Iran Occupational Health

Iran Occupational Health. 2021 (01 July);18: 14

Original Article

http://ioh.iums.ac.ir

Vulnerability Analysis of The Tanks of an Oil Refinery to Fire-Induced Domino Effects Based on Graph Theory

Mousa Jabbari, Associate Professor, Workplace Health Promotion Research Center; Department of Occupational Health and Safety, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Ahmad Alibabaei, Assistant Professor, Department of E-Learning, Virtual School of Medical Education and Management, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Amir kavousi, Professor, Department of Epidemiology, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Mehrnoosh Rezvanjah, (*Corresponding author), MSc in Industrial Safety, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran. mehrnoosh.rezvanjah@gmail.com

Abstract

Background and aims: Due to the high amount of flammable materials, the tank farms are vulnerable to fire-induced domino effects. The present study tries to analyze the vulnerability of the crude oil tanks to domino fires, in one of the refineries of Iran. The purpose of vulnerability analysis, is to determine the tanks with the greatest potential to initiate and propagate domino effects, in order to manage the risk of domino fires.

Methods: Graph theory and centrality measures (betweenness and closeness) were used to model domino scenarios and analyze the vulnerability of tanks to domino effects. The ALOHA consequence modeling software was used to model the consequences of the accident scenarios. The R-statistical software and igraph package were used to model the graph and calculate the centrality measures.

Results: The possible domino scenarios in the tanks were modeled as a directed graph, and the tanks were ranked based on the value of betweenness, out-closeness and in-closeness of their respective nodes (which represent the potential for the propagation of domino effects, the potential for initiating domino effects and potential to be affected by other tanks during domino effects, respectively). Also, based on the all-closeness measure, Also, based on all-closeness measure, the most probable sequence of tank involvement in a domino fire was determined.

Conclusion: The use of the graph theory, allows the graphical modeling of domino scenarios and the determination of the most vulnerable tanks in domino scenarios. The results of vulnerability analysis using graph metrics, can be used in the field of domino effects risk management, and the most vulnerable tanks can be prioritized to be assigned to protection measures.

Conflicts of interest: None

Funding: None

Keywords

Domino effects

Vulnerability analysis

Graph theory

Fire protection

Received: 2019/09/17

Accepted : 2020/07/01

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

Tanks are one of the major hazardous installations in the processing industry, including refineries, which are used to store crude oil and various petroleum products. The presence of multiple tanks containing large volumes of flammable materials that are adjacent to each other, makes the tank farms vulnerable to fire-induced domino effects; therefore, only by analyzing the accidents related to tanks individually, the risk management of tanks will not be sufficient, regardless of the possibility of chain scenarios among tanks. Thus, the present study tries to analyze the vulnerability of the tanks to the fire-induced domino effects in one of the refineries of Iran. The purpose of this vulnerability analysis is to determine and protect the tanks that have the greatest impact on the initiation and propagation of domino scenarios, in order to manage the risk of these chain accidents. In the present study, the graph theory model has been used as one of the new graphical methods to model the domino scenarios between tanks, and also to analyze their vulnerability. Graph measures have so far been used in studies related to the analysis of the vulnerability of the process industries to domino effects caused by terrorist attacks (1, 2), as well as accidental failures (3-5).

METHODOLOGY

In the graph model, the hazardous equipment are considered as graph nodes, and the probability of accident's propagation between equipment is also indicated by the weight of the edges between the nodes. Modeling of the domino scenarios between tanks as a directed graph, makes it possible to analyze the vulnerability of tanks to domino effects, using the graph measures. Using graph measures, the vulnerability indices of tanks (that represent the potential for initiating and propagating the domino effects) can be quantified, and thus tanks can be compared with each other, in terms of their participation in the onset and propagation of the domino events. The steps to model domino scenarios and analyze the vulnerability of hazardous equipment using graph theory are as follows:

1. Identifying the major hazardous equipment as graph nodes: This case study was conducted on 9 tanks containing crude oil. In order to model the domino scenarios in the studied tanks as a graph, 9 nodes corresponding to each tank were considered.

2. Determining the accident scenario for each of the hazardous equipment: According to the type of equipment selected for the study, chemical contents as well as their physical and operational conditions, the accident scenario was considered (both as an initial accident and as a domino-induced accident) for all tanks, in terms of major release and the pool fire due to the immediate ignition.

3. Determining the escalation vectors according to the accident scenario and calculating their severity: Considering the pool fire as the accident scenario related to the tanks, the corresponding escalation vector of the heat radiation was considered. In this study, ALOHA consequence modeling software was used to model the outcome of the pool fire scenario in each of the tanks, and to calculate the intensity of the escalation vectors in the location of other tanks. ALOHA software has been used in various studies to model the consequences of the release of hazardous materials, including toxic material releases and various types of fire (6, 7).

4. Comparing the escalation vectors with the threshold value and determining the probable target equipment (determining the graph edges): In order to determine the probable target tanks related to fire in each tank (which can participate in the formation of secondary scenarios and escalation of the primary accident), the values of the escalation vector (here the thermal radiation), were compared with the threshold value (15kW/m2); in cases where Q_{ij} (the amount of heat radiation received by tank j, due to a fire in tank i) was greater than or equal to the threshold value, tank j was considered the probable target of the fire scenario in tank i, and this relationship was modeled by drawing an edge from node i to node j. By determining the edges at this stage, the graph structure was formed qualitatively.

5. Calculating the weight of the graph edges: For a meaningful modeling of the domino scenarios in the form of a weighted graph, the weight of each edge was assigned as the ratio of the threshold value to the corresponding escalation vector value of that edge (3-5); thus, if the heat radiation value corresponding to an edge is greater, there is shorter distance between the two nodes connected by that edge, and the effect they have on each other during a domino event is greater as well.

6. Modeling domino scenarios as a graph and calculating nodes' centrality measures (vulnerability indices of the corresponding equipment): R statistical software and igraph package were used to graphically model domino scenarios in a graph form. R software is an open-source statistical programming platform in which, the igraph packages can be used to generate graphs and to study their properties. In the previous steps, graph nodes, edges between nodes, as well as the weight assigned to each edge were determined. At this stage, a graph with specified characteristics

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

was modeled and plotted. Using the functions in the R software, the centrality measures (betweenness, in-closeness, out-closeness and all-closeness) for each node and consequently, the vulnerability indices of their respective tanks were calculated.

7. Equipment vulnerability analysis based on the graph measures: According to the graph theory, the betweenness index of a node, shows how many graph nodes are in need of this node in order to communicate faster (with fewer intermediaries). The higher the betweenness of a node, the more it is able to facilitate the spread of an effect between other nodes in the graph. From the perspective of the accident propagation between tanks, it is also argued that the tank with the highest betweenness index has the greatest potential for the propagation of domino effects to all tanks. The index of in-closeness of a node in the graph, indicates the speed of access of other nodes to it, and the higher index for a node, indicates that it can be affected by other nodes in a shorter time. The higher in-closeness index of a tank, indicates its high susceptibility to be impacted by all studied tanks during different domino scenarios. The node with the highest amount of out-closeness has a faster access to other nodes, and can affect them in a shorter time. Therefore, it can be argued that starting an accident from a tank with the highest amount of out-closeness, can cause other tanks to engage more rapidly and lead to a more severe domino incident. By definition, the all-closeness index for a node, shows the extent to which that node has access to other nodes and the extent to which they are accessible. Thus, this index can show the capability of a tank to have an impact on other tanks, and also the susceptibility to be affected (damaged) by them during domino effects collectively. It is possible to predict the most probable sequence of the involved tanks in a chain of accidents, by using this index (3, 4).

RESULTS

The magnitude of all escalation vectors were calculated by modeling the defined fire scenario in each tank, using ALOHA software. Table 1, shows the intensity of the escalation vectors related to the fire scenario of each tank at the location of the target tanks. A graph with 9 nodes and 40 edges was modeled using the R software, and the weight of each edge was assigned. Figure 1, shows the graph drawn

Table 1. Amounts of the thermal radiation (kW/m^2) caused by fire in tank i at the location of the target tank j.

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-	20	-	50	-	-	-	-	-
2	17/5	-	85	60	40	16	-	-	-
3	-	45	-	25	60	69	16	36	-
4	25	34	25	-	85	-	-	16	-
5	-	17	34	44	-	23	-	66	17
6	-	-	35	-	23	-	88	60	42
7	-	-	-	-	-	41	-	25	61
8	-	-	15	-	35	35	25	-	85
9	-	-	-	-	-	16	35	43	-

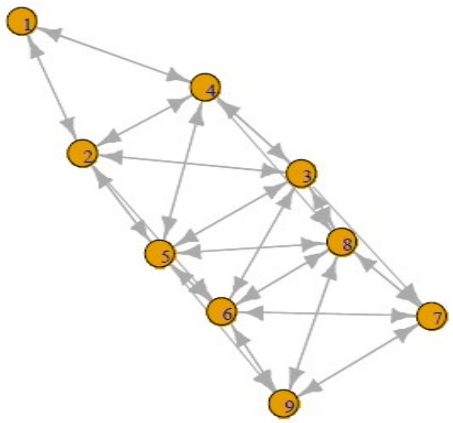


Fig. 1. Graph modeling corresponding to domino scenarios in the studied tanks, using R software.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

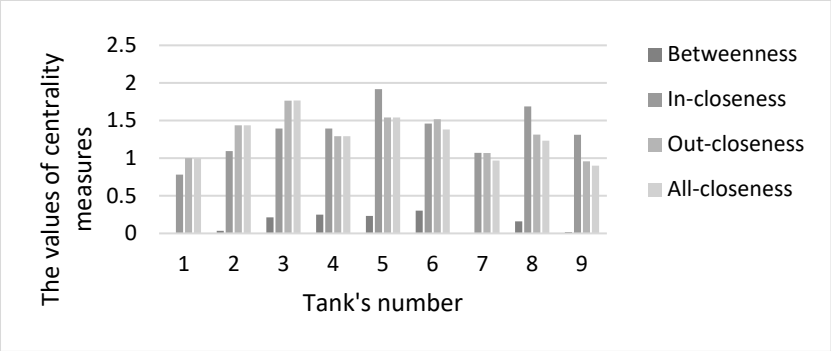


Fig. 2. Comparison of tanks based on the centrality measures.

in the R software. The target tanks related to the fire scenario in each tank and possible domino scenarios, are shown in the plotted graph. The values of the centrality measures for the graph nodes (tanks) were calculated using the functions in the R software. As figure 2 shows, tanks 6, 4, 5, 3, 8, 2, 9, 1 and 7 have the highest values of the betweenness index (susceptibility to propagation of domino effects), respectively. Tanks 3, 5, 6, 2, 8, 4, 7, 1, and 9 have the highest values of the out-closeness index (susceptibility to trigger severe domino effects), respectively. Tanks 5, 8, 6, 3, 4, 9, 2, 7 and 1 have the highest values of the in-closeness (susceptibility to be impacted during different domino scenarios), respectively. Tanks 3, 5, 2, 6, 4, 8, 1, 7 and 9 have the highest values of the all-closeness index (potential to trigger severe domino effects and to be impacted during different domino scenarios collectively), respectively; thus this arrangement is the most probable sequential involvement of tanks in chain fires.

