



## Investigating the Economic Consequences of Fire and Explosion Domino Phenomenon in an Oil Refinery Storage Tanks

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

**Davood Eskandari**, Assistant Professor, Department of Occupational Health and Safety Engineering, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

✉ **Patrick Johnny**, (\*Corresponding author), MSc in Industrial Safety, School of Public Health and Safety, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran. [Patrickjohnny1974@gmail.com](mailto:Patrickjohnny1974@gmail.com)

### Abstract

**Background and aims:** The identification of accident costs and their modeling can motivate industries to establish safety systems. Storage tanks for oil derivatives are among the significant industrial facilities that consistently contribute to domino effects in the oil industry. Thus, this study explores the economic consequences of fire and explosion domino phenomena in oil refinery storage tanks.

**Methods:** The current study employs Phast software to determine the heat flux, while R-statistical software and the igraph R package are used for graph modeling. The centrality measures (i.e., betweenness, in-closeness, out-closeness, and all-closeness) for the tank graph based on the thermal threshold of 10 kW/m<sup>2</sup> and 15 kW/m<sup>2</sup> are evaluated using R software.

**Results:** According to Dow's fire and explosion index, the hazard level of these tanks is high and intense. The results indicate that the lowest and highest values of Dow's fire and explosion index relate to kerosene and pentane and naphtha gas, respectively. The evaluation of the contact area in a domino effect scenario reveals that this effect can increase accident costs up to 2 times. Moreover, implementing essential safety plans such as a fire alarm system reduces accident costs by 50%.

**Conclusion:** The application of graph theory enables graphical modeling of domino scenarios and identification of the most vulnerable tanks concerning trigger potential and expansion of domino effects. The most vulnerable tanks are prioritized for protective measures, such as active and inactive safety barriers. Overall, the impact of implementing safety plans in reducing fire and explosion to protect the tanks is similar to that of a fire alarm system.

**Conflicts of interest:** None

**Funding:** None

### Keywords

Domino phenomenon  
Dow's fire and explosion  
index  
Graph theory  
Fire protection of oil tank

Received: 2022/07/4

Accepted : 2024/03/15

## INTRODUCTION

Flammable and explosive liquid storage tanks are prevalent in refineries, petrochemicals, petroleum warehouses, marine terminals, airports, local fuel companies, power plants, and large manufacturing facilities. One of the most significant threats to these storage tanks is the risk of fire and explosion. Typically, fires in storage tanks can lead to the dispersion and overflow of fluids, creating explosive hazards. Upon receiving sufficient energy, a fire or explosion may occur in these tanks. If this event transpires as an explosion, the blast wave may have a destructive effect on nearby tanks, potentially leading to catastrophic consequences concerning safety, health, and the environment.

Oil tanks in the refinery carry substantial safety, health, and environmental risks. Therefore, it is imperative to conduct further research to investigate the economic effects of the fire and explosion domino phenomenon in these tanks. Domino effects encompass an initial event that impacts the installation and commissioning of the device, followed by one or more subsequent events that also affect other facilities. The spread of damage can be spatial (areas not damaged in the initial event are destroyed), temporal (the same areas are affected, but secondary events occur with a delay), or both.

In light of these considerations, this study aims to evaluate the economic consequences of the fire and explosion domino phenomenon in oil refinery storage tanks.

## METHODOLOGY

This research was conducted in an oil refinery storage tank. The refinery had 111 types of tanks, including fixed roofs (cone and dome types), floating roofs (internal and external), and spherical. Given the wide range of tanks according to the refinery's aerial plan and plot plan, 10 spherical and floating roof types of tanks with different dimensions and capacities containing final products (e.g., gasoline, light naphtha, kerosene, and pentane gas) were evaluated. The steps for modeling domino scenarios and analyzing vulnerability using graph theory are as follows:

**1. Identifying the different scenarios causing domino effects:** Possible initial scenarios were identified based on the tanks' contents and operational parameters. Intense pouring of oil products, jet fire, fireball, pool fire, vapor cloud explosion, and BLEVE are the events that may create a domino effect. Regarding the leakage type, the scenario of the complete gap in the connections of the studied tanks will be considered as the selected scenario.

**2. Modeling the fire and explosion consequences:** The aim was to model the consequences of this accident. In this way, it is possible to determine the amount of damage caused by thermal radiation at

different distances from the scenario location and evaluate human damage (maximum number of losses caused by fire) using Phast 7.2 software. Steps to model consequences include discharge modeling step, propagation, and scenario effects.

**3. Consequence assessment:** After modeling, the consequences of the events are evaluated. For this purpose, the amount of losses and damages caused by the final consequence of the scenario (radiation) is calculated. Consequence assessment in this study was performed to determine the mortality rate. Probit equations were used to calculate the percentage of people affected by the radiation scenario caused by fire and tank explosion.

**4. R-statistical software:** R-statistical software and an igraph package were used for graphical modeling of domino scenarios in graph format. At this stage, a graph with specified characteristics was modeled and plotted. The centrality measures (betweenness, in-closeness, out-closeness, and all-closeness) for each node and consequently, the vulnerability indices of their respective reservoirs were calculated using functions in R software and igraph package.

Graph modeling was utilized to model the domino effect, following these steps:

**1. Step 1:** Identifying and gathering information on possible threats and hazards. At this stage, the significant hazardous pieces of equipment (10 tanks) were considered as graph nodes.

**2. Step 2:** Determining an accident scenario for each tank.

**3. Step 3:** Determining and calculating the tanks' escalation vectors (heat flux) according to the accident scenario.

**4. Step 4:** Identifying probable target tanks by comparing threshold values and escalation vectors (heat flux) obtained in the previous step.

**5. Step 5:** Determining the weight of the graph edges. These weights are used to identify probable target tanks in graph modeling.

**6. Step 6:** Obtaining the graph model by entering the weights of each node (which shows the domino effect of each tank on other tanks) into the R software and igraph package.

In this software, firstly, the weights of the edges and nodes of the graph model must be specified. Next, edges and tanks weights were analyzed as nodes considering the weights as inputs. This model calculates the centrality and betweenness indices using the software. Finally, the model was interpreted, and its vulnerability assessment was performed using the obtained indices.

## Accident costs assessment

Accident costs were determined based on the radius of exposure and area of exposure of each tank, using the fire and explosion index. Due to the unavailability

of actual prices for a tank accident, the last tank construction contract at the refinery was used as a reference to determine the price. The cost of materials in the tank was estimated based on global product prices.

The effect of implementing safety plans on Dow's fire and explosion index was determined by assigning the lowest score to the C3 fire protection factor. This factor includes fire detectors, steel frames, fire water units, special systems, sprinkler systems, water curtain systems, foam, manual fire extinguisher monitors, and cable protection.

## RESULTS

### Equipment as a graph

Equipment can indeed be modeled as a graph by representing important and hazardous equipment as nodes of a graph, with escalation vectors such as heat radiation and overpressure serving as edges. This research utilized R software and the igraph package to model the graphs for the study. The tank area was evaluated for 10 tanks, and two thresholds were considered to determine the heat flux threshold (heat dissipation) that could cause damage to adjacent units.

