

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Evaluation of Domino Effects and Vulnerability Analysis of Oil Product Storage Tanks Using Graph Theory and Bayesian Networks in a Process Industry

Maryam Ghaljahi<sup>1,2</sup>, Leila Omid<sup>1</sup>, Ali Karimi<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran

Received: 23-10-2024

Accepted: 4-12-2024

### ABSTRACT

**Introduction:** Safety in process industries is of paramount importance, as these industries typically deal with hazardous chemicals and complex processes that can lead to irreparable consequences in the event of accidents. The present study aims to evaluate domino effects and analyze the vulnerability of storage tanks using graph theory and Bayesian networks in a process industry. This approach can help identify system vulnerabilities and facilitate the prediction of potential accidents, ultimately leading to improved safety measures.

**Material and Methods:** In this study, after collecting initial information related to the location of storage tanks and determining accident scenarios, the tanks under investigation were selected based on the type of stored materials and their layout, with input from experts. These tanks were modeled as nodes in a graph, and the probability of accident spreading among them was represented as edges in the graph based on the amount of heat radiation. Additionally, for modeling domino effects and analyzing vulnerability, graph theory and Bayesian networks were employed.

**Results:** Based on the target tanks related to the pool fire scenario, domino effects in the tanks were identified and modeled as a theory graph. Tank number 4 was determined to be the most influential and susceptible tank in the spread and initiation of domino effects, with the highest betweenness index (0.2381), outcloseness index (0.35211), and incloseness index (0.3663). Additionally, based on the allcloseness index, the most likely sequence of the tank involvement in fires caused by domino effects was identified.

**Conclusion:** In order to reduce the likelihood of exacerbating domino effects, modeling the effects using Bayesian networks and graph theory is proposed; the results can also be applied to optimize fire suppression strategies. Additionally, vulnerability analysis through graph theory and the assessment of tanks regarding their potential for fire initiation and spread can be beneficial in managing the risks associated with domino effects.

**Keywords:** Domino effects, Vulnerability, Fire, Graph theory, Storage tanks

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Ghaljahi M, Omid L, Karimi A. Evaluation of Domino Effects and Vulnerability Analysis of Oil Product Storage Tanks Using Graph Theory and Bayesian Networks in a Process Industry. *J Health Saf Work*. 2024; 14(4): 736-755.

\* Corresponding Author Email: [a\\_karimi@sina.tums.ac.ir](mailto:a_karimi@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.

## 1. INTRODUCTION

Safety in process industries is of paramount importance, particularly because of the complexities of the systems used and the associated hazards. These industries often involve multi-stage processes and complex interactions between equipment and chemicals, where any failure or error can lead to serious and unpredictable accidents. Therefore, the potential for domino effects, which refer to the transfer and escalation of accidents from one part to another, is a major concern. Domino effects (also known as chain reactions) refer to high-consequence, low-probability incidents in which the occurrence of an initial accident (such as a fire) in one unit leads to the involvement of neighboring units, causing the scale of the initial accident to expand.

Graph theory is a modern graphical method for modeling domino effect scenarios among storage tanks and analyzing the vulnerabilities; it is a collection of nodes and arcs, where each arc connects two nodes. In the graph model, hazardous equipment (tanks) are represented as graph nodes, and the likelihood of incident propagation among the equipment is indicated by the arcs between the nodes. Modeling domino effects among tanks by graph theory enables the analysis of the most vulnerable tanks to domino effects using graph metrics. In other words, graph metrics allow the quantification of the vulnerable components of tanks (potential for ignition and propagation of domino effects), thereby enabling a comparison of tanks based on their involvement in initiating and spreading domino effects.

The graph indicators have been utilized in studies related to the vulnerability analysis of process industries to domino accidents resulting from terrorist attacks, as well as random failures. The lack of the need to calculate the probabilities of incident escalation in the modeling of domino effects using graph theory makes this method applicable even in conditions with multiple hazardous equipment.

Considering the large number of oil, gas, gasoline, and other petroleum product storage tanks in the process industries and the importance of protecting them from fire and preventing vulnerability to nearby facilities, this study aims to employ graph theory to identify tanks with the highest potential for ignition and propagation

of domino effects. Bayesian networks are used to model domino effects among eight tanks in a process industry. In this study, each tank is treated as a node, and the possibility of fire spreading between adjacent nodes (tanks) is considered as an arc. The fire spread from one tank to another depends on the intensity of the received heat flux (escalation vector).

## 2. MATERIAL AND METHODS

In recent studies, Modeling domino effects through the application of graph theory and the calculation of its indices has been widely used. Graph theory modeling is conducted using the R software and the igraph package. R is an open-source statistical programming environment that allows the generation of various graphs and the study of their characteristics using the igraph package. Additionally, BN facilitates modeling and managing uncertainties, making it easier to identify spatial-temporal dependencies of domino effects and allowing for more accurate identification of the most probable event sequences. The present study was conducted in several steps as outlined below:

- 1) Identifying hazardous tanks and collecting relevant information as graph nodes.
- 2) Determining the incident scenario for each of the hazardous storage tanks.
- 3) Identify the based on the accident scenario and calculate their intensity.
- 4) Comparing the escalation vectors with the threshold value as graph arcs.
- 5) Calculating the weights of the graph arcs.
- 6) Modeling the domino effects and vulnerabilities to adjacent tanks using graph theory and calculating the centrality indices of the nodes.
- 7) Analyzing the vulnerability of the equipment based on the graph theory indices.
- 8) Modeling domino effects and the likelihood of escalation of the initial scenario to adjacent tanks using a Bayesian network.

The studied process industry contained storage tanks for gasoline, kerosene, jet fuel, fuel oil, and other products. The selection of tanks was based on the opinions of the research team and an expert panel comprising safety and fire department heads, process and operations experts, tank unit specialists, and HSE professionals in the industry. Eight storage tanks for kerosene and jet fuel were chosen due to their highest storage capacity and

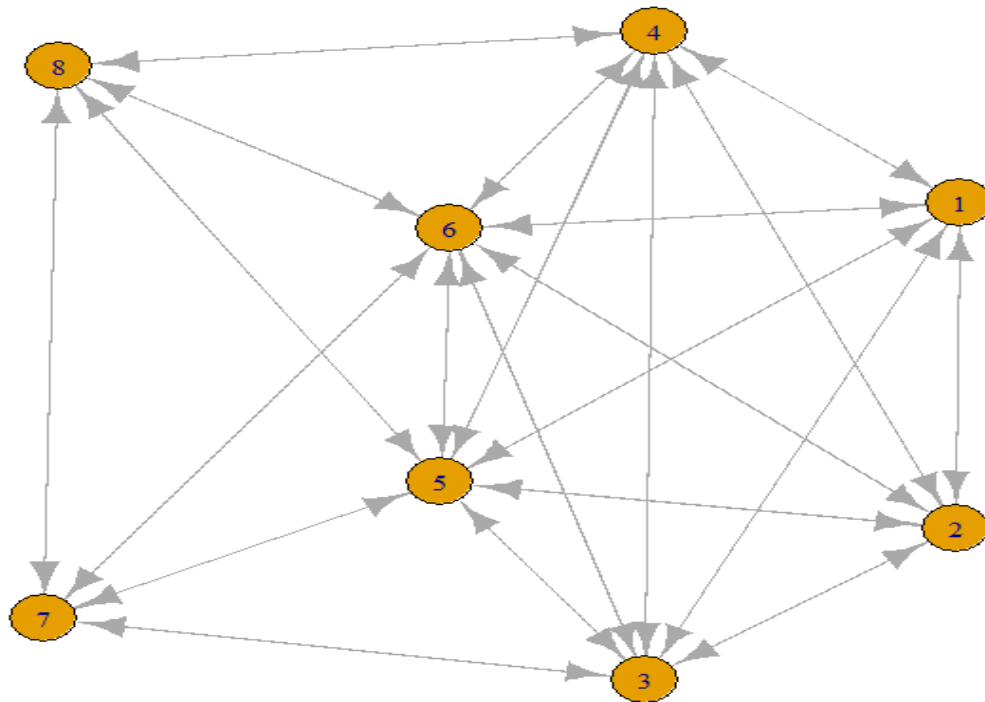


Figure 1: Fire escalation paths

Table 1: Calculated Graph theory indices for each of the nodes (tanks)

Tank Number	Betweenness	In closeness index	Out closeness index	All closeness index
1	0	0.27548	0.28902	0.29326
2	0	0.27855	0.27473	0.2809
3	0.14286	0.35211	0.34843	0.35842
4	0.2381	0.3663	0.35211	0.37037
5	0.20238	0.35211	0.34965	0.35842
6	0.17857	0.35587	0.34483	0.36101
7	0	0.21368	0.22075	0.22075
8	0	0.22371	0.22272	0.22883

consideration of the distances between the tanks and their layout. ALOHA software was used for modeling the consequences of the scenarios. The weight of each arc was assigned as the ratio of the threshold value of  $15 \text{ kW/m}^2$  to the corresponding escalation vector (heat radiation) of that arc.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

The results obtained from the consequence analysis and the vulnerability assessment of adjacent reservoirs, using graph theory and calculating node

centrality indices, indicated that tank number 4 had the highest in-closeness, out-closeness, and all-closeness indices, followed by tanks 5 and 6, which also had significant values (Figure 1). Table 1 shows the computed centrality indices for each of the nodes in the current study.

