

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## Quantitative Risk Assessment of Condensate Storage Tank, Considering Domino Effects

Mostafa Mirzaei Aliabadi, Hossein Ramezani\*, Omid Kalatpour

Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Sciences, Hamadan, Iran

Received: 2020-8-19

Accepted: 2021-3-7

### ABSTRACT

**Introduction:** In process industries, some of the primary events may result in secondary events in an industrial unit called the domino effect. Since refinery storage tanks are always at risk of fire and explosion, quantitative risk assessment is important in determining the severity and outcome of an accident, taking into account the effects of dominoes on the main industry, neighbors, and society and can play an important role in risk management. Therefore, the purpose of this study was to quantitatively evaluate the risk of condensate storage tanks taking into account the domino effect.

**Material and Methods:** The technique used in this study was Quantitative Risk Assessment (QRA), the analysis of the consequences of which was performed using PHAST (7.22) after setting goals, studying the process, identifying hazards and scenarios. Then, to determine the extent of the domino effects of the escalation vectors were matched against the threshold, and after screening, the overall vulnerability of the repositories for mapping individual risk levels was calculated.

**Results:** In the leakage scenario, after considering the domino effects, the risk contour 10-4 to about 250 meters and the risk contour 10-5 to about 400 meters increased. Also in the catastrophic rupture scenario, the radius of risk contour of the 10-5 increased to 100 m after considering the domino effects up to around damage tank.

**Conclusion:** As can be deduced from the results, using this method can give a clear picture of the consequences of chain events and the probability of damage to nearby employees, equipment and neighbors, which is very important in risk, emergency and crisis management.

**Keywords:** Condensate Gas, Quantitative risk assessment, Domino effects, Accidents

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Mirzaei Aliabadi M, Ramezani H, Kalatpour O. Quantitative Risk Assessment of Condensate Storage Tank, Considering Domino Effects, J Health Saf Work. 2022; 12(1): 204-221.

## 1. INTRODUCTION

In the process industries, especially the oil and gas industry, there are always potential risks that can lead to severe and irreversible damage. One of the most important products of gas refineries is gas condensates that are stored and then exported in high volumes. Storage tanks are one of the most important refinery equipment that are always at risk of fire and explosion. Among such hazards, conflagration is the most common and explosion is the most important risk to oil storage tanks and petroleum products incurring heavy casualties.

Quantitative Risk Assessment (QRA) is a method that can provide an appropriate estimate of safe intervals, given the set of conditions and the

probability of occurrence. Two parameters play a major role in the quantitative risk assessment of events. The first parameter is the consequence and the second parameter is the frequency of the event.

Determining the extent of the damage and the radius affected by these events play a key role in reducing the frequency of the occurrence of these incident. In the process industries, some of the major incident, called the internal and external domino effects, may lead to secondary incidents inside and outside the fringes of an industrial unit. Expanding the scenario of a primary event that causes one or more of the other secondary events and modulates the consequences of the accident is commonly referred to as the domino accident. Domino accidents occur only when the damage

\* Corresponding Author Email: [hse.ms.naft@gmail.com](mailto:hse.ms.naft@gmail.com)

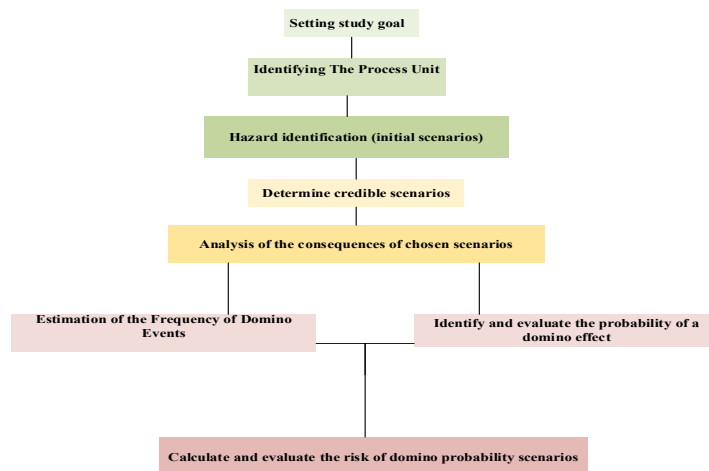


Fig. 1. Flow diagram of the procedure used for the quantitative risk assessment with considering domino effects

caused to the unit and adjacent devices is solely due to a primary event and the introduction of damage escalation vectors onto adjacent devices, not that the equipment around the site of the incident is damaged separately. A model is needed to provide an accurate picture of the range affected by domino effects and risk levels, considering the three factors of the primary event, the impact of the primary event and its wave extension to other parts, and the possibility of one or more secondary events (7). Therefore, in the present study, in addition to the presentation of a comprehensive approach, quantitative risk assessment of gas condensate storage tank was carried out considering the dominoes effects.

## 2. MATERIAL AND METHODS

This study is based on the QRA method considering the overall probability of domino effects on condensate storages, which is performed step by step in Figure 1.

The technique used in this study was QRA, the analysis of the consequences of which was performed using PHAST (7.22) after setting goals, studying the process, identifying hazards and scenarios. Then, to determine the extent of the domino effects of the escalation vectors were matched against the threshold, and after screening, the overall vulnerability of the repositories for mapping individual risk levels was calculated.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

The results of the studied scenarios and the impact of affected areas on adjacent tanks were determined using PHAST (v.22) software. The

results of the evaluation showed the highest radiation intensity and blast wave in the leakage scenario of tanks 2 and 4 due to the low distance of about 85.5 m. tanks 5 to 11 did not receive much radiation and blast overpressure due to the longer distance. The highest intensity of radiation was related to Jetfire, which also had the lowest probability of occurrence. According to the results, the safest distance was 612m in the leakage scenario and 3430m in the catastrophic rupture scenario.

In the next step to calculate the probability of damage to the tanks, screening was carried out based on the threshold defined and only the effective escalation vectors on the tanks were considered for subsequent calculations. Then, using the equations, the probability probit for each of the adjacent tanks was calculated, and the overall probability of extension (PE) for each tank and finally, the domino effect frequency rate for each tank were determined.

As shown in Table 1, in the leakage scenario, tanks 6 to 11 were removed from subsequent calculations due to the negligible amount of radiation and blast overpressure and tanks 1 and 5 were removed due to not reaching the damage threshold. The highest PE in the leakage scenario in tanks 2 and 4 with a probability of 0.17 and a frequency rate of  $7.2 \times 10^{-6}$  and in the catastrophic rupture scenario in tanks are 9 to 11 with a probability of 0.125 and a frequency rate of  $1.25 \times 10^{-6}$ .

After calculating scenario frequency rates with and without the domino effects and entering the information about the scenario and population into the PHAST software, SAFETI (V7.22) individual

Table 1. Calculation of Probability Probit, PE, Domino effects frequency Rate

Target equipment	Leakage scenario				Catastrophic rupture scenario				
	Probability probit		PE	$f_p$	$f_{de}$	Probability probit	PE	$f_p$	$f_{de}$
	Jet fire	Late pool fire							
Tk1				4E-04		0.01	0.004	1E-05	4.08E-08
Tk2	0.28	0.01	0.17		7.2E-06	0.01	0.004		4.08E-08
Tk4	0.28	0.01	0.17		7.2E-06	0.01	0.004		4.08E-08
TK5						0.06	0.024		2.43E-07
Tk6						0.06	0.024		2.43E-07
Tk7						0.06	0.024		2.43E-07
TK8						0.06	0.024		2.43E-07
TK9						0.31	0.125		1.25E-06
TK10						0.31	0.125		1.25E-06
TK11						0.31	0.125		1.25E-06



Fig. 2. Individual risk contours of TK3 tank leakage with/without of domino effects



Fig. 3. Individual risk contours of TK3 tank catastrophic rupture with/without of domino effects

risk levels as shown in Figure 2 for leakage scenarios and Figure 3 for the catastrophic rupture scenario were plotted.

As shown in Figure 2, in the leakage scenario, after considering the domino effects, the risk contour  $10^{-4}$  increased to about 250 meters and the risk contour  $10^{-5}$  increased to about 400 meters. Also in the catastrophic rupture scenario, according to Figure 3, the radius of risk contour of the  $10^{-5}$  increased to 100 m after considering the domino effects around tank 3. A comparison of the risk contours in the images clearly showed the increased risk when calculating the domino effect.

#### 4. CONCLUSIONS

In this study, a quantitative risk assessment (QRA) model along with calculating the total probability of domino effects was used to calculate the individual

risk levels taking into account the domino effects. As can be deduced from the results, using this approach can give us a clear picture of the consequences of domino events and the potential for damage to nearby employees, equipment, and neighbors which is critical to risk, emergency and crisis management. Considering safe intervals and routes for dispatching fire teams, locations of support teams, and safe muster points are among items that can be identified by a risk assessment of different scenarios.

QRA with regard to domino effects is a key tool in understanding the probability scenarios of domino effects on industrial sites; therefore, in the countries process industries, special attention should be given to the assessment of the risks of domino events so that comprehensive crisis management plans can be implemented for all possible scenarios.

## ارزیابی کمی ریسک مخازن ذخیره‌سازی میعانات گازی با در نظر گرفتن اثر دومینو

مصطفی میرزایی علی آبادی، حسین رضانی\*، امید کلات پور

مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی همدان، همدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۷

### چکیده

**مقدمه:** در صنایع فرآیندی برخی از حوادث اولیه ممکن است منجر به حوادث ثانویه در یک واحد صنعتی یا همان اثر دومینو شوند. از آنجایی که مخازن ذخیره‌سازی پالایشگاهی همواره در معرض ریسک حریق و انفجار می‌باشند، بنابراین ارزیابی کمی ریسک با در نظر گرفتن اثرات دومینو بر روی صنعت اصلی، همسایگان و جامعه در تعیین شدت و پیامد حادثه حائز اهمیت است و می‌تواند در مدیریت ریسک نقش مهمی ایفا نماید؛ بنابراین هدف از انجام این مطالعه ارزیابی کمی ریسک مخازن ذخیره‌سازی میعانات گازی با در نظر گرفتن اثرات دومینو است.