According to Table 1, Tanks 6, 4, 5, and 7, in that order, have the highest betweenness index, indicating they have the greatest potential for accident

propagation among the 10 tanks. Based on the all-closeness index, the most probable sequence of tank involvement begins with Tank 6. The in-closeness index reveals that Tank 3, a spherical reservoir, is most susceptible to impact compared to the other tanks. Lastly, Tank 6, with the highest out-closeness index, is most likely to trigger domino effects.

### Comparison of 10 tanks with heat flux threshold = 15

Considering the heat flux threshold of 15 kW/m<sup>2</sup> for the heat dissipation rate among the 10 tanks, the graph of these tanks and their relationship is shown in Fig. 1.

According to Table 1, Tanks 3 and 7, with the highest in-closeness index, have the greatest susceptibility to be impacted compared to the other tanks, in the order of their appearance. Tanks 7 and 9, with the highest out-closeness index, have the greatest susceptibility to triggering domino effects. Based on the all-closeness index, the most probable sequence of tank involvement starts from tanks 6, 9, 8, and 10, respectively. Tanks 7, 9, and 4, with the highest betweenness index, have the greatest potential for accident propagation among the ten tanks, in the order of their appearance.

### Determining the fire and explosion index

General process hazards are the major factors in

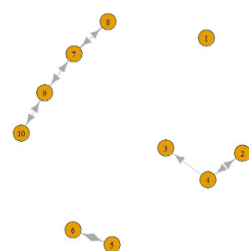


Fig. 1. Graph of the relationship between 10 tanks based on heat flux threshold=15

Table 1. Centrality measures for each node

Tank	Ten tanks with a threshold of 10 kW/m <sup>2</sup>				Ten tanks with a threshold of 15 kW/m <sup>2</sup>			
	Betweenness	All-closeness index	In-closeness index	Out-closeness index	Betweenness	All-closeness index	In-closeness index	Out-closeness index
1	0	0.052994	0.034002	0.012366	0	0.011111	0.011111	0.011111
2	0	0.056465	0.028531	0.057637	0	0.013841	0.012384	0.013841
3	0	0.072674	0.072307	0.011111	0	0.013841	0.013841	0.011111
4	0.291667	0.072939	0.031201	0.074906	0.013889	0.013986	0.012384	0.013986
5	0.25	0.084317	0.034294	0.081367	0	0.012384	0.012384	0.012384
6	0.347222	0.084674	0.034807	0.084674	0	0.012384	0.012384	0.012384
7	0.25	0.072622	0.033356	0.069541	0.055556	0.015873	0.015831	0.015873
8	0.097222	0.072939	0.034507	0.072939	0	0.015504	0.015464	0.015504
9	0.069444	0.05848	0.03202	0.057045	0.055556	0.015831	0.015873	0.015831
10	0	0.053163	0.031456	0.053163	0	0.015464	0.015504	0.015464

**Table 2.** Fire and explosion index calculations

Name of the tank	S.R.Kerosene	Blending Naphtha	C5	Gasoline	Plat Formate	Plat Formate	Gasoline	Light Iso Naphtha	Gasoline	Gasoline
(F1)	2.1	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55
(F2)	3.4	3.5	4	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Process unit hazard factor	7.14	8.925	10.2	8.925	8.925	8.925	8.925	8.925	8.925	8.925
$F_1 \times F_2 = F_3$										
Facto MF	10	21	21	16	16	16	16	21	16	16
Fire and explosion index										
Dow $F_3 \times MF = F&EI$	71.4	187.425	187.425	142.8	142.8	142.8	142.8	187.425	142.8	142.8
Degree of hazard	Limited hazard	Intense	Intense	High	High	High	High	Intense	High	High
Radius at risk										
R (m) $= F&EI * 0.256 (m)$	18	48	48	36	36	36	36	48	36	36
Area at risk $m^2$	1049	7234	7234	4069	4069	4069	4069	7234	4069	4069

**Table 3.** The loss control factor

Loss control credit factor	S. R. Kerosene	Blending Naphtha	C5	Gasoline	Plat Formate	Plat Formate	Gasoline	Light Iso Naphtha	Gasoline	Gasoline
$C_1$	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
$C_2$	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
$C_3$	0.46	0.46	0.72	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
$C = C_1 \times C_2 \times C_3$	0.30	0.30	0.49	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30

determining the damage caused by accidents. Exothermic chemical reactions, endothermic processes, transportation, handling and storage of materials, enclosed or internal process units, access to the area, drainage, and spill control are the six factors that determine the general process hazards. Special process hazards, which are the major factors affecting the probability of an accident, contain the factors for toxic substances, pressure, low temperature, the quantity of flammable/unstable materials, corrosion and erosion, leakage, and using flammable equipment. The process unit hazards were estimated by multiplying the general hazard factor and process hazard. The product of the unit hazard factor multiplied by the material factor determines the Dow fire and explosion index number (Table 2).

#### Determining the loss control factor

Various methods are available to control hazards and operating conditions in the workplace. These factors were analyzed in the form of the C1 process control factor with items of emergency power, explosion control cooling systems, emergency stop system, computer controls, neutral gas, operational instructions, review of material reactivity, and other process hazard analyses. The C2 material separation factor included the remote control valve, drainage and leakage control, and automatic locking. Fire protection

factor C3 included items such as fire detectors, steel frames, fire water, special system, spray systems, water curtain, foam, manual fire extinguisher monitors, and cable protection. Table 3 shows the loss control factor.

#### The costs of the domino effect

The costs caused by the domino effect were investigated and compared with normal fires. According to graph theory, Tanks 4 and 7 have the potential to create a domino effect in heat fluxes of 10 kW/m<sup>2</sup> and 15 kW/m<sup>2</sup>. Next, the contact area of the costs caused by the fire and tank explosion during the domino phenomenon was determined accordingly. Table 4 shows the results.

#### The effect of implementing safety plans in reducing fire and explosion

In the present study, the effect of safety plans was evaluated. Safety plans in the Dow's fire and explosion index were considered in the fire protection factor of C3. The results showed that a lack of safety plans leads to more than double the costs in the event of an accident.

#### DISCUSSION

At the flux threshold of  $Q_{th} = 10 \text{ kW} / \text{m}^2$ , Tank 6, with the highest betweenness index, has the highest

**Table 4.** Tanks with the possibility of creating a fire-induced domino effect

Row	Tank number	Type of the tank	Fluid in service	Contact area in terms of Dow's index	Contact area in terms of the domino phenomenon	The total value of the tank	The value of the contact area in terms of Dow's index	The value of the area in terms of the domino phenomenon
1	TK-2027	Floating roof	Gasoline	2026	2033-2021-2022-2028-2026	6.950	14.45	27.2
2	TK-2033	Floating roof	Gasoline	2028	2032-2031-2028	6.950	13.73	21.6

potential for accident propagation among 10 tanks. Also, at a flux threshold of 15 kW/m<sup>2</sup>, Tanks 7, 9, and 4 show the highest potential for accident propagation among the ten tanks, in the order of their appearance. The costs caused by a domino effect were evaluated and compared with normal fires. Afterward, the cost caused by a domino phenomenon was compared with the cost of accidents based on the Dow's fire and explosion index. Finally, the costs caused by a domino effect were investigated and compared with normal fires. According to the graph theory, Tanks 6 and 7 have the susceptibility to domino effect propagation at threshold heat radiation of 10 kW/m<sup>2</sup> and 15 kW/m<sup>2</sup>, respectively. The costs caused by the fire and explosion in tanks during the domino effect were determined. Domino accidents can double the cost of an accident. Khakzad et al. (2017) studied the application of graph theory to cost-effective fire protection of chemical plants during domino effects. They reported that active fire protection of installations with the highest accuracy and passive fire protection of installations with the highest betweenness score are the most effective strategies for reducing the vulnerability of chemical plants to fire-induced domino effects. They found that the lack of fire prevention equipment increases the potential costs of damage to the plant, which is consistent with the results of the present study. Ahmadi et al. (2020) reviewed atmospheric storage tank fire scenarios: costs and causes. The cost caused by domino effects was eight times higher than that of events without domino effects. In the present study, the cost caused by domino effects was twice that of events without domino effects.