Tanks number 4, 6, 5, 3, 2, 1, 8, and 7 had the highest values of the incloseness index (indicating potential susceptibility to other tanks during domino effects), listed in that order. The outcloseness index (indicating potential to trigger

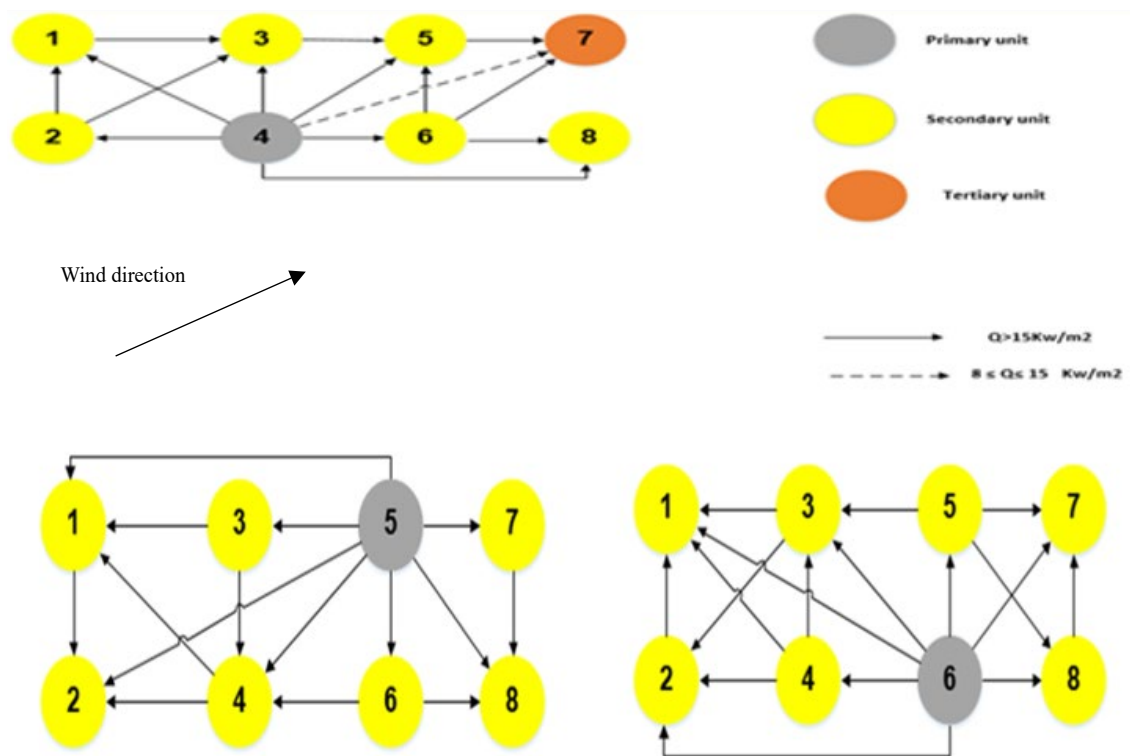


Figure 2: Modeling the initiation of domino effects using a Bayesian network in tanks 4, 5, and 6

domino effects) was also calculated for eight tanks, with the tanks ranked from highest to lowest based on their scores as follows: 4, 5, 3, 6, 1, 2, 8, and 7. Tanks number 4, 6, 5, 3, 1, 2, 8, and 7 also had the highest allclosness index, meaning these tanks were the most vulnerable in terms of potential to trigger domino accidents and susceptibility to other tanks when such incidents occur simultaneously. Additionally, tank number 4 had the highest inclosness, outclosness, and allclosness indices, followed by tanks number 5 and 6, which also held significant values.

Figure 2 shows the modeling for the initiation of domino effects using a Bayesian network. Tanks 4, 5, and 6 are considered as the initiators of domino effects, which can lead to the spread of fire and damage to other tanks. These fires spread pathways illustrate how an incident in these initial tanks can trigger a sequence and chain of events in secondary and tertiary tanks. The wind direction, which was from the southwest to the northeast,

also plays a crucial role in the spread of the fire, as it can direct flames and smoke toward other areas, increasing the likelihood of secondary and tertiary fires occurring.

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, graph theory and heat radiation escalation vectors were utilized to model the domino effects resulting from a fire in the jet fuel and kerosene storage tank area of a process industry. Based on the findings, modeling domino effects using graph theory can be used to identify vulnerable units in the process industries and determine the prevention measures to reduce the probability and severity of these effects.

#### 5. ACKNOWLEDGMENT

This study was part of a PhD thesis in the field of Occupational Health Engineering supported by Tehran University of Medical Sciences (grant No: IR.TUMS.SPH.REC.1402.243).

## ارزیابی اثرات دومینو و تحلیل آسیب پذیری مخازن ذخیره فرآورده های نفتی با بکارگیری تئوری گراف و شبکه بیزین در یک صنعت فرآیندی

مریم قلع جهی<sup>۱،۲</sup>، لیلا امید<sup>۱</sup>، علی کریمی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>گروه مهندسی بهداشت حرفه ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۱۴

### چکیده

**مقدمه:** ایمنی در صنایع فرآیندی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این صنایع معمولاً با مواد شیمیایی خطرناک و فرآیندهای پیچیده سروکار دارند که در صورت بروز حوادث می‌توانند پیامدهای جبران‌ناپذیری به همراه داشته باشند. یکی از نگرانی‌های عمده در این صنایع، اثرات دومینو است که به انتقال و تشدید حوادث از یک بخش به بخش دیگر اشاره دارد. این پدیده می‌تواند منجر به وقوع حوادث زنجیره‌ای و افزایش شدت آسیب‌ها شود. به همین دلیل، کاربرد و قوت مدل‌های تحلیلی در ارزیابی این اثرات اهمیت ویژه‌ای دارد. در این راستا، هدف مطالعه حاضر، ارزیابی اثرات دومینو و تحلیل آسیب‌پذیری مخازن ذخیره فرآورده‌های نفتی با استفاده از تئوری گراف و شبکه بیزین در یک صنعت فرآیندی است. این رویکرد به شناسایی نقاط ضعف سیستم کمک کرده و امکان پیش‌بینی حوادث بالقوه را فراهم می‌آورد که در نهایت می‌تواند به بهبود تدابیر ایمنی و کاهش خطرات مرتبط منجر شود.

**روش کار:** در این پژوهش، پس از جمع‌آوری اطلاعات اولیه مرتبط با جایگاه مخازن ذخیره و تعیین سناریوی حادثه، مخازن مورد مطالعه با توجه به نوع مواد ذخیره‌شده و جانمایی آن‌ها، با نظر کارشناسان انتخاب شدند. این مخازن به صورت گره‌های گراف مدل‌سازی شده و احتمال گسترش حادثه میان آن‌ها به شکل کمان‌های گراف نمایش داده شد. برای مدل‌سازی پیامد حوادث و محاسبه میزان تشعشع حرارتی ناشی از وقوع حریق در هر مخزن به مخازن مجاور، از نرم‌افزار مدل‌سازی ALOHA استفاده شد. همچنین، برای مدل‌سازی اثرات دومینو و تحلیل آسیب‌پذیری، از تئوری گراف و شبکه بیزین بهره‌گیری شد و محاسبه شاخص‌های تئوری گراف با استفاده از نرم‌افزار آماری R و بسته igrph انجام گرفت.

**یافته‌ها:** اثرات دومینو در مخازن با توجه به مخازن هدف مربوط به سناریوی حریق استخری مشخص گردیدند و به صورت گراف جهت دار مدل‌سازی شدند. مخزن شماره ۴ تاثیرگذارترین و تاثیرپذیرترین مخزن در گسترش و راه‌اندازی اثرات دومینو با بالاترین شاخص بینیت (۰/۲۳۸۱)، شاخص نزدیکی خارجی (۰/۳۵۲۱۱) و شاخص نزدیکی داخلی (۰/۳۶۶۳) تعیین شد. همچنین بر اساس شاخص نزدیکی کل، محتمل‌ترین توالی درگیر شدن مخازن در حریق‌های ناشی از اثرات دومینو مشخص گردید.

**نتیجه‌گیری:** مدل‌سازی اثرات دومینو با استفاده از شبکه‌های بیزین و تئوری گراف به‌منظور کاهش احتمال تشدید این اثرات پیشنهاد می‌شود و نتایج آن می‌تواند برای استراتژی‌های بهینه‌اطفای حریق نیز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، تحلیل آسیب‌پذیری با استفاده از تئوری گراف و تعیین مخازن از نظر پتانسیل راه‌اندازی و گسترش حریق، می‌تواند در زمینه مدیریت ریسک اثرات دومینو مفید باشد.

**کلمات کلیدی:** اثرات دومینو، آسیب‌پذیری، حریق، تئوری گراف، مخازن ذخیره‌سازی

ایمنی در صنایع فرآیندی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به ویژه به دلیل پیچیدگی‌های سیستم‌های مورد استفاده و خطرات مرتبط با آن‌ها. این صنایع اغلب شامل فرآیندهای چندمرحله‌ای و تعاملات پیچیده بین تجهیزات و مواد شیمیایی هستند که هرگونه نقص یا خطا می‌تواند منجر به حوادث جدی و غیرقابل پیش‌بینی شود. از این رو، احتمال وقوع اثرات دومینو، که به انتقال و تشدید حوادث از یک بخش به بخش دیگر اشاره دارد، یک نگرانی عمده به شمار می‌رود (۱، ۲). علیرغم ارتقاء دانش ایمنی فرآیند، بهبود ابزارهای تجزیه و تحلیل حوادث و معرفی سیستم‌های مدیریت ایمنی، نرخ حوادث در صنایع فرآیندی همچنان رو به افزایش است. بنابراین یک رویکرد یکپارچه برای ارزیابی عملکرد و ارزیابی ریسک‌های موجود در صنایع فرآیندی به روشی سیستمی در رابطه با پیشگیری و کاهش حوادث بزرگ مورد نیاز است (۳). اثرات دومینو (حوادث زنجیره‌ای)، به حادثه‌ای گفته می‌شوند که با پیامد بالا و احتمال کم هستند که طی آن‌ها وقوع یک حادثه اولیه (مانند حریق) در یک واحد منجر به درگیر شدن واحدهای مجاور می‌شود، به گونه‌ای که ابعاد حادثه اولیه گسترش می‌یابد (۱، ۲، ۴).

مخاطرات عمده موجود در صنایع فرآیندی شامل حریق، انفجار و انتشار مواد سمی است. از میان این سه مخاطره عمده، حریق شایع‌ترین مخاطره‌ای است که صنایع فرآیندی با آن مواجهه دارند و انفجار دارای بیشترین پتانسیل آسیب‌زایی بوده و منجر به خسارات جانی و مالی می‌شود (۵). در صنایع فرآیندی سناریوی حریق به دلیل تاثیر مستقیم بر روی تجهیزات و امکان آسیب‌رسانی به نیروی کار از اهمیت زیادی برخوردار است، در حدود ۵۰٪ از حوادث حریق در صنایع فرآیندی و صنایع دارای تانک‌های ذخیره رخ می‌دهند، حادثه‌ای مانند حریق در بونسفیلد انگلستان (۲۰۰۵)، سیتاپورای هند و پورتوریکو ایالات متحده (۲۰۰۹) نمونه‌هایی از حریق‌های بسیار بزرگ و پایدار در سایت‌های مخازن هستند (۶). حریق در صنایع فرآیندی و شیمیایی سبب

تحمیل ریسک‌هایی با پیامد شدید به اموال و پرسنل می‌شود، دامنه تاثیر حریق می‌تواند از یک حریق کوچک مانند حریق در ناحیه نشت بند<sup>۱</sup> تا حریق‌هایی که کل سطح تانک را فرا گرفته و سبب ایجاد حریق ثانویه در واحد یا واحدهای مجاور شوند، متفاوت باشد (۷).