**روش کار:** تکنیک مورد استفاده در این پژوهش روش ارزیابی کمی ریسک (QRA) می‌باشد که پس از تعیین اهداف، مطالعه فرآیند، شناسایی مخاطرات و تعیین سناریوها، تجزیه و تحلیل پیامدهای آن با نرم‌افزار PHAST(7.22) صورت پذیرفته است. سپس برای تعیین میزان اثرات دومینو، بردارهای تشدید با حدود آستانه مطابقت داده شده و پس از غربالگری، احتمال کلی آسیب‌پذیری مخازن، جهت ترسیم ترازهای ریسک فردی محاسبه می‌گردد.

**یافته‌ها:** در سناریو نشتی شعاع تراز ریسک  $10^{-4}$  بعد از در نظر گرفتن اثرات دومینو تا حدود ۲۵۰ متر و شعاع تراز ریسک ۵-۱۰ تا حدود ۴۰۰ متر افزایش داشته است. همچنین در سناریو ترکیدگی/پارگی فاجعه‌بار نیز طبق شعاع تراز ریسک ۵-۱۰، بعد از در نظر گرفتن اثرات دومینو تا حدود ۱۰۰ متر در اطراف مخزن ۳ افزایش داشته است.

**نتیجه‌گیری:** همان‌طور که از نتایج استنباط می‌گردد، استفاده از این روش می‌تواند تصویر واضحی از پیامدهای حوادث زنجیره‌ای و احتمال آسیب کارکنان، تجهیزات و همسایگان مجاور به ما بدهد که در مدیریت ریسک، مدیریت شرایط اضطراری و بحران‌ها بسیار حائز اهمیت باشد.

**کلمات کلیدی:** میعانات گازی، ارزیابی کمی ریسک، اثرات دومینو، حوادث

### نحوه استناد به این مقاله

میرزایی علی آبادی مصطفی، رضانی حسین، کلات پور امید. ارزیابی کمی ریسک مخازن ذخیره‌سازی میعانات گازی با در نظر گرفتن اثر دومینو. فصلنامه بهداشت و ایمنی کار. ۱۴۰۱؛ ۱۲ (۱): ۲۰۴-۲۲۱.

### مقدمه

در صنایع فرآیندی به خصوص صنایع نفت و گاز، همواره خطرات بالقوه‌ای وجود دارد که می‌تواند منجر به بروز صدمات جانی و خسارات مالی شدید و جبران‌ناپذیری شود (۱). یکی از مهم‌ترین محصولات تولیدی پالایشگاه‌های گاز، میعانات گازی می‌باشد که در حجم‌های بالایی ذخیره‌سازی و سپس صادر می‌شوند. میعانات گازی یا کاندنسیت؛ شامل ترکیبات سنگین‌تر از بوتان است که در شرایط اتمسفری، حالت مایع دارد، این ترکیبات با ارزش، پس از تثبیت فشار بخار و تنظیم نقطه شبنم به مخازن ذخیره‌سازی منتقل می‌شوند، مخازن ذخیره‌سازی یکی از مهم‌ترین تجهیزات پالایشگاهی هستند که همواره در معرض ریسک حریق و انفجار می‌باشند که در این میان آتش‌سوزی رایج‌ترین و انفجار به جهت میزان مرگ‌ومیری که به دنبال دارد مهم‌ترین ریسک مخازن ذخیره‌سازی نفت و فرآورده‌های نفتی است (۲، ۳). طبق آمار حوادث صنایع نفت و گاز کشور از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۶ حدود ۵۱ حادثه در این صنایع رخ داده است که ۳۴ کشته و ۳۷ مصدوم با درجات مختلف مصدومیت برجای گذاشته است و بخش عمده این حوادث ناشی از نشت مواد نفتی از مخازن بوده است (۴).

حجم شدن واحدهای صنعتی و تغییر شرایط کاربری اراضی در خارج از مرزهای واحدهای صنعتی سبب می‌شود که ریسک تولیدی، توسط واحدهای صنعتی تغییر کند که با توجه به روند کنونی، این تغییر عموماً رو به افزایش است. لذا تعیین و رعایت فاصله مناسب بین منابع ایجاد خطر و بخش آسیب‌پذیر، همواره سبب ایجاد انعطاف لازم در برخورد مناسب با تغییرات محتمل در طول زمان می‌شود. تعیین این فواصل و مطالعات مربوطه، از طریق روشی به نام ارزیابی کمی ریسک یا همان روش QRA<sup>۱</sup> صورت می‌گیرد. ارزیابی کمی ریسک روشی است که با توجه به مجموعه شرایط موجود و با لحاظ کردن احتمال وقوع حوادث، می‌تواند تخمین مناسبی از فواصل ایمن را ارائه دهد. در ارزیابی کمی ریسک حوادث، دو پارامتر نقش

#### 1 Quantitative Risk Assessment

عمده‌ای ایفا می‌کنند. پارامتر اول پیامد و پارامتر دوم تکرارپذیری حادثه است. عموماً هیچ‌کدام از این دو پارامتر به تنهایی برای ارزیابی خطرات کافی نیستند. به همین دلیل تعیین معیاری که هر دو عامل را در نظر بگیرد، در بررسی مخاطرات بسیار مفید می‌باشد (۵). همچنین یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی ریسک صنایع فرآیندی مدل‌سازی پیامدهای ناشی از حوادث محتمل می‌باشد که این مرحله شامل تخلیه‌سازی، انتشار مواد در محیط و به دنبال آن مدل‌سازی پیامدهای ناشی از اشتعال یا انفجار مواد می‌باشد (۶).

تعیین حد آسیب‌رسانی و شعاع تحت تأثیر این حوادث، نقش اساسی در کاهش نرخ پیامد وقوع این حوادث دارند، همچنین تعیین سناریوهای ایجادکننده حوادث و روند وقوع این حوادث در پیشبرد اهداف، شناسایی و کنترل مخاطرات ایجادکننده این سناریوها از اهمیت خاصی برخوردار هستند (۷). در صنایع فرآیندی برخی از رویدادهای اصلی ممکن است منجر به رویدادهای ثانویه در داخل و خارج از حصار یک واحد صنعتی شوند که به آن اثرات داخلی و خارجی دومینو گفته می‌شود (۸). این نوع محیط‌ها باعث می‌شود وضعیت‌های خطرناک به‌طور فزاینده‌ای از معیارهای بحرانی فراتر رود که باعث وقوع حوادث دوم یا حتی سوم می‌شود و تأثیرات حادثه را گسترش می‌دهد یا در نواحی همسایگان تأثیر می‌گذارد و در نتیجه منجر به حادثی می‌شود که فاجعه‌آمیزتر از حادثه اولیه است (۸، ۹). گسترش سناریوی یک حادثه اولیه که باعث ایجاد یک یا چند حادثه ثانویه دیگر می‌شود و باعث تعدیل شدن نتایج حاصل از حادثه می‌شود، معمولاً تحت عنوان حادثه دومینو تعریف می‌شود. حوادث زنجیره‌ای تنها زمانی مطرح می‌شوند که تخریب ایجادشده در واحد و دستگاه‌های مجاور، فقط و فقط به واسطه بروز حادثه اولیه و وارد آمدن بردارهای گسترش آسیب بر روی دستگاه‌های مجاور باشد و نه آنکه تجهیزات اطراف محل حادثه مستقلاً دچار آسیب شده باشند. وقایعی که منجر به آزادسازی انرژی فورانی می‌گردند، لازمه ایجاد زنجیره‌ای از حوادث گسترش‌یابنده و آسیب‌رسان هستند که عموماً به دلیل

وارد آمدن آسیب به تجهیزات اتمسفریک یا تحت فشار مورد هدف به وجود می‌آیند.

حوادث ناشی از اثر دومینو، حوادثی هستند که فاجعه‌بارترین پیامدها را به بار می‌آورند. پیامدهای این موارد در سطوح مختلف است و ممکن است نه تنها کارخانه‌های صنعتی بلکه مردم، محیط‌زیست و اقتصاد را نیز تحت تأثیر قرار دهد. احتمال اثر دومینو به دلیل توسعه در کارخانه‌های صنعتی، مجاورت چنین مراکزی و موجودی مواد خطرناک آن‌ها به‌طور فزاینده‌ای زیاد است. خطر بالقوه اثر دومینو به‌طور گسترده‌ای در قانون از اولین دستورالعمل (Seveso-I) (۸۲/۵۰۱/EEC) شناخته شده است که به ارزیابی اثرات دومینو در تجزیه و تحلیل ایمنی سایت‌های صنعتی که فعالیت‌های آن‌ها تحت این امر است، نیاز دارد. علاوه بر این، بخشنامه Seveso-II (96/82/EC) این الزامات را برای ارزیابی اثرات دومینو نه تنها در سایت مورد بررسی بلکه به کارخانه‌های مجاور نیز گسترش داد (۱۰).

