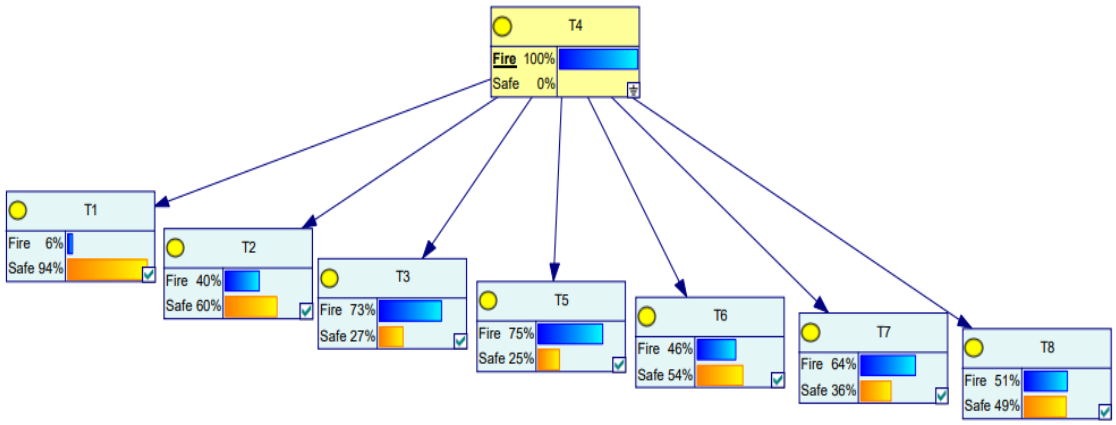
	P (T4|T3)	
T3	Fire	Safe
Fire	۰.۸۱	۰.۱۹
Safe	۰.۰۰	۱.۰۰

جدول ۴: جدول احتمال شرطی مخزن شماره ۵ با توجه به رخداد حریق در مخزن شماره ۴

	P (T5|T4)	
T4	Fire	Safe
Fire	۰.۷۵	۰.۲۵
Safe	۰.۰۰	۱.۰۰



شکل ۳: مدلسازی اثرات دومینو حریق با در نظر گرفتن حریق اولیه در مخزن شماره ۳



شکل ۴: مدلسازی اثرات دومینو حریق با در نظر گرفتن حریق اولیه در مخزن شماره ۴

جدول ۵: جدول احتمال شرطی مخزن شماره ۵ با در نظر گرفتن رخداد حریق در مخازن شماره ۳ و ۴

		P (T5| T3,T4)	
T3	T4	Fire	Safe
Fire	Fire	۰.۸۲	۰.۱۸
Fire	Safe	۰.۳۵	۰.۶۵
Safe	Fire	۰.۷۶	۰.۲۴
Safe	Safe	۰.۰۰	۱.۰۰

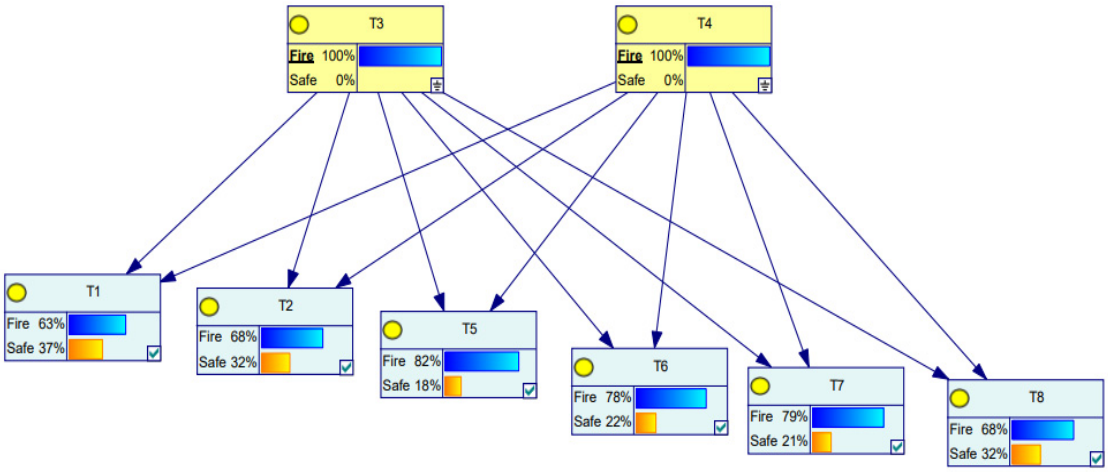
رخداد حریق در مخازن شماره ۳ و ۴، رتبه بندی واحدها بر اساس marginal probabilities و ایجاد اثرات دومینو نشان می‌دهد که مخازن شماره ۵ ($T5 = fire = 0.82$)، ۷ ($T7 = fire = 0.79$) و ۶ ($T6 = fire = 0.78$) به عنوان واحدهای ثانویه (secondary units) و مخازن شماره ۸ ($T8 = fire = 0.68$)، ۲ ($T2 = fire = 0.68$) و ۱ ($T1 = fire = 0.63$) به عنوان واحدهای tertiary طبقه بندی می‌شوند.

