

ORIGINAL RESEARCH PAPER

## A Consequence Analysis of a Hydrogen Sulfide Gas Release using PHAST Software in the Sulfur Recovery Unit of Abadan Oil Refinery Company

Towhid Delshad, Farhad Shahraki, Mohammad Reza Sardashti Birjandi\*, Bahareh Bidar

Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Received: 11-5-2024

Accepted: 23-12-2025

### ABSTRACT

**Introduction:** Industrial units, such as oil refineries, face significant hazards due to the release of toxic and flammable gases. Hydrogen sulfide ( $H_2S$ ), due to its high toxicity and environmental impact, is among the most dangerous pollutants. This study aimed to model and assess the consequences of  $H_2S$  release in the Sulfur Recovery Unit (SRU) of Abadan Refinery using PHAST software to support safety planning and risk reduction strategies.

**Material and Methods:** Consequence modeling was conducted using PHAST version 8.4. Process data, including temperature, pressure, flow rate, and feed composition, along with meteorological conditions (average temperature, relative humidity, and wind speed based on Pasquill stability classification), were used to define probable scenarios. Scenarios included partial pipeline rupture, variable leak flow, short pipe release, and catastrophic reactor tank rupture. Key damage criteria, including thermal radiation threshold, explosion overpressure, and toxic dose, were used to determine hazard zones.

**Results:** Thermal radiation up to  $71.027 \text{ kW/m}^2$  can cause instant death within a 70-meter radius, while overpressure exceeding 0.206 bar can destroy equipment and structures up to 35 meters in summer conditions. The  $H_2S$  cloud can spread up to 120 meters downwind, causing immediate fatalities among exposed personnel. These findings identify high-risk zones in and around the SRU, emphasizing the need to relocate shelters, install gas monitoring systems, and provide protective equipment. Results are limited to the defined scenarios and PHAST assumptions.

**Conclusion:** Due to the lack of risk assessment studies in early phases and during operation, identifying safe points and high-risk zones, along with prioritizing risk reduction, is essential to ensure workplace and public safety. Comprehensive risk assessment, including probability analysis (using software such as SAFETI) and application of advanced models (CFD and AI-based methods), is recommended for future research.

**Keywords:** Consequence modeling, Risk assessment, PHAST software, Hydrogen sulfide ( $H_2S$ )

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Delshad T., Shahraki F., Sardashti Birjandi M.R., Bidar B. A Consequence Analysis of a Hydrogen Sulfide Gas Release using PHAST Software in the Sulfur Recovery Unit of Abadan Oil Refinery Company. *J Health Saf Work.* 2025; 15(4): 932-959.

## 1. INTRODUCTION

In modern industrial settings, safety and quality of life are of paramount importance, particularly in high-risk sectors such as oil and gas. These industries face significant hazards due to the

potential leakage of toxic, flammable, and explosive substances, which can lead to fires, explosions, and poisoning. Systematic incident analysis is therefore essential for developing effective safety programs and minimizing both human and financial losses. Risk management techniques—particularly

\* Corresponding Author Email: [m.r\\_sardashti@eng.usb.ac.ir](mailto:m.r_sardashti@eng.usb.ac.ir)

those employing software tools such as PHAST—play a critical role in identifying and mitigating such risks by evaluating both the likelihood of incident occurrence and the severity of potential consequences. This integrated approach is widely adopted in refineries and petrochemical facilities to enhance safety performance.

To prevent catastrophic events, it is vital to assess and analyze the consequences of hazardous scenarios. In safety engineering, consequence and damage analysis provide valuable insight into the scale and impact of incidents, enabling decision-makers to implement appropriate control measures. PHAST software, recognized for its robust consequence modeling capabilities, is extensively used to evaluate high-risk zones and simulate the effects of hazardous releases. In this study, PHAST is applied to assess the release of hydrogen sulfide in the sulfur recovery unit (SRU) of the Abadan Refinery. The research focuses on modeling the potential outcomes of hydrogen sulfide release and defining safety boundaries based on different scenarios, including toxic dispersion, fire, and explosion events.