حوادث دومینو به وقوع زنجیره‌ای حوادث در یک سیستم اشاره دارند که در آن یک حادثه می‌تواند به طور مستقیم منجر به بروز حوادث دیگر شود. بنابراین می‌توان گفت اثرات دومینو دارای سه ویژگی مشترک هستند: با یک سناریوی تصادفی اولیه آغاز و به دلیل "بردار تشدید" ایجاد شده توسط اثرات فیزیکی سناریوی اولیه به واحدهای مجاور گسترش و منجر به رویدادهای ثانویه می‌شوند (۸). براساس مطالعه آمار حوادث گذشته، حریق عمدتاً (آتش استخری) باعث اثرات دومینو در صنایع فرآیندی بوده‌اند، برای مثال انفجارهای پیاپی در دسامبر ۲۰۰۵ در پایانه ذخیره‌سازی مواد نفتی بونسفیلد در انگلستان منجر به وقوع حرقی شد که روزها به طول انجامید و ۴۳ مجروح و خسارت مالی عمده‌ای به جای گذاشت (۹). جنبه‌های مختلف اثر دومینو شامل بردار تشدید، یعنی عواملی که باعث تشدید و گسترش حادثه می‌شوند، می‌باشد. این عوامل می‌توانند شامل طراحی نامناسب تجهیزات، هم‌جواری مخازن خطرناک یا نقص‌های عملیاتی باشند که باعث انتقال سریع خطر از یک بخش به بخش دیگر می‌شوند. در این راستا، موضوع حد آستانه نیز اهمیت ویژه‌ای دارد، شناسایی این حد آستانه و درک ماهیت آن، به مدیریت مؤثر ریسک و پیشگیری از حوادث دومینو کمک می‌کند، زیرا می‌توان تدابیر ایمنی را به گونه‌ای طراحی کرد که از ورود به این مناطق بحرانی جلوگیری شود. برای تعیین واحد یا مخازن مجاور تحت تاثیر حریق اولیه، مقادیر بردارهای تشدید (تابش حرارتی) انتشار یافته از مخزن هدف با مقدار آستانه ( $15 \frac{kW}{m^2}$ ) مقایسه می‌شوند (۸).

تئوری گراف یکی از روش‌های گرافیکی نوین برای مدل‌سازی سناریوهای اثرات دومینو میان مخازن و

1. Rim seal

همچنین تحلیل آسیب پذیری آنها است که یک گراف جهت دار می باشد و این گراف مجموعه ای از گره ها و کمان ها است که در آن هر کمان دو گره را به هم متصل می سازد. در مدل گراف تجهیزات مخاطره آمیز (مخازن) به عنوان گره های گراف در نظر گرفته می شوند و احتمال کمی گسترش حادثه میان تجهیزات نیز توسط کمان های میان گره ها نشان داده می شوند. مدل سازی اثرات دومینو میان مخازن به صورت یک گراف جهت دار این امکان را فراهم می کند که با استفاده از شاخص های گراف آسیب پذیرترین مخازن در برابر اثرات دومینو مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد، به عبارت دیگر با استفاده از شاخص های گراف می توان مولفه های آسیب پذیری مخازن (پتانسیل راه اندازی و گسترش اثرات دومینو) را کمی نمود و از این طریق مخازن را از نظر میزان مشارکت آن ها در آغاز و گسترش اثرات دومینو با یکدیگر مقایسه نمود. تئوری گراف به طور طبیعی مدلی است که ممکن است پیچیدگی های واقعی سیستم های صنعتی را به خوبی منعکس نکند. در دنیای واقعی، عوامل غیرخطی و وابستگی های پیچیده ای وجود دارد که ممکن است در مدل سازی گنجانده نشوند (۱۰، ۱۱، ۱۲).

در تئوری گراف، معیارها و شاخص هایی برای شناسایی مهم ترین رئوس (بحرانی) یا رتبه بندی ساختارهای مختلف گراف ایجاد شده است. بر این اساس، معیارهای مربوطه در این کار به دو دسته تقسیم می شوند: (۱) معیارهای رئوس و (۲) معیارهای سطح گراف. دسته اول برای شناسایی و رتبه بندی رئوس بحرانی در یک گراف (یعنی تجزیه و تحلیل آسیب پذیری واحد) استفاده می شود در حالی که دسته دوم برای مقایسه ساختار گراف های مختلف بر اساس آسیب پذیری آنها استفاده می شود (یعنی تجزیه و تحلیل آسیب پذیری فرآیند) (۱۲).

مدل سازی و ارزیابی ایمنی اثرات دومینو به دلیل عدم قطعیت و پیچیدگی چالش برانگیز است، عدم قطعیت در مدل سازی و تحلیل اثرات دومینو تا حدود زیادی به دلیل نادر بودن اثرات دومینو و در نتیجه ناکافی بودن داده های مورد نیاز برای ارزیابی های کمی آنها است. روش های

توسعه یافته برای مدل سازی اثرات دومینو و ارزیابی ریسک را می توان در سه دسته کلی مدل های تحلیلی، مدل های عددی و مدل های گرافیکی تقسیم نمود (۱۳). در میان تکنیک های گرافیکی، شبکه بیزین به دلیل توانایی در، در نظر گرفتن عدم قطعیت ها (برخلاف نمودارهای گراف)، در نظر گرفتن وابستگی های متقابل و تعاملات غیرخطی (برخلاف درخت رویداد) و انجام به روزرسانی احتمال (برخلاف شبکه پتری) به عنوان یک تکنیک قوی برای مدل سازی اثرات دومینو ثابت شده است ولی محدودیت این شبکه در مدل سازی وابستگی های زمانی ممکن است منجر به مسیرهای انتشار حادثه نادرست و در نتیجه احتمالات مربوطه نادرست شود (۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸).

تئوری گراف و شاخص های آن به عنوان یک جایگزین امیدوارکننده برای شبکه بیزی (BN) برای مدل سازی اثرات دومینو و تجزیه و تحلیل بحرانی بودن واحدهای فرایندی و سایت های مرتبط با توجه به آسیب پذیری اثرات دومینو در مطالعات گذشته پیشنهاد شده است. خاکزاد و همکارانش با مدل سازی اثرات دومینو به عنوان یک گراف جهت دار، نشان دادند که شاخص های گراف نظیر شاخص های نزدیکی و بینیت را می توان برای شناسایی واحدهای بحرانی از منظر ایمنی در یک صنعت فرایندی استفاده نمود. تاکنون مطالعات اندکی (در ایران و جهان) جهت مدلسازی اثرات دومینو با استفاده از تئوری گراف و شاخص های مرتبط انجام شده است و همچنین کاربردپذیری و بکارگیری این شاخص ها و تلفیق آن ها با خروجی های شبکه بیزین در مدلسازی اثرات دومینو در مطالعات پیشین نیز مورد تاکید بوده است (۱۹). بنابراین، مطالعه حاضر با در نظر گرفتن رویکرد تلفیقی به بررسی همزمان آسیب پذیری و مدلسازی اثرات دومینو می پردازد. بکارگیری این رویکرد سبب شناسایی مخازن تاثیرپذیر از جنبه آسیب پذیری و همچنین مدلسازی گسترش حریق و محاسبه احتمال آن در مخازن ذخیره بر اساس شار حرارتی دریافتی مخازن از مخزن تحت حریق با در نظر گرفتن اثرات دومینو می گردد.



شکل ۱: جانمایی مخازن مورد مطالعه

مطالعه حاضر در هشت گام به ترتیب اشاره شده در ذیل به انجام رسید:

#### گام اول: تعیین مخازن مخاطره آمیز و جمع آوری اطلاعات مرتبط به عنوان گره های گراف

حریق یکی از رایج ترین حوادث در صنایع فرآیندی است که مدیریت و کنترل آن بسیار حیاتی است، زیرا این حوادث می توانند اثرات دومینو خطرناک ایجاد کرده و به وقوع بحران های جدی منجر شوند (۴، ۲۱، ۲۲، ۲۳). صنعت فرآیندی مورد مطالعه حاوی ۱۱۰ مخزن ذخیره بنزین، نفت سفید (Kerosene)، سوخت جت، نفت کوره و سایر فرآورده های نفتی می باشد. انتخاب مخازن بر اساس نظر تیم تحقیق و هیئت خبرگان متشکل از روسای ادارات ایمنی و آتش نشانی، کارشناسان واحد فرآیند و بهره برداری، واحد مخازن و کارشناسان HSE صنعت مورد مطالعه انجام شد. ۸ مخزن ذخیره سازی نفت سفید و سوخت جت به دلیل دارا بودن بیشترین ظرفیت ذخیره سازی و در نظر گرفتن فواصل میان مخازن و جانمایی آن ها به عنوان جایگاه مخازن مورد مطالعه در نظر گرفته شدند. شکل ۱ نمایی از جایگاه مخازن مورد بررسی را نشان می دهد.

در این مطالعه موردی کلیه داده های سیستم به طور دقیق توسط اعضای متخصص در واحدهای مختلف از جمله رئیس عملیات، واحد مخازن، کارشناسان فرآیند و ایمنی، شناسایی و مورد تحلیل قرار گرفتند. مطالعه حاضر بر روی مخازن ذخیره سازی نفت سفید و سوخت جت انجام گردید. تمامی این مخازن از نوع اتمسفریک<sup>۱</sup>

با توجه به تعداد زیاد مخازن ذخیره نفت، گاز، بنزین و دیگر مشتقات نفتی در پالایشگاه ها و اهمیت حفاظت از آن ها در برابر حریق و پیشگیری از آسیب پذیری تاسیسات مجاور، مطالعه حاضر با هدف بکارگیری تئوری گراف برای تعیین مخازن دارای بیشترین پتانسیل راه اندازی و گسترش حوادث دومینو و شبکه های بیزین در مدلسازی اثرات دومینو در میان ۸ مخزن از مخازن ذخیره فرآورده های نفتی در یکی از پالایشگاه های کشور انجام شده است. در این مطالعه هر یک از مخازن به عنوان گره و امکان گسترش حریق میان گره های 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 مطالعاتی که اخیراً صورت گرفته است مدلسازی تئوری گراف و محاسبه شاخص های آن به عنوان یک تکنیک داده کاوی قدرتمند به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است، مدلسازی تئوری گراف با نرم افزار R و بسته igraph می باشد، نرم افزار R یک محیط برنامه نویسی آماری متن باز است و با استفاده از بسته igraph در آن می توان به تولید گراف های مختلف و مطالعه مشخصات آن ها پرداخت و شبکه بیزین نیز برای مدلسازی و مدیریت عدم قطعیت و مجموعه ای از داده ها، شناسایی وابستگی های مکانی- زمانی اثرات دومینو را آسان و همچنین امکان شناسایی محتمل ترین توالی رویدادها را با دقت بیشتری ممکن می سازد (۱۴، ۲۰).

1. Atmospheric

جدول ۱: اطلاعات مرتبط با مخازن مورد مطالعه

شماره مخزن	نوع ماده	قطر مخزن (m)	ارتفاع مخزن (m)	حجم مخزن (m <sup>3</sup> )
۱	سوخت جت	۱۸/۲۸۸	۱۲/۱۹۲	۳۱۸۸
۲	سوخت جت	۱۸/۲۸۸	۱۲/۱۹۲	۳۱۸۸
۳	سوخت جت	۲۶/۲۱۳	۱۴/۶۳	۷۹۵۰
۴	سوخت جت	۲۶/۲۱۳	۱۴/۶۳	۷۹۵۰
۵	کروزین (نفت سفید)	۳۳/۵۲۸	۱۴/۶۳	۱۲۸۰۰
۶	کروزین (نفت سفید)	۳۳/۵۲۸	۱۴/۶۳	۱۲۸۰۰
۷	کروزین (نفت سفید)	۴۰/۵۳۸	۱۴/۶۳	۱۹۰۸۰
۸	کروزین (نفت سفید)	۳۳/۵۲۸	۱۴/۶۳	۱۲۸۰۰

و سقف شناور<sup>۱</sup> می‌باشند. اطلاعات مربوط به مخازن در جدول شماره ۱ آورده شده است.