شکل ۶ احتمال پروبیت یا آسیب (damage probability) هرکدام از مخازن مجاور در صورت رخداد حریق در مخزن شماره ۳ و مخزن شماره ۴ را نشان می‌دهد.

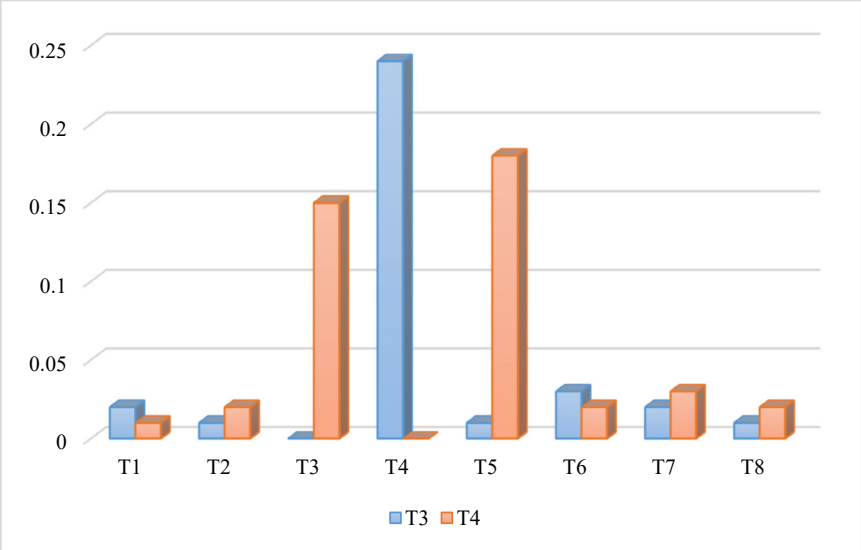
بحث

امکان پیشگیری کامل از حوادث در صنایع فرایندی و شیمیایی بسیار دشوار است. اگر حادثه‌ای در یک صنعت دارای مخاطره بزرگ رخ دهد، ممکن است تاثیر زیادی بر محیط اطراف داشته باشد و تشدید شده و سبب ایجاد اثرات دومینو گردد. حوادث ناشی از اثرات دومینو معمولاً پیامدهای بسیار شدیدتری نسبت به حادثه اولیه دارند و شدیدترین رویدادهایی هستند که ممکن است فرایندهای صنعتی و تأسیسات ذخیره‌سازی را تحت تأثیر قرار دهند. لذا، توجه مدیریت ایمنی و انجام مطالعه را به خود جلب می‌کنند. شدت بالقوه چنین سناریوهای حادثه‌ای مستلزم تلاش‌های قوی برای ارزیابی، کنترل و جلوگیری از اثرات دومینو است (۲۸). در مطالعه حاضر رویکرد آموزشی مدلسازی اثرات دومینو ناشی از حریق با استفاده از شبکه‌های بیزین که توسط خاکزاد در سال ۲۰۲۱ (۱۳) ارائه شده است، جهت مدلسازی اثرات دومینوی ناشی از حریق در محوطه مخازن ذخیره‌سازی بنزین در یکی از انبارهای نفت کشور بکار گرفته شد.