## CONCLUSION

Identifying the costs of accidents and modeling them can encourage industries to build safety systems. Oil storage tanks are among the most important industrial installations effective in causing domino accidents in the oil industry. In the present study, Phast software was used to determine the heat flux, and R-statistical software and the igraph package were used to model the graph. The centrality measures (i.e., betweenness, in-closeness, out-closeness, and all-closeness) for the tank graph were evaluated using R software based on the thermal thresholds of 10 kW/m<sup>2</sup> and 15 kW/m<sup>2</sup>. According to the Dow's fire and explosion index, the hazard degree of these tanks was high and intense. Results showed that the lowest and the highest value of Dow's fire and explosion index is related to kerosene and pentane and naphtha gas, respectively. Assessing the contact area in case of a domino effect showed that a domino effect can increase the cost of the accident up to 2 times. Also, implementing necessary safety plans such as a fire alarm system reduces the cost of accidents by 50%.

## ACKNOWLEDGMENT

This article is extracted from a master's thesis written at Shahid Beheshti University of Medical Sciences. The authors thank the refinery employee, the Faculty of Health and Safety officials, and reviewers for collaborating in this research.

## CONFLICT OF INTEREST

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

## How to cite this article:

Mousa Jabbari, Davood Eskandari, Patrick Johnny. Investigating the Economic Consequences of Fire and Explosion Domino Phenomenon in an Oil Refinery Storage Tanks. *Iran Occupational Health*. 2023 (01 Aug);20:13.

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





## بررسی پیامدهای اقتصادی پدیده دومینو حریق و انفجار مخازن در یک پالایشگاه نفت

**موسی جباری:** استاد، مرکز تحقیقات ارتقای سلامت محیط کار، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران؛ گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

**داود اسکندری:** استادیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه ای و ایمنی کار، دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.  
**پاتریک جانی:** \*نویسنده مسئول (کارشناس ارشد ایمنی صنعتی دانشکده بهداشت و ایمنی، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران. Patrickjohnny1974@gmail.com

### چکیده

**کلیدواژه‌ها**  
پدیده دومینو  
شاخص حریق و انفجار DOW  
نظریه گراف  
حفاظت از حریق مخازن نفت

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵

**زمینه و هدف:** شناسایی هزینه‌های حوادث و مدل‌سازی آن‌ها می‌تواند به ترغیب نمودن صنایع به ایجاد سیستم‌های ایمنی کمک کند. در این میان، مخازن ذخیره‌سازی مشتقات نفتی یکی از مهم‌ترین تأسیسات صنعتی هستند که همواره در بروز حوادث دومینو در صنعت نفت مؤثر می‌باشند. لذا این پژوهش باهدف بررسی پیامدهای اقتصادی پدیده دومینو حریق و انفجار در مخازن نفت یک صنعت پالایشگاهی انجام گردید.

**روش بررسی:** در این پژوهش، از نرم‌افزار PHAST برای تعیین شار حرارتی و مدل‌سازی گراف‌ها با استفاده از بسته graph در نرم‌افزار برنامه‌نویسی R انجام گردید. بررسی شاخص‌های نزدیکی داخلی، نزدیکی بیرونی، شاخص درونی کل و شاخص بینیت برای گراف مخازن ده‌گانه بر اساس آستانه حرارتی  $10 \text{ KW/m}^2$  و  $15 \text{ KW/m}^2$  از طریق نرم‌افزار R انجام شد.

**یافته‌ها:** درجه خطر این مخازن با توجه به شاخص حریق و انفجار DOW در محدوده زیاد و شدید قرار گرفت. شاخص حریق و انفجار در مخزن نفت سفید ۷۱ (کمترین شاخص) و در مخازن پنتان و نفتا برابر ۱۸۷/۴۲ محاسبه شد. بررسی ارزش ناحیه تماس در صورت ایجاد پدیده دومینو نشان داد که حادثه دومینو می‌تواند تا ۲ برابر هزینه‌های حادثه را افزایش دهد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد که حادثه دومینو می‌تواند تا ۲ برابر هزینه‌های حادثه را افزایش دهد. همچنین تأثیر اجرای طرح‌های ایمنی از قبیل سیستم اعلام حریق و اطفاء حریق کاهش ۵۰ درصدی هزینه حوادث می‌باشد.

**تعارض منافع:** گزارش نشده است.

**منبع حمایت کننده:** ندارد.

شیوه استناد به این مقاله:

Mousa Jabbari, Davood Eskandari, Patrick Johnny. Investigating the Economic Consequences of Fire and Explosion Domino Phenomenon in an Oil Refinery Storage Tanks. Iran Occupational Health. 2023 (01 Aug);20:13.

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

## مقدمه

مخازن ذخیره مایعات قابل اشتعال و قابل انفجار در پالایشگاه‌ها، پتروشیمی‌ها، انبارهای فرآورده‌های نفتی و پایانه‌های دریایی، فرودگاه‌ها، شرکت‌های سوخت محلی، نیروگاه‌ها و تأسیسات تولیدی بزرگ مانند کارخانه‌ها یافت می‌شود (۱). مخازن ذخیره‌سازی مایعات قابل اشتعال و انفجار به روش‌های گوناگون و با توجه به امکانات موجود ساخته می‌شوند (۲). این مخازن می‌توانند از ۵ متر تا ۱۵ متر قطر داشته باشند و می‌توانند به‌طور متوسط دارای ۱۵ متر ارتفاع باشند (۳). مایعات قابل اشتعال همانند نفت سنگین، بنزین، دیزل، نفت سفید و غیره در مخازن ذخیره شده در دمای اتمسفر یا تحت فشار ذخیره می‌شوند (۴). به‌طور کلی وقوع حریق در مخازن ذخیره سازی سبب پراکندگی و سرریز شدن سیالات و میعان‌ات موجود در آن‌ها و به وجود آمدن خطرات انفجاری می‌گردد. اگر این مخازن به مقدار کافی انرژی به دست آورند، ممکن است باعث آتش سوزی یا انفجار شوند. اگر این اتفاق به صورت انفجار روی دهد، موج ایجاد شده در اثر انفجار ممکن است یک اثر تخریب‌کننده ایجاد کرده و مخازن نزدیک را تحت تأثیر قرار داده و می‌تواند یک وضعیت فاجعه بار از نظر پیامدهای ایمنی، بهداشتی و زیست محیطی ایجاد کند (۵).