DISCUSSION

Vulnerability analysis using the graph measures, not only makes it possible to identify critical tanks initiating and propagating domino effects, but also by using the results, helps in the initiation of plans for the safety management of these accidents. Just as the removal of the node with the highest betweenness index from the graph, leads to the greatest disconnection in the graph structure; the protection of the tanks with the highest betweenness index, also leads to the interruption of critical paths of accident propagation between the tanks. Protecting the tanks has the greatest impact on other tanks (the tanks with the highest out-closeness index), and also prevents the onset of the most severe domino scenarios. In studies conducted so far, various approaches have been used to manage the risk of domino effects. A study by Khakzad et al. (2017) on the optimal allocation of protection strategies against domino effects, showed that active protection of critical equipment that initiate domino effects, and the passive protection of critical equipment that propagate domino scenarios, is the most effective way to reduce the vulnerability of the chemical plants to domino fire accidents (5). Therefore, the effect of fireproofing (as a passive protection method) four tanks with the highest potential for accident propagation (tanks 6, 4, 5, and 3, respectively), and the use of sprinkler system (as an active protection method) for the four tanks with the highest potential to trigger domino effects (tanks 3, 5, 6, and 2, respectively) on the vulnerability of crude oil tanks' layout, has been investigated. To quantify the vulnerability of tanks' layout subject to domino effects, the graph out-closeness score (average of the out-closeness scores of nodes) was used. In the case where there is no protection, the value of graph out-closeness is 1.32, as Table 2 shows, the protection of

Table 2. The effect of the protection measures on the vulnerability of tanks' layout (out-closeness score of the graph).

		Protected tanks	Out-closeness score of the graph
The type of protection measure	Fireproofing	Tank6	0.65
		Tank6 and Tank4	0.39
		Tank6, Tank4 and Tank5	0.28
		Tank6, Tank4, Tank5 and Tank3	0.18
	Sprinkler system	Tank3	1.24
		Tank3 and Tank5	1.03
		Tank3, Tank5 and Tank6	0.93
		Tank3, Tank5, Tank6 and Tank2	0.91

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

the most vulnerable tanks, especially fireproofing the tanks which contributes to the propagation of domino effects the most, can cause a significant reduction in the vulnerability of the tanks' layout to domino fires.

CONCLUSION

The graph theory model, is an effective approach for graphical modeling of domino scenarios, and determining the most vulnerable tanks in terms of their potential in initiating and propagating domino effects. The non-probabilistic nature of the graph model, reduces the size of the calculations for vulnerability analysis and the duration required to do so, compared to the probabilistic methods. The results of the vulnerability analysis using the graph metrics, can be used in the field of domino effects risk management, and the most vulnerable tanks can be prioritized to assign protection measures such as, active and passive safety barriers. According to the study, the protection of the most vulnerable tanks (by fireproofing and using the sprinkler system), can reduce vulnerability of the tanks' layout to domino effects. However, the cost of implementing protection measures is also important in choosing the type of protection measure and the number of selected tanks to allocate protection measures (prioritized based on the vulnerability indexes). Given that the protection measures usually require economic justification due to limited financial resources, the vulnerability index of tanks' layout (closeness score of graph) can be used in conjunction with other decision-making criteria, for selecting effective protection strategies (such as cost of implementation) and achieving the optimal economic solutions.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Shahid Beheshti University of Medical Sciences for financial support of the research, and to thank the safety experts and the HSE officials of the Oil Refining Company for their cooperation in the conduction of this research.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there are no conflict of interest regarding the publication of this manuscript.

How to cite this article:

Mousa Jabbari, Ahmad Alibabaei, Amir kavousi, Mehrnoosh Rezvanjah. Vulnerability Analysis of The Tanks of an Oil Refinery to Fire-Induced Domino Effects Based on Graph Theory. Iran Occupational Health. 2021 (01 July);18:14.

***This work is published under CC BY-NC 4.0 licence**

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

سلامت کار ایران
دوره ۱۸ - ۱۴/۱۴۰۰

مقاله پژوهشی
http://ioh.iums.ac.ir

تحلیل آسیب‌پذیری مخازن یکی از پالایشگاه‌های نفت نسبت به حوادث زنجیره‌ای ناشی از حریق بر اساس نظریه گراف

موسی جباری: دانشیار، مرکز تحقیقات ارتقاء سلامت محیط کار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.
احمدعلی بابایی: استادیار، گروه یادگیری الکترونیکی، دانشکده مجازی، آموزش پزشکی و مدیریت دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.
امیر کاوسی: استاد، گروه اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.
مهرنوش رضوان جاه: (* نویسنده مسئول) کارشناس ارشد ایمنی صنعتی، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.
mehrnoosh.rezvanjah@gmail.com

چکیده

زمینه و هدف: مخازن یکی از تأسیسات مخاطره‌آمیز مهم صنایع فرآیندی ازجمله پالایشگاه‌ها هستند که برای ذخیره‌سازی نفت خام و فرآورده‌های نفتی گوناگون مورداستفاده قرار می‌گیرند. وجود مخازن متعدد محتوی حجم بالایی از مواد قابل‌اشتعال در مجاورت یکدیگر، محوطه استقرار آن‌ها را نسبت به وقوع حوادث زنجیره‌ای ناشی از حریق آسیب‌پذیر می‌سازد؛ بنابراین مدیریت ریسک مخازن تنها با تجزیه‌وتحلیل حوادث مربوط به آن‌ها به‌صورت منفرد و با صرف‌نظر از احتمال وقوع سناریوهای زنجیره‌ای میان مخازن کافی نخواهد بود. به همین جهت، مطالعه حاضر به تحلیل آسیب‌پذیری مخازن یکی از پالایشگاه‌های کشور نسبت به حوادث زنجیره‌ای ناشی از حریق پرداخته است. هدف از تحلیل آسیب‌پذیری در این پژوهش تعیین مخازن دارای بیش‌ترین پتانسیل راه‌اندازی و گسترش حوادث زنجیره‌ای به‌منظور مدیریت ریسک این حوادث است.

روش بررسی: در این مطالعه از نظریه گراف و شاخص‌های مرکزیت برای مدل‌سازی سناریوهای زنجیره‌ای و تحلیل آسیب‌پذیری مخازن استفاده شده است. مخازن موردمطالعه به‌صورت گره‌های گراف و احتمال گسترش حادثه میان آن‌ها به‌صورت کمان‌های گراف مدل‌سازی شده‌اند. برای محاسبه کمی مؤلفه‌های آسیب‌پذیری مخازن نسبت به حوادث زنجیره‌ای (پتانسیل گسترش حوادث زنجیره‌ای میان مخازن، پتانسیل راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای، پتانسیل تأثیرپذیری از سایر مخازن هنگام وقوع حوادث زنجیره‌ای، پتانسیل تأثیرگذاری بر سایر مخازن و تأثیرپذیری از آن‌ها به‌صورت توأم هنگام وقوع حوادث زنجیره‌ای) به ترتیب از شاخص‌های بینیت، مرکزیت نزدیکی خارجی، نزدیکی داخلی و نزدیکی کل گره‌های متناظر مخازن استفاده شده است. برای مدل‌سازی پیامد سناریو حوادث و محاسبه میزان تشعشع حرارتی که در اثر وقوع حریق در هر مخزن به مخازن مجاور آن می‌رسد، از نرم‌افزار مدل‌سازی پیامد ALOHA استفاده شده و برای مدل‌سازی گراف و محاسبه شاخص‌های مرکزیت گره‌ها، نرم‌افزار آماری R و بسته igraph مورداستفاده قرار گرفته است.

یافته ها: مخازن هدف مربوط به سناریو حریق در هر مخزن مشخص گردیده اند و سناریوهای زنجیره‌ای محتمل در مخازن به‌صورت یک گراف جهت‌دار مدل‌سازی شده اند. مخازن بر اساس مقدار شاخص‌های مرکزیت گره‌های متناظر آن‌ها رتبه‌بندی و با یکدیگر مقایسه گردیده اند. مخزن دارای بالاترین مقدار شاخص بینیت (۰/۳۰۳۶) به‌عنوان مخزن دارای بیش‌ترین پتانسیل گسترش حوادث زنجیره‌ای میان مخازن، مخزن دارای بالاترین شاخص نزدیکی خارجی (۱/۷۶۶۰) به‌عنوان مخزن دارای بیش‌ترین پتانسیل راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای و مخزن دارای بالاترین شاخص نزدیکی داخلی (۱/۹۱۸۵) به‌عنوان مخزن دارای بیش‌ترین پتانسیل تأثیرپذیری از مخازن دیگر هنگام حوادث زنجیره‌ای تعیین گشته اند. همچنین بر اساس شاخص نزدیکی کل، محتمل‌ترین توالی درگیر شدن مخازن در حریق‌های زنجیره‌ای مشخص گردیده است.

نتیجه گیری: رویکرد نظریه گراف امکان مدل‌سازی گرافیکی سناریوهای زنجیره‌ای میان مخازن و تعیین آسیب‌پذیرترین مخازن ازنظر پتانسیل راه‌اندازی و گسترش حوادث زنجیره‌ای را فراهم می‌کند. نتایج حاصل از تحلیل آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص‌های گراف می‌توانند درزمینه مدیریت ریسک حوادث زنجیره‌ای مورداستفاده قرار گیرند و آسیب‌پذیرترین مخازن برای اختصاص اقدامات حفاظتی مانند موانع ایمنی فعال و غیرفعال در اولویت قرار گیرند. با استفاده از شاخص‌های مرکزیت گراف همچنین می‌توان میزان کاهش آسیب‌پذیری مجموعه مخازن به‌واسطه پیاده‌سازی موانع ایمنی را محاسبه کرده و از این طریق راهکارهای اختصاص بهینه اقدامات حفاظتی را مشخص نمود.

تعارض منافع: *گزارش نشده است.*
منبع حمایت کننده: *ندارد.*

کلیدواژه‌ها
حوادث زنجیره‌ای
تحلیل آسیب‌پذیری
نظریه گراف
حفاظت در برابر حریق

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۱

شیوه استناد به این مقاله:
Mousa Jabbari, Ahmad Alibabaei, Amir kavousi, Mehrnoosh Rezvanjah. Vulnerability Analysis of The Tanks of an Oil Refinery to Fire-Induced Domino Effects Based on Graph Theory. Iran Occupational Health. 2021 (01 July);18:14.

*انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با CC BY-NC 4.0 صورت گرفته است

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

مقدمه

حوادث زنجیره‌ای به حوادثی گفته می‌شود که طی آن‌ها وقوع یک حادثه اولیه در یک واحد منجر به درگیر شدن دیگر واحدها می‌شود؛ به‌گونه‌ای که ابعاد حادثه اولیه گسترش می‌یابد (۸). به دلیل پیچیدگی ذاتی سناریوهای حوادث زنجیره‌ای، تعاریف گوناگونی برای این حوادث ارائه شده که غالباً مکمل یکدیگر بوده و هریک بر ویژگی‌های خاصی از آن تأکید نموده‌اند (۹)؛ بااین‌حال گسترش یافتن[1] حادثه از مشخصات اصلی سناریوهای زنجیره‌ای است. طی یک حادثه زنجیره‌ای، یک حادثه اولیه (مانند حریق در یک مخزن) به واحدهای مجاور گسترش می‌یابد و موجب راه‌اندازی حوادث ثانویه و سطوح بالاتر می‌گردد؛ به‌گونه‌ای که پیامدهای کلی زنجیره حوادث درمجموع شدیدتر از پیامدهای حادثه اولیه خواهد بود (۸). گسترش حادثه معمولاً به دلیل اثرات فیزیکی ایجادشده توسط حادثه اولیه به وقوع می‌پیوندد که این اثرات فیزیکی اصطلاحاً بردار تشدید[2] نامیده می‌شوند. برای مثال در مورد سناریوی حریق، تشعشع حرارتی ناشی از آن یک بردار تشدید است که می‌تواند موجب آسیب رساندن به واحدهای مجاور و گسترش حادثه شود (۱۰).