با توجه به اینکه سناریوی مورد بررسی در مطالعه حاضر آتش استخری در نظر گرفته شده است، تابش حرارتی بیش از مقادیر حد آستانه می‌تواند مخازن مجاور



شکل ۵: مدلسازی اثرات دومینو حریق با در نظر گرفتن رخداد حریق اولیه در مخازن شماره ۳ و ۴



شکل ۶: احتمال پروبیت در مخازن

را تحت تاثیر قرار داده و سبب ایجاد آسیب در آن‌ها گردد. بر اساس یافته‌های مطالعه در صورت رخداد حریق در مخزن شماره ۳، مخازن شماره ۴ و ۶ به عنوان واحدهای ثانویه و مخازن شماره ۱، ۲، ۵ و ۷ به عنوان واحدهای tertiary (مرتبه سوم) و مخزن شماره ۸ به عنوان واحد quaternary در مدلسازی اثرات دومینو شناسایی گردیدند. همچنین، در صورت رخداد حریق در مخزن شماره ۴، مخازن شماره ۳، ۵ و ۷ به عنوان واحدهای ثانویه (secondary units) و مخازن شماره ۲، ۶ و ۸ به عنوان واحدهای tertiary (مرتبه سوم) و مخزن شماره ۱ به عنوان واحد quaternary (مرتبه چهارم) شناسایی گردیدند. خاکزاد و همکاران (۲۰۱۳) روشی مبتنی بر BNبرای مدل‌سازی اثرات دومینو در صنایع فرایندی توسعه دادند که واحدهای فرایندی را به عنوان گره‌های

BNو امکان گسترش حادثه در بین گره‌های مجاور را به عنوان کمان‌های هدایت‌شده BN در نظر گرفتند. در رویکرد آنها، احتمالات مشروط اختصاص داده شده به گره‌ها با استفاده از روابط دوز-پاسخ (مدل‌های پروبیت) برای تخمین احتمال آسیب واحدهای فرایندی در معرض شار گرمایی (در صورت رخداد حریق) و موج انفجار (در صورت رخداد انفجار) تعیین شدند (۲۹). با توجه به رخداد حریق یا انفجار اولیه در یک مخزن فرایندی، از بین دو مخزن در معرض، مخزن با بالاترین احتمال تشدید به عنوان واحد ثانویه انتخاب می‌شود که در زنجیره حوادث وارد می‌شود. با توجه به اثرات هم افزایی احتمالی بین مخازن اولیه و ثانویه، توالی و احتمال درگیری مخازن مرتبه سوم و بالاتر در زنجیره حوادث را می‌توان به همین ترتیب شناسایی نمود. لازم به ذکر است که از آنجایی که انفجارها ناگهانی و کوتاه مدت هستند، امکان وقوع انفجارهای همزمان چندگانه بسیار کم است و بنابراین اصل هم افزایی به ندرت در مورد انفجارها اعمال می‌شود. اما در صورت رخداد حریق، احتمال رخداد حریق همزمان بسیار بالاتر است. حریق‌های صنعتی مانند حریق مخازن، آتش استخری و آتش فورانی معمولاً مدت زمان بیشتری برای اطفا نیاز دارند و بنابراین احتمال دریافت شارهای گرمایی ناشی از حریق در تجهیزات یا واحدهای مجاور و در نتیجه ایجاد اثر هم افزایی به مراتب بالاتر است (۱۳). نتایج مدلسازی اثرات دومینو در مطالعه انجام شده بر روی ۵ مخزن حاوی بنزین توسط Khakzad و Khan (۲۰۲۱) نشان داد که با افزایش فاصله از واحد اولیه (مخزن در حال سوختن)، مقادیر شار گرمایی دریافتی (بردار تشدید) کاهش و اثرات دومینو نیز کاهش می‌یابد. بر اساس یافته‌ها، احتمال اثرات دومینو ناشی از حریق با در نظر گرفتن بردار تشدید تابش حرارتی در دو مخزن مجاور ۶۳٪ و در مخزن با فاصله بیشتر ۲۴٪ گزارش گردیده است (۲۴). در مطالعه حاضر با توجه به حجم بیشتر مخازن ریسک رخداد اثرات دومینو بیشتر از مطالعه مذکور و در مخازن مجاور مخزن در حال سوختن حدود ۷۵ تا ۸۲٪ است.