#### گام دوم: تعیین سناریوی حادثه برای هر یک از مخازن مخاطره‌آمیز

با توجه به محتویات درون مخزن و پارامترهای عملیاتی، سناریوهای احتمالی اولیه شناسایی می‌شوند که ممکن است منجر به بروز یکی از خطرات فرآیندی نظیر سرریز و ریزش شدید مواد نفتی، حریق فورانی، حریق ناگهانی، حریق استخری، انفجار ابر بخار یا پدیده BLEVE شوند (۲۴). با توجه به نوع مخازن، برای همه مخازن، بدترین سناریو به صورت (حریق استخری) ناشی از شکافت مخزن (rupture) در فاصله یک متری از کف مخزن تعریف گردید. بر اساس داده‌های گردآوری شده و شرایط عملیاتی محل مورد مطالعه، شرایط جوی به صورت سرعت باد برابر با  $\frac{m}{s}$  (۶، جهت وزش باد از جنوب غربی به شمال شرقی، ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد برابر با ۱۰ متر، دمای هوا برابر با °C ۳۵، کلاس پایداری C، رطوبت نسبی (میانگین) برابر با ۵۰٪ و آسمان کاملاً آفتابی در نظر گرفته شد. میزان پر بودن مخازن نیز برابر با ۸۰٪ فرض گردید.

#### گام سوم: تعیین بردارهای تشدید با توجه به سناریوی حادثه و محاسبه شدت آن‌ها

در این گام، بر اساس نوع حادثه، بردار تشدید مرتبط

1. Floating roof

با آن شناسایی شد. برای مدل‌سازی پیامدهای سناریو از نرم‌افزار ALOHA بهره‌برداری گردید. ناحیه خطر با استفاده از این نرم‌افزار تعیین شد و سپس با به‌کارگیری نرم‌افزار MARPLOT، این ناحیه بر روی نقشه و محل جانمایی مخازن تطبیق داده شد. نرم‌افزار ALOHA برای مدل‌سازی پیامدهای ناشی از آزادسازی مواد خطرناک، نشن مواد سمی و انواع حریق‌ها کاربرد دارد (۱۰، ۲۵).

#### گام چهارم: مقایسه بردارهای تشدید با مقدار آستانه

در این مرحله، تاثیر وقوع حادثه اولیه در هر مخزن بر سایر مخازن و احتمال ایجاد سناریوهای ثانویه و تشدید 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  $15 \frac{kW}{m^2}$  برای مدت زمان بیش از ۱۰ دقیقه انجام پذیرفت. در مواردی که  $Q_{ij}$  (مقدار شار گرمایی که مخزن ز در اثر وقوع حریق در مخزن i دریافت می‌کند) بزرگتر یا مساوی مقدار آستانه بود، مخزن ز هدف احتمالی سناریو حریق در مخزن i در نظر گرفته شد، با تعیین کمان‌ها در این مرحله، ساختار گراف به صورت کیفی شکل گرفت.

#### گام پنجم: محاسبه وزن کمان‌های گراف

برای ارزیابی آسیب‌پذیری مخازن در برابر اثرات دومینو، نیاز به کمی‌سازی مدل گراف وجود دارد.

$v_i$  عبور می کنند ( $i \neq j \neq k$ ). همچنین نشان دهنده فاصله بین گره های  $v_j$  و  $v_k$  است، بدون در نظر گرفتن این که آیا از گره  $v_i$  عبور می کنند یا خیر. همان طور که از معادله ۱ استنباط می گردد، حذف کردن گرهی از گراف که مقدار بینیت بالایی دارد می تواند به قطع اتصالات بیش تر و گسستگی در گراف منجر شود.

$$c_b(v_i) = \sum_{j,k} \frac{d_{jk}(v_i)}{d_{jk}} \quad (1)$$

همچنین شاخص نزدیکی یکی از شاخص های مورد بررسی در تئوری گراف است. این شاخص برای یک گره می تواند به دو نوع داخلی و خارجی تقسیم شود. شاخص نزدیکی خارجی برای گره  $v_i$  به تعداد گام های لازم برای رسیدن به سایر گره های گراف از  $v_i$  تعریف می شود و با نماد  $c_{c-out}(v_i)$  نمایش داده می شود. شاخص نزدیکی داخلی برای گره  $v_i$  برابر است با تعداد گام های لازم برای رسیدن به گره  $v_i$  از سایر گره های گراف و با نماد  $c_{c-in}(v_i)$  نشان داده می شود و شاخص نزدیکی کل که با نماد  $c_{c-all}(v_i)$  نمایش داده می شود، بدون در نظر گرفتن جهت گمان ها، دو شاخص داخلی و خارجی را ترکیب می کند (۲۷).

$$c_{c-out}(v_i) = \frac{1}{\sum_j dij} \quad (2)$$

$$c_{c-in}(v_i) = \frac{1}{\sum_j dji} \quad (3)$$

بر اساس مقادیر شاخص های تئوری گراف که با استفاده از معادله ۲ و ۳ محاسبه می شوند، شاخص نزدیکی برای گراف نیز به صورت میانگین مقدار نزدیکی گره ها قابل محاسبه است. به این ترتیب شاخص نزدیکی خارجی برای گراف  $c_{c-out}(G)$  با استفاده از معادله ۴ محاسبه گردید (۱۰).

$$c_{c-out}(G) = \frac{\sum_{i=1}^n c_{c-out}(v_i)}{n} \quad (4)$$

در این مدل، گمان ها نمایانگر بردارهای تشدید بین مخازن هستند. برای تبدیل این روابط به شکل کمی، باید ویژگی های عددی به گمان ها اختصاص داده شود به طوری که این ویژگی ها با شدت بردارهای تشدید مربوطه هم راستا باشند. در گراف های وزنی، هر چه وزن یک گمان بیشتر باشد، نشان دهنده فاصله بیشتر میان دو گره ای است که این گمان آن ها را به هم متصل می کند، که در واقع این به معنی تعامل ضعیف تر میان آن دو گره است. به همین خاطر برای مدلسازی صحیح و معنادار سناریوهای حوادث دومینو در قالب یک گراف وزن دار، وزن هر گمان به صورت نسبت مقدار آستانه  $\frac{15 kW}{m^2}$  به مقدار بردار تشدید (تابش حرارتی) متناظر آن گمان اختصاص داده شد (۲۶).

گام ششم: مدل سازی اثرات دومینو و آسیب پذیری به مخازن مجاور با استفاده از تئوری گراف و محاسبه شاخص های مرکزیت گره ها

یک ساختار گراف، از دو مجموعه تشکیل شده است: مجموعه ای از گره ها و مجموعه ای از گمان ها. مرتبه گراف معادل تعداد گره های آن است و اندازه گراف به تعداد گمان های آن اشاره دارد. گمان ها ممکن است به صورت جهت دار یا بدون جهت باشند که دو گره را به یکدیگر متصل می کنند. در گراف های وزن دار، علاوه بر گره ها و گمان ها، مقادیر عددی خاصی می توانند به هر کدام از این عناصر نسبت داده شوند. بر اساس مفهوم فاصله در نظریه گراف، شاخص های متعددی به منظور بررسی مشخصات گراف ها به وجود آمده اند که در میان آن ها شاخص های مرکزیت از جمله شاخص های بینیت<sup>۱</sup> و نزدیکی<sup>۲</sup> بسیار متداول اند. شاخص بینیت برای گره  $v_i$  به صورت  $c_b(v_i)$  نشان داده می شود و بر اساس معادله ۱ بیانگر نسبت تعداد دفعاتی است که آن گره در کوتاه ترین مسیر میان گره های دیگر در گراف قرار می گیرد. در این معادله ( $v_i$ ) نشان دهنده فاصله بین گره های  $v_j$  و  $v_k$  هست که از گره

1. Betweenness  
2. Closeness

### گام هفتم: تحلیل آسیب پذیری تجهیزات بر اساس شاخص‌های تئوری گراف

بعد از ارزیابی شاخص‌های مرکزیت گره‌ها، آسیب‌پذیری تجهیزات مرتبط با هر گره به دقت بررسی شد. براساس تعریف شاخص بینیت، گره‌هایی که بینیت بالاتری دارند، معمولاً نقش واسطه‌گری در گراف ایفا می‌کنند. به همین ترتیب، تجهیزات با بینیت بالاتر نیز بیشترین نقش را در گسترش یک رخداد اولیه یا تأثیرات دومینو خواهند داشت. بنابراین، شاخص بینیت به‌خوبی نشان‌دهنده پتانسیل یک تجهیز در تسریع گسترش اثرات دومینو است. تجهیزاتی که دارای بینیت بالاتر هستند، به عنوان واحدهای بحرانی در گسترش حادثه به سایر تجهیزات مجاور عمل می‌کنند. از سوی دیگر، شاخص نزدیکی خارجی میزان دسترسی یک گره به سایر گره‌ها را در گراف اندازه‌گیری می‌کند و به همین دلیل می‌تواند توانایی یک مخزن در راه‌اندازی و گسترش اثرات دومینو را نشان دهد. در مقابل، شاخص نزدیکی داخلی میزان دسترسی یک گره به دیگر گره‌ها را از درون گراف ارزیابی می‌کند و به این ترتیب، توانایی یک مخزن را در تحمل و تأثیرپذیری از اثرات دومینو مختلف نمایش می‌دهند. در نهایت، شاخص نزدیکی کل نمایانگر آسیب‌پذیری کلی تجهیزات است، زیرا این شاخص ترکیبی از توانایی تجهیزات در اثرگذاری و تأثیرپذیری در سناریوهای اثرات دومینو را به صورت همزمان در نظر می‌گیرد. با استفاده از این شاخص، می‌توان پیش‌بینی کرد که در صورت وقوع اثرات دومینو، ترتیب درگیر شدن مخازن چگونه خواهد بود (۲۸).