همان‌طور که آمار حوادث گذشته نشان می‌دهد، حوادث زنجیره‌ای تاکنون مسبب فجایع متعددی در صنایع فرآیندی بوده‌اند (۱۱). برای مثال انفجارهای متوالی در انبار ذخیره‌سازی گاز مایع در مکزیکوسیتی در نوامبر ۱۹۸۴ منجر به مرگ ۶۵۰ نفر، جراحت شدید ۶۵۰۰ نفر و نابودی سه مجموعه از تأسیسات فرآیندی شد؛ همچنین در دسامبر ۲۰۰۵ انفجارهای پی‌درپی در پایانه ذخیره‌سازی مواد نفتی بونس فیلد در انگلستان، منجر به وقوع حریقی شد که روزها به طول انجامید و ۴۳ مجروح و خسارت مالی عمده‌ای بر جای گذاشت (۳, ۱۲). ازجمله حوادث زنجیره‌ای در داخل کشور نیز می‌توان به حادثه شازند اراک در سال ۱۳۸۷ اشاره کرد که در آن وقوع یک انفجار در یک واحد پایین‌دستی پتروشیمی، منجر به ویرانی واحد مجاور و کشته شدن بیش از ۳۰ نفر درمجموع شد (۱۳). حادثه پتروشیمی خارک در مرداد ۱۳۸۹ نیز نمونه دیگری از حوادث زنجیره‌ای به وقوع پیوسته در داخل کشور است (۱۴). طبق مطالعه داربرا[3] و همکاران (۲۰۱۰) در زمینه بررسی خصوصیات حوادث زنجیره‌ای گذشته، تأسیسات ذخیره‌سازی بیش از سایر اماکن و فعالیت‌ها در معرض حوادث زنجیره‌ای قرارگرفته‌اند؛ زیرا وجود مخازن محتوی حجم بالایی از مواد مخاطره‌آمیز (اکثراً قابل‌اشتعال) در مجاورت یکدیگر احتمال وقوع سناریوهای زنجیره‌ای را افزایش می‌دهد. همچنین اکثر حوادث زنجیره‌ای موردمطالعه (۵۲/۴ درصد) در اثر یک حریق اولیه ایجادشده‌اند (۱۵). از میان انواع حریق، حریق استخری[4] از منظر قابلیت ایجاد حوادث زنجیره‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است. بر اساس آمار حوادث گذشته، حریق استخری عامل راه‌اندازی ۸۰ درصد حوادث زنجیره‌ای با منشأ حریق بوده است (۱۶)؛ بنابراین وقوع یک حریق استخری در محوطه استقرار مخازن محتوی مواد قابل‌اشتعال، می‌تواند مخازن دیگر را نیز درگیر کرده و کل مجموعه را نابود سازد. با توجه به آمار حوادث گذشته و پتانسیل بالای وقوع حریق‌های زنجیره‌ای در تأسیسات ذخیره‌سازی نفتی، مطالعه حاضر به تحلیل آسیب‌پذیری[5] مخازن یکی از پالایشگاه‌های کشور نسبت به وقوع حوادث زنجیره‌ای ناشی از حریق پرداخته است. در این مطالعه مفهوم آسیب‌پذیری نسبت به حوادث زنجیره‌ای بر اساس تعریف ارائه‌شده توسط خاکزاد و رنیرز[6] (۲۰۱۵)، به معنای توانایی یک تجهیز یا مجموعه تجهیزات مخاطره‌آمیز در راه‌اندازی یا شدت بخشیدن به حوادث زنجیره‌ای احتمالی است (۴)؛ بنابراین هدف تحلیل آسیب‌پذیری نیز شناسایی و حفاظت از مخازنی است که بیش‌ترین تأثیر را در شروع و گسترش سناریوهای زنجیره‌ای خواهند داشت. مخازن مختلف با توجه به عوامل متعددی (ازجمله نوع مخزن، خصوصیات مواد محتوی و شرایط نگهداری آن، موقعیت قرارگیری مخزن در میان سایر تجهیزات و ...) دارای پتانسیل‌های متفاوتی ازنظر میزان مشارکت در شکل‌گیری حوادث زنجیره‌ای هستند. بعضی از مخازن دارای پتانسیل بالای راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای هستند و وقوع یک حادثه اولیه در آن‌ها با احتمال بیشتری نسبت به سایر مخازن منجر به آغاز سناریوهای زنجیره‌ای می‌شود؛ درحالی‌که بعضی از مخازن از پتانسیل بالای گسترش حادثه برخوردار هستند و درصورتی‌که دچار حادثه شوند، تجهیزات بیشتری را در مجاورت خود دچار حوادث مراتب بالاتر می‌نمایند.

در مطالعات انجام‌گرفته تاکنون رویکردهای متفاوتی ازجمله روش‌های تحلیلی (۱۰, ۱۷-۲۰)، شبیه‌سازی (۲۱-۲۳) و روش‌های گرافیکی (۳, ۴, ۲۴-۲۹)، به‌منظور مدل‌سازی و ارزیابی ریسک حوادث زنجیره‌ای مورداستفاده قرارگرفته‌اند که هرکدام از روش‌ها با توجه به

1 Propagation
2 Escalation Vector
3 Darbra

4 Pool Fire
5 Vulnerability
6 Reniers

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

هدف مطالعه و محدودیت زمان اجرای آن از مزایا و معایب مختص خود برخوردار هستند. روش‌های گرافیکی ازجمله شبکه بیزین[1] (۲۶-۲۹)، مدل شبکه (۲۴, ۲۵) و گراف (۳, ۴)، در مقایسه با روش‌های تحلیلی می‌توانند چارچوب مناسبی را برای مدل‌سازی سناریوهای زنجیره‌ای پیچیده و حوادث مراتب بالاتر فراهم کنند. روش‌های شبیه‌سازی نیز به‌خوبی می‌توانند سیر تحول حوادث زنجیره‌ای و گسترش آن را ازنظر مکانی مدل‌سازی کنند، بااین‌حال محدودیت این روش زمان‌بر بودن آن خصوصاً در شرایط تعدد تجهیزات مخاطره‌آمیز است (۳۰). در مطالعه حاضر از مدل گراف به‌عنوان یکی از روش‌های گرافیکی نوین برای مدل‌سازی سناریوهای زنجیره‌ای میان مخازن و همچنین تحلیل آسیب‌پذیری آن‌ها استفاده شده‌است. یک گراف جهت‌دار مجموعه‌ای از گره‌ها[2] و کمان‌ها[3] است که در آن هر کمان دو گره را به یکدیگر متصل می‌سازد. در مدل گراف تجهیزات مخاطره‌آمیز (مخازن) به‌عنوان گره‌های گراف در نظر گرفته می‌شوند و احتمال کمی گسترش حادثه میان تجهیزات نیز توسط وزن کمان‌های میان گره‌ها نشان داده می‌شود (۳, ۴). مدل‌سازی سناریوهای زنجیره‌ای میان مخازن به‌صورت یک گراف جهت‌دار این امکان را فراهم می‌کند که با استفاده از شاخص‌های گراف آسیب‌پذیری مخازن در برابر حوادث زنجیره‌ای مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گیرد. به‌عبارت‌دیگر با استفاده از شاخص‌های گراف می‌توان مؤلفه‌های آسیب‌پذیری مخازن (پتانسیل راه‌اندازی و گسترش حوادث زنجیره‌ای) را کمی نمود و از این طریق مخازن را ازنظر میزان مشارکت آن‌ها در آغاز و گسترش حوادث زنجیره‌ای با یکدیگر مقایسه نمود. شاخص‌های گراف تاکنون در مطالعات مربوط به تحلیل آسیب‌پذیری صنایع فرآیندی نسبت به حوادث زنجیره‌ای ایجادشده در اثر حملات تروریستی (۱)، همچنین شکست‌های تصادفی (۳-۵)، مورداستفاده قرارگرفته‌اند. عدم نیاز به محاسبه احتمال‌های تشدید حادثه در فرآیند مدل‌سازی حوادث زنجیره‌ای با استفاده از نظریه گراف، کاربرد این روش را حتی در شرایط تعدد تجهیزات مخاطره‌آمیز ممکن می‌سازد.

با توجه به اهمیت مطالعه آسیب‌پذیری تأسیسات بحرانی همچون مخازن نفتی نسبت به وقوع حوادث زنجیره‌ای ناشی از حریق، مطالعه حاضر باهدف تعیین مخازن دارای بیشترین پتانسیل راه‌اندازی و گسترش حوادث زنجیره‌ای دریکی از پالایشگاه‌های کشور با استفاده از شاخص‌های گراف انجام گرفت. در این مطالعه برای مدل‌سازی پیامد سناریو حادثه مربوط به هر مخزن و محاسبه بردارهای تشدید مربوط به آن از نرم‌افزار مدل‌سازی پیامد ALOHA (۳۱)، استفاده شد. همچنین برای مدل‌سازی گراف و محاسبه شاخص‌های آن نرم‌افزار آماری R (۳۲) و بسته igraph (۳۳)، مورداستفاده قرار گرفت. نرم‌افزار R یک محیط برنامه‌نویسی آماری متن‌باز است و با استفاده از بسته igraph در آن می‌توان به تولید گراف‌های مختلف و مطالعه مشخصات آن‌ها پرداخت. در این مطالعه با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل آسیب‌پذیری، راهکارهای کاهش آسیب‌پذیری مجموعه مخازن از طریق اختصاص موانع ایمنی[4] به مخازن بحرانی آغازگر و گسترش‌دهنده سناریوهای زنجیره‌ای مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

روش بررسی

در مطالعه حاضر از نظریه گراف و شاخص‌های آن برای تحلیل آسیب‌پذیری مخازن یکی از پالایشگاه‌های کشور، نسبت به وقوع حوادث زنجیره‌ای ناشی از حریق استفاده شد. مخازن موردمطالعه در قالب گره‌ها و احتمال گسترش حادثه میان آن‌ها به‌صورت کمان‌های وزن‌دار مدل‌سازی شدند؛ سپس با نمایش سناریوهای زنجیره‌ای به‌صورت یک گراف، آسیب‌پذیری مخازن از طریق محاسبه شاخص‌های مرکزیت[5] گره‌های متناظر آن‌ها موردبررسی قرار گرفت. به‌منظور دست‌یابی به درک روشن‌تری از فرآیند مدل‌سازی حوادث زنجیره‌ای و تحلیل آسیب‌پذیری مخازن، ابتدا به معرفی نظریه گراف و تعاریف مربوط به شاخص‌های گراف که در تحلیل آسیب‌پذیری مورداستفاده قرارگرفته‌اند، پرداخته می‌شود. سپس مراحل انجام مطالعه به‌تفصیل بیان می‌گردد.