بر اساس یافته‌های مطالعه حاضر، با در نظر گرفتن رخداد حریق همزمان در مخازن شماره ۳ و ۴، رتبه بندی واحدها بر اساس marginal probabilities (احتمالات حاشیه ای) در ایجاد اثرات دومینو نشان داد که مخازن شماره ۵، ۶ و ۷ به عنوان واحدهای ثانویه (secondary units) و مخازن شماره ۱، ۲ و ۸ به عنوان واحدهای tertiary (مرتبه سوم) طبقه بندی می‌شوند. یافته‌های Khakzad و Khan (۲۰۲۱) نشان داد که در صورت رخداد حریق همزمان در دو مخزن در محوطه مخازن، با توجه به افزایش مقادیر شار گرمایی دریافتی توسط سایر تجهیزات و مخازن، احتمال رخداد حریق در مخازن افزایش می‌یابد (۲۴).

در مناطقی که مقادیر زیادی از مواد قابل اشتعال ذخیره می‌شود، رخداد حریق در یک واحد ممکن است به سایر تاسیسات گسترش یابد و در نتیجه اثر دومینو ایجاد شود. حریق‌های ثانویه همچنین ممکن است باعث آتش‌سوزی در سایر تاسیسات شوند. از آنجایی که تابش حرارتی حریق سبب آغاز فرآیند گرم شدن و رساندن آسیب به تاسیسات مجاور می‌شود، مدت زمانی طول می‌کشد تا حریق به تاسیسات دیگر گسترش یابد. در طول گسترش حریق، معمولاً واکنش اضطراری برای اطفاء آن در اسرع وقت انجام می‌شود. رسیدن پرسنل آتش نشانی به محل آتش سوزی و شروع مبارزه با آتش، مدت زمانی را نیاز دارد. تجزیه و تحلیل اثرات دومینوی ناشی از حریق می‌تواند به پرسنل واکنش اضطراری کمک کند تا از قبل برای کنترل حریق آماده شوند. تیم‌های واکنش اضطراری و تیم‌های پشتیبان معمولاً در زمان‌های مختلف به محل حریق می‌رسند. هنگامی که تیم‌های واکنش اضطراری در خنک‌سازی مخزن شرکت می‌کنند، تابش حرارتی دریافتی توسط مخازن مجاور کاهش می‌یابد و زمان تا خرابی تجهیزات بر این اساس طولانی‌تر می‌شود تا تیم‌های پشتیبان زمان بیشتری برای رسیدن به مخزن مجاور تحت تاثیر حریق داشته باشند. این امر که سبب افزایش همکاری پرسنل درگیر در اطفاء حریق و نیروهای پشتیبان می‌شود، می‌تواند تا حد امکان نیروی اضطراری

کمتری را برای حفظ سطح پاسخ اضطراری مورد نیاز و کاهش هزینه‌های عملیاتی اختصاص دهد (۳۰).