Several related studies have modeled hazardous gas release scenarios—such as hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) and ammonia—using PHAST software. These investigations analyzed various release conditions, estimated impacts on surrounding areas, and determined safety distances and damage potential for both human health and the environment. Collectively, their findings highlight the critical importance of consequence assessment and simulation-based tools like PHAST in supporting risk-informed decision-making and improving safety in process industries.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Quantitative risk assessment method

Quantitative risk assessment is carried out in seven stages. The first stage involves defining the objectives, such as identifying process hazards, determining safety zones, and evaluating environmental impacts. In the second stage, the process unit is described using resources such as P&ID diagrams, process flow diagrams (PFD), and safety data sheets. The third stage focuses on identifying potential hazards through methods such as HAZOP, FMEA, and PHA. In the fourth stage, various scenarios—including leaks, ruptures, and pipeline failures—are simulated by analyzing parameters such as material density, pressure, and

release duration.

In the fifth stage, consequence modeling is performed to predict the effects of incidents across different locations and timeframes. The sixth stage estimates scenario frequencies based on the likelihood of occurrence and potential impact, using the formula: Risk = Consequence × Frequency. Finally, in the seventh stage, PHAST software is employed to calculate the consequences of the defined scenarios, enabling the identification of high-risk zones and boundaries within the Abadan refinery's sulfur recovery unit.

### 2.2. Introduction to the SRU

The Sulfur Recovery Unit (SRU) plays a critical role in oil and gas refineries by removing sulfur from natural gas and other process streams, thereby mitigating environmental pollution. The SRU is subject to hazards such as toxic gas emissions (e.g., H<sub>2</sub>S) and potential fires and explosions, necessitating robust safety design and preventive measures. At the Abadan Refinery, the SRU is designed to process 100 tons of sulfur per day; however, current production is approximately 30 tons due to upstream unit conditions and feedstock limitations. A general overview of the sulfur recovery process is presented in Fig. 1.

The predominant sulfur recovery method is the Claus process, which converts H<sub>2</sub>S into elemental sulfur through two main stages. In the thermal stage, H<sub>2</sub>S undergoes high-temperature reactions to produce sulfur and sulfur dioxide. In the catalytic stage, these reactions are further promoted with the aid of catalysts, enhancing overall sulfur recovery efficiency.

## 3. ANALYSIS AND CONSEQUENCE MODELING OF THE SRU UNIT

In the consequence assessment, scenarios characterized by higher probability and severe potential impacts were selected for analysis. Drawing on previous studies of sulfur recovery units and consultations with engineers at the Abadan Refinery, gas leaks from the incoming pipeline (feeding from the amine unit) and from the R-901 reactor within the SRU, highlighted in red in Fig. 1, were identified as critical sources. The potential scenarios associated with these areas are summarized in Table 1.

These scenarios were simulated using PHAST version 8.4, incorporating the unit's layout maps, process data, section conditions, feed composition,