نظریه گراف

یک گراف ریاضی، یک زوج مرتب $G=(V,E)$ متشکل از مجموعه‌ای از گره‌ها $V=\{v_1, v_2, \ldots, v_n\}$ و مجموعه‌ای از کمان‌ها $E=\{e_1, e_2, \ldots, e_m\}$ است. مرتبه[6] یک گراف برابر با تعداد گره‌های آن (n) و اندازه[7] یک گراف برابر با تعداد کمان‌های آن (m) است. کمان‌های یک گراف می‌توانند به‌صورت یک خط جهت‌دار یا بدون جهت که دو گره را به یکدیگر متصل می‌کنند، نشان داده شوند. در یک گراف وزن‌دار، مجموعه‌ای از مقادیر عددی نیز می‌توانند به

1 Bayesian Network
2 Nodes
3 Edges
4 Safety Barriers
5 Centrality Measures
6 Order
7 Size

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

هریک از گره‌ها یا کمان‌های گراف نسبت داده شوند. در این صورت گراف وزن‌دار به‌صورت $G=(V,E,W_V,W_E)$ نمایش داده می‌شود که در آن W_V و W_E به ترتیب بردارهای وزن اختصاص داده شده به گره‌ها و کمان‌ها هستند. در یک گراف جهت‌دار یک گشت[1] از گره v_i به گره v_j، دنباله‌ای از گره‌ها و کمان‌ها است که از v_i آغاز شده و به v_j ختم می‌گردد؛ به‌طوری‌که از هر گره در این میان چندین بار می‌توان عبور کرد. یک مسیر[2]، گشتی از v_i به v_j است که در آن از هر گره میانی تنها یک‌بار می‌توان عبور کرد. فاصله بین v_i و v_j برابر با طول کوتاه‌ترین مسیر از گره v_i به گره v_j است و به‌صورت $d_{ij}=d(v_i,v_j)$ نشان داده می‌شود. بر اساس مفهوم فاصله در نظریه گراف، شاخص‌های متعددی به‌منظور بررسی مشخصات گراف‌ها به وجود آمده‌اند که در میان آن‌ها شاخص‌های مرکزیت ازجمله شاخص‌های بینیت[3] و نزدیکی[4] بسیار متداول‌اند. شاخص بینیت برای گره v_i به‌صورت $C_b(v_i)$ نشان داده می‌شود و بر اساس معادله ۱ بیانگر نسبت تعداد دفعاتی است که آن گره در کوتاه‌ترین مسیر میان گره‌های دیگر در گراف قرار می‌گیرد. در این معادله $d_{jk}(v_i)$ نشان‌دهنده فاصله بین گره‌های v_j و v_k هست که از گره v_i عبور می‌کنند $(i\neq j\neq k)$. همچنین d_{jk} نشان‌دهنده فاصله بین گره‌های v_j و v_k است، بدون در نظر گرفتن این‌که آیا از گره v_i عبور می‌کنند یا خیر. همان‌طور که از معادله ۱ استنباط می‌گردد، حذف کردن گرهی از گراف که مقدار بینیت بالایی دارد می‌تواند به قطع اتصالات بیش‌تر و گسستگی بزرگ‌تری در گراف منجر شود.

$$Cb(vi)=\sum_{j,k}\frac{djk(vi)}{djk} \qquad (۱)$$

شاخص متداول دیگر در زمینه بررسی مشخصات گراف‌ها شاخص نزدیکی است. شاخص نزدیکی برای یک گره را با در نظر گرفتن جهت کمان‌ها می‌توان به دو شاخص نزدیکی داخلی[5] و نزدیکی خارجی[6] تقسیم کرد. شاخص نزدیکی خارجی برای گره v_i به‌صورت تعداد گام‌های لازم برای رسیدن به دیگر گره‌های گراف از گره v_i تعریف می‌گردد و با نماد $C_{c\text{-}out}(v_i)$ نشان داده می‌شود. همچنین شاخص نزدیکی داخلی برای گره v_i برابر با تعداد گام‌های لازم برای رسیدن به گره v_i از دیگر گره‌های گراف است و با نماد $C_{c\text{-}in}(v_i)$ نمایش داده می‌شود. شاخص نزدیکی کل که با نماد $C_{c\text{-}all}(v_i)$ نشان داده می‌شود، با صرف‌نظر از جهت کمان‌ها دو شاخص نزدیکی داخلی و خارجی را ترکیب می‌کند (۳۴).

$$Cc-out(vi)=\frac{1}{\sum_j dij} \qquad (۲)$$

$$Cc-in(vi)=\frac{1}{\sum_j dji} \qquad (۳)$$

گفتنی است که بر اساس مقادیر مرکزیت نزدیکی گره‌ها که با استفاده از معادله ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند، شاخص نزدیکی برای گراف نیز به صورت میانگین مقدار نزدیکی گره‌ها قابل‌محاسبه است. به‌این‌ترتیب شاخص نزدیکی خارجی برای گراف $(C_{c\text{-}out}(G))$ با استفاده از معادله ۴ قابل‌محاسبه است (۲).

$$Cc-out(G)=\frac{\sum_{i=1}^{n}Cc-out(vi)}{n} \qquad (۴)$$

فرآیند مدل‌سازی حوادث زنجیره‌ای به‌صورت گراف و تحلیل آسیب‌پذیری تجهیزات مخاطره‌آمیز

در این بخش روش تحلیل آسیب‌پذیری تأسیسات ذخیره‌سازی/فرآیندی نسبت به حوادث زنجیره‌ای با استفاده از نظریه گراف به‌صورت مرحله‌به‌مرحله شرح داده می‌شود.

مرحله اول: تعیین تجهیزات مخاطره‌آمیز مهم به‌عنوان گره‌های گراف

گام اول مدل‌سازی حوادث زنجیره‌ای با استفاده از نظریه گراف، تعیین تجهیزات مخاطره‌آمیز مهم (تجهیزات محتوی حجم بالایی از مواد شیمیایی قابل‌اشتعال یا قابل‌انفجار مانند مخازن ذخیره‌سازی که استعداد راه‌اندازی و یا شدت بخشیدن به حوادث زنجیره‌ای را دارند) به‌عنوان گره‌های گراف است (۳-۵). حریق و انفجار متداول‌ترین حوادث صنایع فرآیندی هستند که کنترل آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (۳۵)؛ زیرا این حوادث قابلیت ایجاد سناریوهای زنجیره‌ای را دارند و می‌توانند منجر به وقوع فاجعه گردند. با توجه به این‌که بر اساس مطالعات انجام‌گرفته بیش‌ترین حوادث مخازن پالایشگاه‌ها مربوط به مخازن نفت خام و بیش‌ترین پیامد حادثه از نوع آتش‌سوزی بوده است (۳۶، ۳۷)، این مطالعه موردی بر روی ۹ مخزن محتوی نفت خام در یکی از پالایشگاه‌های کشور انجام گرفت. مخازن موردمطالعه

1 Walk
2 Path
3 Betweenness
4 Closeness
5 In-Closeness
6 Out-Closeness

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]



شکل ۱. جانمایی مخازن تحت بررسی در مطالعه موردی.

از نوع اتمسفریک و دارای سقف شناور بوده و نسبت به مخازن مجاور خود (مخازن محتوی مشتقات نفت) از ابعاد بسیار بالاتری برخوردار هستند. جانمایی مخازن تحت بررسی در شکل شماره ۱ نشان داده شده و مخازن از شماره ۱ تا ۹ شماره‌گذاری شده‌اند. ارتفاع مخازن ۱۴/۶۳ متر، قطر مخازن ۵۴ الی ۵۸ متر و دمای مخازن ۳۲/۲ الی ۳۵/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. به‌منظور مدل‌سازی سناریوهای زنجیره‌ای در مخازن موردمطالعه به‌صورت گراف، ۹ گره متناظر با هر یک از مخازن در نظر گرفته شد.

مرحله دوم: تعیین سناریوی حادثه برای هریک از تجهیزات مخاطره‌آمیز

در این مرحله با توجه به نوع تجهیزات انتخاب‌شده برای مطالعه، محتویات شیمیایی و همچنین شرایط فیزیکی و عملیاتی آن‌ها، سناریوی حادثه مربوط به هر تجهیز مشخص گردید. با توجه به نوع مخازن موردبررسی (اتمسفریک) و ماده شیمیایی محتوی آن‌ها (نفت خام)، سناریوی حادثه (هم به‌عنوان سناریوی اولیه و هم به‌عنوان سناریوی مراتب بالاتر) برای همه مخازن به‌صورت رهایش بزرگ[1] و ایجاد حریق استخری در اثر جرقه فوری[2] در نظر گرفته شد. بر اساس اسناد طراحی و شرایط عملیاتی محل موردمطالعه، شرایط جوی به‌صورت سرعت باد برابر با ۷/۵ متر بر ثانیه، جهت وزش باد از جنوب غربی، ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد برابر با ۱۰ متر، دمای هوا برابر با ۴۳ درجه سانتی‌گراد (گرم‌ترین ماه سال)، کلاس پایداری C، رطوبت نسبی برابر با ۲۸٪ و آسمان کاملاً آفتابی در نظر گرفته شد. میزان پر بودن همه مخازن نیز برابر با ۸۰٪ فرض گردید. همچنین با توجه به این‌که حجم همه مخازن بیش از ۱۲۰۰۰ مترمکعب است، قطر سوراخ مربوط به رهایش بزرگ برای هر مخزن برابر با ۱۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد (۳۸). محل رهایش نیز در ارتفاع صفر از کف مخزن (بدترین سناریو) فرض گردید.

1 Major Release
2 Immediate Ignition

حداکثر مساحت حوضچه برای سناریوی حریق هر مخزن با توجه به مساحت باند وال مربوطه در نظر گرفته شد.

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

در این مرحله بر اساس نوع حادثه در نظر گرفته‌شده برای مخازن، نوع بردار تشدید مربوطه مشخص گردید؛ سپس اندازه بردار تشدید حاصل از وقوع حادثه در هر مخزن، در محل سایر مخازن محاسبه شد. با توجه به در نظر گرفتن حریق استخری به‌عنوان سناریوی حادثه مربوط به مخازن، بردار تشدید متناظر آن تشعشع حرارتی در نظر گرفته شد (۱۰). در این مطالعه برای مدل‌سازی پیامد سناریوی حریق استخری در هریک از مخازن و محاسبه شدت بردارهای تشدید در محل دیگر مخازن از نرم‌افزار مدل‌سازی پیامد ALOHA استفاده گردید. نرم‌افزار ALOHA برای مدل‌سازی پیامدهای ناشی از رهایش مواد مخاطره‌آمیز، ازجمله نشت مواد سمی و انواع حریق در مطالعات مختلف مورد استفاده قرارگرفته‌است (۶, ۷, ۳۹-۴۱).