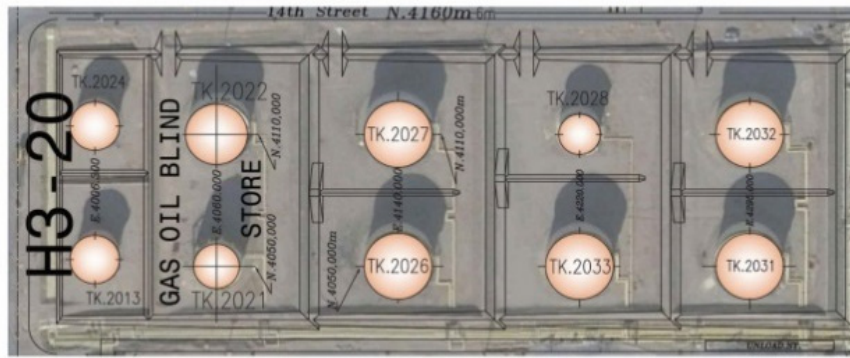
بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که انفجار با احتمال وقوع ۵۷٪ و حریق با احتمال وقوع ۴۳٪ به ترتیب شایع‌ترین علل پدیده دومینو هستند. بررسی ۲۲۵ حادثه منجر به پدیده دومینو، نشان می‌دهد که ۳۵٪ این حوادث در محل‌های ذخیره‌سازی مواد شیمیایی، ۲۸٪ در صنایع فرآیندی و ۱۹٪ در صنایع انتقال مواد خطرناک رخ داده است (۶). احمدی و همکاران (۲۰۲۰) یک مطالعه مروری بر روی سناریوها و دلایل آتش‌سوزی مخزن ذخیره‌سازی با فشار اتمسفری انجام دادند. آن‌ها در این تحقیق، حوادث آتش‌سوزی مخازن ذخیره‌سازی اتمسفریک را از یک پایگاه داده‌های حوادث، مقالات و منابع دیگر جمع‌آوری کردند و علل و هزینه ۱۰۴ حادثه را طبقه‌بندی کردند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که ۳۸٪ حوادث به علت عوامل محیطی، ۲۰٪ فاکتور تجهیزات، ۱۵٪ عامل خطای انسانی، ۱۳٪ اثر دومینو، ۱۰٪ عامل نگهداری و تعمیرات و ۴٪ حمله تروریستی بود. اصابت صاعقه بیشترین علت تصادفات ناشی از عوامل محیطی (۲۱/۷۳٪) بود. هزینه حوادثی که اثرات دومینو را تولید کرده‌اند هشت برابر بیشتر از هزینه حوادث بدون اثر دومینو بوده است (۷). خاکزاد و همکاران (۲۰۱۷) مقاله‌ای تحت عنوان کاربرد نظریه‌ی

گراف در حفاظت از آتش سوزی تأسیسات شیمیایی در اثر تأثیرات دومینو انجام دادند. در این بررسی مشخص شده حفاظت فعال در برابر آتش سوزی تأسیسات با بالاترین میزان دقت و حفاظت غیر فعال (انفعالی) از آتش سوزی تأسیسات با بالاترین میزان بینابینی از جمله مؤثرترین استراتژی‌ها در کاهش آسیب‌پذیری تأسیسات شیمیایی در برابر آتش‌گیری القا شده از تأثیرات دومینو به شمار می‌روند (۸). خاکزاد و رنیریز (۲۰۱۵) با استفاده از رویکرد تئوری گراف نشان دادند که در میان تأسیسات مربوط به واحد شیمیایی، مواردی که دارای بالاترین امتیاز متمرکز بینابینی می‌باشند، بیشترین اثرات دومینو را دارا خواهند بود؛ در نتیجه، جداسازی این چنین تأسیسات (به‌وسیله محافظت در برابر حریق) می‌تواند به‌طور فراوانی، شدت و احتمال رخ دادن اثرات دومینو را کاهش دهد (۹).

مخازن نفت در پالایشگاه از لحاظ خطرات ایمنی، بهداشتی و زیست محیطی، بسیار مهم می‌باشند. لذا لازم است پژوهش‌های بیشتری جهت بررسی اثرات اقتصادی پدیده دومینو حریق و انفجار در مخازن انجام پذیرد. تأثیرات دومینو شامل واقعه آغازین است که بر روی نصب و راه‌اندازی دستگاه تأثیر گذار است و یک یا چند حادثه بعدی را به دنبال دارد که بر روی تأسیسات دیگر نیز تأثیر گذار خواهند بود. با توجه به گستردگی فعالیت‌ها و تعداد و حساسیت مخازن نفت، گاز و بنزین و دیگر مشتقات نفتی در پالایشگاه‌ها و اهمیت حفاظت از آن‌ها در برابر حریق بسیار ضروری است، لذا هدف این پژوهش بررسی پیامدهای اقتصادی پدیده دومینو حریق و انفجار مخازن نفت در یک صنعت پالایشگاهی می‌باشد.

## روش بررسی

این تحقیق در مخازن ذخیره‌سازی یک پالایشگاه نفت انجام شد. تعداد ۱۱۱ مخزن در انواع مختلف شامل سقف ثابت (مخروطی و گنبدی)، سقف شناور (داخلی و خارجی) و کروی در سرویس می‌باشند. با توجه به گستردگی مخازن در این پالایشگاه طبق نقشه هوایی و Plot plan پالایشگاه، تعداد ۱۰ مخزن در انواع کروی و سقف شناور حاوی فرآورده‌های نهائی شامل بنزین، نفتا سبک، نفت سفید و گاز پنتان در ابعاد و ظرفیت‌های متفاوت و بنا بر دلایل زیر مورد مطالعه قرار گرفت. جانمایی مخازن تحت بررسی در مطالعه موردی در شکل ۱ نشان داده شده است. انتخاب مخازن بر اساس، نظر تیم تحقیق و هیئت خبرگان متشکل از روسای ادارات ایمنی و آتش‌نشانی و با در نظر گرفتن موارد زیر انجام گردید. وجود مخازن



شکل ۱. جانمایی مخازن تحت بررسی در مطالعه موردی

و خسارات وارده به تجهیزات فرایندی (مخازن) است. به منظور محاسبه درصد افرادی که تحت تأثیر سناریو تشعشع ناشی از حریق و انفجار مخزن حادثه دیده گرفته اند از معادلات Probit استفاده شد. معادلات پرابیت را به صورت کلی می توان با رابطه زیر نشان داد.

$$Y = \frac{36}{38} + \frac{2}{56} \ln(txy)^3 \quad (1)$$

Y میزان پرابیت، t زمان مواجهه بر حسب ثانیه و i میزان تشعشع حرارتی بر حسب وات بر مترمربع است. بعد از محاسبه مقدار پرابیت (Y)، با استفاده از رابطه زیر احتمال مرگ و میر این افراد (P) به دست می آید.

$$P = 0.5 \left\{ 1 + \frac{Y-5}{|Y-5|} \operatorname{erf} \left( \frac{|Y-5|}{\sqrt{2}} \right) \right\} \quad (2)$$

با ترکیب معادله ۲ با توزیع جمعیت  $D_p$  در محل وقوع حادثه، تعداد افرادی که کشته می شد (N) بر اساس رابطه ۳ به دست می آید.

$$N = \int_A P \times dA \quad (3)$$

N: تعداد مرگ و میر، P: توزیع جمعیت (نفر / مترمربع)، A: مساحت ناحیه تحت تأثیر (مترمربع) (۶).