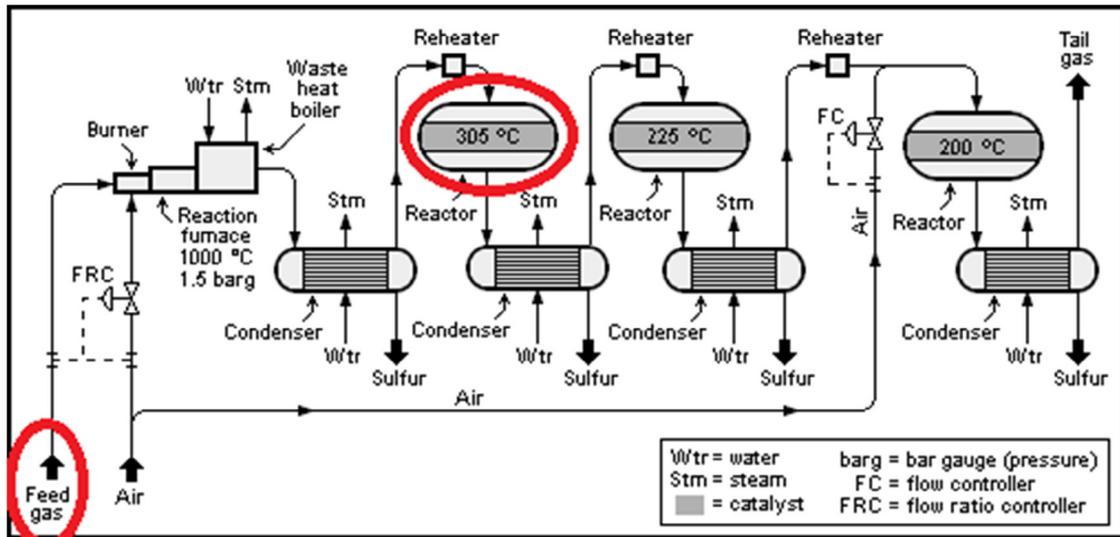


Fig. 1: The location of the feed stream from the amine unit and R-109 reactor in the SRU

Table 1: Determined scenarios for SRU

No.	Scenario location	Scenario	Leak size (in)	Pressure (bar)	Average temperature (°C)	Height (m)	Weather
1	Feed Pipeline	Long pipeline	Breach 20%	0.6	25	8	Winter
2	Feed Pipeline	Long pipeline	Breach 20%	0.6	65	8	Summer
3	R-901 reactor	Time varying short pipe release	Sudden Rupture	0.4	25	3	Winter
4	R-901 reactor	Time varying short pipe release	Sudden Rupture	0.4	65	3	Summer
5	R-901 reactor	Catastrophic rupture	Sudden Rupture	0.4	25	3	Winter
6	R-901 reactor	Catastrophic rupture	Sudden Rupture	0.4	65	3	Summer
7	R-901 reactor	Time varying leak	5	0.4	25	3	Winter
8	R-901 reactor	Time varying leak	5	0.4	65	3	Summer

and regional meteorological data, in accordance with Pasquale’s atmospheric stability classification.

#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

##### 4.1. Damages assessment

The output results from PHAST for the defined scenarios were analyzed according to established criteria for assessing damage from fire radiation, explosion overpressure, and toxic material release, as illustrated in the generated diagrams.

##### 4.2. Consequences of the determined scenarios

###### 4.2.1. Feed pipeline with breach 20% scenario

Given that the pipeline contains flammable and toxic substances, the major consequences of this scenario include material release, toxic exposure, flash fires, explosion overpressure, and unexpected

ignition events. Figure 2 depicts the concentration of released toxic materials—including hydrogen sulfide, carbon monoxide, carbon disulfide, and sulfur dioxide—at varying distances downwind from the release point. The chart indicates that the maximum toxic dose occurs at approximately 9 meters from the release source, resulting in the highest mortality rate, which extends up to 49 meters. Each line in the figure, distinguished by color, represents a specific toxic compound.

###### 4.2.2. R-901 reactor with the Time-Varying Short Pipe Release scenario

In this scenario, the R-901 reactor experiences a release through a short pipe with a time-varying discharge rate. Similar to Fig. 2, Fig. 3 presents the concentration of released toxic materials as a