مرحله چهارم: مقایسه بردارهای تشدید با مقدار آستانه و تعیین تجهیزات هدف احتمالی (کمان‌های گراف)

در این مرحله مشخص شد که در اثر وقوع حادثه اولیه در هر مخزن، کدام‌یک از مخازن دیگر در شکل‌گیری سناریوهای ثانویه و شدت یافتن حادثه مشارکت خواهند کرد. برای شناسایی تجهیزات هدف احتمالی و تعیین این‌که آیا توسط بردارهای تشدید متأثر می‌شوند یا خیر، شدت بردار تشدید در محل قرارگیری تجهیز هدف باید بزرگ‌تر از مقدار آستانه تشدید متناظر باشد. به این منظور مقادیر بردار تشدید (در اینجا تشعشع حرارتی) که در مرحله قبل محاسبه شدند، با مقدار آستانه مقایسه گردیدند؛ در مواردی که Q_{ij} (مقدار تشعشع حرارتی که مخزن j در اثر وقوع حریق در مخزن i دریافت می‌کند) بزرگ‌تر یا مساوی مقدار آستانه بود، مخزن j هدف احتمالی سناریوی حریق در مخزن i در نظر گرفته شد و این رابطه به‌صورت ترسیم یک کمان از گره i به گره j مدل‌سازی گردید. با تعیین کمان‌ها در این مرحله، ساختار گراف به‌صورت کیفی شکل گرفت. ذکر این نکته لازم است که در این مطالعه مقدار آستانه تشدید برای مخازن اتمسفریک هدف حریق استخری برابر با ۱۵ kW/m^2 برای مدت‌زمان بیش از ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شده‌است (۱۰). به‌عبارت‌دیگر یک مخزن اتمسفریک باید حرارتی بیش‌تر یا مساوی با ۱۵ kW/m^2

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

را برای مدت‌زمان بیش‌تر از ۱۰ دقیقه دریافت کند تا به‌عنوان تجهیز هدف یک حریق استخری قلمداد شود و خود موجب شکل‌گیری سناریوی مرتبه بالاتر گردد.

مرحله پنجم: محاسبه وزن کمان‌های گراف

تحلیل آسیب‌پذیری تجهیزات مخاطره‌آمیز نسبت به حوادث زنجیره‌ای مستلزم کمی ساختن مدل گراف است. همان‌طور که گفته شد کمان‌های موجود در مدل گراف، نشان‌دهنده بردارهای تشدید میان تجهیزات هستند. برای نشان دادن این رابطه به‌صورت کمی، لازم است که مشخصات عددی به کمان‌ها اختصاص یابد؛ به‌گونه‌ای که این مشخصات عددی با اندازه بردارهای تشدید متناظر کمان‌ها مرتبط باشند. در گراف‌های وزن‌دار، وزن بیش‌تر برای یک کمان بر فاصله بیش‌تر بین دو گره‌ای که توسط آن کمان به یکدیگر متصل می‌شوند دلالت دارد؛ بنابراین نشان‌دهنده تعامل ضعیف‌تر بین آن دو گره است. به همین خاطر برای مدل‌سازی صحیح و معنادار سناریوهای زنجیره‌ای در قالب یک گراف وزن‌دار، وزن هر کمان به‌صورت نسبت مقدار آستانه ($15\,kW/m^2$) به مقدار بردار تشدید (تشعشع حرارتی) متناظر آن کمان اختصاص داده شد (۳-۵)؛ به‌این‌ترتیب بیش‌تر بودن تشعشع حرارتی متناظر با یک کمان، نشان‌دهنده فاصله کمتر میان دو گره متصل شونده توسط آن کمان و تأثیر بیش‌تر آن‌ها بر یکدیگر در طول حادثه زنجیره‌ای است.

مرحله ششم: مدل‌سازی سناریوهای زنجیره‌ای به‌صورت گراف و محاسبه شاخص‌های مرکزیت گره‌ها (شاخص‌های آسیب‌پذیری تجهیزات متناظر)

در این مطالعه برای مدل‌سازی گرافیکی سناریوهای زنجیره‌ای در قالب گراف از نرم‌افزار آماری R و بسته igraph استفاده گردید. نرم‌افزار R یک محیط برنامه‌نویسی آماری متن‌باز است که در آن با استفاده از بسته igraph می‌توان به تولید گراف و مطالعه ویژگی‌های آن پرداخت. در مراحل قبل گره‌های گراف، کمان‌های میان گره‌ها و همچنین وزن اختصاص داده‌شده به هر یک از کمان‌ها تعیین گردیدند. در این مرحله یک گراف با مشخصات تعیین‌شده، مدل‌سازی شده و ترسیم گردید؛ سپس با استفاده از توابع موجود در نرم‌افزار R و بسته igraph شاخص‌های مرکزیت بینیت، نزدیکی داخلی، نزدیکی خارجی و نزدیکی کل برای هریک از گره‌ها و درنتیجه مؤلفه‌های آسیب‌پذیری مخازن متناظر آن‌ها محاسبه شدند.

مرحله هفتم: تحلیل آسیب‌پذیری تجهیزات بر اساس شاخص‌های گراف

پس از محاسبه شاخص‌های مرکزیت برای گره‌ها، آسیب‌پذیری تجهیزات متناظر با هریک از گره‌ها مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. با توجه به تعریف ارائه‌شده برای شاخص بینیت همان‌طور که گره‌های دارای بینیت بالاتر نقش واسطه را در گراف ایفا می‌کنند، تجهیزات دارای بینیت بالاتر نیز بیش‌ترین مشارکت را در گسترش یک رخداد اولیه یا یک حادثه زنجیره‌ای به جریان درآمده خواهند داشت؛ بنابراین شاخص بینیت نشان‌دهنده استعداد یک تجهیز در گسترش سناریوهای زنجیره‌ای است و تجهیز دارای بینیت بالاتر (واحد بحرانی گسترش‌دهنده) نقش کلیدی را در گسترش حادثه به تجهیزات دیگر ایفا خواهد کرد. شاخص نزدیکی خارجی همان‌گونه که گفته شد میزان دسترسی یک گره را به دیگر گره‌های گراف نشان می‌دهد و ازاین‌رو بیان‌گر قابلیت یک تجهیز در راه‌اندازی و ایجاد حوادث زنجیره‌ای است. به‌عبارت‌دیگر وقوع حادثه اولیه در تجهیز دارای نزدیکی خارجی بالاتر (واحد بحرانی آغازگر)، منجر به حادثه زنجیره‌ای شدیدتری در کل مجموعه خواهد شد. شاخص نزدیکی داخلی، بیان‌گر دسترس‌پذیری یک گره از سایر گره‌های گراف است و به همین جهت می‌تواند قابلیت یک تجهیز را در تأثیرپذیری حین سناریوهای زنجیره‌ای مختلف نشان می‌دهد. شاخص نزدیکی کل نیز به‌خوبی بیان‌گر سطح کلی آسیب‌پذیری تجهیزات است؛ زیرا قابلیت تجهیزات در تأثیرگذاری و تأثیرپذیری آن‌ها هنگام سناریوهای زنجیره‌ای را به‌صورت توأم نشان می‌دهد. با استفاده از این شاخص می‌توان پیش‌بینی کرد که ترتیب احتمالی درگیر شدن مخازن در سناریوهای زنجیره‌ای چگونه خواهد بود (۳-۵).

یافته‌ها

در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی پیامد سناریوها و محاسبه بردارهای تشدید با استفاده از نرم‌افزار ALOHA ارائه شده‌است. همچنین گراف مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های مرکزیت با استفاده از نرم‌افزار R ارائه گردیده و مخازن بر اساس مؤلفه‌های آسیب‌پذیری باهم مقایسه شده‌اند.

نتایج حاصل از محاسبه بردارهای تشدید و تعیین مخازن هدف

از طریق مدل‌سازی سناریوی حریق تعریف‌شده در

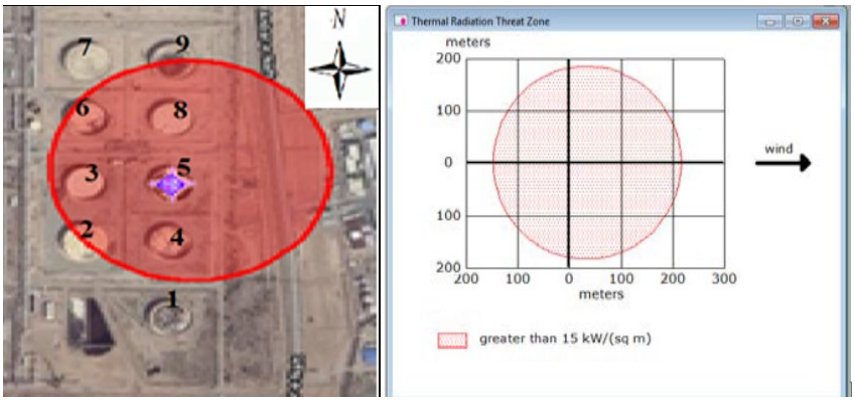
[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

هر مخزن با استفاده از نرم‌افزار ALOHA، کلیه بردارهای تشدید محاسبه گردیدند. برای نمونه در شکل شماره ۲ ناحیه خطر مربوط به تشعشع حرارتی حاصل از سناریوی حریق در مخزن شماره ۵ با استفاده از نرم‌افزار ALOHA مشخص گردیده و با استفاده از نرم‌افزار MARPLOT (۴۲)، بر روی نقشه جانمایی مخازن منطبق شده‌است. این ناحیه خطر بر اساس مقدار آستانه تشدید مشخص شده‌است و محدوده‌ای را که در آن تشعشع حرارتی دریافتی بیش از $15\ kW/m^2$ است، نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل شماره ۲ نشان می‌دهد، مخازن شماره ۲، ۳، ۴، ۶، ۸ و ۹ با دریافت تشعشع حرارتی بیش از $15\ kW/m^2$ مخازن هدف احتمالی سناریوی حریق در مخزن شماره ۵ هستند؛ به‌گونه‌ای که مقدار تشعشع حرارتی دریافتی در نزدیک‌ترین قسمت از این مخازن به مخزن شماره ۵ به ترتیب برابر با $17\ kW/m^2$، $34\ kW/m^2$، $44\ kW/m^2$، $23\ kW/m^2$، $66\ kW/m^2$ و $17\ kW/m^2$ است. به همین ترتیب مخازن هدف مربوط به سناریوی حریق در ۸ مخزن دیگر نیز تعیین‌شده و مقدار تشعشع حرارتی دریافتی آن‌ها محاسبه گردیده است. جدول شماره ۱ شدت بردارهای تشدید مربوط به سناریوی حریق هر مخزن را در محل قرارگیری مخازن هدف آن نشان می‌دهد؛ بنابراین تنها مقادیر تشعشع حرارتی بیش از $15\ kW/m^2$ در جدول ثبت گردیده‌اند.

نتایج حاصل از مدل‌سازی گراف متناظر با سناریوهای زنجیره‌ای در مخازن و محاسبه شاخص‌های مرکزیت گره‌ها

پس از تعیین مخازن هدف و کمان‌های گراف، وزن هر کمان همان‌گونه که ذکر شد، به‌صورت نسبت مقدار آستانه تشدید به بردار تشدید متناظر آن کمان محاسبه گردید. به‌عنوان نمونه ازآنجایی‌که مخازن شماره ۲ و ۴ مخازن هدف سناریوی حریق در مخزن شماره ۱ هستند، یک کمان از گره ۱ به گره ۲ (۲←۱) و نیز یک کمان از گره ۱ به گره ۴ (۴←۱) ترسیم گردید. وزن این کمان‌ها نیز

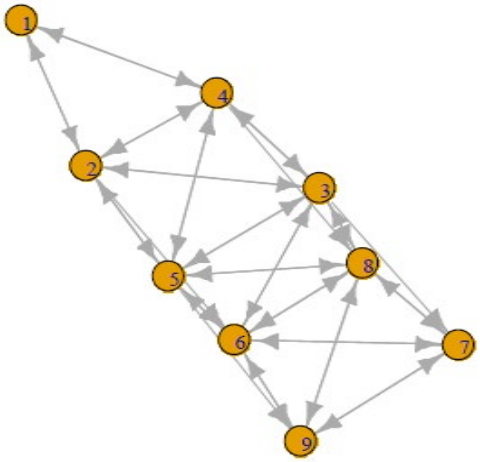


شکل ۲. ناحیه خطر و مخازن هدف مربوط به حریق استخری در مخزن شماره ۵ (بر اساس مقدار آستانه تشدید) که با استفاده از نرم‌افزارهای ALOHA و MARPLOT مشخص شده‌است.