#### نرم افزار آماری R

در این مطالعه برای مدل سازی گرافیکی سناریوهای زنجیره ای در قالب گراف از نرم افزار آماری R و بسته igrph استفاده گردید (۱۱-۱۳). با استفاده از توابع موجود در نرم افزار R و بسته igrph شاخص های مرکزیت بینیت، نزدیکی داخلی، نزدیکی خارجی و نزدیکی کل برای هر یک از گره ها و در نتیجه مؤلفه های آسیب پذیری

سقف شناور با احتمال خطر نشت مواد، تجمع بخارات قابل اشتعال و انفجار، وجود مخازن کروی و سقف شناور در دایک وال مشترک، ذخیره محصولات سبک نفتی در محوطه مخازن مورد مطالعه، وجود مخزن کروی تحت فشار در بین سایر مخازن اتمسفریک، عدم وجود آب کافی جهت مبارزه و کنترل حریق به دلیل بحران کم آبی و کاهش فشار آب آتش نشانی، عدم وجود سیستم های ثابت خنک کننده و خودکار اطفاء حریق بر روی مخازن سقف شناور و وجود مخازن استراتژیک ذخیره بنزین که در اثر آتش سوزیمی تواند باعث برهم زدن سیستم انتقال سوخت گردد.

*شناسایی سناریوهای مختلف ایجادکننده اثرات دومینو*  
بر اساس محتویات درون مخزن و همچنین پارامترهای عملیاتی، سناریوهای ممکن اولیه شناسایی گردید. معمولاً سرریز و ریزش شدید مواد نفتی، حریق جتی، حریق توپی، حریق استخری، انفجار ابر بخار و پدیده BLEVE جزء رویدادهای با توانائی ایجاد پدیده دومینو می باشند. از نظر نوع نشتی نیز در این تحقیق، سناریوی مربوط به شکافت کامل اتصالات مخازن مورد بررسی، به عنوان سناریوی انتخابی در نظر گرفته شد.

#### مدل سازی اثرات

تشعشع ناشی از حریق به عنوان اثر اصلی رخداد حادثه در نظر گرفته شد.

#### ارزیابی پیامد

پس از مدل سازی، ارزیابی پیامد حوادث انجام گردید. برای این منظور ابتدا میزان تلفات و خسارت های ناشی از پیامد نهائی سناریو (تشعشع) محاسبه می گردد. هدف از ارزیابی پیامد در این مطالعه تعیین میزان مرگ و میر

شامل مخازن ده‌گانه است می‌پردازیم. تمامی مخازن موجود در این محوطه، استوانه‌ای هستند به جز مخزن ۲۰۲۱ که کروی است. آستانه شار حرارتی برای مخزن استوانه‌ای در این محوطه هر دو آستانه  $Q_{th} = 10 \text{KW}/m^2$  و  $Q_{th} = 15 \text{KW}/m^2$  در نظر گرفته شد. از طرفی آستانه شار حرارتی برای تنها مخزن کروی یعنی مخزن ۲۰۲۱ برابر  $Q_{th} = 45 \text{KW}/m^2$  در نظر گرفته شد. دلیل انتخاب این دو آستانه به منظور افزایش حساسیت ایمنی و اقدام محافظه کارانه در تعیین آستانه شار حرارتی یعنی انتشار حرارتی که موجب آسیب به واحدهای مجاور بوده است. (۹، ۱۰، ۱۶). در این مطالعه، بدترین حالت مقدار آستانه تشدید تابش برابر ۱۰ کیلووات بر مترمربع انتخاب شد. حال به محاسبه شاخص‌های گراف مخازن ده‌گانه با آستانه شار حرارتی برابر  $10 \text{KW}/m^2$  می‌پردازیم. با توجه به شاخص بینیت، مخزن شماره ۶ دارای بیشترین پتانسیل گسترش حادثه میان مخازن ده‌گانه است. پس از مخزن شماره ۶، مخزن شماره ۴ و بعد از آن مخزن ۵ و ۷ هستند که بیشترین پتانسیل گسترش حادثه را در میان مخازن دارند.

#### مقایسه مخازن ده‌گانه بر اساس آستانه شار حرارتی برابر ۱۵

با در نظر گرفتن آستانه شار حرارتی برابر  $15 \text{KW}/m^2$  برای میزان انتشار حرارت در میان مخازن ده‌گانه، گراف مربوط به مخازن ده‌گانه و ارتباط آن‌ها در نظر گرفته و به بررسی شاخص‌های نزدیکی داخلی، نزدیکی بیرونی، شاخص درونی کل و شاخص بینیت برای گراف مخازن ده‌گانه بر اساس آستانه حرارتی  $15 \text{KW}/m^2$  می‌پردازیم. با توجه به نتایج شاخص بینیت، مخزن‌های شماره ۷ و ۹ دارای بیشترین پتانسیل گسترش حادثه میان مخازن ده‌گانه هستند. پس از این مخازن، مخزن شماره ۴ است که بیشترین پتانسیل گسترش حادثه را در میان مخازن دارد.

مخازن متناظر آن‌ها محاسبه شدند؛ که مراحل مدل‌سازی گراف آن‌ها به ترتیب زیر می‌باشد.

- در مرحله اول شناسایی و جمع‌آوری اطلاعات از تهدیدات و خطرات انجام گردید.
- در مرحله دوم، برای هر یک از مخازن، سناریو حادثه تعیین شد.
- در مرحله سوم با توجه به سناریو حادثه، بردارهای تشدید (شار حرارتی مخازن) مشخص شد.
- مرحله چهارم با توجه به مقادیر آستانه و بردارهای تشدید (شار حرارتی)، مخازن هدف احتمالی مشخص گردید.
- مرحله پنجم وزن یال‌های گراف برای تعیین مخازن هدف احتمالی در مدل‌سازی مشخص شد.
- مرحله ششم با استفاده از نرم‌افزار R و در بسته نرم‌افزاری igraph با ورود وزن‌های هر گره مدل گراف به دست آمد.

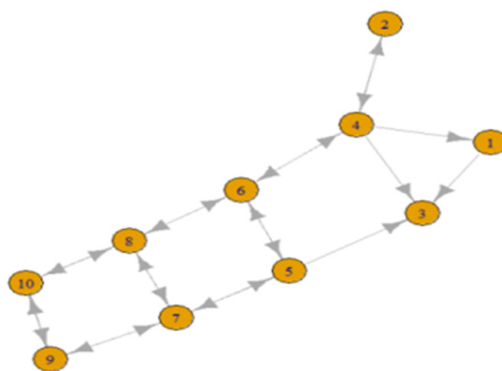
#### نحوه بررسی هزینه‌های حوادث

بررسی هزینه‌های حوادث با توجه به شعاع در معرض هر مخزن در شاخص آتش‌سوزی و انفجار مشخص گردید. به دلیل عدم دسترسی به قیمت‌های واقعی هزینه‌های حوادث یک مخزن، آخرین قرارداد ساخت مخزن در پالایشگاه برای بررسی هزینه‌های حوادث استفاده شد، هزینه مواد درون مخزن نیز از طریق قیمت‌های جهانی محصول شناسایی شد. برای تعیین میزان تأثیر اجرای طرح‌های ایمنی در این تحقیق در شاخص حریق و انفجار DOW به فاکتور حفاظت در حریق C3 کمترین نمره داده شد.