یک مطالعه آماری از حوادث دومینو گذشته (۱۱) نشان می‌دهد که انفجارها با ۵۷ درصد بیشترین علت بروز اثر دومینو و به دنبال آن آتش‌سوزی‌ها ۴۳ درصد است. مطالعه ۲۲۵ حادثه شامل اثرات دومینو، نشان می‌دهد که نواحی ذخیره‌سازی محتمل‌ترین عامل شروع اثر دومینو (۳۵ درصد) و پس از آن فرآیندهای کارخانه (۲۸ درصد) هستند. همچنین، بیشترین توالی حوادث عبارت‌اند از انفجار-آتش (۲۷/۶ درصد)، آتش-انفجار (۲۷/۵ درصد) و آتش-آتش (۱۸ درصد).

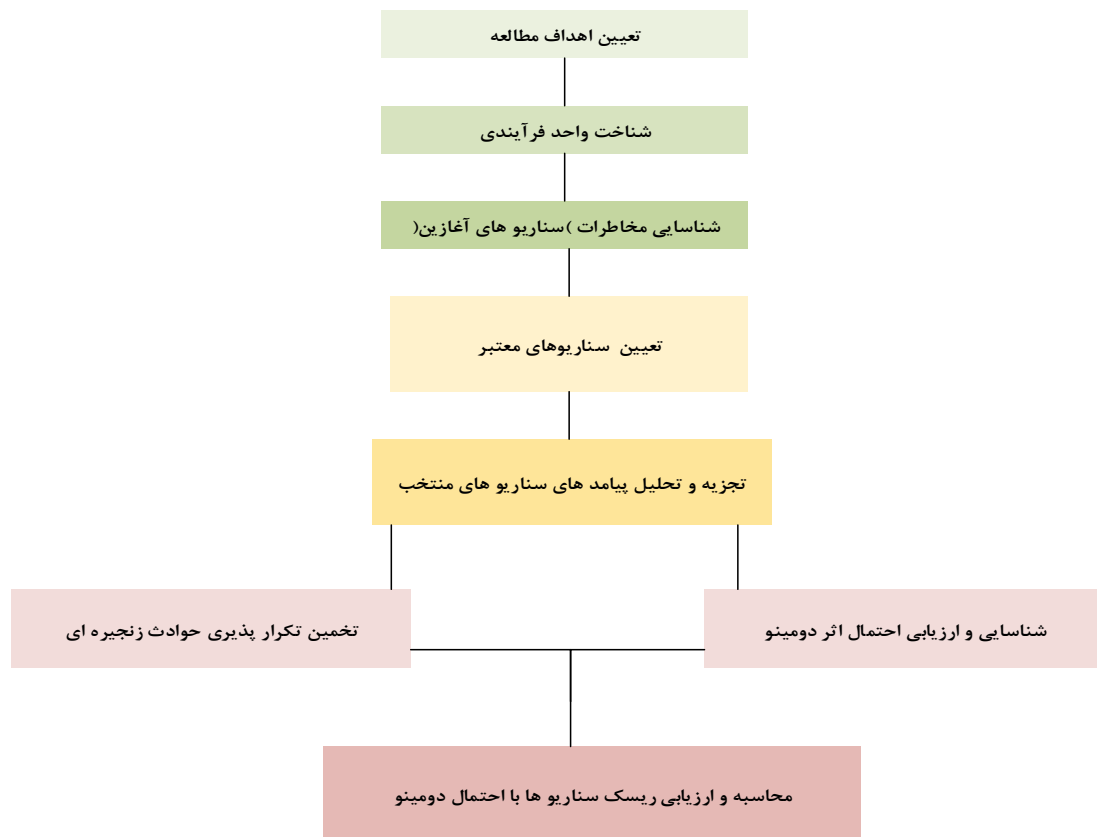
یکی از اصلی‌ترین و کلیدی‌ترین عناصر در سیستم‌های مدیریتی موفق، لزوم آمادگی و طرح‌ریزی برای واکنش در شرایط بحرانی و اضطراری جهت کاهش پیامدها و محافظت از پرسنل است، همچنین عملکرد و کارایی اقدامات واکنش اضطراری طراحی شده بر اساس سناریوها باید با توجه به تجزیه و تحلیل پیامدها و اثرات دومینو آن‌ها مورد توجه قرار گیرد (۱۲). گرچه تهدیدات ناشی از تأثیرات دومینو نزدیک به سه دهه به رسمیت شناخته شده است، ولی این موضوع هنوز در مورد نحوه

ارزیابی خود بحث‌برانگیز است. اگرچه استفاده از دستورالعمل‌های Seveso در کشورهای عضو اتحادیه اروپا باید بر اساس روش‌ها و ابزارهایی برای شناسایی سایت‌هایی باشد که احتمال ایجاد دامنه اثرات دومینو را دارند، اما هیچ رویه عمومی پذیرفته‌شده‌ای برای انجام چنین وظایفی در دسترس نیست. این به‌نوعی نتیجه عدم رویکرد هماهنگ برای ارزیابی خطرات عمده حوادث در کشورهای اروپایی است که بسته به کشور عضو، از رویکردهای کیفی، کمی یا نیمه کمی استفاده می‌شود. در سال ۲۰۱۲، مرکز تحقیقات مشترک EC و اداره حفاظت اجتماعی نروژ گزارشی در مورد رویکردی در جهت اثر دومینو در اروپا منتشر کردند. این گزارش نشان می‌دهد که همه کشورها تأسیسات با قابلیت اثر دومینو را شناسایی نکرده‌اند (فقط ۱۴ کشور گزارش داده‌اند که چنین فعالیتی را انجام داده‌اند). بعلاوه، اکثریت قریب به اتفاق کشورهای عضو اتحادیه اروپا فاقد ابزار (رهنمودها، چک لیست‌ها، مدل‌ها، نرم‌افزار) اختصاصی برای ارزیابی اثرات دومینو هستند (۱۳).

طی سال‌های متمادی، بررسی و تجزیه و تحلیل این نوع حوادث، مشکلی اساسی برای مهندسين ایمنی بوده است چراکه مدل‌های ارزیابی ریسک پروسه‌ها را به‌صورت مجزا بررسی می‌کنند، از این‌رو ابزار مناسبی به‌منظور بررسی نتایج حاصل از حوادث دومینو نمی‌باشند. لذا به مدلی نیاز است که بتواند با در نظر گرفتن سه عامل رخداد حادثه اولیه، تأثیر حادثه اولیه و گسترش موج آن به بخش‌های مختلف دیگر و امکان بروز یک یا چند حادثه ثانویه دیگر، تصویر درست و قابل قبولی از محدوده تحت تأثیر حوادث دومینو و ریسک آن ارائه دهد (۱۴). از این‌رو در مطالعه حاضر ضمن ارائه روشی جامع، ارزیابی کمی ریسک مخازن ذخیره میعانات گازی با در نظر گرفتن اثرات دومینو انجام گرفته است.

### روش کار

این مطالعه بر اساس روش QRA با در نظر گرفتن احتمال کلی اثرات دومینو بر روی مخازن میعانات گازی



تصویر ۱. مراحل انجام ارزیابی کمی ریسک با در نظر گرفت احتمال دومینو

از رئیس عملیات، اپراتور واحد، کارشناس فرآیند و کارشناسان HSE شناسایی و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. از جمله مواردی که در مطالعه مخازن ذخیره‌سازی میعان‌گازی در نظر گرفته شد شامل: نقشه‌های عملیاتی PFD's و P&ID's و نقشه‌های جانمایی (Layout)، شرح فرآیند، خواص فیزیکی و شیمیایی مواد موجود در فرآیند، بازدید میدانی و مصاحبه با کارشناسان واحد عملیات. در مطالعه حاضر به ارزیابی کمی ریسک در یک مجموعه پالایشگاهی گاز در منطقه عسلویه پرداخته شده است. همان‌طور که در تصویر ۲ مشهود است تعداد ۱۱ مخزن میعان‌گازی که در دو مجموعه پالایشگاهی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات مربوط به این مخازن در جدول ۱ نمایش داده شده است.

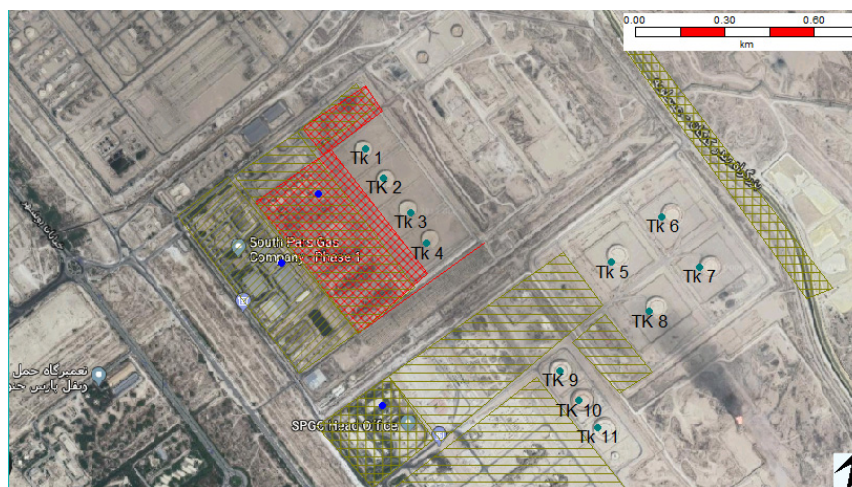
صورت گرفته است که طبق تصویر ۱ مراحل آن گام‌به‌گام انجام پذیرفت:

#### ۱. گام نخست تعیین اهداف مطالعه

اولین گام در ارزیابی ریسک کمی در یک شرکت/صنعت، تعیین اهداف ارزیابی است. اهداف موردنظر در این مطالعه شامل: تعیین ریسک فردی مخاطرات فرآیندی (حریق، انفجار، پخش مواد سمی) با در نظر گرفتن اثرات دومینو و تعیین حریم ایمن مخازن ذخیره‌سازی میعان‌گازی است.