جدول ۱. مقادیر تشعشع حرارتی (kW/m^2) ناشی از وقوع حریق در مخزن i در محل قرارگیری مخزن هدف j.

i \ j	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
۱	-	۲۰	-	۵۰	-	-	-	-	-
۲	۱۷/۵	-	۸۵	۶۰	۴۰	۱۶	-	-	-
۳	-	۴۵	-	۲۵	۶۰	۶۹	۱۶	۳۶	-
۴	۲۵	۳۴	۲۵	-	۸۵	-	-	۱۶	-
۵	-	۱۷	۳۴	۴۴	-	۲۳	-	۶۶	۱۷
۶	-	-	۳۵	-	۲۳	-	۸۸	۶۰	۴۲
۷	-	-	-	-	-	۴۱	-	۲۵	۶۱
۸	-	-	۱۵	-	۳۵	۳۵	۲۵	-	۸۵
۹	-	-	-	-	-	۱۶	۳۵	۴۳	-

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]



شکل ۳. مدل‌سازی گراف متناظر با سناریوهای زنجیره‌ای در مخازن موردمطالعه با استفاده از نرم‌افزار R.

به ترتیب به‌صورت (۰/۷۵=۱۵÷۲۰) و (۰/۳=۱۵÷۵۰) محاسبه شد. به همین ترتیب یک گراف با ۹ گره و ۴۰ کمان تعیین‌شده با استفاده از نرم‌افزار R مدل‌سازی گردید و وزن هر کمان نیز مطابق با آنچه گفته شد اختصاص یافت. شکل شماره ۳ گراف ترسیم‌شده در نرم‌افزار R را نشان می‌دهد. مخازن هدف مربوط به سناریوی حریق در هر مخزن و سناریوهای زنجیره‌ای محتمل در گراف ترسیم‌شده قابل‌رؤیت است. پس از مدل‌سازی گراف، مقادیر شاخص‌های مرکزیت برای گره‌های گراف، با استفاده از توابع موجود در نرم‌افزار R محاسبه گردیدند (جدول شماره ۲). در نمودار شماره ۱ مخازن بر اساس شاخص‌های مرکزیت گره‌های متناظر آن‌ها (مؤلفه‌های آسیب‌پذیری) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مطابق نمودار شماره ۱ به ترتیب مخازن شماره ۶، ۴، ۵، ۳، ۸، ۲، ۹، ۱ و ۷ دارای بیش‌ترین مقدار شاخص بینیت (پتانسیل گسترش حوادث زنجیره‌ای) هستند. مخازن شماره ۵، ۸، ۶، ۳ و ۴، ۹، ۲، ۷ و ۱ به ترتیب از بیش‌ترین مقدار شاخص نزدیکی داخلی (پتانسیل تأثیرپذیری از سایر مخازن حین سناریوهای زنجیره‌ای) برخوردار هستند. مخازن شماره ۳، ۵، ۶، ۲، ۸، ۴، ۷، ۱ و ۹ به ترتیب دارای بیش‌ترین مقدار شاخص نزدیکی خارجی (پتانسیل راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای) هستند. مخازن شماره ۳، ۵، ۲، ۶، ۴، ۸، ۱، ۷ و ۹ به ترتیب از بیش‌ترین مقدار شاخص نزدیکی کل برخوردار هستند؛ به‌عبارت‌دیگر این مخازن به ترتیب آسیب‌پذیرترین مخازن ازنظر پتانسیل راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای و تأثیرپذیری از سایر مخازن هنگام وقوع آن به‌صورت توأم هستند.

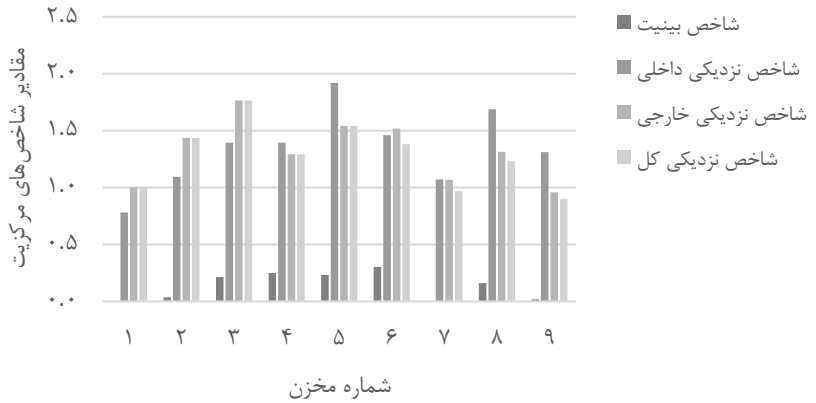
بحث

در این پژوهش مخازن موردمطالعه براساس شاخص‌های مرکزیت گره‌های متناظر آن‌ها ازجمله بینیت و نزدیکی، رتبه‌بندی شدند. همان‌طور که نمودار ۱ نشان می‌دهد مخزن شماره ۶ دارای بیش‌ترین مقدار شاخص بینیت (۰/۳۰۳۶) است و پس‌ازآن به ترتیب مخازن شماره ۴، ۵ و ۳ بالاترین شاخص بینیت را در میان ۹ مخزن موردمطالعه دارند. بر اساس نظریه گراف، شاخص بینیت یک گره نشان می‌دهد که چه تعداد از گره‌های گراف برای ارتباط سریع‌تر با یکدیگر (با واسطه کمتر) به این گره نیازمندند. هرچه بینیت یک گره بالاتر باشد یعنی آن گره در مکان بحرانی‌تری قرار گرفته‌است و توانایی بیشتری در تسهیل گسترش یک اثر بین سایر گره‌های گراف دارد. از منظر گسترش حادثه میان مخازن (به‌واسطه تشعشع حرارتی ناشی از حریق) نیز چنین استدلال می‌شود که مخزن دارای بالاترین شاخص بینیت (مخزن ۶) دارای بیش‌ترین پتانسیل گسترش سناریوهای زنجیره‌ای است؛ بنابراین اگر این مخزن در هر مرحله از یک سناریوی زنجیره‌ای دچار حریق گردد، مسیرهای

جدول ۲. شاخص‌های مرکزیت محاسبه‌شده برای هریک از گره‌ها (مخازن).

شماره مخزن	شاخص بینیت	شاخص نزدیکی داخلی	شاخص نزدیکی خارجی	شاخص نزدیکی کل
۱	۰	۰/۷۸۰۵	۱	۱
۲	۰/۰۳۵۷	۱/۰۹۴۴	۱/۴۳۶۳	۱/۴۳۶۳
۳	۰/۲۱۴۳	۱/۳۹۳۷	۱/۷۶۶۰	۱/۷۶۶۰
۴	۰/۲۵	۱/۳۹۳۷	۱/۲۹۲۴	۱/۲۹۲۴
۵	۰/۲۳۲۱	۱/۹۱۸۵	۱/۵۴۱۴	۱/۵۴۱۴
۶	۰/۳۰۳۶	۱/۴۵۹۸	۱/۵۱۸۰	۱/۳۸۱۷
۷	۰	۱/۰۷۰۹	۱/۰۶۸۱	۰/۹۶۸۵
۸	۰/۱۶۰۷	۱/۶۸۷۸	۱/۳۱۳۶	۱/۲۳۲۷
۹	۰/۰۱۷۸	۱/۳۱۱۵	۰/۹۵۸۱	۰/۸۹۹۹

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]



نمودار ۱. مقایسه مخازن بر اساس مقادیر شاخص‌های مرکزیت گره‌های متناظر آن‌ها.

گسترش حادثه را تا بالاترین حد ممکن تسهیل خواهد کرد. همان‌طور که گراف مدل‌سازی شده در شکل ۳ نشان می‌دهد وقوع حریق در هر یک از مخازن شماره ۲، ۳، ۵، ۷، ۸ و ۹ می‌تواند موجب شکست مخزن ۶ و وقوع حادثه در آن شود. از سوی دیگر درصورتی‌که مخزن ۶ دچار حریق گردد، می‌تواند موجب گسترش حادثه به مخازن شماره ۳، ۵، ۷، ۸ و ۹ گردد که هریک از این مخازن نیز می‌توانند به‌صورت زنجیره‌وار مخازن هدف مربوط به خود را متأثر نمایند. مطابق نمودار ۱ مخزن شماره ۵ دارای بیش‌ترین مقدار شاخص نزدیکی داخلی (۱/۹۱۸۵) است و پس‌ازآن به ترتیب مخازن شماره ۸، ۶، ۳ و ۴ (مخازن ۳ و ۴ دارای شاخص نزدیکی برابر هستند) بالاترین شاخص نزدیکی داخلی را دارند. شاخص نزدیکی داخلی یک گره در گراف بیان‌گر سرعت دسترسی گره‌های دیگر به آن است و بالاتر بودن این شاخص برای یک گره نشان می‌دهد که در مدت‌زمان کم‌تری می‌تواند از سایر گره‌ها تأثیر بپذیرد. با توجه به شکل ۳، وقوع حریق در هریک از مخازن شماره ۲، ۳، ۴، ۶ و ۸ (به‌صورت یک حریق اولیه یا به‌واسطه سناریوهای زنجیره‌ای) می‌تواند مخزن شماره ۵ را متأثر سازد. باید گفت که مخازن نام‌برده مخازنی هستند که مستقیماً می‌توانند مخزن شماره ۵ را هدف خود قرار دهند. به‌طور مثال مخزن شماره ۱ نیز از طریق گسترش حادثه به مخزن ۲ می‌تواند مخزن ۵ را تحت تأثیر قرار دهد. بالاتر بودن شاخص نزدیکی داخلی مخزن شماره ۵، نشان‌دهنده تأثیرپذیری بالای آن از حوادث مربوط به سایر مخازن موردمطالعه است. با توجه به نمودار ۱، مخزن شماره ۳ دارای بالاترین مقدار شاخص نزدیکی خارجی (۱/۷۶۶۰) است و پس‌ازآن به ترتیب مخازن شماره ۵، ۶ و ۲ بیش‌ترین شاخص نزدیکی خارجی را در میان ۹ مخزن موردمطالعه دارند. گرهی که دارای بیش‌ترین مقدار نزدیکی خارجی است، سرعت دسترسی بیشتری به گره‌های دیگر دارد و در مدت‌زمان کمتری می‌تواند روی آن‌ها اثر بگذارد؛ بنابراین می‌توان چنین استدلال کرد که شروع حریق از مخزن دارای بالاترین مقدار نزدیکی خارجی (مخزن شماره ۳) با سرعت بیشتری می‌تواند موجب درگیر شدن سایر مخازن شده و منجر به آغاز حادثه زنجیره‌ای شدیدتری گردد. به‌عبارت‌دیگر می‌توان گفت که مخزن شماره ۳ دارای بیش‌ترین پتانسیل راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای است. مطابق سناریوهای زنجیره‌ای مدل‌سازی شده در شکل ۳، وقوع یک حریق اولیه در مخزن ۳ می‌تواند موجب وقوع حریق ثانویه در مخازن شماره ۲، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ شود؛ به همین ترتیب هریک از این مخازن نیز می‌توانند مخازن هدف خود را متأثر نموده و حادثه را به‌مراتب بالاتر گسترش دهند. بر اساس تعریف، شاخص نزدیکی کل برای یک گره میزان دسترسی آن گره به سایر گره‌ها و میزان دسترس‌پذیری از آن‌ها را به‌صورت توأم نشان می‌دهد؛ به همین جهت این شاخص می‌تواند احتمال گسترش حادثه از یک مخزن به سایر مخازن و همچنین احتمال گسترش حادثه از سایر مخازن به آن را به‌صورت کلی نشان دهد. با توجه به این استدلال، می‌توان توالی احتمالی شرکت مخازن در حریق زنجیره‌ای را به‌صورت مخازن شماره ۳، ۵، ۲، ۶، ۴، ۸، ۱، ۷ و ۹ پیش‌بینی کرد (با توجه به رتبه‌بندی مخازن بر اساس شاخص نزدیکی کل در نمودار ۱).