#### نتایج و یافته‌ها

##### مخازن ده‌گانه

حال به بررسی محوطه مخازن مورد مطالعه که



شکل ۲. گراف مربوط به مخازن ده‌گانه با آستانه ۱۰

شاخص به ترتیب برابر ۱ و ۳۲۰ می‌باشد که طبقه‌بندی ریسک شدت حریق و انفجار هر مخزن مشخص گردید. شاخص‌های حریق و انفجار در مخزن نفت سفید ۷۱ کمترین شاخص و در پنتان و نفتا این شاخص ۱۸۷/۴۲ محاسبه شد (۱۴).

#### تعیین فاکتور اعتبار کنترل ضرو زیان

روش‌های مختلفی برای کنترل خطرات و شرایط عملیاتی در محیط کار وجود دارد که در قالب فاکتور کنترل فرایند C1 با آیتم‌های برق اضطراری، سیستم‌های سردکننده کنترل انفجار، سیستم توقف اضطراری عملیات، کنترل‌های کامپیوتری، گاز خنثی، دستورالعمل‌های عملیاتی، بازنگری واکنش‌پذیری مواد، سایر تجزیه و تحلیل خطرات فرایند مورد بررسی قرار گرفتند. فاکتور جداسازی مواد C2 شامل آیتم‌های شیر کنترل راه دور، تخلیه کردن، زهکشی و کنترل نشتی و قفل خودکار بود و فاکتور حفاظت در حریق C3 شامل آیتم‌های آشکارسازها حریق، اسکلت فلزی، آب آتش‌نشانی، سیستم ویژه، سیستم‌های اسپرینکلر، پرده آب، فوم، مانیتور خاموش، دستی، حفاظت کابل می‌باشد. حاصل ضرب ۳ فاکتور حفاظت از حریق، فاکتور جداسازی مواد و فاکتور کنترل فرایند فاکتور کنترل ضرو زیان به دست آمد.

$$C = C_1 \times C_2 \times C_3 \quad (10)$$

#### تعیین ارزش ناحیه تماس

با توجه به شعاع در معرض هر مخزن که در جدول ۱ محاسبه شاخص آتش‌سوزی و انفجار مشخص گردیده است. برای هر مخزن یک سناریو ناحیه تماس هنگام آتش‌سوزی تعیین گردید. همچنین با توجه برای دریافت ارزش ناحیه تماس از هزینه‌های انجام پروژه یک مخزن در سال جاری استفاده شد. ارزش مواد داخل مخزن نیز از طریق بازار جهانی تعیین شد.

#### هزینه‌های پدیده دومینو

در ادامه هزینه‌های ناشی از ایجاد پدیده دومینو بررسی گردید و برای به دست آمدن این هزینه‌ها و مقایسه آن با حریق‌های عادی انجام گردید. با توجه به اینکه مخزن ۶ و ۷ طبق نظریه گراف پتانسیل ایجاد پدیده دومینو در شارهای حرارتی  $10 \text{ KW/m}^2$  و  $15 \text{ KW/m}^2$  داشته‌اند که ارزش ناحیه تماس بر حسب ایجاد پدیده دومینو مشخص گردید.

#### تعیین شاخص حریق و انفجار

##### محاسبه فاکتور خطرات عمومی فرآیند (F1)

مخاطرات عمومی فرآیند عوامل اصلی تعیین خسارت یک حادثه هستند. در این تحقیق واکنش شیمیایی گرمازا، فرایندهای گرماگیر، واحدهای فرآیندی داخلی به دلیل اینکه هیچ‌گونه تأثیری بر روی ریسک نداشته صفر در نظر گرفته شد. در مورد انتقال، جابجایی و انبار کردن مواد به دلیل اینکه گازها و یا مایعات قابل اشتغال با درجه اشتعال‌پذیری ۳ یا ۴ فاکتور ۰/۸۵ در نظر گرفته شد. به دلیل وجود مسیرهای دسترسی در اطراف مخازن، فاکتور دسترسی ۰/۲۰ در نظر گرفته شد. به دلیل مناسب نبودن سیستم زهکشی برای انتقال مایعات قابل اشتغال، بالاترین فاکتور را برای آن در نظر گرفته شد.

##### محاسبه فاکتور خطرات خاص فرآیند (F2)

خطرات فرآیند ویژه عوامل اصلی هستند که بر احتمال وقوع حادثه تأثیر می‌گذارند، از جمله موارد مانند مواد سمی، فشار، کم‌دمایی، مقدار مواد قابل اشتعال/ناپایدار، خوردگی و فرسایش، نشتی، استفاده از تجهیزات مشتعل می‌باشند. در این تحقیق فشار کمتر از اتمسفر، استفاده از تجهیزات مشتعل، سیستم تبادل گرمایی گازوئیل داغ، تجهیزات دوار به دلیل اینکه هیچ‌گونه تأثیری بر روی ریسک نداشته صفر در نظر گرفته شده است. فاکتور مواد سمی از ضرب ۰/۲ در خطرات بهداشتی به دست می‌آید با توجه به اینکه خطرات بهداشتی مواد ۱ می‌باشد. لذا فاکتور مواد سمی ۰/۲ در نظر گرفته شد.

##### محاسبه خطرات واحد فرآیند F3

خطرات واحد فرآیند با حاصل ضرب فاکتور خطرات عمومی و خطرات فرآیند، به دست آمد (۱۴).

$$F3 = F1 * F2 \quad (8)$$

#### شاخص حریق و انفجار DOW

حاصل ضرب فاکتور خطرات واحد در فاکتور مواد عدد شاخص حریق و انفجار DOW را مشخص می‌کند که از رابطه زیر شاخص حریق و انفجار هر مخزن به دست آمد (۱۴).

$$F_3 \times MF = F \& EI \quad (9)$$

بر طبق راهنمای شاخص حریق و انفجار DOW این

## میزان تأثیر اجرای طرح‌های ایمنی در کاهش حریق و انفجار

در این تحقیق طبق نقشه هوایی و Plot plan پالایشگاه، تعداد ۱۰ مخزن در انواع کروی و سقف شناور حاوی فرآورده‌های نهائی شامل بنزین، نفتا سبک، نفت سفید و C5 در ابعاد و ظرفیت‌های متفاوت بررسی شد. به منظور تعیین آستانه شار حرارتی یا انتشار حرارتی که موجب آسیب به واحدهای مجاور می‌شود، دو آستانه  $Q_{th} = 10Kw/m^2$  و  $Q_{th} = 15Kw/m^2$  در نظر گرفته شد. بر اساس مفهوم فاصله در نظریه گراف، شاخص‌های متعددی به منظور بررسی مشخصات گراف‌ها به وجود آمده‌اند که در میان آن‌ها شاخص‌های مرکزیت از جمله شاخص‌های بینیت و نزدیکی بسیار متداول‌اند. شاخص نزدیکی برای یک رأس را با در نظر گرفتن جهت یال‌ها می‌توان به دو شاخص نزدیکی داخلی و نزدیکی خارجی تقسیم کرد. شاخص نزدیکی خارجی برای رأس  $v_i$  به صورت تعداد گام‌های لازم برای رسیدن به دیگر رأس‌های گراف از رأس  $v_i$  تعریف می‌گردد لذا با نمایش تأسیسات مهم و خطرناک به صورت رئوس یک گراف و بردارهای پیمایش همچون نمایش انتشار حرارت و یا فشار بیش از حد آن‌ها به صورت یال‌ها، آن تأسیسات را می‌توان به صورت یک گراف مدل بندی نمود.