#### ۲. شناخت واحد فرآیندی مورد مطالعه

در این مرحله کلیه پارامترها و داده‌های سیستم در راستای اهداف مطالعه به‌طور دقیق توسط تیمی متشکل



تصویر ۲. نحوه جانمایی مخازن میعانات گازی در مجموعه پالایشگاهی گاز مورد بررسی

جدول ۱. مشخصات مخازن مورد بررسی در تحقیق

ردیف	شماره مخزن	محتوای مخزن	حجم مخزن (مترمکعب)	نوع مخزن	دمای مخزن (درجه سانتی‌گراد)	سن تجهیزات
۱	TK 1	میعانات گازی	۴۲۰۰۰	سقف شناور	اتمسفریک	۱۷ سال
۲	TK 2	میعانات گازی	۴۲۰۰۰	سقف شناور	اتمسفریک	۱۷ سال
۳	TK 3	میعانات گازی	۴۲۰۰۰	سقف شناور	اتمسفریک	۱۷ سال
۴	TK 4	میعانات گازی	۴۲۰۰۰	سقف شناور	اتمسفریک	۱۷ سال
۵	TK 5	میعانات گازی	۶۰۰۰۰	سقف شناور	اتمسفریک	۱۸ سال
۶	TK 6	میعانات گازی	۶۰۰۰۰	سقف شناور	اتمسفریک	۱۸ سال
۷	TK 7	میعانات گازی	۶۰۰۰۰	سقف شناور	اتمسفریک	۱۸ سال
۸	TK 8	میعانات گازی	۶۰۰۰۰	سقف شناور	اتمسفریک	۱۸ سال
۹	TK 9	میعانات گازی	۸۱۰۰۰	سقف شناور	اتمسفریک	۱۰ سال
۱۰	TK 10	میعانات گازی	۸۱۰۰۰	سقف شناور	اتمسفریک	۱۰ سال
۱۱	TK 11	میعانات گازی	۸۱۰۰۰	سقف شناور	اتمسفریک	۱۰ سال

۳. شناسایی مخاطرات (سناریوهای آغازین)  
 در این مطالعه از دو روش زیر به‌منظور بررسی و شناسایی مخاطرات موجود استفاده گردید: ۱. مطالعات مخاطرات و راهبری (HAZOP)، ۲. تجزیه و تحلیل درخت خطا (FTA) در جهت تحلیل ریسک مخاطرات ناشی از نقص در عملکرد تجهیزات و به دنبال آن رهایش مواد از مخازن (۱۵). به‌منظور محاسبه نرخ تکرارپذیری از نمودار درخت خطا استفاده گردید که دو سناریو

معتبر به‌عنوان رخداد اولیه (TP<sup>۳</sup>) تعیین و با استناد به استانداردهای دفتر اجرایی بهداشت و ایمنی انگلستان<sup>۴</sup> میزان نرخ تکرارپذیری برای مخازن اتمسفریک با سقف شناور با قابلیت اشتعال بالا برای نشتی  $۴ \times ۱۰^{-۴}$  و برای ترکیبگی مخزن  $۱ \times ۱۰^{-۵}$  محاسبه گردید.

۴. تعیین سناریوهای معتبر

سناریو، واقعه‌ای است که می‌تواند منجر به رخداد

3 Top Event

4 The Health and Safety Executive (HSE)

2 Fault Tree Analysis

جدول ۲. مشخصات پارامترهای آب و هوایی منطقه مورد مطالعه

پارامترهای محیطی مورد نیاز	شرایط آب و هوایی مربوط به بازه زمانی بهار و تابستان	شرایط آب و هوایی مربوط به بازه زمانی پاییز و زمستان
دما (میانگین)	۳۶ درجه سانتی گراد	۱۹ درجه سانتی گراد
رطوبت نسبی (میانگین)	۵۱٪	۶۳٪
سرعت باد (میانگین)	۷/۳ متر بر ثانیه	۵ متر بر ثانیه
پایداری جو	D	D
وجود موانع	برخی موانع مثل تأسیسات	برخی موانع مثل تأسیسات
نوع محوطه (روباژ یا بسته)	روباژ	روباژ
جهت غالب باد	جنوبی	جنوبی
ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد از سطح زمین	۵ متر	۵ متر
پدیده وارونگی دما	ندارد	ندارد
ارتفاع از سطح دریا	.	.

در مدل‌سازی پیامدهای ناشی از نشت و یا ترکیب مخازن باید بدترین حالت ممکن و بدترین شرایط آب و هوایی را در نظر گرفت که در این مطالعه بر اساس استاندارد مرجع مورد استناد (شرکت DNV.GL<sup>۷</sup>) (۱۷) دو سناریو معتبر نشتی<sup>۸</sup> ۱۲ اینچی و ترکیب/ پارگی فاجعه‌بار<sup>۹</sup> مخزن شماره ۳ مورد بررسی قرار گرفت که احتمالات مربوط به شاخه‌های این درخت رویداد در تصویر ۳ آنالیز درخت واقعه نمایان است (۱۸).

۵. تجزیه و تحلیل پیامدهای سناریوهای منتخب در این مرحله پیامدهای گوناگون ناشی از یک سناریو که می‌تواند سبب تلفات، صدمات جسمی به انسان و آسیب به تجهیزات و ساختمان‌های اطراف شود ارزیابی می‌گردید، هر سناریو به صورت واقعه‌ای مستقل در نظر گرفته می‌شود. پیامد حوادث (مانند آتش، انفجار و غیره) اثرات فیزیکی بر روی افراد، اموال و محیط‌زیست دارد، عمدتاً به علت تابش حرارتی<sup>۱۰</sup>، انفجار ناشی از فشار بیش‌ازحد<sup>۱۱</sup> و قرار گرفتن در معرض سمیت<sup>۱۲</sup> است. امروزه

یکی از مخاطرات فرآیندی نظیر آتش، انفجار و رهائش مواد سمی شود. سناریو به صورت رخداد مستقل در نظر گرفته می‌شود که ممکن است در یک واحد فرآیندی اتفاق بیافتد و هر کدام از این سناریوها می‌تواند چندین نتیجه حادثه (آتش، انفجار، پخش مواد سمی و ...) داشته باشد. طراحی و ایمنی احتیاطات برای مخازن ذخیره‌سازی و دیگر تأسیسات فرآیند، احتمال وقوع یک حادثه را به حداقل می‌رساند؛ باین‌حال، انتشار تصادفی ممکن است در هر تأسیسی رخ دهد. از دست دادن مهارها (LOC<sup>۵</sup>) یکی از شایع‌ترین رویدادهای آغازین در حوادث دنباله‌دار در صنعت فرآیندی است (۱۶). پیامد سناریوها به چندین پارامتر شامل شرایط عملیاتی (مانند دما و فشار)، نوع تجهیزات دچار نقص شده (مخزن ذخیره‌سازی/اتصالات فرآیند)، ویژگی‌های نشت (اصلی، جزئی یا فوری)، فاز آزاد شدن (مایع، گاز یا دوفازی) و گروه مواد خطرناک منتشرشده (اشتعال‌پذیری، انفجار، واکنش‌پذیری و سمیت) بستگی دارد. برای تعیین پیامد نهایی هر رویداد آغازین، از تکنیک درخت رویداد (ETA<sup>۶</sup>) استفاده گردید. شرایط آب و هوایی منطقه جهت مدل‌سازی در نرم‌افزار بر اساس نمودار گلباد در دو کلاس آب و هوایی تابستان و زمستان طبق جدول ۲ تعیین گردید.

5 Loss of Containment  
6 Event Tree Analysis

7 Det Norske Veritas (Norway) and Germanischer Lloyd (Germany)

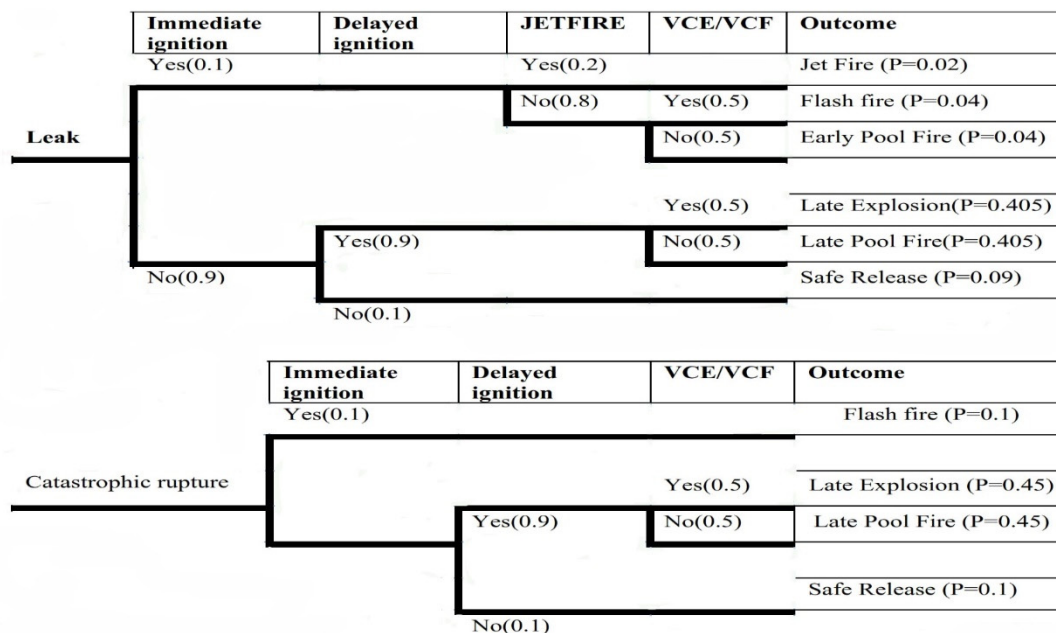
8 Leak

9 Catastrophic rupture

10 Thermal Radiation

11 Blast Overpressure

12 Toxicity Exposure



تصویر ۳. درخت واقعه مربوط به رویداد نشتی و ترکیدگی/پارگی فاجعه‌بار

می‌گیرند، بردارهای تشدید<sup>۱۵</sup> بر روی واحدهای مجاور با مقادیر آستانه<sup>۱۶</sup> (جدول ۳) پیش تعریف شده مقایسه می‌شوند. این آستانه‌ها توسط سطوح تابش حرارتی، فشار بیش از حد یا غلظت سمی که باعث تأثیرات خاص بر روی افراد و یا اموال می‌شود، داده می‌شود.