### گام هشتم: مدل‌سازی اثرات دومینو و احتمال تشدید سناریو اولیه به مخازن مجاور با استفاده از شبکه بی‌زین

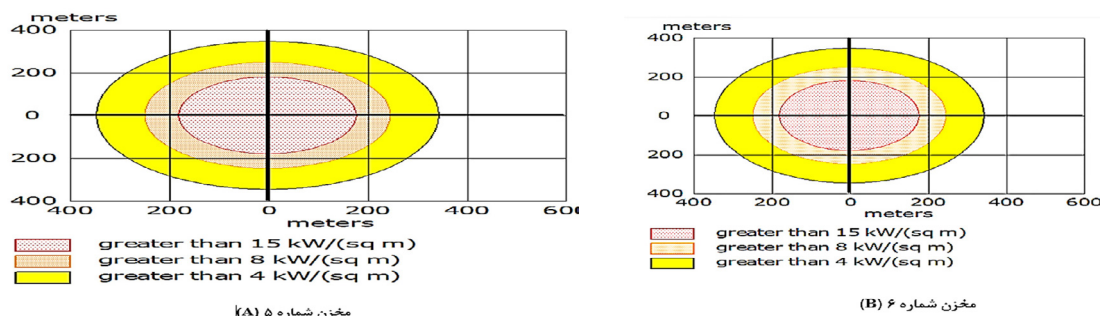
اثرات دومینو وقایعی با پیامد بالا و احتمال وقوع کم هستند که مدلسازی و ارزیابی ایمنی آنها برای صنایع فرآیندی دارای پیچیدگی‌ها و ابهامات زیادی است. از شبکه‌های بی‌زین معمولی، به منظور ارزیابی ریسک با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های زمانی و مکانی که

از توالی‌های نقص‌ها یا تغییرات زمانی ناشی می‌شوند، استفاده می‌گردد. احتمال تشدید وقایع در طراحی‌های اثرات دومینویی با در نظر گرفتن وابستگی‌های زمانی و مکانی، توسط شبکه بی‌زین مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مرحله اول ارزیابی ریسک این مطالعه، یک مدل گرافیکی و علل ریشه‌ای وقوع حریق بررسی شد. هر شبکه بی‌زین را به صورت یک زوج دوتایی  $N = ((V, E), p)$  نشان می‌دهند که از دو بخش اصلی تشکیل شده است، در واقع بخش کیفی از شبکه بی‌زین نمایش بصری از فعل و انفعالات میان متغیرها است. در بخش کمی شبکه بی‌زین، سنجش مجموعه‌ای از مشخصات احتمال وقوع متغیرها صورت می‌گیرد. شبکه بی‌زین، گراف جهت‌دار غیرحلقوی است که در آن نود یا گره نشان‌دهنده متغیر تصادفی و کمان‌ها نشان‌دهنده وابستگی‌های احتمالاتی بین متغیرها هستند (۷، ۲۹، ۳۰). در این مرحله با استفاده از مدل ساخته شده از شبکه بی‌زین احتمال وقوع رویدادهای منجر به نقص (در این مطالعه وقوع حریق) محاسبه می‌گردد و توزیع احتمال وقوع حوادث با استفاده از روابط میان متغیرهای منجر به ایجاد حریق محاسبه می‌گردد. در این مرحله ابتدا یک مدل پویای گرافیکی از فرآیند وقوع حادثه که از علل ریشه‌ای منجر به وقوع سناریوی حادثه (حریق) مخازن شروع می‌شود و در نهایت بر اساس عملکرد صحیح یا نقص موانع ایمنی منجر به پیامدهای مختلف می‌گردد، با استفاده از شبکه بی‌زین ساخته شد. در قدم بعدی کمی‌سازی مدل ساخته شده صورت گرفت. در شبکه بی‌زین برای محاسبه احتمال توزیع توام (مشترک) مجموعه‌ای از متغیرها  $U = \{X_1, \dots, X_n\}$  از رابطه زیر استفاده می‌شود (۷، ۳۰):

$$P(U) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \text{Parents}(X_i)) \quad (5)$$

والدین یک گره، گره‌های قبلی بلا فصل آن می‌باشند  
احتمال متغیر  $X_i$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P(X_i) = \sum U / X_i P(U) \quad (6)$$



شکل ۲: ناحیه خطر مربوط به بروز حریق استخری در مخازن شماره ۵ (A) و ۶ (B)

جدول ۲: مقادیر تابش حرارتی دریافتی مخزن از مخزن در حریق

$T_i \downarrow T_j \rightarrow$	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
T1		۶۲	۷۵	۴۸	۲۸	۲۲	۹	۸
T2	۶۰		۴۲	۷۲	۲۲	۲۸	۹	۹
T3	۷۶	۴۱		۶۵	۷۱	۳۸	۱۵	۱۴
T4	۴۰	۷۴	۵۸		۳۹	۷۴	۱۳	۱۶
T5	۲۸	۲۲	۷۴	۴۲		۵۲	۳۳	۲۵
T6	۲۲	۲۸	۳۷	۷۰	۵۷		۲۵	۲۶
T7	۹	۸	۱۵	۱۳	۳۲	۲۵		۵۷
T8	۸	۹	۱۴	۱۷	۲۶	۳۷	۵۰	

حسب کیلووات بر مترمربع)،  $V$  حجم مخزن (بر حسب متر مکعب) و  $Y$  نشان دهنده مقدار Probit می باشد (۳۲).  
احتمال رخداد آتش استخری در واحد اولیه  $(0.5 - E.1)$  در نظر گرفته شد (۳۳).

### یافته ها

نتایج حاصل از آنالیز پیامد و مدل سازی اثرات دومینو و آسیب پذیری به مخازن مجاور با استفاده از تئوری گراف و محاسبه شاخص های تئوری گراف محاسبه مخازن هدف

در این بخش نتایج حاصل از مدل سازی پیامد سناریوها و محاسبه بردارهای تشدید در هر مخزن با استفاده از نرم افزار ALOHA ارائه شده است. جدول شماره ۲ مقادیر شار حرارتی دریافتی هر مخزن را نشان می دهد. با در نظر گرفتن مقادیر شار حرارتی و مقادیر بالاتر از حدود آستانه، مخازن شماره ۵ و ۶ به تمامی مخازن مجاور و مخزن شماره ۴ به جز به مخزن شماره ۷

با استفاده از توابع Probit، ابتدا مقدار Probit ( $Y$ )، محاسبه می شود و سپس با استفاده از رابطه ۸ تخمین زمان تا شکست ( $t_{tf}$ ) برآورد می شود (۳۱).

یافته های بدست آمده از احتمال تشدید سناریو اولیه به مخازن مجاور با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد

$$P_{ij} = 1 - \frac{15}{Q_{ij}} \quad (7)$$

$$Y = 12.54 - 1.847 \ln(t_{tf}) \quad (8)$$

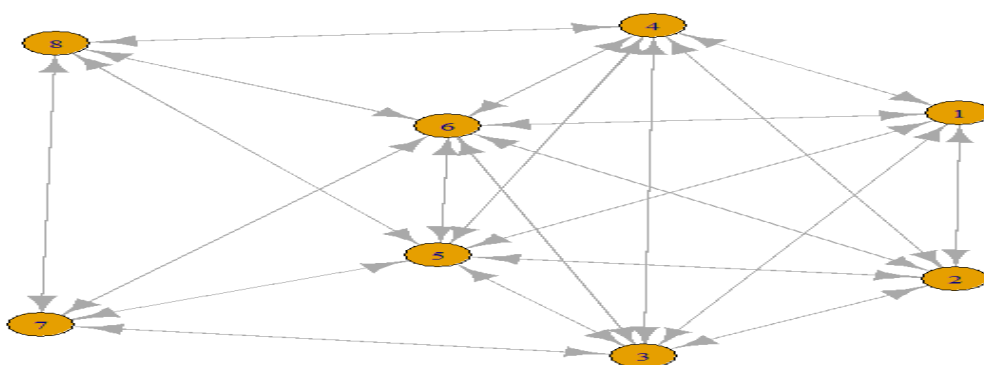
$$\ln(t_{tf}) = -1.13 \ln(Q) - 2.67 \times 10^{-5} V + 9.9 \quad (9)$$

tff correlation

که در رابطه ۹،  $t_{tf}$  نشان دهنده زمان شکست (در ثانیه) است.  $Q$  شار گرمایی دریافتی توسط مخزن (بر

جدول ۳: شاخص های تئوری گراف محاسبه شده برای هر یک از گره ها (مخازن)

شماره مخزن	شاخص بینیت	شاخص نزدیکی داخلی	شاخص نزدیکی خارجی	شاخص نزدیکی کل
۱	۰	۰/۲۷۵۴۸	۰/۲۸۹۰۲	۰/۲۹۳۲۶
۲	۰	۰/۲۷۸۵۵	۰/۲۷۴۷۳	۰/۲۸۰۰۹
۳	۰/۱۴۲۸۶	۰/۳۵۲۱۱	۰/۳۴۸۴۳	۰/۳۵۸۴۲
۴	۰/۲۳۸۱	۰/۳۴۶۴۳	۰/۳۵۲۱۱	۰/۳۷۰۳۷
۵	۰/۳۰۲۳۸	۰/۳۵۲۱۱	۰/۳۴۹۶۵	۰/۳۵۸۴۲
۶	۰/۱۷۸۵۷	۰/۳۵۵۸۷	۰/۳۴۴۸۳	۰/۳۶۱۰۱
۷	۰	۰/۲۱۳۶۸	۰/۲۲۰۷۵	۰/۲۲۰۷۵
۸	۰	۰/۲۲۳۷۱	۰/۲۲۲۷۲	۰/۲۲۸۸۳



شکل ۳: مدل سازی گراف متناظر با سناریوهای اثرات دومینو در مخازن مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار R

شاخص های تئوری گراف برای گره های گراف، با استفاده از توابع موجود در نرم افزار R محاسبه شد (جدول شماره ۳).

در شکل شماره ۴ مخازن بر اساس شاخص های مرکزیت گره های متناظر آن ها (مولفه های آسیب پذیری) با یکدیگر مقایسه شده اند. بر اساس شکل، به ترتیب مخازن شماره ۴، ۵، ۶ و ۳ دارای بیشترین مقدار شاخص بینیت (پتانسیل گسترش حوادث دومینو) هستند. مخازن شماره ۴، ۶، ۵، ۳، ۲، ۱، ۸، ۷ به ترتیب از بیشترین مقدار شاخص نزدیکی داخلی (پتانسیل تاثیرپذیری از سایر مخازن حین اثرات دومینو) برخوردار هستند. مخازن شماره ۴، ۵، ۳، ۶، ۱، ۲، ۸، ۷ به ترتیب دارای بیشترین مقدار شاخص نزدیکی خارجی (پتانسیل راه اندازی اثرات دومینو) هستند. مخازن شماره ۴، ۶، ۵، ۳، ۱، ۲، ۸، ۷ به ترتیب از بیشترین مقدار شاخص نزدیکی

تابش حرارتی بیشتر از مقادیر آستانه می دهند. بنابراین این سه مخزن به عنوان مخازن بحرانی در صنعت مورد مطالعه در نظر گرفته شدند. شکل شماره ۲ ناحیه خطر مربوط به تابش حرارتی برای مخازن شماره ۵ و ۶ را نشان می دهد.