در شاخص نزدیکی کل محتمل‌ترین توالی درگیر

میزان تأثیر اجرای طرح‌های ایمنی در این تحقیق موردسنجش قرار گرفت. طرح‌های ایمنی در شاخص حریق و انفجار DOW در فاکتور حفاظت در حریق C3 موردتوجه قرار گرفت که شامل آیتم‌های آشکارسازهای حریق، اسکلت فلزی، آب آتش‌نشانی، سیستم ویژه، سیستم‌های اسپرینکلر، پرده آب، فوم، مانیتور خاموش‌کننده دستی، حفاظت کابل می‌باشد. با توجه به عدم اجرای طرح‌های ایمنی در این تحقیق این عوامل کمترین نمره را در فاکتور حفاظت در حریق C3 دریافت نمودند. برای دریافت میزان تأثیر طرح‌های ایمنی در تغییر میزان اثر در محتمل‌ترین خسارت واقعی اعداد بالاترین نمره داده شد حداکثر فاکتور اعتبار امتیاز ۱ می‌باشد که بیانگر عدم کارایی کنترل موردنظر در کاهش احتمال و شدت ریسک است در صورتی که عدد فاکتور اعتبار از یک کمتر باشد، بیانگر درجه حفاظتی بالاتر یا سطح کنترل ریسک مطلوب‌تر است؛ که نتایج در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد. نتایج نشان‌دهنده تغییر بیش از دو برابری عدم اجرای طرح‌های ایمنی در هزینه‌ها در صورت بروز حوادث است.

جدول ۱. بررسی هزینه‌های ناشی از حریق و انفجار در مخازن هنگام پدیده دومینو

Gasoline TK-۲۰۳۳	Gasoline TK-۲۰۲۷		ردیف
۱۴۲/۸	۱۴۲/۸	DOW (F&EI) شاخص حریق و انفجار	۱
۳۶	۳۶	شعاع تماس (متر)	۲
۴۰۶۹	۴۰۶۹	ناحیه تماس (مترمربع)	۳
۱۳/۷۳	۱۴/۴۵	برحسب شاخص Dow	۴
۲۱/۶	۲۷/۲	هزینه‌های دومینو	
۰/۶۲	۰/۶۲	فاکتور آسیب (درصد آسیب)	۵
۸/۵۱۲۶	۸/۹۵۹	محتمل‌ترین خسارت پایه (میلیون دلار) [۴*۵]	۶
۱۳/۳۹۲	۱۶/۸۶۴	هزینه‌های دومینو	
۰/۳۰	۰/۳۰	فاکتور اعتبار کنترل ضرر و زیان	۷
۲/۵۵۳۷۸	۲/۶۸۷۷	محتمل‌ترین خسارت واقعی (میلیون دلار) [۶*۷]	۸
۴/۰۱۷۶	۵/۰۵۹۲	هزینه‌های دومینو	

این هزینه‌ها و مقایسه آن با شاخص‌های حریق و انفجار DOW انجام گردید، با توجه به اینکه مخزن ۴ و ۷ طبق نظریه گراف پتانسیل ایجاد پدیده دومینو در شارهای حرارتی  $10 \text{ KW/m}^2$  و  $15 \text{ KW/m}^2$  داشته‌اند. بررسی هزینه‌های ناشی از حریق و انفجار در مخزن در هنگام پدیده دومینو مشخص گردیده است. حادثه دومینو می‌تواند تا ۲ برابر هزینه‌ی حادثه را افزایش دهد. خاکزاد و همکاران (۲۰۱۷) (۸) مقاله‌ای تحت عنوان کاربرد نظریه‌ی گراف در حفاظت مقرون‌به‌صرفه از آتش‌سوزی تأسیسات شیمیایی در اثر تأثیرات دومینو انجام دادند. در این بررسی مشخص شده حفاظت فعال در برابر آتش‌سوزی تأسیسات با بالاترین میزان دقت و حفاظت غیرفعال از آتش‌سوزی تأسیسات با بالاترین میزان بینایی از جمله‌ی مؤثرترین استراتژی‌ها در کاهش آسیب‌پذیری تأسیسات شیمیایی در برابر آتش‌گیری القاشده از تأثیرات دومینو به شمار می‌روند. این تحقیق نیز نبود تجهیزات پیشگیری از حریق و مقابله باعث بالا رفتن هزینه‌های محتمل خسارت در پالایشگاه شده است که با تحقیق حاضر دارای هم‌خوانی می‌باشد. احمدی و همکاران (۲۰۲۰) (۷) مطالعه مروری بر سناریوهای و دلایل آتش‌سوزی مخزن ذخیره‌سازی با فشار اتمسفری انجام دادند. هزینه حوادثی که اثرات دومینو را تولید کرده‌اند هشت برابر بیشتر از هزینه حوادثی بدون اثر دومینو بوده است در این تحقیق هزینه حوادثی که اثرات دومینو ایجاد می‌کند ۲ برابر هزینه حوادث بدون اثر دومینو بوده است؛ اما اثر دومینو ناشی از حریق می‌تواند به‌عنوان ترکیبی از رویداد نامشخص و حوادث قطعی در نظر گرفته شود. خاکزاد و رنیرز (۲۰۱۵) (۹) با استفاده از رویکرد تئوری گراف نشان دادند که در میان تأسیسات مربوط به واحد شیمیایی، مواردی که دارای بالاترین امتیاز متمرکز بینابینی می‌باشند، بیشترین اثرات دومینو را دارا خواهند بود؛ در نتیجه، جداسازی این چنین تأسیسات (به‌وسیله حفاظت در برابر حریق) می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای، شدت و احتمال رخ دادن اثرات دومینو را کاهش دهد. یانگ و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی تاثیر آتش‌سوزی استخری در ایجاد یک رویداد دومینو در مراکز پردازش و ذخیره‌سازی، نشان دادند اگرچه آتش‌سوزی استخر به‌تنهایی توانایی ایجاد یک رویداد دومینو را دارد، اما در صورت ایجاد مسافت ایمن تجهیزات از هم و انجام اقدامات پیشگیرانه این احتمال کاهش می‌یابد [۷۴] در این تحقیق نیز چنانچه فاصله ایمن رعایت گردد باعث حذف خطر شرایط و کاهش ناحیه تماس با تجهیزات می‌گردد.