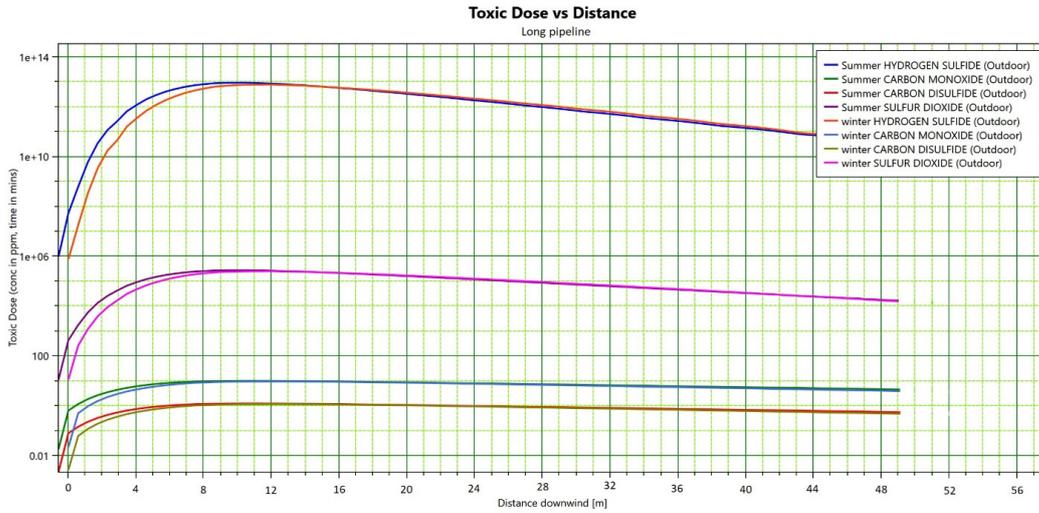


Fig. 2: Toxic dose vs. distance in wind direction for breach 20% scenario

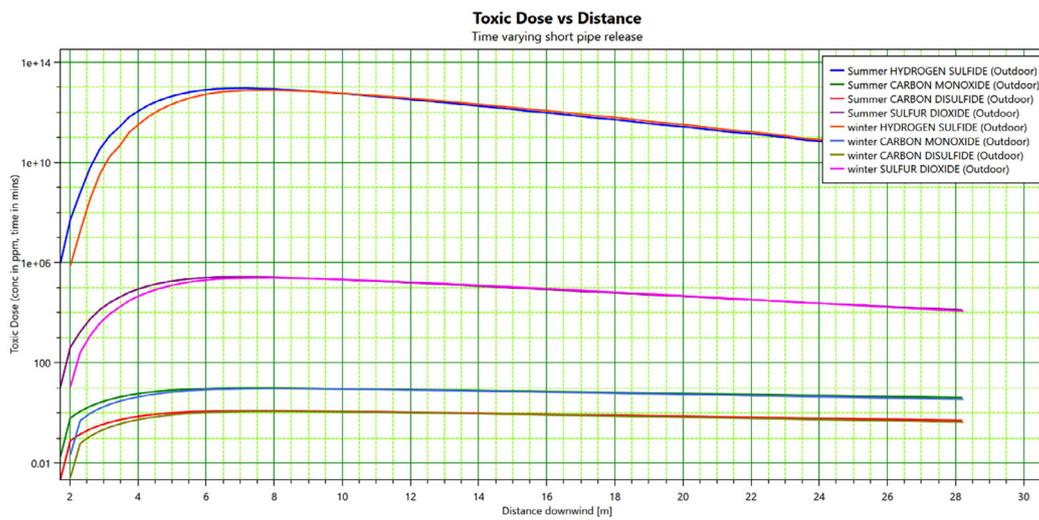


Fig. 3: Toxic dose vs. distance in wind direction for Time-Varying Short Pipe Release scenario

function of distance from the release point under the time-varying short pipe release scenario at the R-901 reactor. In this figure, hydrogen sulfide is indicated in blue, with the highest concentration observed at 12.7 meters, corresponding to the peak mortality rate, which extends up to 29 meters.

#### 4.2.3. R-901 reactor with the Catastrophic Rupture scenario

In this scenario, the reactor tank undergoes catastrophic rupture, releasing all internal materials into the environment. Fig. 4 illustrates the concentration of released toxic materials as a

function of distance from the release point along the wind direction. Hydrogen sulfide concentrations are depicted in blue for summer and orange for winter, highlighting the peak concentrations and corresponding maximum mortality rates. Both the concentration and associated mortality rates decrease with increasing distance, extending up to 19.8 meters.