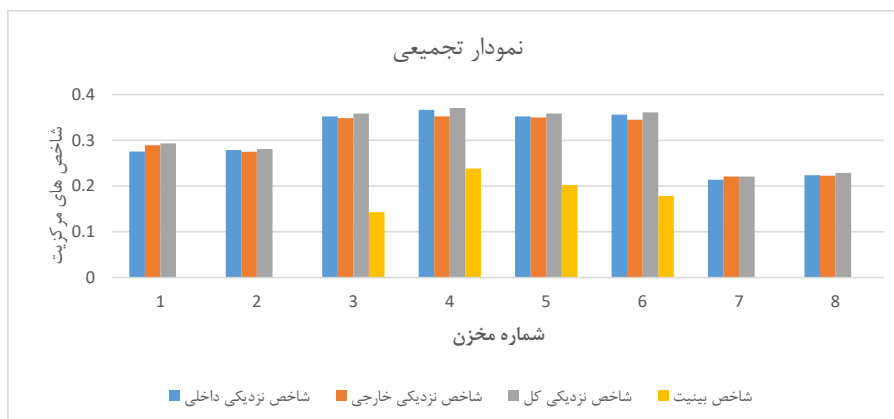
#### محاسبه شاخص های تئوری گراف

پس از تعیین مخازن هدف و کمان های گراف، وزن هر کمان محاسبه گردید. به این ترتیب یک گراف با ۸ گره و ۴۴ کمان تعیین شده با استفاده از نرم افزار R مدل سازی شد. شکل شماره ۳، گراف ترسیم شده در نرم افزار R را نشان می دهد.

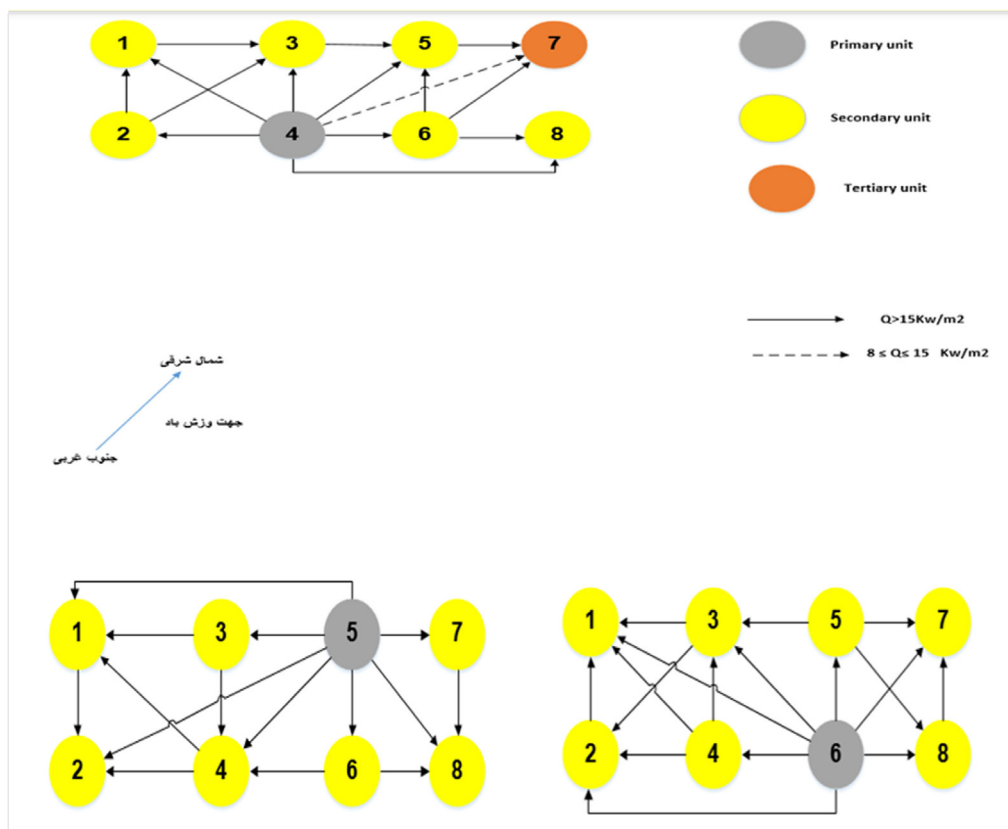
مخازن هدف مربوط به سناریوی حریق در هر مخزن و سناریوهای اثرات دومینو محتمل در گراف ترسیم شده قابل رویت است. پس از مدل سازی گراف، مقادیر

دارای بیشترین شاخص نزدیکی داخلی، نزدیکی خارجی و نزدیکی کل می باشد و بعد از آن مخازن شماره ۵ و ۶ بیشترین عدد را به خود اختصاص می دهند. در شکل شماره ۵، مخازن شماره ۴، ۵ و ۶ به عنوان

کل برخوردار هستند، به عبارت دیگر این مخازن به ترتیب آسیب پذیرترین مخازن از نظر پتانسیل راه اندازی حوادث دومینو و تاثیرپذیری از سایر مخازن هنگام وقوع آن به صورت توأم هستند. همچنین مخزن شماره ۴



شکل ۴: مقایسه مخازن بر اساس مقادیر شاخص های تئوری



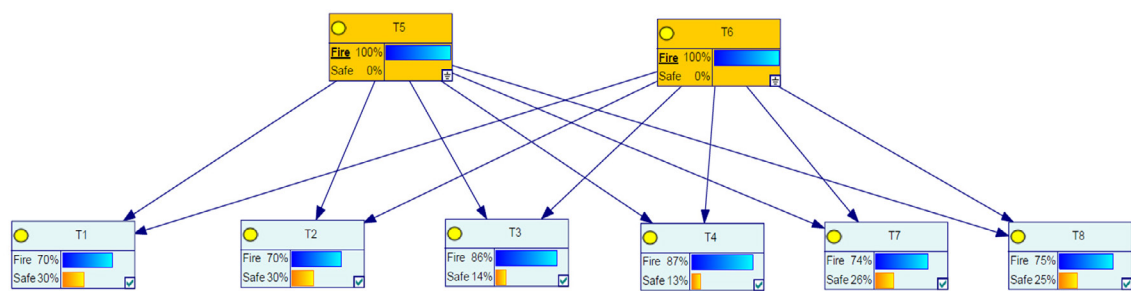
شکل ۵: مدل سازی شروع اثرات دومینو با استفاده از شبکه بیزین در مخازن شماره ۴، ۵ و ۶

مناطق دیگر هدایت کند و احتمال وقوع حریق‌های ثانویه و ثالثیه را افزایش دهد.

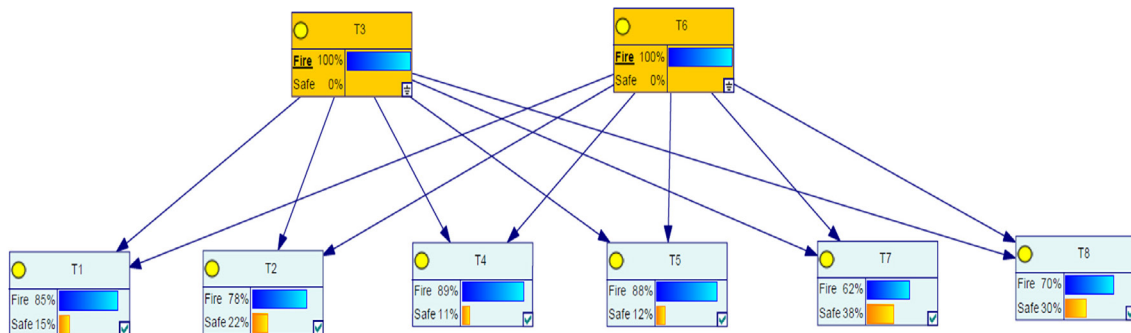
نتایج حاصل از آنالیز پیامد و مدلسازی اثرات دومینو و احتمال تشدید سناریو اولیه به مخازن مجاور با استفاده از شبکه بی‌زین

نتایج بدست آمده از محاسبات احتمال تشدید سناریو اولیه به مخازن مجاور و شار حرارتی، مقادیر حاصل از

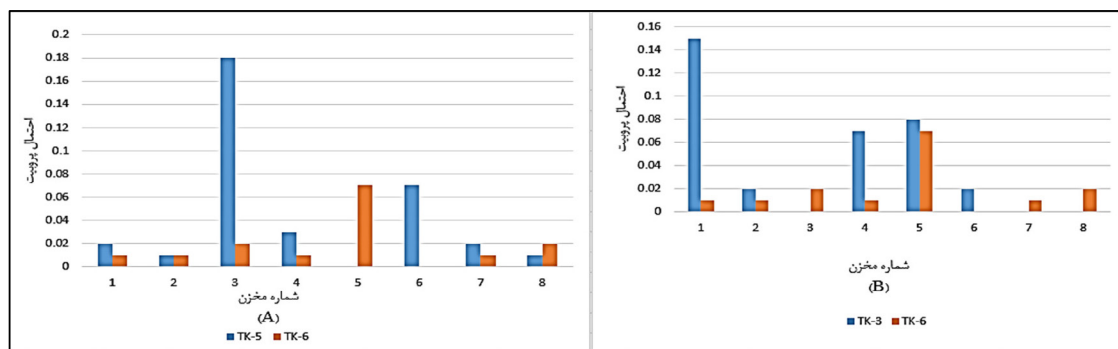
مخازن آغازگر اثرات دومینو در نظر گرفته شده‌اند که می‌توانند باعث گسترش حریق و آسیب به سایر مخازن شوند. این مسیرهای گسترش حریق نشان‌دهنده این هستند که چگونه یک حادثه در این مخازن اولیه می‌تواند به تسلسل و زنجیره‌ای از حوادث در مخازن ثانویه و ثالثیه منجر شود. جهت باد نیز که از جنوب غربی به شمال شرقی است، نقش مهمی در گسترش حریق ایفا می‌کند، چرا که این عامل می‌تواند شعله‌ها و دود را به سمت



شکل ۶: مدلسازی اثرات دومینو حریق با در نظر گرفتن حریق همزمان در مخازن شماره ۵ و ۶.



شکل ۷: مدلسازی اثرات دومینو حریق با در نظر گرفتن حریق همزمان در مخازن شماره ۳ و ۶.



شکل ۸: احتمال پروبیت هر کدام از مخازن مجاور در صورت رخداد حریق در مخازن شماره ۵ و ۶ (A)، و مخازن شماره ۳ و ۶ (B)

در معرض انجام می شود، می توان واحدی که بیشترین احتمال تشدید (شرطی) را دارد به عنوان واحد ثانویه و واحد دیگری را به عنوان واحد سوم درگیر در روند گسترش آتش شناسایی کرد. با ادامه این رویکرد و در نظر گرفتن اثرات هم افزایی احتمالی، امکان شناسایی توالی و احتمال درگیر شدن واحدها در اثرات دومینو فراهم می شود.