بردارهای تشدید که بالاتر از آستانه‌های مربوطه هستند، به اندازه کافی قوی هستند تا آسیب‌های قابل توجهی به واحدهای مجاور وارد کنند. برای برآورد احتمال حوادث ناشی از دومینو، احتمالات آسیب‌های واحدهای هدف باید محاسبه شود. برای محاسبه احتمالات آسیب‌ها، روش‌های مختلفی ارائه شده است (آیزنبرگ و همکاران (۲۱)؛ ویلچز و همکاران (۲۲)؛ کوزانی و همکاران (۲۳)). توابع Probit به دلیل سادگی و انعطاف‌پذیری آن‌ها به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با استفاده از توابع Probit (جدول ۴) اول مقدار Probit،  $Y$ ، به صورت  $Y = a + b \ln(EV)$  محاسبه می‌شود (۲۲)، جایی که  $EV$  بزرگ‌تر از بردار

این مرحله به دلیل پیچیدگی روابط مربوط به مدل‌سازی و زمان‌بر بودن حل آن‌ها، توسط نرم‌افزارهای کامپیوتری انجام می‌شود. در این مطالعه، از نرم‌افزار (۷۷.۲۲) PHAST که بیشتر در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۹، ۲۰) برای ارزیابی اثرات پیامد سناریو نهایی استفاده گردید. مناطق تأثیرپذیر به‌عنوان فاصله‌های شعاعی از منبع انتشار محاسبه می‌شوند که در آن مقدار اشعه حرارتی، فشار بیش از حد یا غلظت سمی بالاتر از معیارهای مشخص شده ارزیابی می‌شود.

#### ۵.۱. شناسایی و ارزیابی احتمال اثر دومینو

طبق گفته کوزانی و همکاران (۷) اثرات دومینو ممکن است با یک یا چند رویداد مانند آتش‌سوزی، آتش‌فورانی، آتش‌کروی،  $VCE$ <sup>۱۳</sup>،  $BLEVE$ <sup>۱۴</sup> و غیره آغاز شود. در این مطالعه، برای تعیین اینکه کدام واحدها در شرکت‌های همسایه احتمالاً تحت تأثیر رویداد اصلی قرار

15 Escalation Vector  
16 Threshold Value

13 Vapor Cloud Explosions  
14 boiling liquid expanding vapor explosion

جدول ۳. حدود آستانه موردنظر برای بردارهای تشدید

حدود آستانه	تجهیز مورد هدف	بردار تشدید و سناریو اولیه
غیرمحمول تنها در صورت در بر گرفته شدن توسط آتش ممکن است غیرمحمول ۱۵ کیلووات/مترمربع برای بیشتر از ۱۰ دقیقه ۵۰ کیلووات/مترمربع برای بیشتر از ۱۰ دقیقه	همه تجهیزات اتمسفریک تحت فشار اتمسفریک تحت فشار	تشعشع آتش ناگهانی آتش کروی آتش فورانی و آتش استخری
۲۲ کیلو پاسکال ۱۷ کیلو پاسکال	اتمسفریک تحت فشار	موج بیشینه فشار همه موج‌های بیشینه فشار ناشی از انفجار
۳۰۰ متر	همه تجهیزات	سناریوهای پرتابه انفجاری ناشی از انفجار مکانیکی، ابر بخار یا BLEVE

جدول ۴. مدل‌های محاسبه احتمال تشدید در مطالعه حاضر

مدل مورد استفاده جهت محاسبه احتمال تشدید	تجهیز مورد هدف	بردار تشدید و سناریو اولیه
مدل پروبیت مبتنی بر "زمان نقص" و مدل‌های ساده شده برای ttf در مقابل تابش: $Y=12.54-1.847\ln(\text{ttf}), \ln(\text{ttf})=-1.128\ln(I)-2.667\times 10^{-5}V+9.877$ $Y=12.54-1.847\ln(\text{ttf}), \ln(\text{ttf})=-0.947\ln(I)+8.835V^{0.032}$	اتمسفریک تحت فشار	تشعشع (همه سناریوهای تشعشع)
مدل پروبیت مبتنی بر فشار بیشینه استاتیک: $Y=-18.96+2.44\ln(Ps)$ $Y=-42.44+4.33\ln(Ps)$ $Y=-28.07+3.16\ln(Ps)$ $Y=-17.79+2.18\ln(Ps)$	اتمسفریک تحت فشار Elongated Auxiliary	موج فشار (همه سناریوهای فشار)

Y: مقدار پروبیت; Time of Failure, (I): شدت تابش V; Kw/m<sup>2</sup> حجم مخزن: (Ps), M<sup>3</sup> موج فشار Kpa

مجاور، احتمال اثرات زنجیره‌ای را به دست آورد. برای شرایط خاصی که وقوع یک حادثه اولیه منجر به وقوع پیوستن تنها یک سناریو ثانویه می‌شود، تکرارپذیری حادثه زنجیره‌ای از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد (۲۴-۲۶):

$$f_{de} = f_{pe} Pd \quad \text{رابطه ۱}$$

که  $f_{de}$  فرکانس مربوط به وقوع حادثه زنجیره‌ای ( $\text{year}^{-1}$ )،  $f_{pe}$  فرکانس حادثه اولیه ( $\text{year}^{-1}$ ) که یا از طریق گزارشات ایمنی و یا استفاده از روش آنالیز درخت خطا در دسترس می‌باشد و  $Pd$  احتمال گسترش یافتن حادثه

تشدید یا یک پارامتر مرتبط است و  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت هستند. با داشتن  $Y$  مشخص، احتمال آسیب  $P$ ، می‌توان به صورت  $P = \varphi (Y - \delta)$  محاسبه شود که  $\varphi$  تابع چگالی تجمعی توزیع نرمال استاندارد است (خاکزاد و همکاران (۲۴)).

#### ۲.۵. تخمین تکرارپذیری حوادث زنجیره‌ای

به منظور محاسبه احتمال وقوع حوادث زنجیره‌ای، می‌بایست وارد مقوله احتمالات شد و با به دست آوردن احتمال وقوع یک حادثه اولیه به صورت منفرد و سپس محاسبه احتمال گسترش این حادثه به سایر تجهیزات

به این ترتیب فرکانس حادثه زنجیره‌ای از حاصل ضرب فرکانس حادثه اولیه در احتمال کلی گسترش این حادثه به دست می‌آید:

$$f_{de} = f_{pe} \times P_e \quad \text{رابطه ۵.}$$

۶. محاسبه و ارزیابی ریسک سناریوهای با احتمال دومینو ریسک فردی<sup>۱۷</sup>

ریسک فردی به معنای احتمال صدمه دیدن یک شخص، در نزدیکی محل حادثه بوده و تابع عوامل مختلفی نظیر نوع صدمه ایجاد شده، احتمال اتفاق افتادن حادثه و شدت حادثه می‌باشد. از آنجاکه به غیر از مرگ برای سطح سایر صدمات تعریف یکسانی نمی‌توان ارائه کرد، لذا منظور از صدمه در این تعریف، صدمات جبران‌ناپذیر و در اکثر موارد مرگ است و از رابطه ساده زیر محاسبه می‌شود:

احتمال کشته شدن فرد در اثر حادثه (تکرارپذیری حادثه):

$$IR_{x,y,i} = f_i P_{f,i}$$

$f_i$ : میزان تکرارپذیری حادثه نهایی  $i$  ناشی از یک حادثه (۱/yr).

$P_{f,i}$ : احتمال مرگبار بودن حادثه نهایی  $i$  ناشی از یک حادثه در موقعیت جغرافیایی  $(X, Y)$ .

رابطه (ریسک فردی نهایی):  $IR_{x,y} = \sum_{i=1}^n IR_{x,y,i}$   
 ریسک فردی نهایی در نقطه‌ای به موقعیت جغرافیایی  $(X, Y)$ ، (احتمال کشته شدن یک نفر در سال).  
 $IR_{x,y,i}$ : ریسک فردی در نقطه‌ای به موقعیت جغرافیایی  $(X, Y)$  و ناشی از حادثه نهایی  $i$ ، (احتمال کشته شدن یک نفر در سال).