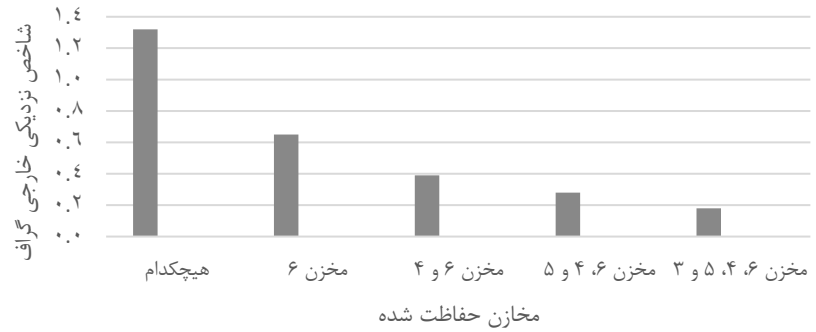
تحلیل آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص‌های گراف نه‌تنها امکان شناسایی مخازن بحرانی آغازگر و گسترش‌دهنده حریق‌های زنجیره‌ای را فراهم می‌کند، بلکه با بهره‌گیری از نتایج آن می‌توان برای مدیریت ایمنی این حوادث نیز برنامه‌ریزی کرد. همان‌گونه که حذف گره دارای بالاترین شاخص بینیت از گراف منجر به بیش‌ترین

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

گسستگی و انفصال در ساختار گراف می‌گردد، محافظت از مخازن دارای بالاترین شاخص بینیت نیز منجر به قطع مسیرهای 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 زنجیره‌ای جلوگیری نماید. تحلیل آسیب‌پذیری با استفاده از مدل گراف این امکان را فراهم می‌کند که آسیب‌پذیرترین مخازن ازنظر میزان مشارکت آن‌ها در شروع و گسترش حوادث زنجیره‌ای در اولویت اقدامات حفاظتی قرار گیرند. در مطالعات انجام‌گرفته تاکنون رویکردهای مختلفی به‌منظور مدیریت ایمنی حوادث زنجیره‌ای مورد استفاده قرارگرفته‌اند. کوزانی[1] و همکاران (۲۰۰۹) با تمرکز بر رویکرد ایمنی ذاتی[2]، مجموعه‌ای از شاخص‌ها را برای تعیین واحدهای بحرانی در صنایع فرآیندی ارائه کرده‌اند (۴۳). مطالعاتی نیز در ارتباط با تعیین فواصل ایمنی و مقدار ذخیره ایمن مواد برای کاهش آسیب‌پذیری صنایع شیمیایی نسبت به حوادث زنجیره‌ای انجام شده‌است (۴۴, ۴۵). باوجوداینکه رویکردهای ایمنی ذاتی مانند فواصل ایمنی میان واحدهای مخاطره‌آمیز می‌تواند نقش مهمی در مدیریت ریسک حوادث زنجیره‌ای داشته باشد؛ اما اجرای مؤثر آن‌ها بیشتر مربوط به مرحله طراحی واحدها است و در تأسیسات در حال بهره‌برداری با محدودیت‌های اقتصادی و عملیاتی روبه‌رو می‌شود. در کنار روش‌های ایمنی ذاتی، استفاده از موانع ایمنی فعال و غیرفعال که به‌عنوان موانع ایمنی افزودنی شناخته می‌شوند ازنظر جلوگیری یا به تأخیر انداختن شروع و گسترش سناریوهای زنجیره‌ای حائز اهمیت است (۴۶). مطالعه خاکزاد و همکاران (۲۰۱۷) در زمینه اختصاص بهینه اقدامات حفاظتی در برابر حوادث زنجیره‌ای نشان داد که حفاظت فعال[3] از تجهیزات بحرانی آغازگر و حفاظت غیرفعال[4] از تجهیزات بحرانی گسترش‌دهنده سناریوهای زنجیره‌ای، مؤثرترین راهکارها برای کاهش آسیب‌پذیری صنایع شیمیایی نسبت به حوادث زنجیره‌ای ناشی از حریق هستند (۵). به همین خاطر در این مطالعه تأثیر ضدحریق‌سازی (به‌عنوان یک روش حفاظت غیرفعال) مخازن بحرانی گسترش‌دهنده و استفاده از سیستم اسپرینکلر (به‌عنوان یک روش حفاظت فعال) برای مخازن بحرانی آغازگر، بر کاهش آسیب‌پذیری مجموعه مخازن مورد بررسی قرارگرفته‌است. نمودار ۲ تأثیر ضدحریق‌سازی چهار مخزن دارای بیش‌ترین پتانسیل گسترش حادثه (به ترتیب مخازن شماره ۶، ۴، ۵ و ۳) را بر کاهش آسیب‌پذیری مجموعه مخازن نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی فرض شده است که مخازن موردنظر با استفاده از مواد ضدحریق دارای عملکرد بالا (مانند پوشش پف‌کننده، اسپری ورمیکولیت و پوشش‌های سیلیکایی) مجهز گردیده‌اند. گفتنی است که برای در نظر گرفتن تأثیر این اقدام حفاظتی در مدل گراف فرض شده است که مخزن ضدحریق‌شده برای مدت ۶۰ دقیقه هیچ بار حرارتی را از مخازن مجاور خود دریافت نمی‌کند (۴۶, ۴۷). به‌عبارت‌دیگر هیچ کمانی به سمت گره متناظر آن در مدل گراف ترسیم نمی‌شود. برای کمی ساختن آسیب‌پذیری مجموعه ۹ مخزن موردمطالعه، از شاخص نزدیکی خارجی گراف (میانگین مقدار نزدیکی خارجی گره‌های متناظر مخازن) استفاده شده‌است. همان‌طور که نمودار ۲ نشان می‌دهد با ضدحریق‌سازی چهار مخزن دارای بیش‌ترین استعداد گسترش حادثه، می‌توان آسیب‌پذیری مجموعه مخازن را از ۱/۳ (حالتی که هیچ اقدام حفاظتی وجود ندارد) به ۰/۱۸ کاهش داد. نمودار ۳ تأثیر استفاده از سیستم اسپرینکلر برای چهار مخزن دارای بیش‌ترین پتانسیل راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای (به ترتیب مخازن شماره ۳، ۵، ۶ و ۲) را بر کاهش آسیب‌پذیری مجموعه مخازن نشان می‌دهد. برای در نظر گرفتن تأثیر این اقدام حفاظتی در مدل گراف فرض شده است که تشعشع حرارتی ساطع‌شونده از مخزن مجهز به اسپرینکلر به میزان ۶۰ درصد کاهش می‌یابد (۴۶, ۴۷). لازم به ذکر است که دسترس‌پذیری[5] و اثربخشی[6] سیستم‌های حفاظتی در مدل‌سازی آن‌ها ۱۰۰ درصد فرض شده است. همان‌طور که نمودار ۳ نشان می‌دهد با تجهیز چهار مخزن دارای بیش‌ترین استعداد راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای به سیستم اسپرینکلر می‌توان آسیب‌پذیری مجموعه مخازن را از ۱/۳ به ۰/۹۱ کاهش داد. بنابراین حفاظت از آسیب‌پذیرترین مخازن خصوصاً ضدحریق‌سازی مخازن بحرانی گسترش‌دهنده می‌تواند آسیب‌پذیری مجموعه مخازن نسبت به حوادث زنجیره‌ای را به میزان قابل توجهی کاهش دهد؛ بااین‌حال هزینه پیاده‌سازی راهکارهای حفاظتی نیز در انتخاب نوع اقدام حفاظتی و این‌که چه تعداد از مخازن (بر اساس مؤلفه‌های آسیب‌پذیری) در اولویت قرار گیرند حائز اهمیت است. با توجه به این‌که معمولاً به دلیل محدودیت منابع مالی

1 Cozzani
2 Inherent Safety
3 Active Protection
4 Passive Protection
5 Availability
6 Effectiveness

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]



نمودار ۲. تأثیر ضدحریق‌سازی مخازن بحرانی گسترش‌دهنده‌ی سناریوهای زنجیره‌ای بر کاهش آسیب‌پذیری مجموعه مخازن.



نمودار ۳. تأثیر استفاده از سیستم اسپرینکلر برای مخازن بحرانی آغازگر سناریوهای زنجیره‌ای بر کاهش آسیب‌پذیری مجموعه مخازن.

اقدامات حفاظتی نیازمند توجیه اقتصادی هستند، شاخص نزدیکی خارجی گراف (معیار آسیب‌پذیری مجموعه مخازن) می‌تواند در کنار سایر معیارهای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب راهکارهای حفاظتی (مانند هزینه اجرای آن) به کار گرفته شود و موجب دستیابی به راهکارهای بهینه اقتصادی گردد.

نتایج حاصل از تحلیل آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص‌های گراف علاوه بر کاربرد آن‌ها در تخصیص بهینه موانع ایمنی می‌تواند در برنامه‌ریزی واکنش در شرایط اضطراری نیز مورد استفاده قرارگیرد. هنگام وقوع حریق‌های زنجیره‌ای در مخازن خصوصاً درصورتی‌که منابع کافی اطفا حریق در دسترس نباشد، این مسئله حائز اهمیت است که کدام مخازن می‌بایست در اولویت عملیات اطفا حریق قرار گیرند. قرارگیری مخازن دارای بالاترین پتانسیل ایجاد حوادث زنجیره‌ای در اولویت عملیات اطفا حریق، می‌تواند از وقوع شدیدترین سناریوهای زنجیره‌ای جلوگیری کرده یا آن را به تأخیر اندازد. نتایج مطالعه خاکزاد (۲۰۱۸) نشان داد که خاموش کردن و سرد کردن واحدهایی با بیش‌ترین مقدار شاخص نزدیکی خارجی راهکار بهینه اطفا حریق است (۴۸).