نیاز به تجزیه و تحلیل ریسک اثرات دومینو در زیرساخت‌های شیمیایی مدت‌هاست که شناخته شده است و به طور سیستماتیک در تجزیه و تحلیل ریسک، ارزیابی ایمنی و تجزیه و تحلیل آسیب‌پذیری کارخانه‌های شیمیایی در دهه گذشته مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، به دلیل احتمالات بسیار کم و درجات بالایی از پیچیدگی، وابستگی و عدم قطعیت نسبت داده شده به چنین حوادثی، مدل‌سازی انتشار مکانی و به‌ویژه زمانی اثرات دومینو در صنایع شیمیایی و فرایندی بسیار چالش برانگیز بوده است. شبکه بیزین (BN) به عنوان یک مدل گرافیکی احتمالی برای مدل‌سازی تکامل فضایی اثرات دومینو و شناسایی محتمل‌ترین پیکربندی واحدها با توجه به یک حادثه اولیه و پتانسیل گسترش اثرات دومینو بکار گرفته شده است و الگوی انتشار احتمالی اثرات دومینو که از یک رویداد اولیه شروع می‌شود می‌تواند در قالب BN توسعه داده شود (۱). BN به طور موثر برای تجزیه و تحلیل اثرات دومینو از نظر کیفی و کمی مناسب است. ساختار انعطاف‌پذیر BN این امکان را فراهم می‌کند که با طیف گسترده‌ای از سناریوهای حادثه سازگار شود. نمایش گرافیکی واحدها و بردارهای تشدید با استفاده از گره‌ها و کمان‌های علّی از طریق BN به طور قابل ملاحظه‌ای به تجسم الگوی انتشار اثرات دومینو کمک می‌کند، که با اکثر روش‌های قطعی و احتمالی آسان نیست. برای حوادث حریق، بردار تشدید اثرات دومینو، تابش حرارتی است. خرابی سایر تأسیسات نزدیک به محل رخداد حریق در مقیاس بزرگ معمولاً به دلیل قرار گرفتن تحت تأثیر تابش‌های حرارتی در یک زمان خاص است. تعیین این واحدها، امکان تعیین اقدامات پاسخ اضطراری کافی و پیشگیری از گسترش اثرات دومینو را فراهم می‌سازد (۳).

نتیجه گیری

در مطالعه حاضر از شبکه‌های بیزین و بردار تشدید تابش حرارتی جهت مدلسازی اثرات دومینوی ناشی از حریق در محوطه مخازن ذخیره‌سازی بنزین در یکی از انبارهای نفت کشور استفاده شد. بر اساس یافته‌های مطالعه، مدل‌سازی و تحلیل ریسک اثرات دومینو با استفاده از شبکه‌های بیزین برای کاهش احتمال تشدید اثرات دومینو پیشنهاد می‌گردد. در نظر گرفتن اثرات هم‌افزایی رویدادهای مراتب مختلف از طریق در نظر گرفتن بردارهای تشدید با توجه به فواصل میان واحدهای فرایندی یا تجهیزات و موجودی مواد شیمیایی در مخازن، سبب مدیریت ریسک مناسب و تعیین اقدامات پاسخ اضطراری در محوطه مخازن ذخیره می‌گردد. بر اساس نتایج، این رویکرد برای ارائه بینشی در فرایند انتشار حادثه و اثرات دومینو و تعیین احتمال رخداد حریق در سایر مخازن یا تجهیزات، ساده اما مؤثر است.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل (بخشی از) پایان نامه در مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای با کد طرح 1402-4-99-68937 می‌باشد که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران اجرا شده است.