#### 4-2-4. R-901 reactor with the Time-Varying Leak scenario

Fig. 5 presents the toxicity dose of the released material at different distances. According to this chart,

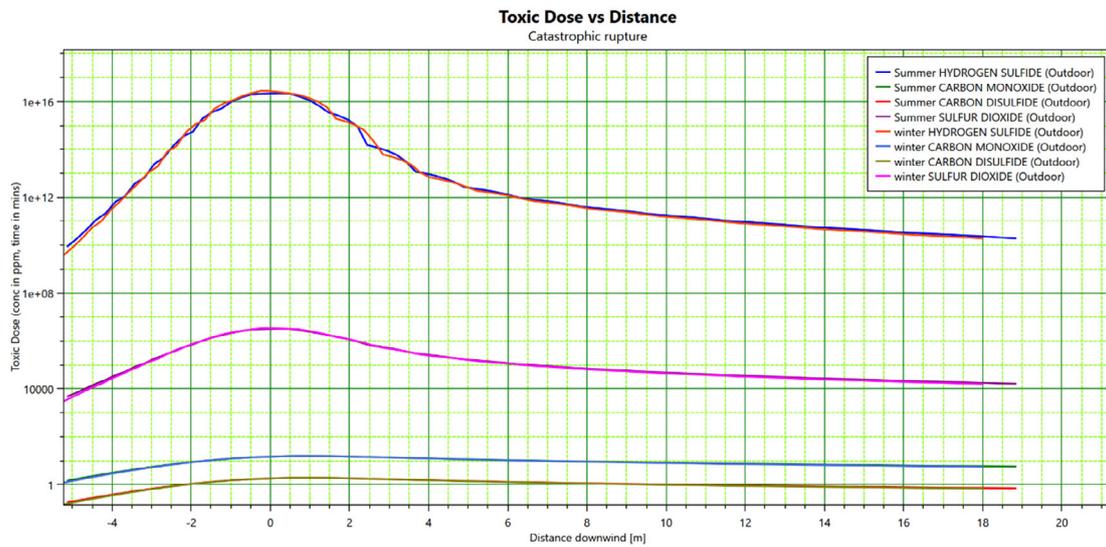


Fig. 4: Toxic dose vs. distance in wind direction for Catastrophic Rupture scenario

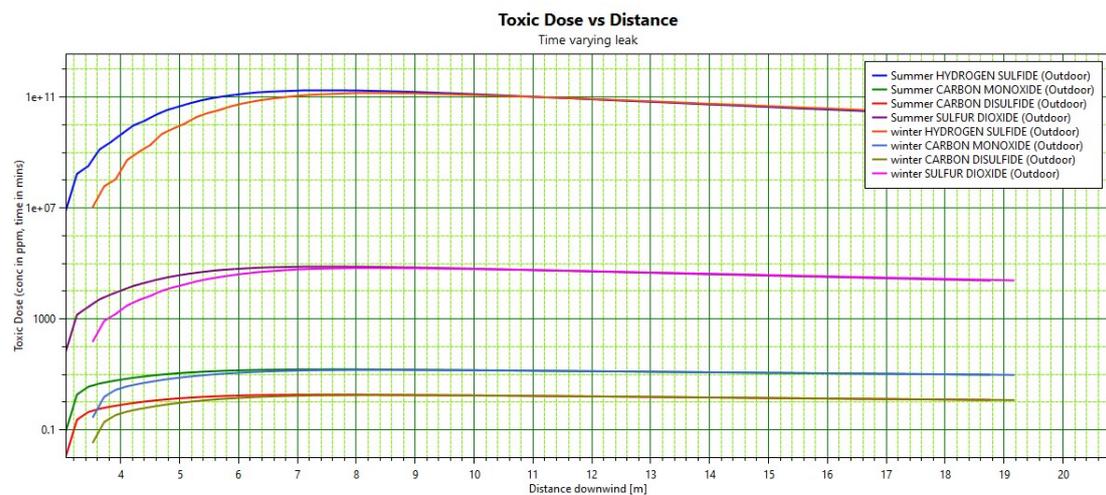


Fig. 5: Toxic dose vs. distance from the release point in wind direction for Time-Varying Leak scenario

hydrogen sulfide gas—depicted in blue for summer and orange for winter—reaches its maximum dose and associated mortality rate at 7 meters, extending up to 19.2 meters from the leak point.

### 5. CONCLUSIONS

This study employed PHAST software and process data to evaluate potential scenarios and identify high-risk areas in the desulfurization unit, with a focus on the release of toxic gases such as

hydrogen sulfide. The results indicate that a sudden discharge from the reactor inlet line constitutes the most hazardous scenario, with fire radiation and explosion effects extending into personnel areas. Hydrogen sulfide clouds were found to propagate up to 120 meters downwind, presenting significant risks to workers. Another critical scenario involves a 20% leak from the pipeline, where the resulting toxic cloud reaches up to 13 meters, still posing considerable danger to personnel.