برای نمایش ریسک فردی اغلب از دو نوع نمودار استفاده می‌شود که نوع اول آن نمودار تراز<sup>۱۸</sup> است. در این

اولیه است که از مدل‌های پرابیت احتمال گسترش آسیب محاسبه می‌شود. فرکانس وقوع حوادث اولیه از طریق گزارش‌ها و مطالعات صورت گرفته در مباحث ایمنی می‌تواند به دست آید و یا آنکه از طریق روش درخت واقعه محاسبه شود. در حالت کلی تری از حوادث زنجیره‌ای که سناریو اولیه منجر به بروز بیش از یک حادثه ثانویه می‌گردد، رابطه محاسبه تکرارپذیری پیچیده‌تر می‌شود. اگر فرض شود که به دلیل وجود  $N$  دستگاه مجاور منبع حادثه اولیه، وقوع  $N$  حادثه ثانویه محتمل باشد، احتمال آنکه یک سناریو زنجیره‌ای که در نتیجه رسیدن آسیب به  $k$  دستگاه منجر به حادث شدن  $k$  حادثه ثانویه می‌گردد ( $N \leq k$ ) و با بردار  $J_m^k$  مشخص می‌گردد از رابطه (۲) به دست می‌آید:

رابطه ۲.

$$P(k, m) = \prod_{j=1}^N [1 - P_{d,i} + \delta(i, J_m^k)(2P_{d,i} - 1)]$$

در نهایت میزان تکرارپذیری حادثه زنجیره‌ای  $m$  ام از میان  $k$  حادثه زنجیره‌ای محتمل از رابطه (۳) قابل دستیابی است:

$$f_{de}^{(k,m)} = f_{pe} P_d^{(k,m)} \quad \text{رابطه ۳.}$$

همان طوری که اشاره شد در رابطه فوق کل حوادث زنجیره‌ای محتمل بدون در نظر گرفتن حدود آستانه و اینکه آیا امکان گسترش حادثه وجود دارد یا خیر، محاسبه می‌گردد. در حالی که با انجام مرحله غربالگری و حذف تجهیزاتی که احتمال گسترش حادثه اولیه بر روی آن‌ها از میان کل تجهیزات مجاور وجود ندارد، می‌توان از تعداد کل این حوادث زنجیره‌ای و پیچیده شدن رابطه احتمال گسترش کلی جلوگیری به عمل آورد. احتمال گسترش کلی حادثه اولیه به کمک رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$P_{de} = \sum_{K=1}^N \sum_{M=1}^{\theta k} P_d \quad \text{رابطه ۴.}$$

17 Individual risk  
18 Level Graph

جدول ۵. نتایج ارزیابی پیامد سناریوها بر روی مخازن مجاور

سناریو نشتی						سناریو ترکیبگی/پارگی فاجعه بار		
Late Explosion	Late pool fire	Late Explosion	Late pool fire	Early pool fire	Jetfire	فاصله بین مخازن (متر)	مخزن مورد هدف	مخزن آسیب دیده
موج فشار (barg)	شدت تشعشع (kw/m2)	موج فشار (barg)	شدت تشعشع (kw/m2)	شدت تشعشع (kw/m2)	شدت تشعشع (kw/m2)			
۰/۲۰۶۸	۲۰	۰/۲۰۶۸	۶	ناچیز	۶	۲۰/۱/۵	۱	۳
۰/۲۰۶۸	۲۰	۰/۲۰۶۸	۲۰	۶/۳۷	۴۸	۸۵/۵	۲	۳
۰/۲۰۶۸	۲۰	۰/۲۰۶۸	۲۰	۶/۳۷	۴۸	۸۵/۵	۴	۳
۰/۲۰۶۸	۲۰	۰/۱۳۷۹	ناچیز	ناچیز	ناچیز	۶۹۰	۵	۳
۰/۲۰۶۸	۲۰	۰/۲۰۶۸	ناچیز	ناچیز	ناچیز	۸۵۰	۶	۳
۰/۲۰۶۸	۲۰	۰/۲۰۶۸	ناچیز	ناچیز	ناچیز	۹۹۵	۷	۳
۰/۲۰۶۸	۲۰	۰/۲۰۶۸	ناچیز	ناچیز	ناچیز	۸۶۰	۸	۳
۰/۲۰۶۸	۲۰	۰/۲۰۶۸	ناچیز	ناچیز	ناچیز	۷۱۰	۹	۳
۰/۲۰۶۸	۲۰	۰/۲۰۶۸	ناچیز	ناچیز	ناچیز	۸۲۰	۱۰	۳
۰/۲۰۶۸	۲۰	۰/۲۰۶۸	ناچیز	ناچیز	ناچیز	۹۵۵	۱۱	۳

جدول ۶. محاسبه احتمال پروبیت، PE، نرخ تکرارپذیری حوادث زنجیره‌ای

سناریو ترکیبگی/پارگی فاجعه بار				سناریو نشتی					مخزن مورد هدف
Fd	Fp	PE	احتمال پروبیت	Fd	Fp	PE	احتمال پروبیت		
			Late pool fire				Late pool fire	Jet fire	
۴/۰۸×۸-۱۰	۱×۵-۱۰	۰/۰۰۴	۰/۰۱						Tk 1
۴/۰۸×۸-۱۰	۱×۵-۱۰	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۷/۲×۶-۱۰	۴×۴-۱۰	۰/۱۷	۰/۰۱	۰/۲۸	Tk2
۴/۰۸×۸-۱۰	۱×۵-۱۰	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۷/۲×۶-۱۰	۴×۴-۱۰	۰/۱۷	۰/۰۱	۰/۲۸	Tk4
۲/۴۳×۷-۱۰	۱×۵-۱۰	۰/۰۲۴	۰/۰۶						TK5
۲/۴۳×۷-۱۰	۱×۵-۱۰	۰/۰۲۴	۰/۰۶						Tk6
۲/۴۳×۷-۱۰	۱×۵-۱۰	۰/۰۲۴	۰/۰۶						Tk7
۲/۴۳×۷-۱۰	۱×۵-۱۰	۰/۰۲۴	۰/۰۶						TK8
۱/۲۵×۶-۱۰	۱×۵-۱۰	۰/۱۲۵	۰/۳۱						TK9
۱/۲۵×۶-۱۰	۱×۵-۱۰	۰/۱۲۵	۰/۳۱						TK10
۱/۲۵×۶-۱۰	۱×۵-۱۰	۰/۱۲۵	۰/۳۱						TK11

وزش باد در یک جهت با جهت دیگر متفاوت است و همین امر ممکن سبب شود که این ترازها دایره‌ای شکل نباشند. برای محاسبه ریسک فردی با در نظر گرفتن اثر دومینو می‌بایست از رابطه زیر استفاده نمود:

$$IR_{(x,y)de} = f_{de} P_{de}$$

نمودارها، ریسک فردی در هر نقطه جغرافیایی بر روی نقشه ترسیم می‌شود و هر تراز نمایانگر محیطی پیرامون محل حادثه می‌باشد که دارای ریسک فردی یکسانی است. از آنجاکه شدت پیامدهای یک حادثه ممکن است در جهات مختلف یکسان نباشد، به‌طور مثال احتمال



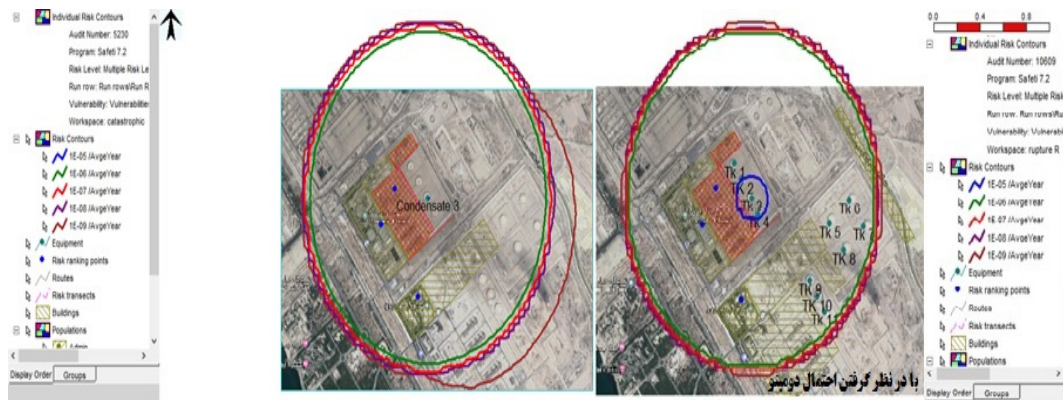
تصویر ۴. تراز ریسک فردی ناشی مخزن TK3 با و بدون در نظر گرفتن اثرات دومینو

### یافته‌ها

تعیین گردید. همان‌طور که نتایج آن در جدول ۵ مشاهده می‌گردد در سناریوی ناشی مخازن ۶ تا ۱۱ به علت ناچیز بودن مقدار تشعشع و موج انفجار و در مخازن ۱ و ۵ به علت نرسیدن به حد آستانه آسیب از محاسبات بعدی حذف گردیده است. بیشترین مقدار احتمال گسترش آسیب در سناریوی ناشی مربوط به مخازن ۲ و ۴ با احتمال ۰/۱۷ و نرخ تکرارپذیری  $10^{-6} \times 7/2$  و در سناریوی ترکیبگی/پارگی فاجعه‌بار مخازن ۹ تا ۱۱ با احتمال ۰/۱۲۵ و نرخ تکرارپذیری  $10^{-6} \times 1/25$  می‌باشد. همچنین بر طبق نتایج در سناریوی ناشی، فاصله ایمن بین مخازن میعانات گازی جهت عدم وقوع حوادث دومینو بیشتر از ۱۲۰ متر می‌باشد و فاصله ایمن بین آخرین مخزن میعانات گازی در پالایشگاه با مخزن دیگر در پالایشگاه مجاور بیشتر از ۹۰۰ متر می‌باشد.