مطالعه حاضر به طور خاص بر روی استفاده از شاخص های تئوری گراف برای شبیه سازی گسترش آتش و تعیین مخازن بحرانی متمرکز است. نتایج نشان داد که مخازن ۴، ۵ و ۶ بیشترین تأثیر را در گسترش حریق دارند. این نتایج مشابه با مطالعات قبلی است که از شاخص های بینیت و نزدیکی برای تحلیل آسیب پذیری و شبیه سازی اثرات دومینو استفاده کرده اند. برای مثال، در مطالعه Khakzad و همکاران (۲۰۲۱) نیز از تئوری گراف و شاخص های بینیت و نزدیکی خارجی برای شبیه سازی انتشار اثرات دومینو استفاده شد. نتایج نشان داد که مخازن با شاخص های بالای بینیت به عنوان گره های بحرانی در گسترش حادثه عمل می کنند (۳۳).

از منظر آسیب پذیری واحد، در میان واحدهای اولیه بالقوه در یک صنعت فرآیندی، واحدی که دارای بیشترین شاخص نزدیکی خارجی است، احتمال بالاتر و اثر دومینوی شدیدتری را به همراه خواهد داشت Khakzad و Reniers همچنین نشان دادند که از نقطه نظر ارزیابی آسیب پذیری امنیتی، حمله به تعدادی از واحدها با شاخص نزدیکی خارجی بیشتر منجر به تأثیر دومینوی ویرانگرتر از هر حمله به همان تعداد واحد دیگر می شود همچنین، در میان واحدهای یک صنعت فرآیندی، واحدی که شاخص بینیت بزرگتری دارد، بیشتر از بقیه به انتشار اثرات دومینو کمک می کند. به این ترتیب، ایزوله کردن واحدها (به عنوان مثال، ضد حریق نمودن آنها در صورت آتش سوزی یا محافظت از آنها در برابر موج انفجار در صورت انفجار می تواند به طور قابل توجهی احتمال و شدت اثرات دومینو را کاهش دهد (۱۹).

مرحله آنالیز پیامد را تایید نمود و نشان داد که از میان ۸ مخزن مورد مطالعه، مخازن شماره ۵ و ۶ 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.

مخازن شماره ۵ و ۶ به دلیل اینکه به شش مخزن مجاور خود در سایت انتخاب شده شار حرارتی بیشتر از میزان آستانه را می دهند برای مدلسازی اثرات دومینو با در نظر گرفتن رخداد حریق همزمان انتخاب شدند. بر اساس شکل ۵، رتبه بندی واحدها بر اساس marginal probabilities و ایجاد اثرات دومینو نشان می دهد که مخازن شماره ۴ ( $T4 = fire = 0.87$ )، ۳ ( $T3 = fire = 0.86$ ) و ۸ ( $T8 = fire = 0.75$ ) به عنوان واحدهای ثانویه (secondary units) و مخازن شماره ۷ ( $T7 = fire = 0.74$ )، ۲ ( $T2 = fire = 0.7$ ) و ۱ ( $T1 = fire = 0.7$ ) به عنوان واحدهای tertiary طبقه بندی می شوند همچنین با در نظر گرفتن رخداد حریق همزمان در مخازن شماره ۳ و ۶ که دو مخزن با هم فاصله دارند نیز رتبه بندی اثرات دومینو را مورد بررسی قرار دادند بر اساس شکل ۶، رتبه بندی واحدها بر اساس marginal probabilities و ایجاد اثرات دومینو نشان می دهد که مخازن شماره ۴ ( $T4 = fire = 0.89$ )، ۵ ( $T5 = fire = 0.88$ ) و ۱ ( $T1 = fire = 0.85$ ) به عنوان واحدهای ثانویه (secondary units) و مخازن شماره ۲ ( $T2 = fire = 0.78$ )، ۸ ( $T8 = fire = 0.7$ ) و ۷ ( $T7 = fire = 0.62$ ) به عنوان واحدهای tertiary طبقه بندی می شوند. احتمال پروبیت هرکدام از مخازن مجاور در صورت رخداد حریق در مخازن شماره ۵ و ۶ (A)، و مخازن شماره ۳ و ۶ (B) در نمودار شماره ۱ نشان داده می شود.

### بحث

با به کارگیری شبیه سازی فرآیند گسترش آتش، که بر اساس وقوع یک آتش سوزی اولیه و واحدهای

شاخص‌های تئوری گراف تا کنون در مطالعات مربوط به تحلیل آسیب پذیری صنایع فرآیندی نسبت به حوادث دومینو ایجاد شده در اثر حملات تروریستی، همچنین شکست‌های تصادفی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. عدم نیاز به محاسبه احتمال‌های تشدید حادثه در فرآیند مدل‌سازی اثرات دومینو با استفاده از تئوری گراف، کاربرد این روش را حتی در شرایط تعدد تجهیزات مخاطره‌آمیز ممکن می‌سازد (۱۰).

تحلیل آسیب پذیری با استفاده از شاخص‌های تئوری گراف نه تنها امکان شناسایی مخازن بحرانی آغازگر و گسترش‌دهنده حریق‌های دومینو را فراهم می‌کند، بلکه با بهره‌گیری از نتایج آن می‌توان برای مدیریت ایمنی این حوادث نیز برنامه‌ریزی کرد همانگونه که حذف گره دارای بالاترین شاخص بینیت از گراف منجر به بیشترین گسستگی و انفصال در ساختار گراف می‌گردد، محافظت از مخازن دارای بالاترین شاخص بینیت نیز منجر به قطع مسیره‌های بحرانی گسترش حادثه میان مخازن می‌شود. همچنین محافظت از مخازنی که بیشترین تاثیرگذاری بر سایر مخازن را دارند (مخازن دارای بیشترین مقدار شاخص نزدیکی خارجی)، می‌تواند از شکل‌گیری شدیدترین سناریوهای دومینو جلوگیری نماید. در مطالعه Rezvanjah و همکاران اثر ضد حریق‌سازی پس از مشخص شدن شاخص‌های بینیت مورد بررسی قرار گرفت و نشان داد که استفاده از ضد حریق‌سازی برای مخازن گسترش‌دهنده و سیستم اسپرینکلر برای مخازن آغازگر بحرانی در کاهش آسیب پذیری مخازن مجاور تاثیر گذار است (۱۰).

اگر منابع اطفای حریق کافی باشد، راهبردهای اطفاء حریق در کارخانه‌های فرآیندی شامل خاموش کردن همزمان واحدهای در حال سوختن و خنک کردن واحدهای در معرض خطر است. به این ترتیب می‌توان آتش را مهار کرد و از انتشار آن به واحدهای در معرض جلوگیری کرد که در غیر این صورت باعث تشدید آتش و ایجاد اثرات دومینو می‌شود. با این حال، زمانی که منابع اطفای حریق برای رسیدگی به همه واحدهای بحرانی - چه در حال

سوختن و چه در معرض خطر - کافی نیست، آتش نشانان باید تصمیم بگیرند که کدام واحدهای در حال سوختن را ابتدا مهار کنند و کدام واحدهای در معرض را ابتدا خنک کنند تا خطرات را به حداقل برسانند. تصمیم‌گیری موثر در چنین شرایطی با دانستن این موضوع حیاتی می‌شود که با گسترش آتش به واحدهای مجاور، تعداد واحدهای بحرانی به طور تصاعدی افزایش می‌یابد و منابع موجود برای اطفای حریق را ناکافی‌تر می‌کند. بنابراین یافته‌های این مطالعه با تعیین مخزن بحرانی آغازگر و واحد گسترش‌دهنده حریق و با تعیین شاخص‌های بینیت، نزدیکی داخلی و نزدیکی خارجی و نزدیکی کل نشان داد که مخزن شماره ۴ باید در اولویت قرار گیرد و اگر مخازن ۵ و ۶ دچار حریق شوند مخزن شماره ۴ باید در اولویت برای خنک شدن قرار بگیرد.

در مطالعه‌ی Zhou و همکاران، مشابه مطالعه‌ی حاضر، سناریوهای گسترش آتش و استراتژی‌های اطفای حریق مورد بررسی قرار گرفت، با این تفاوت که از مدل Petri-Net برای شبیه‌سازی و تحلیل اثرات دومینو استفاده شده بود. همچنین، در این مطالعه به اهمیت تعیین اولویت‌های اطفای حریق به منظور کاهش آسیب‌ها و مدیریت بحران تاکید گردید. در حالی که مطالعه‌ی حاضر بیشتر بر ویژگی‌های ساختاری و شبکه‌ای گسترش آتش در صنایع فرآیندی تمرکز دارد، مطالعه‌ی Zhou بر تخصیص بهینه منابع انسانی در پاسخ به وقوع چند آتش همزمان متمرکز بوده است (۳۴).

در مطالعه‌ی دیگری، Zhou و همکاران از مدل Petri-Net ترکیب شده با تئوری زمان‌دار و رنگی برای تحلیل فرآیندهای پاسخ اضطراری در حوادث شیمیایی استفاده کرده و به تحلیل و مدیریت پاسخ‌های اضطراری در حوادث شیمیایی و آتش‌سوزی‌ها در صنایع فرآیندی پرداختند (۳۵). این ویژگی‌ها نشان‌دهنده‌ی هم‌پوشانی بین پژوهش حاضر و دو مطالعه‌ی فوق در زمینه‌ی تحلیل پاسخ‌های اضطراری تحت شرایط مختلف و استفاده از مدل‌سازی برای بهبود عملکرد سیستم‌های ایمنی می‌باشد.

بهینه‌ترین استراتژی را برای اطفای حریق انتخاب نمود در پژوهش حاضر نیز با مشخص شدن دو مخزن بحرانی ۵ و ۶ با استفاده از شبکه بیزین می‌توانیم استراتژی‌های بهینه اطفای حریق را به صنعت مورد نظر ارائه دهیم (۱۳).

با این حال، محدودیت‌هایی نیز در این مطالعه وجود دارد که باید به آن‌ها اشاره کرد. مطالعه حاضر تنها بر روی برخی از مخازن متمرکز شده است و ممکن است نتایج آن به سایر سیستم‌ها یا شرایط قابل تعمیم نباشد. بنابراین، توصیه می‌شود در مطالعه‌ای جداگانه به بررسی و گسترش این موضوع پرداخته شود تا بتوان به درک بهتری از اثرات دومینو و استراتژی‌های مدیریت آن دست یافت. بر اساس نتایج این مطالعه، کاربردهای عملی متعددی وجود دارد که می‌تواند به بهبود مدیریت ریسک و ایمنی در سیستم‌های صنعتی کمک کند. از جمله این کاربردها می‌توان به این موارد اشاره کرد: نتایج مدل‌سازی می‌تواند به شناسایی و پیش‌بینی مخازنی که در معرض بالاترین خطر راه‌اندازی اثرات دومینو هستند، کمک کند. همچنین با تحلیل آسیب‌پذیری مخازن مجاور، می‌توان نقاط ضعف سیستم را شناسایی کرده و تدابیر لازم برای کاهش خطرات را اتخاذ نمود، این امر می‌تواند شامل بهبود زیرساخت‌ها، سیستم‌های ایمنی و پروتکل‌های اطفای حریق باشد. همچنین یکی دیگر از محدودیت‌های مطالعه حاضر عدم در نظر گرفتن مقادیر واقعی صنعت در محاسبات نرخ رخداد و تکیه بر شار حرارتی دریافتی مخازن در مدلسازی اثرات دومینو است، اما بکارگیری رویکرد تلفیقی تئوری گراف و شاخص‌های آن و شبکه بیزین در مدلسازی اثرات دومینو و همچنین توافق خروجی‌های هر دو رویکرد، کاربردپذیری آن‌ها برای مدلسازی اثرات دومینو در صنایع فرایندی را تایید می‌نماید.