## 6. INDUSTRIAL RECOMMENDATIONS

Based on the results of the consequence assessment for the release of toxic hydrogen sulfide gas in the sulfur recovery unit, the following recommendations are proposed to enhance safety and mitigate potential hazards:

- High-risk zone: Mark a 120-meter radius around the reactor as a high-risk area.
- Relocate shelters: Move personnel shelters to safer locations beyond 120 meters and, if possible, at higher elevations.
- Gas masks: Provide sufficient masks for all staff, install mask boxes along main paths, and train personnel on proper usage.
- Wind direction flags: Install flags at key locations to indicate wind direction and help personnel avoid downwind exposure.
- Ammonia capsules: Make ammonia capsules available for emergency neutralization of H<sub>2</sub>S, forming a less hazardous compound.
- Emergency drills: Conduct regular drills for H<sub>2</sub>S leak and release scenarios.

- Detection devices: Equip personnel with H<sub>2</sub>S detectors for rapid leak identification and risk mitigation.

Implementation of these measures can significantly improve employee safety and minimize the potential impact of hazardous incidents.

## 7. STUDY LIMITATIONS

Several limitations should be considered in this study. First, only a limited number of critical scenarios were analyzed, and rare or alternative operational events may not have been captured. Second, meteorological conditions were considered only for summer and winter, while daily or seasonal variations in wind speed and atmospheric stability could influence results. Third, some process data were based on available information and engineering estimates, introducing uncertainties. Finally, PHAST assumptions, such as uniform atmospheric conditions and stationary release points, may lead to differences between simulated and real-world outcomes.

## ارزیابی پیامد انتشار گاز سولفید هیدروژن با استفاده از نرم افزار PHAST در واحد بازیابی گوگرد شرکت پالایش نفت آبادان

توحید دلشاد، فرهاد شهرکی، محمد رضا سردشتی بیرجندی\*، بهاره بیدار

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲

### چکیده

**مقدمه:** واحدهای صنعتی مانند پالایشگاههای نفت با خطرات ناشی از انتشار گازهای سمی و قابل اشتعال مواجه هستند. گاز هیدروژن سولفید ( $H_2S$ ) به دلیل سمیت بالا و اثرات زیست محیطی، از جمله خطرناکترین آلایندههاست. هدف این مطالعه، مدلسازی و ارزیابی پیامد انتشار  $H_2S$  در واحد بازیافت گوگرد (SRU) پالایشگاه آبادان با استفاده از نرم افزار PHAST برای پشتیبانی از برنامه ریزی ایمنی و استراتژی های کاهش ریسک است.

**روش کار:** مدل سازی پیامدها با نسخه ۸.۴ نرم افزار PHAST انجام شد. داده های فرآیندی شامل دما، فشار، دبی جریان و آنالیز خوراک، همراه با شرایط هواشناسی (دمای متوسط، رطوبت نسبی و سرعت باد براساس طبقه بندی پاسکویل) برای تعریف سناریوها استفاده شدند. سناریوها شامل پارگی جزئی خط لوله، نشتی با دبی متغیر، آزادسازی از لوله کوتاه و پارگی فاجعه آمیز مخزن راکتور بودند. معیارهای کلیدی آسیب شامل آستانه تشعشع حرارتی، فشار موج انفجار و دوز سمیت برای تعیین محدوده های پرخطر به کار گرفته شد.

**یافته ها:** تشعشع حرارتی تا  $71/027 \text{ kW/m}^2$  مرگ آنی تا شعاع ۷۰ متر ایجاد می کند و فشار بیش از  $0/02 \text{ bar}$  تجهیزات و سازه ها را تا ۳۵ متر در تابستان تخریب می کند. ابر  $H_2S$  تا ۱۲۰ متر در جهت باد گسترش می یابد و مرگ فوری کارکنان را موجب می شود. این یافته ها محدوده های پرخطر SRU و اطراف آن را مشخص کرده و بر ضرورت جابجایی پناهگاه ها، نصب سیستم پایش گاز و تأمین تجهیزات حفاظتی تأکید می کند. نتایج محدود به سناریوهای تعریف شده و مفروضات PHAST است.