بعد از محاسبه نرخ تکرارپذیری سناریوها با و بدون در نظر گرفتن اثرات دومینو و وارد کردن اطلاعات سناریوها و جمعیت در معرض در نرم‌افزار PHAST, SAFETI (۷۷.۲۲)، ترازهای ریسک فردی مطابق تصویر ۴ برای سناریوی ناشی و تصویر ۵ برای سناریوی ترکیبگی/پارگی فاجعه‌بار ترسیم گردید. همان‌طور که در تصویر ۴ مشخص است، در سناریوی ناشی شعاع تراز ریسک  $10^{-4}$  بعد از در نظر گرفتن اثرات دومینو تا حدود ۲۵۰ متر و شعاع تراز ریسک  $10^{-5}$  تا حدود ۴۰۰ متر افزایش داشته است. همچنین در سناریوی ترکیبگی/پارگی فاجعه‌بار نیز طبق تصویر ۵، شعاع تراز ریسک  $10^{-5}$  بعد از

با استفاده نرم‌افزار PHAST (۷۷.۲۲) پیامدهای سناریوهای مورد مطالعه و نواحی تحت تأثیر آن بر روی مخازن مجاور مشخص گردید، نتایج این ارزیابی که طبق جدول ۷ مشهود است که نشان می‌دهد در سناریوی ناشی مخازن ۲ و ۴ به علت فاصله کم در حدود ۸۵/۵ متر بیشترین شدت تشعشع و موج انفجار را دریافت می‌نمایند و مخازن ۵ تا ۱۱ به علت فاصله بیشتر تقریباً تشعشع و موج انفجاری را دریافت نمی‌کنند که بیشترین شدت تشعشع مربوط به Jetfire می‌باشد که در عین حال کمترین احتمال وقوع را نیز دارا می‌باشد. در سناریوی ترکیبگی/پارگی فاجعه‌بار مخازن، همه مخازن شدت تشعشع مشابه و موج انفجار مشابهی را دریافت می‌کنند. بر اساس نتایج حاصله ایمن‌ترین فاصله (بدون دریافت تشعشع یا موج تأثیرگذار) در سناریوی ناشی ۶۱۲ متر و در سناریوی ترکیبگی/پارگی فاجعه‌بار ۳۴۳۰ متر می‌باشد. در گام بعدی جهت محاسبه احتمال آسیب مخازن، ابتدا بر اساس حدود آستانه تعریف‌شده در جدول ۳ غربالگری نموده و فقط بردارهای تشدید تأثیرگذار بر روی مخازن جهت انجام محاسبات بعدی در نظر گرفته شد، سپس با استفاده از روابط موجود در جدول شماره ۴ احتمال پروبیت هر کدام از مخازن مجاور و همچنین با استفاده از رابطه ۴ احتمال کلی گسترش حادثه زنجیره‌ای (PE) برای هر مخزن محاسبه شد و در نهایت با استفاده از رابطه ۵، نرخ تکرارپذیری اثر دومینو برای هر مخزن



تصویر ۵. تراز ریسک فردی ترکیب‌گی/پارگی مخزن TK3 با و بدون در نظر گرفتن اثرات دومینو

که در منطقه داخلی از هرگونه ساخت‌وساز به‌استثنای واحدهای کوچک صنعتی و کم‌جمعیت، آن‌هم در موارد ضروری خودداری شود. همچنین در منطقه خارجی تنها از ساخت‌وساز سازمان‌ها و مناطق حساس و نیز مراکز خرید و سرگرمی بزرگ و پررفت‌وآمد بایستی ممانعت به عمل آید (۱۴). دستیابی به ایمنی در اتحادیه اروپا<sup>۲۳</sup> تفاوت قابل‌توجهی دارد، از بررسی معیارهای ریسک فردی می‌توان دریافت که ریسک فردی  $10^{-5}$  در سال نشان‌دهنده حد بالایی<sup>۲۴</sup> در اروپا برای تأسیسات موجود است، درحالی‌که در انگلیس حد غیرقابل تحمل  $10^{-4}$  است اما رعایت ALARP<sup>۲۵</sup> کاملاً تحمیل می‌شود، به این معنی که در واقعیت، ریسک خیلی کمتر از حد مجاز است. میزان ریسک ناچیز<sup>۲۶</sup> که در انگلیس به‌عنوان  $10^{-7}$  در سال و در هلند به‌عنوان  $10^{-8}$  در سال مشخص می‌شود، جای سؤالی باقی نمی‌گذارد و فرض بر این است که مقدار  $10^{-8}$  می‌تواند فعلاً در سراسر اتحادیه اروپا پذیرفته شود (۲۷).

بر اساس معیارهای پذیرش ریسک فردی در اتحادیه اروپا و انگلیس، نتایج ارزیابی ریسک فردی در مطالعه حاضر خصوصاً زمانی که اثرات دومینو نیز در نظر گرفته‌شده‌اند از میزان قابل‌پذیرش برای همسایگان تجاوز

در نظر گرفتن اثرات دومینو تا حدود ۱۰۰ متر در اطراف مخزن ۳ افزایش داشته است. مقایسه ترازهای ریسک در تصاویر، افزایش میزان ریسک را در صورت محاسبه اثر دومینو به‌وضوح نمایان ساخته است.

### بحث

بر اساس استانداردهایی که در آژانس مجری بهداشت و ایمنی انگلستان طرح گردیده است، معیاری برای انجام ساخت‌وساز اماکن با کاربری‌های مختلف در اراضی اطراف واحدهای مخاطره‌آفرین وجود دارد. از آنجایی‌که چنین ملاک‌هایی در ایران هنوز به‌صورت استاندارد تعریف نشده است، بنابراین در این مطالعه از معیار مذکور استفاده گردیده است. بر این اساس اراضی از لحاظ کاربری<sup>۱۹</sup> به ۴ دسته کلی تقسیم‌بندی شده است: مناطق صنعتی، مراکز خرید و سرگرمی، مناطق مسکونی و سازمان‌ها و مراکز حساس و پررفت‌وآمد. از طرفی محدوده‌های تقسیم‌بندی ریسک فردی نیز به سه منطقه تقسیم می‌شود: منطقه داخلی<sup>۲۰</sup> با میزان ریسک فردی بیشتر از  $10^{-5}$  منطقه میانی<sup>۲۱</sup> با ریسک فردی بین  $10^{-5}$  تا  $10^{-6}$  و نهایتاً منطقه بیرونی<sup>۲۲</sup> با میزان ریسک فردی بین  $10^{-6}$  تا  $10^{-7}$  است. توصیه‌های ایمنی صورت گرفته به این قرار است

- 23 European Union
- 24 Upper limit
- 25 As low as reasonably practicable
- 26 Negligible risk

- 19 Land Using
- 20 Inner Zone
- 21 Middle Zone
- 22 Outer Zone

همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود بیشترین میزان احتمال پروبیت که می‌تواند منجر به آسیب به مخازن مجاور گردد به ترتیب مربوط به آتش فورانی و آتش استخری است که طبق مطالعه آماری دبرا و همکاران (۱۱) در حوادث رخ داده که منجر به دومینو می‌شود میزان فراوانی سناریوهای آتش-آتش ۱۸ درصد است. همچنین میزان فاصله، یکی از عوامل اصلی در کاهش احتمال دومینو است که در مطالعه حاضر زمانی که فاصله به بیش از ۶۰۰ متر می‌رسد احتمال وقوع دومینو تقریباً به صفر می‌رسد. این عامل برای صنایعی که امکان جانمایی تجهیزات و مخازن ذخیره‌سازی وجود دارد بسیار سودمند است و برای صنایعی که محدودیت فضا وجود دارد می‌بایست از موانع ایمنی جهت کاهش احتمال دومینو استفاده کرد که لندوچی و همکاران (۲۸) در مطالعه‌ای موردی به تعیین سهم موانع ایمنی در کاهش احتمال دومینو پرداخته‌اند که بر آن اساس ایمنی و آتش‌نشانی<sup>۲۷</sup> و اقدامات اضطراری<sup>۲۸</sup> بیشترین میزان کاهش را در احتمال دومینو داشتند.

در مطالعه‌ای دیگر عبدالحمید زاده و همکاران (۲۹) با بررسی یک مجموعه ذخیره‌سازی شامل مخازن نفتا، LPG و زایلن به مقایسه نتایج ارزیابی احتمال وقوع دومینو در حالت آنالیز تحلیلی و استفاده از الگوریتم FREEDOM<sup>۲۹</sup> نموده که نتایج نشان می‌دهد زمانی که تعداد سناریوهای آغازین بیشتر از یکی است به دلیل پیچیدگی محاسبات و به دست آوردن میزان ریسک دقیق‌تر می‌بایست از نرم‌افزار و شبیه‌سازها استفاده نمود تا بتوان نرخ دقیق تکرارپذیری سناریوها را تخمین زد که یکی از تفاوت‌های این مطالعه با مطالعه عبدالحمید زاده در محدود بودن مخازن (میعانات گازی) است که تعداد پیامدها (انفجار، آتش، انتشار سمی و پرتابه) ناشی از مخازن متفاوت را محدود می‌کند. یکی از محدودیت‌هایی که برای مطالعات دومینو در ایران وجود دارد، نبود پایگاه داده معتبر برای تخمین نرخ تکرارپذیری نقص است و

27 Fire Protection

28 Emergency measures

29 FREquency Estimation of DOMino accidents

می‌نماید و این امر به‌خوبی نمایان‌گر عدم رعایت فواصل ایمن در تأسیس پالایشگاه‌ها در مجاورت یکدیگر است. همچنین مقدار ریسک فردی در سناریو ترکیب پارگی مخزن برای افراد حاضر در ساختمان‌های ستادی (در هر دو پالایشگاه) در محدوده غیرقابل‌تحمل قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده این است که حدفواصل ایمن بین واحدهای عملیاتی و ستادی رعایت نشده است و در صورت احتمال وقوع چنین حوادثی می‌بایست افراد به‌طور کامل از پالایشگاه تخلیه گردند و محل‌های تجمع ایمن در محدوده پالایشگاه در این‌گونه مواقع ایمن نیستند.