طبق نتایج حاصل از مطالعه حاضر، یافته‌های حاصل از مدل‌سازی اثرات دومینو و آنالیز پیامد توسط تئوری گراف و شبکه بیزین با هم، هم پوشانی داشتند و مشخص شد که با استفاده از این دو روش مخازنی که بیشترین امکان راه‌اندازی اثرات دومینو را دارند می‌توان به صورت گرافیکی

همچنین نتایج پژوهش حاضر با استفاده از شبکه‌های بیزین برای ارزیابی احتمال حریق همزمان در مخازن و تحلیل اثرات دومینو نیز مشابه با تحقیقات گذشته است. در مطالعه Khakzad و Khan و همچنین در پژوهش‌های اخیر (Khakzad et al., 2024) از مدل‌سازی شبکه بیزین برای ارزیابی تشدید حادثه و پیش‌بینی احتمال وقوع اثرات دومینو استفاده شده است. این مدل‌ها کمک می‌کنند تا استراتژی‌های بهینه اطفای حریق طراحی و اجرا شوند، مانند اولویت‌بندی مخازن برای خاموش کردن یا خنک کردن که در مطالعه حاضر نیز تأکید شده است (۱۲، ۲۶).

در مطالعه فوق و نیز در مطالعات D'Amico و Yang (۳۶) نیز اشاره شده است که در مواقع محدودیت منابع اطفای حریق، شبیه‌سازی گسترش آتش و اولویت‌بندی مخازن برای خنک‌سازی و خاموش کردن می‌تواند به کاهش اثرات دومینو کمک کند. همانطور که در مطالعه D'Amico اشاره شده، مخازن با دریافت شار حرارتی بیشتر باید در اولویت خنک‌سازی قرار بگیرند، که در مطالعه حاضر نیز به همین مسئله اشاره شده است. D'Amico استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی آتش را برای محاسبه شار حرارتی منتشر شده از یک مخزن در حال سوختن و سپس اولویت بندی مخازن در معرض بر اساس بزرگی شار حرارتی که دریافت می‌کنند را پیشنهاد کرد: مخازن در معرض دید که ۱۹-۳۵ کیلووات بر متر مربع شار حرارتی دریافت می‌کنند، باید بلافاصله خنک شود (اولویت اول) در حالی که آنهایی که ۱۲-۱۹ کیلووات بر متر مربع شار حرارتی دریافت می‌کنند باید ظرف ۱-۳ ساعت خنک شوند (اولویت دوم) (۳۷).

در مطالعه‌ای که Khakzad بر روی ۵ مخزن حاوی مواد شیمیایی انجام داده است به کاربرد شبکه بیزین و مدلسازی اثرات دومینو حریق پرداخته و نشان می‌دهد که حریق همزمان در دو مخزن چگونه باعث گسترش حریق به سایر مخازن می‌شود و با بررسی مسیرهای انتشار حریق و مهار مخزن آغازگر و مشخص شدن مخزنی که بیشترین تاثیر را در گسترش حریق دارد می‌توان

کاهش احتمال تشدید اثرات دومینو هر یک از این دو روش پیشنهاد می‌گردد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل (بخشی از) پایان نامه در مقطع دکتری رشته مهندسی بهداشت حرفه‌ای با کد طرح IR.TUMS.SPH.REC.1402.243 می‌باشد که با حمایت دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران اجرا شده است.

### کد اخلاق

این پژوهش با رعایت کامل اصول اخلاقی انجام شده است. کد اخلاقی با شماره IR.TUMS.SPH.REC.1402.243 دریافت شده است.

### REFERENCES

1. Omidi L, Dolatabad KM, Pilbeam C. Differences in perception of the importance of process safety indicators between experts in Iran and the West. *J Safety Res.* 2023;84:261-72.
2. 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.
3. Pasma HJ, Knegtering B, Rogers W. A holistic approach to control process safety risks: Possible ways forward. *Reliab Eng Syst Saf.* 2013;117:21-9.
4. 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(1).
5. Khan FI, Abbasi S. Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences. *J Loss Prev Process Ind.* 1999;12(5):361-78.
6. Planas-Cuchi E, Montiel H, Casal J. A survey of the origin, type and consequences of fire accidents in process plants and in the transportation of hazardous materials. *Process Saf Environ Prot.* 1997;75(1):3-8.
7. Khakzad N. Optimal firefighting to prevent domino effects: Methodologies based on dynamic influence

مدل‌سازی نمود، با استفاده از هر دو روش مدل‌سازی مورد مطالعه می‌توان تحلیل آسیب پذیری مخازن مجاور، تحلیل ریسک اثرات دومینو و کاهش احتمال تشدید آن را پیش بینی و استراتژی‌های اطفاء حریق را ارایه نمود که توصیه می‌شود در مطالعه‌ای جداگانه به این موضوع پرداخته شود

### نتیجه گیری

در مطالعه حاضر از تئوری گراف و شبکه بیزین و بردار تشدید تابش حرارتی جهت مدلسازی اثرات دومینوی ناشی از حریق در محوطه مخازن ذخیره‌سازی سوخت جت و نفت سفید در یکی از پالایشگاه‌های کشور استفاده شد. بر اساس یافته‌های مطالعه، مدل‌سازی و تحلیل ریسک اثرات دومینو با استفاده از تئوری گراف و شبکه بیزین هر دو دارای نتایج یکسانی هستند و برای

- diagram and mathematical programming. *Reliab Eng Syst Saf.* 2021;212:107577.
8. Cozzani V, Gubinelli G, Salzano E. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *J Hazard Mater.* 2006;129(1-3):1-21.
  9. Rostami NK, Reniers G. Application of Bayesian network and multi-criteria decision analysis to risk-based design of chemical plants. *Chem Eng Trans.* 2016;48:223-8.
  10. Jabbari M, Alibabaei A, Rezvanjah M. Vulnerability analysis of the tanks of an oil refinery to fire-induced domino effects based on graph Theory. *Iran Occup Health.* 2021;18(1):201-19.
  11. Jabbari M, Eskandari D, Johnny P. Investigating the economic consequences of fire and explosion domino phenomenon in oil refinery storage tanks. *Iran Occup Health.* 2023;20(1):164-77.
  12. Khakzad N, Salzano E, Amyotte P. A graph-based optimization methodology for identifying firefighting strategies aimed at domino effects. *Can J Chem Eng.* 2024.
  13. Khakzad N. A tutorial on fire domino effect modeling using Bayesian networks. *Modelling.* 2021;2(2):240-58.
  14. Landucci G, Molag M, Cozzani V. Modeling the performance of coated LPG tanks engulfed in fires. *J*

- Hazard Mater. 2009;172(1):447-56.
15. 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.
  16. 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.
  17. Zhou J, Reniers G. Petri-net based cascading effect analysis of vapor cloud explosions. *J Loss Prev Process Ind.* 2017;48:118-25.
  18. Kamil MZ, Taleb-Berrouane M, Khan F, Ahmed S. Dynamic domino effect risk assessment using Petri-nets. *Process Saf Environ Prot.* 2019;124:308-16.
  19. Khakzad N, Reniers G. Low-capacity utilization of process plants: A cost-robust approach to tackle man-made domino effects. *Reliab Eng Syst Saf.* 2019;191:106114.
  20. Khakzad N. Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures. *Reliab Eng Syst Saf.* 2015;138:263-72.
  21. Sadeghi A, Jabbari Gharabagh M, Rezaeian M, Alidoosti A, Eskandari D. Fire and explosion risk assessment in a combined cycle power plant. *Iran J Chem Chem Eng.* 2020;39(6):303-11.
  22. Asghari B, Omidvari M. Probability assessment of chemical liquid release at floating roof storage tank in the oil refinery by fuzzy fault tree analysis. *Iran Occup Health.* 2018;15(4):8-20.
  23. Ghasemi F, Kalatpour O, Salehi V, Omid L. Why are emergency responses ineffective and inefficient? Lessons learnt from past events. *J Loss Prev Process Ind.* 2024;90:105335.
  24. Aliabadi MM, Ramezani H, Kalatpour O. Quantitative risk assessment of condensate storage tank, considering domino effects. *J Health Saf Work.* 2022;12(1).
  25. 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.
  26. Khakzad N, Reniers G, Abbassi R, Khan F. Vulnerability analysis of process plants subject to domino effects. *Reliab Eng Syst Saf.* 2016;154:127-36.
  27. Freeman LC. Centrality in social networks: Conceptual clarification. *Soc Netw Crit Concepts Sociol.* 2002;1:238-63.
  28. Khakzad N, Landucci G, Reniers G. Application of graph theory to cost-effective fire protection of chemical plants during domino effects. *Risk Anal.* 2017;37(9):1652-67.
  29. Kjaerulff UB, Madsen AL. Bayesian networks and influence diagrams. *Springer Sci Bus Media.* 2008;200:114.
  30. Zarei E, Jafari MJ, Badri N. Risk assessment of vapor cloud explosions in a hydrogen production facility with consequence modeling. 2013.
  31. Khodabakhsh Z, Omid L, Mostafae 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;111(14):614-30.
  32. Zhang L, Reniers G, Ovidi F, Landucci G, Khakzad N. Applying agent-based modeling and simulation for domino effect assessment in chemical plants. In: *Dynamic Risk Assessment and Management of Domino Effects and Cascading Events in the Process Industry.* Elsevier; 2021. p. 97-132.
  33. Khakzad N, Reniers G. Application of graph theory to assessing the vulnerability of tank terminals to domino effects. In: *Dynamic Risk Assessment and Management of Domino Effects and Cascading Events in the Process Industry.* Elsevier; 2021. p. 133-53.
  34. Zhou J, Reniers G. Petri-net based simulation analysis for emergency response to multiple simultaneous large-scale fires. *J Loss Prev Process Ind.* 2016;40:554-62.
  35. 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.
  36. Yang R, Khan F, Neto ET, Rusli R, Ji J. Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliab Eng Syst Saf.* 2020;202:106976.
  37. D'Amico M. Risk based fire protection strategy in crude oil storage facilities. *Int Fire Prot Mag E-Newsw.* 2015(64).