شدن مخازن از مخزن شماره ۶ آغاز می‌شود. مخازن بعدی به ترتیب عبارت‌اند از مخزن شماره ۵، مخازن ۴ و ۸، مخزن ۳ و مخزن ۷ است. بر اساس شاخص نزدیکی داخلی مخزن ۳ یعنی مخزن با شماره ۲۰۲۱ که یک مخزن کروی است با اختلاف قابل توجهی نسبت به سایر مخازن، به‌عنوان مخزن دارای بیشترین تأثیرپذیری از سایر مخازن است. در شاخص نزدیکی خارجی برای مخزن شماره ۶ بیشترین مقدار است یعنی مخزن شماره ۶ به‌عنوان مخزن دارای بیشترین پتانسیل راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای است. پس از این مخزن، در میان مخازن ده‌گانه، مخزن شماره ۵ است که دارای بیشترین پتانسیل راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای است که باید مورد توجه قرار گیرد. با در نظر گرفتن آستانه شار حرارتی برابر ۱۵ برای میزان انتشار حرارت در میان مخازن ده‌گانه، گراف مربوط به مخازن ده‌گانه مشخص گردید. با توجه به شاخص نزدیکی داخلی برای مخزن شماره ۹ بیشترین مقدار است یعنی مخزن شماره ۹ به‌عنوان مخزن دارای بیشترین تأثیرپذیری از سایر مخازن است. پس از این مخزن، در میان مخازن ده‌گانه، مخزن شماره ۷ است که دارای بیشترین تأثیرپذیری از سایر مخازن است. با توجه به شاخص نزدیکی خارجی برای مخزن شماره ۷ بیشترین مقدار است یعنی مخزن شماره ۷ به‌عنوان مخزن دارای بیشترین پتانسیل راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای است. پس از این مخزن، در میان مخازن ده‌گانه، مخزن شماره ۹ است که دارای بیشترین پتانسیل راه‌اندازی حوادث زنجیره‌ای است که باید مورد توجه قرار گیرد. همچنین بر اساس شاخص نزدیکی کل نیز محتمل‌ترین توالی درگیر شدن مخازن از مخزن شماره ۷ آغاز می‌شود. مخازن بعدی به ترتیب عبارت‌اند از مخزن شماره ۹، مخزن شماره ۸ و مخزن ۱۰ است.

در آستانه شار  $Q_{th} = 10 \text{ kW/m}^2$  شاخص بینیت، مخزن شماره ۶ دارای بیشترین پتانسیل گسترش حادثه میان مخازن ده‌گانه است. پس از مخزن شماره ۶، مخزن شماره ۴ و بعد از آن مخازن ۵ و ۷ هستند که بیشترین پتانسیل گسترش حادثه را در میان مخازن دارند. در آستانه شار حرارتی  $15 \text{ KW/m}^2$  مخزن‌های شماره ۷ و ۹ دارای بیشترین پتانسیل گسترش حادثه میان مخازن ده‌گانه هستند. پس از این مخازن، مخزن شماره ۴ است که بیشترین پتانسیل گسترش حادثه را در میان مخازن دارد. بررسی هزینه‌های ناشی از ایجاد پدیده دومینو و مقایسه آن با حریق‌های عادی انجام گردید. برای به دست آمدن

## REFERENCE

1. Bashiri E, Farahani Farahani H. Examining fire and explosion crisis scenarios in oil warehouses, second national conference on critical infrastructure protection. Tehran, Malik Ashtar University of Technology; 2018. [Persian]
2. Gurjar BR, Sharma RK, Ghuge SP, Wate SR, Agrawal R. Individual and societal risk assessment for a petroleum oil storage terminal. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. 2015;19(4):04015003.
3. Moshiran V, Ghasemi Kozekanan A, Sadeghi Yarandi M, Karimi A. Fire and explosion risk assessment using the optimized DOW index (with fuzzy logic) in a gas refinery, 11th national conference on occupational health and safety, Tehran, University of Medical Sciences and Health Services; 2018. [Persian]
4. 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.
5. Yazdi M, Nikfar F. The principles of explosion protection in gas and petrochemical industries Mehrarzan-Fan Avaran; 2014. [Persian]
6. Shahidi Aliabadi A, Kalatpour O, Zarei MP. Assessment of the consequences of fire in methane gas tanks in a gas refinery. *Occupational Health Engineering*. 2016;3(1):51-59. [Persian]
7. Ahmadi O, Mortazavi SB, Mahabadi HA. Review of Atmospheric Storage Tank Fire Scenarios: Costs and Causes. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2020;20:1-22.
8. 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):1652-6.
9. 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;73:143-63.
10. Reniers G, Cozzani V. *Domino Effects in the Process Industries, Modeling, Prevention and Managing*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands; 2013.
11. R Development Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2009.
12. Csardi G, Nepusz T. The igraph software package for complex network research. *International Journal of Complex Systems*; 2006.
13. Jabari M, Ali Babaei A, Kaousi RJ. Vulnerability analysis of the tanks of one of the oil refineries to chain accidents caused by fire based on graph theory. *Iranian Occupational*

## نتیجه گیری

این پژوهش باهدف بررسی پیامدهای اقتصادی پدیده دومینو حریق و انفجار در مخازن نفت یک صنعت پالایشگاهی انجام گردید. در این پژوهش از نرم افزار PHAST برای تعیین شار حرارتی و مدل سازی گرافها با استفاده از بسته igraph در نرم افزار برنامه نویسی R انجام گردید. بررسی شاخص های نزدیکی داخلی، نزدیکی بیرونی، شاخص درونی کل و شاخص بینیت برای گراف مخازن ده گانه بر اساس آستانه حرارتی  $10 \text{ KW/m}^2$  و  $15 \text{ KW/m}^2$  از طریق نرم افزار R انجام شد. درجه خطر این مخازن با توجه به شاخص حریق و انفجار DOW حدود زیاد و شدید قرار گرفت. شاخص های حریق و انفجار در مخازن نفت سفید ۷۱ کمترین شاخص و در پنتان و نفتا این شاخص  $187/42$  محاسبه شد. بررسی ارزش ناحیه تماس در صورت ایجاد پدیده دومینو نشان داد که حادثه دومینو می تواند تا ۲ برابر هزینه های حادثه را افزایش دهد. نتایج نشان داد که حادثه دومینو می تواند تا ۲ برابر هزینه های حادثه را افزایش دهد. همچنین تأثیر اجرای طرح های ایمنی لازم همانند سیستم اعلام و اطفاء حریق کاهش ۵۰ درصدی هزینه حوادث می باشد.

## محدودیت های تحقیق

از محدودیت های این تحقیق می توان به موارد زیر اشاره نمود

- محدودیت های ناشی از دست یابی به اطلاعات فنی مخازن و قدیمی بودن برخی اسناد در آرشیو دفتر فنی که بازخوانی اطلاعات را با مشکل روبرو نمود.
- محدودیت های ناشی از قیمت گذاری دقیق ارزش مخازن و تجهیزات.
- محدودیت های ناشی از نصب نرم افزار شبیه سازی به دلیل استفاده از نسخه های کرک شده و نامعتبر بودن لایسنس های آن در کشور.

## تقدیر و تشکر

این مقاله از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مصوب و دفاع شده در دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از کارکنان پالایشگاه، مسئولان پژوهشی دانشکده بهداشت و ایمنی و هیئت داوران پایان نامه که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

- Fanavaran 2011. [Persian]
15. Yang R, Khan F, Neto ET, Rusli R, Ji J. Could pool fire alone cause a domino effect?. Reliability Engineering & System Safety. 2020 May 16:106976.
- Health Journal. 2021;18(1):201-219. [Persian]
14. Stareh H, Ghasemi A, Mardani M, DOW fire and explosion index, American Institute of Chemical Engineers, first edition, Tehran, translated by Tehran