آنتونیونی و همکاران (۱۰) نیز در مطالعه‌ای مشابه بر روی مخازن بوتادین با استفاده از روش QRA و محاسبه احتمال کلی گسترش اثرات دومینو، ترازهای ریسک فردی را با و بدون در نظر گرفتن اثر دومینو با استفاده از نرم‌افزار Aripa-GIS ترسیم نمودند که طبق نتایج حاصله تراز ریسک فردی  $10^{-6}$  بعد از در نظر گرفتن اثر دومینو حدود  $300$  متر و تراز ریسک  $10^{-7}$  با در نظر گرفتن اثر دومینو حدود  $400$  متر جابه‌جا گردید. در مطالعه دیگری که توسط زینالی و همکاران (۱۳) بر روی مخازن دو مجتمع پتروشیمی شهید تندگویان و بوعلی سینا که در مجاورت یکدیگر قرار دارند نیز با استفاده از روش QRA و محاسبه احتمال کلی گسترش اثرات دومینو ترازهای ریسک فردی با و بدون در نظر گرفتن اثر دومینو با استفاده شبکه‌بندی نقشه ترسیم گردید که طبق نتایج حاصله ترازهای ریسک فردی با در نظر گرفتن اثر دومینو در تراز  $10^{-5}$  به میزان  $200$  متر و تراز  $10^{-6}$  به میزان  $500$  متر و تراز  $10^{-7}$  به میزان  $600$  متر جابه‌جا گردیده است، همچنین مخازن ذخیره‌سازی مجتمع تندگویان در منطقه داخلی ترازهای ریسک فردی مربوط به سناریوهای آسیب به مخازن مجتمع بوعلی سینا قرار می‌گیرند. میزان جابه‌جایی ترازهای ریسک فردی در مطالعه حاضر با مطالعات فوق‌زمانی که اثرات دومینو در نظر گرفته می‌شود همخوانی دارد و اختلاف در میزان ریسک‌های فردی نیز به دلیل تفاوت در فرآیندهای مورد بررسی و سناریوها است.

است که می‌توان با ارزیابی ریسک سناریوهای مختلف مشخص گردند، ارزیابی کمی ریسک با در نظر گرفتن اثرات دومینو ابزار کلیدی در جهت فهم سناریوهای با احتمال اثر دومینو در سایت‌های صنعتی است؛ بنابراین لازم است در صنایع فرآیندی کشور اهمیت ویژه‌ای به ارزیابی ریسک‌های حوادث زنجیره‌ای داده شود تا بتوان طرح‌های جامع مدیریت بحران را برای همه سناریوهای محتمل اجرایی نمود.

### تشکر و قدردانی

این مقاله از پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای حسین رضانی در دانشگاه علوم پزشکی همدان به شماره ۹۸۰۲۲۴۱۴۵۸ و کد اخلاق IR.UMSHA.۱۳۹۸.۱۰۴ REC استخراج شده است. نویسندگان بدین‌وسیله از مجتمع گاز پارس جنوبی و تمام کسانی که در راستای اجرای این پژوهش همکاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را به عمل می‌آورند.

### REFERENCES

1. Ebrahimzadeh M, Halvani G, Mortazavi M, Soltani R. Assessment of potential hazards by failure modes and effect analysis (FMEA) method in Shiraz oil refinery. Occupational Medicine Quarterly Journal. 2011;3(2):16-23. [Persian]
2. Kamaei M, Keshvari A, Moshashaei P. Investigating and modeling of the effects of condensate storage tank fire in a refinery. Journal of Occupational Hygiene Engineering. 2015;2(3):29-37. [Persian]
3. Mehrshad F, Jozi SA, Malmasi S, Baradaran V. Risk Assessment of the Controlling Methods to Prevent the Harmful Environmental Effects from Fire and Explosion: A Case Study. International Journal of Occupational Hygiene. 2019;11(3).
4. SHANA. Official data and information of the Ministry of Petroleum (SHANA) regarding the fatalities: (SHANA) The official media of the Ministry of Petroleum; 2017 [Available from: www.shana.ir. [Persian]
5. Mousavi A, rezayan s. Quantitative risk assessment

بالاجبار می‌بایست از مراجع بین‌المللی استفاده نمود که بر اساس استانداردهای بکار گرفته‌شده در صنایع همان کشورها به دست می‌آیند و در نتیجه می‌تواند نتایج به‌دست‌آمده با واقعیت دارای تفاوت‌هایی باشد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق از یک مدل ارزیابی کمی ریسک QRA به همراه محاسبه احتمال کلی اثرات دومینو در جهت محاسبه ترازهای ریسک فردی با در نظر گرفتن اثرات دومینو استفاده گردید، همان‌طور که از نتایج استنباط می‌گردد، استفاده از این روش می‌تواند تصویر واضحی از پیامدهای حوادث زنجیره‌ای و احتمال آسیب کارکنان، تجهیزات و همسایگان مجاور به ما بدهد که در مدیریت ریسک، مدیریت شرایط اضطراری و بحران‌ها بسیار حائز اهمیت باشد. رعایت فواصل و مسیرهای ایمن جهت اعزام تیم‌های آتش‌نشانی، محل استقرار تیم‌های پشتیبانی، محل‌های تجمع ایمن از جمله مواردی

- from process accidents at the Ramsar Gas Pressure Strengthening Station. 2nd National Conference on Crisis Management and HSE Tehran.Iran: Islamic Azad University of Fars Science and Research Branch; 2014. [Persian]
6. Jafari M, Zarei E, Dormohammadi A. Presentation of a method for consequence modeling and quantitative risk assessment of fire and explosion in process industry (Case study: Hydrogen Production Process). Health and Safety at Work. 2013;3(1):55-68. [Persian]
  7. Procedure for Performing a Failure Mode, Effects and Critically Analysis. Military Standard: Depart Defense USA; 1980. p. 27-33.
  8. Cozzani V, Gubinelli G, Salzano E. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. Journal of hazardous materials. 2006;129(1-3):1-21.
  9. CCPS. Guidelines for Fire Protection in Chemical Petroch, Center for Chemical Process Safety: Wiley-AIChE (August 15, 2003); 2003. 480 p.
  10. 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.
11. Darbra R, Palacios A, Casal J. Domino effect in chemical accidents: Main features and accident sequences. *Journal of hazardous materials*. 2010;183(1-3):565-73.
  12. Zhou J, Reniers G, Khakzad N. Application of event sequence diagram to evaluate emergency response actions during fire-induced domino effects. *Reliability Engineering & System Safety*. 2016;150:202-9.
  13. Alileche N, Cozzani V, Reniers G, Estel L. Thresholds for domino effects and safety distances in the process industry: a review of approaches and regulations. *Reliability Engineering & System Safety*. 2015;143:74-84.
  14. Zainali N, Abdolhamidzade B, editors. Risk assessment of the probability of domino events in two adjacent petrochemical. *Proceedings of the 3rd National Conference on Health, Safety and Environment (HSE)*; 2009. [Persian]
  15. Mohammadfam I, Sajedi A, Mahmoudi S, Mohammadfam F. Application of Hazard and Operability Study (HAZOP) in evaluation of health, safety and environmental (HSE) hazards. *International Journal of occupational hygiene*. 2012;4(2):17-20.
  16. Reniers G, Cozzani V. Features of escalation scenarios. *Domino Effects in the Process Industries*: Elsevier; 2013. p. 30-42.
  17. Veritas DN. ARF-activity responsible function. DNV Proprietary Documentation. 1998.
  18. Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments [Internet]. The Health and Safety Executive (HSE) 2019. Available from: <https://www.hse.gov.uk>.
  19. Harati B, Karimi A, Askari A, Dehghani F, Nasrollahi A. Modeling and evaluation of safety consequences of propylene oxide leakage, a petrochemical company. *Health and Safety at Work*. 2018;8(2):199-209. [Persian]
  20. Kamaei M, Alizadeh SSA, Keshvari A, Kheyrkhah Z, Moshashaei P. Risk assessment and consequence modeling of BLEVE explosion wave phenomenon of LPG spherical tank in a refinery. *Health and Safety at Work*. 2016;6(2):10-24. [Persian]
  21. Eisenberg NA, Lynch CJ, Breeding RJ. Vulnerability model. A simulation system for assessing damage resulting from marine spills. *Enviro control inc rockville md*; 1975.
  22. Vi lchez J, Montiel H, Casal J, Arnaldos J. Analytical expressions for the calculation of damage percentage using the probit methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2001;14(3):193-7.
  23. 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(1-3):14-30.
  24. Khakzad N, Khan F, Amyotte P, Cozzani V. Domino effect analysis using Bayesian networks. *Risk Analysis: An International Journal*. 2013;33(2):292-306.
  25. AIChE C. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. New York, NY. 2000.
  26. Khan FI, Abbasi S. Models for domino effect analysis in chemical process industries. *Process Safety Progress*. 1998;17(2):107-23.
  27. Trbojevic V. Risk criteria in EU. *Risk*. 2005;10(5):1945-52.
  28. Landucci G, Argenti F, Tugnoli A, Cozzani V. Quantitative assessment of safety barrier performance in the prevention of domino scenarios triggered by fire. *Reliability Engineering & System Safety*. 2015;143:30-43.
  29. 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(1-3):416-26.