REFERENCES

1. Khakzad N. Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures. Reliab Eng Syst Saf. 2015;138:263-72.
2. Zhou J, Reniers G. A matrix-based modeling and analysis approach for fire-induced domino effects. Process Saf Environ Prot. 2018;116:347-53.
3. Zhou J, Reniers G. Petri-net based evaluation of emergency response actions for preventing domino effects triggered by fire. J Loss Prev Process Ind. 2018;51:94-101.
4. Ghasemi F, Kalatpour O, Salehi V, Omidi L. Why are emergency responses ineffective and inefficient? Lessons learnt from past events. J Loss Prev Process Ind. 2024;90:105335.
5. Omidi L, Zakerian SA, Saraji JN, Hadavandi E, Yekaninejad MS. Prioritization of human factors variables in the management of major accident hazards in process industries using fuzzy AHP approach. Health scope. 2018;7.
6. Hanifi SM, Omidi L, Moradi G. Risk calculation and consequences simulation of natural gas leakage accident using ALOHA software. J Health Saf Work. 2019;9.
7. Omidi L, Dolatabad KM, Pilbeam C. Differences in perception of the importance of process safety indicators between experts in Iran and the West. J Saf Res. 2023;84:261-72.
8. Omidi L, Zakerian SA, Saraji JN, Hadavandi E, Yekaninejad MS. Safety performance assessment among control room operators based on feature extraction and genetic fuzzy system in the process industry. Process Saf Environ Prot. 2018;116:590-602.
9. Reniers G, Cozzani V. Features of escalation scenarios. Domino effects in the process industries: Elsevier; 2013. p. 30-42.
10. Darbra R, Palacios A, Casal J. Domino effect in chemical accidents: Main features and accident sequences. J Hazard Mater. 2010;183(1-3):565-73.
11. Huang K, Chen G, Khan F, Yang Y. Dynamic analysis for fire-induced domino effects in chemical process industries. Process Saf Environ Prot. 2021;148:686-97.
12. Cozzani V, Gubinelli G, Salzano E. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. J Hazard Mater. 2006;129(1-3):1-21.
13. Khakzad N. A tutorial on fire domino effect modeling using Bayesian networks. Modelling. 2021;2(2):240-58.
14. Dadashzadeh M, Khan F, Hawboldt K, Amyotte P. An integrated approach for fire and explosion consequence modelling. Fire Saf J. 2013;61:324-37.
15. Cozzani V, Gubinelli G, Antonioni G, Spadoni G, Zanelli S. The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. J Hazard Mater. 2005;127(1-3):14-30.
16. Rum A, Landucci G, Galletti C. Coupling of integral methods and CFD for modeling complex industrial accidents. J Loss Prev Process Ind. 2018;53:115-28.
17. Alileche N, Olivier D, Estel L, Cozzani V. Analysis of domino effect in the process industry using the event tree method. Saf Sci. 2017;97:10-9.
18. Zhou J, Reniers G. Petri-net based cascading effect analysis of vapor cloud explosions. J Loss Prev Process Ind. 2017;48:118-25.
19. Landucci G, Molag M, Cozzani V. Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires. J Hazard Mater. 2009;172(1):447-56.
20. Ghasemi F, Ghasemi A, Kalatpour O. Prediction of human error probability during the hydrocarbon road tanker loading operation using a hybrid technique of fuzzy sets, Bayesian network and CREAM. Int J Occup Saf Ergon. 2022;28(3):1342-52.
21. Zheng B, Chen Gh. Storage tank fire accidents. Process Safety Progress. 2011;30(3):291-3.
22. Aliabadi MM, Ramezani H, Kalatpour O. Quantitative Risk Assessment of Condensate Storage Tank, Considering Domino Effects. J Health Saf Work. 2022;12(1).
23. Jabbari M, Alibabaei A, Rezvanjah M. Vulnerability analysis of the tanks of an oil refinery to fire-induced dom-ino effects based on graph Theory. Iran Occup Health. 2021;18(1):201-19.
24. Khakzad N, Khan F. Application of Bayesian network to domino effect assessment. Dynamic Risk Assessment and Management of Domino Effects and Cascading Events in the Process Industry: Elsevier; 2021. p. 49-71.
25. Eisenberg NA, Lynch CJ, Breeding RJ. Vulnerability model. A simulation system for assessing damage resulting from marine spills. Final report. Enviro Control, Inc., Rockville, Md.(USA); 1975.
26. Zhang L, Reniers G, Ovidi F, Landucci G, Khakzad N. Applying agent-based modeling and simulation for domino effect assessment in chemical plants. Dynamic Risk Assessment and Management of Domino Effects

and Cascading Events in the Process Industry: Elsevier; 2021. p. 97-132.

27. Khakzad N, Reniers G. Application of graph theory to assessing the vulnerability of tank terminals to domino effects. Dynamic Risk Assessment and Management of Domino Effects and Cascading Events in the Process Industry: Elsevier; 2021. p. 133-53.
28. Zhou J, Reniers G. Petri net simulation of multi-department emergency response to avert domino effects in chemical industry accidents. Process Saf Environ Prot. 2021;146:916-26.
29. Khakzad N, Khan F, Amyotte P, Cozzani V. Domino effect analysis using Bayesian networks. Risk Anal Int J. 2013;33(2):292-306.
30. Zhou J, Reniers G, Cozzani V. A Petri-net approach for firefighting force allocation analysis of fire emergency response with backups. Reliab Eng Syst Saf. 2023;229:108847.