شایان ذکر است که یکی از محدودیت‌های مطالعه حاضر تأثیر سناریوهای نشتی مختلف و پارامترهای شرایط جوی متفاوت بر نتایج به‌دست‌آمده است که با توجه به محدودیت زمان تحقیق، امکان انجام آن‌ها در این پژوهش وجود نداشت. تغییر پارامترهای نشتی و شرایط جوی به‌عنوان ورودی‌های نرم‌افزار ALOHA می‌توانند منجر به تغییر مقادیر بردارهای تشدید (تشعشع حرارتی) محاسبه‌شده گردند و درنهایت رتبه‌بندی متفاوتی از آسیب‌پذیرترین مخازن حاصل شود. در این مطالعه بدترین سناریو (رهایش بزرگ و گرم‌ترین ماه سال) برای مدل‌سازی سناریو حوادث مخازن استفاده شد. برای دستیابی به نتایج کامل‌تر می‌توان مدل‌سازی پیامد حوادث را برای سایر سناریوهای احتمالی به‌صورت جداگانه انجام داد و شاخص‌های مرکزیت گره‌های گراف (مؤلفه‌های آسیب‌پذیری مخازن) را برای سناریوهای مذکور به‌صورت مجزا محاسبه کرد. در مطالعه خاکزاد و همکاران (۲۰۱۶) برای تعیین آسیب‌پذیرترین مخازن در حالت کلی از میانگین شاخص‌های گراف محاسبه‌شده تحت شرایط جوی مختلف استفاده شده‌است (۳).

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

نتیجه‌گیری

مدل نظریه گراف ابزار سودمندی برای مدل‌سازی گرافیکی سناریوهای زنجیره‌ای محتمل میان تجهیزات مخاطره‌آمیز صنایع فرآیندی (ازجمله مخازن) و همچنین تحلیل آسیب‌پذیری آن‌ها نسبت به وقوع حوادث زنجیره‌ای است. با استفاده از شاخص‌های مرکزیت بینیت و نزدیکی می‌توان آسیب‌پذیرترین مخازن را از نظر امکان راه‌اندازی و گسترش سناریوهای زنجیره‌ای توسط آن‌ها مشخص نمود. ماهیت غیراحتمالاتی مدل گراف موجب کاهش حجم و زمان انجام محاسبات تحلیل آسیب‌پذیری در مقایسه با روش‌های احتمالاتی می‌گردد. نتایج حاصل از تحلیل آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص‌های گراف می‌توانند درزمینه مدیریت ریسک حوادث زنجیره‌ای مورداستفاده قرار گیرند و آسیب‌پذیرترین مخازن برای اختصاص اقدامات حفاظتی مانند موانع ایمنی فعال و غیرفعال در اولویت قرار گیرند. همچنین با استفاده از شاخص‌های مرکزیت می‌توان میزان کاهش آسیب‌پذیری مجموعه مخازن به‌واسطه پیاده‌سازی موانع ایمنی را محاسبه کرد و از این طریق راهکارهای اختصاص بهینه اقدامات حفاظتی را مشخص نمود. در پژوهش حاضر تأثیر برخی از اقدامات حفاظت در برابر حریق بر کاهش آسیب‌پذیری مجموعه مخازن موردمطالعه نسبت به حوادث زنجیره‌ای نشان داده شد. انجام یک ارزیابی اقتصادی برای انتخاب راهکارهای بهینه کاهش آسیب‌پذیری مجموعه مخازن در مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد. به‌طور مثال می‌توان بررسی کرد که با در نظر گرفتن محدودیت منابع مالی، پیاده‌سازی چه نوعی از اقدامات حفاظتی و برای چه تعداد از مخازن بحرانی آغازگر و گسترش‌دهنده سناریوهای زنجیره‌ای، بیش‌ترین کاهش را در آسیب‌پذیری مجموعه مخازن ایجاد خواهد کرد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از کارشناسان ایمنی و مسئولین اداره HSE شرکت پالایش نفت بابت همکاری ایشان در اجرای این تحقیق تشکر و قدردانی می‌نمایم.

منابع

1. Reniers GL, Audenaert A. Preparing for major terrorist attacks against chemical clusters: Intelligently planning protection measures wrt domino effects. Process Safety and Environmental Protection. 2014;92(6):583-9.
2. Khakzad N, Reniers G. Low-capacity utilization of process plants: A cost-robust approach to tackle man-made domino effects. Reliability Engineering & System Safety. 2018.
3. Khakzad N, Reniers G, Abbassi R, Khan F. Vulnerability analysis of process plants subject to domino effects. Reliability Engineering & System Safety. 2016;154:127-36.
4. Khakzad N, Reniers G. Using graph theory to analyze the vulnerability of process plants in the context of cascading effects. Reliability Engineering & System Safety. 2015;143:63-73.
5. Khakzad N, Landucci G, Reniers G. Application of Graph Theory to Cost-Effective Fire Protection of Chemical Plants During Domino Effects. Risk analysis. 2017;37(9):1652-67.
6. Jabbari M, Kavousi A. Consequence Analysis of Flammable Chemical Releases from a pipeline. The Fourth International Conference on Computational Sciences and Optimization (CSO 2011). Kunming and Lijiang, Yunnan, China, April 15-19, 2011.
7. Jabbari M, Atabi F, Ghorbani R. Key airborne concentrations of chemicals for emergency response planning in HAZMAT road transportation-margin of safety or survival. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020:104139.
8. Reniers G, Cozzani V. 3 - Features of Escalation Scenarios. Domino Effects in the Process Industries. Amsterdam: Elsevier; 2013. p. 30-42.
9. Necci A, Cozzani V, Spadoni G, Khan F. Assessment of domino effect: State of the art and research Needs. Reliability Engineering & System Safety. 2015;143:3-18.
10. Cozzani V, Gubinelli G, Antonioni G, Spadoni G, Zanelli S. The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. Journal of hazardous Materials. 2005;127(1):14-30.
11. Cozzani V, Gubinelli G, Salzano E. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. Journal of hazardous materials. 2006;129(1):1-21.
12. Khakzad N, Reniers G. Application of Bayesian network and multi-criteria decision analysis to risk-based design of chemical plants. Chemical Engineering Transactions. 2016;48:223-8.
13. Abdolhamidzadeh B. Present a model for evaluation of domino effects second level in process industrials [Thesis, Phd]. Tehran: Sharif University of Technology; 2010. [Persian].
14. Rad AH. Quantitative Risk Assessment of Domino Accidents using GIS [Thesis, M.Sc]. Tehran: Sharif University of Technology; 2011. [Persian].
15. Darbra R, Palacios A, Casal J. Domino effect in chemical accidents: main features and accident sequences. Journal of hazardous materials. 2010;183(1):565-73.
16. Abdolhamidzadeh B, Abbasi T, Rashtchian D, Abbasi

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

SA. Domino effect in process-industry accidents–An inventory of past events and identification of some patterns. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2011;24(5):575-93.
17. Cozzani V, Salzano E. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models. Journal of Hazardous Materials. 2004;107(3):67-80.
18. Cozzani V, Antonioni G, Spadoni G. Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool. Journal of Loss Prevention in the process industries. 2006;19(5):463-77.
19. Antonioni G, Spadoni G, Cozzani V. Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2009;22(5):614-24.
20. Zhou J, Reniers G. A matrix-based modeling and analysis approach for fire-induced domino effects. Process Safety and Environmental Protection. 2018;116:347-53.
21. Rad A, Abdolhamidzadeh B, Abbasi T, Rashtchian D. FREEDOM II: An improved methodology to assess domino effect frequency using simulation techniques. Process Safety and Environmental Protection. 2014;92(6):714-22.
22. Abdolhamidzadeh B, Abbasi T, Rashtchian D, Abbasi SA. A new method for assessing domino effect in chemical process industry. Journal of hazardous materials. 2010;182(1):416-26.
23. Zhang L, Landucci G, Reniers G, Khakzad N, Zhou J. DAMS: A Model to Assess Domino Effects by Using Agent-Based Modeling and Simulation. Risk analysis. 2018;38(8):1585-600.
24. Reniers GL, Dullaert W. Knock-on accident prevention in a chemical cluster. Expert systems with applications. 2008;34(1):42-9.
25. Reniers GL, Dullaert W. DomPrevPlanning: user-friendly software for planning domino effects prevention. Safety Science. 2007;45(10):1060-81.
26. Khakzad N. Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures. Reliability Engineering & System Safety. 2015;138:263-72.
27. Khakzad N, Khan F, Amyotte P, Cozzani V. Domino effect analysis using Bayesian networks. Risk Analysis. 2013;33(2):292-306.
28. Khakzad N, Amyotte P, Cozzani V, Reniers G, Pasman H. How to address model uncertainty in the escalation of domino effects? Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018;54:49-56.
29. Ji J, Tong Q, Khan F, Dadashzadeh M, Abbassi R. Risk-based domino effect analysis for fire and explosion accidents considering uncertainty in processing facilities. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2018;57(11):3990-4006.
30. Chen C, Reniers G, Khakzad N. A thorough classification and discussion of approaches for modeling and managing domino effects in the process industries. Safety science. 2020;125:104618.
31. ALOHA. US Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmospheric Administration. Available online at: https://www.epa.gov/cameo/aloha-software.
32. R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2009.
33. Csardi G, Nepusz T. The igraph software package for complex network research. InterJournal, Complex Systems. 2006;1695(5):1-9.
34. Freeman LC. Centrality in social networks conceptual clarification. Social networks. 1978;1(3):215-39.
35. Sadeghi A, Jabbari Gharabagh m, Rezaeian M, Alidoosti A. Fire and Explosion Risk Assessment in a Combined Cycle Power Plant. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE). 2020.
36. 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 Occupational Health. 2018;15(4):8-20. [Persian].
37. Chang JI, Lin C-C. A study of storage tank accidents. Journal of loss prevention in the process industries. 2006;19(1):51-9.
38. FRED, Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments, HSE 2012.
39. Atabi F, Ghorbani R, Jabbari M. Assessment of safe distance for five toxic materials commonly in the accidents of chemical road transportation using ALOHA and PHAST software and CEI index (Case Study: Tehran-Qazvin Highway). Iran Occupational Health. 2017;14(4):42-35. [Persian].
40. Jabbari M, Sajjadi S, Hossein M, Gholamnia R, editors. Determination of Airborne Quantity and Consequence Analysis of 1, 3-Butadiene Release from a Petrochemical Plant Pipeline. Applied Mechanics and Materials; 2013: Trans Tech Publ.
41. Beheshti MH, Hajizadeh R, Mehri A, Borhani Jebeli M. Modeling the result of hexane leakage from storage tanks and planning a emergency response programm in a petrochemical complex. Iran Occupational Health. 2016;13(1):69-79. [Persian].
42. MARPLOT. US Environmental Protection Agency, National Oceanic and Atmospheric Administration. Available online at: https://www.epa.gov/cameo/marplot-software.
43. Cozzani V, Tugnoli A, Salzano E. The development of an inherent safety approach to the prevention of

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]

domino accidents. Accident Analysis & Prevention. 2009;41(6):1216-27.
44. Khakzad N, Khan F, Amyotte P, Cozzani V. Risk management of domino effects considering dynamic consequence analysis. Risk Analysis. 2014;34(6):1128-38.
45. Cozzani V, Tugnoli A, Salzano E. Prevention of domino effect: from active and passive strategies to inherently safer design. Journal of hazardous materials. 2007;139(2):209-19.
46. Khakzad N, Landucci G, Cozzani V, Reniers G, Pasman H. Cost-effective fire protection of chemical plants against domino effects. Reliability Engineering & System Safety. 2018;169:412-21.
47. Landucci G, Argenti F, Spadoni G, Cozzani V. Domino effect frequency assessment: The role of safety barriers. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016;44:706-17.
48. Khakzad N. A graph theoretic approach to optimal firefighting in oil terminals. Energies. 2018;11(11):3101.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.52547/ioh.18.1.201]