**نتیجه گیری:** به سبب عدم مطالعه ارزیابی ریسک در فازهای اولیه و حین بهره برداری، تعیین نقاط ایمن و محدوده با ریسک بالا به همراه اولویت بندی کاهش ریسک ضروری است تا سلامت محیط کار کارکنان و عموم مردم تأمین شود. ارزیابی کامل ریسک شامل تحلیل احتمال وقوع (با نرم افزارهایی مانند SAFETI) و استفاده از مدل های پیشرفته تر (CFD) و روش های هوش مصنوعی) برای تحقیقات آینده توصیه می شود.

**کلمات کلیدی:** مدل سازی پیامد، ارزیابی ریسک، نرم افزار PHAST، هیدروژن سولفید ( $H_2S$ )

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [m.r.sardashti@eng.usb.ac.ir](mailto:m.r.sardashti@eng.usb.ac.ir)

## مقدمه

با این حال، در پژوهش حاضر تمرکز بر بخش پیامد است؛ زیرا نرم‌افزار PHAST<sup>2</sup> تنها پیامدها را مدل‌سازی می‌کند و محاسبه احتمال وقوع معمولاً با نرم‌افزارهای دیگری مانند SAFETI انجام می‌شود. نرم‌افزار PHAST یکی از ابزارهای قدرتمند برای مدل‌سازی پیامدها و تحلیل حوادث است. در این مطالعه از نسخه ۸.۴ این نرم‌افزار برای ارزیابی محدوده‌های پرخطر ناشی از انتشار هیدروژن سولفید در واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه آبادان استفاده شده است.

با وجود حوادث متعدد مرتبط با انتشار H<sub>2</sub>S در ایران و جهان، مطالعات سیستماتیک در این زمینه همچنان محدود است. به‌عنوان نمونه، جدول ۱ شماری از حوادث شاخص H<sub>2</sub>S را نشان می‌دهد که انگیزه این پژوهش را برجسته‌تر می‌سازد.

مرور پژوهش‌های داخلی و خارجی نشان می‌دهد که مدل‌سازی پیامد با نرم‌افزار PHAST ابزاری کارآمد برای درک بهتر الگوی انتشار گازهای سمی و انفجار است.

در سال ۲۰۱۰، خلیلی‌پور لنگرودی (۷) به بررسی خطرات فرآیندی واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه شهید هاشمی‌نژاد پرداخت و نشان داد که بازدهی این واحد به عملکرد بخش‌های دیگر شامل کوره، راکتور و مبدل‌های کاتالیستی وابسته است. کاهش بازدهی واحد بازیافت گوگرد می‌تواند باعث انتشار بیشتر گاز SO<sub>2</sub> و آلودگی زیست‌محیطی شود؛ بنابراین، تثبیت پارامترهایی نظیر دمای کوره و نسبت گاز اسیدی به هوا در طراحی عملیاتی ضروری است. در سال ۲۰۱۲، پانديا و همکاران (۸) مدل پراکندگی گازهای کلر، نیتریک اکسید و آمونیاک را با نرم‌افزار PHAST تحلیل کردند. تأثیر عواملی مانند ارتفاع و زاویه تخلیه، شرایط جوی و دبی‌های متفاوت تخلیه بر نحوه پراکندگی این گازها برای مدت‌زمان ۶۱ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش درک بهتری از پراکندگی گازها در سناریوهای مختلف ارائه کرد. در همان سال، شاکری (۹) پیامدهای آزادسازی، انفجار و انتشار گازهای سمی در پالایشگاه شیراز را با نرم‌افزار PHAST

در دنیای امروز، ایمنی و کیفیت زندگی به عنوان اهداف اصلی انسان مطرح هستند. با گسترش صنایع، به‌ویژه نفت و گاز، خطرات مرتبط با این حوزه‌ها افزایش یافته است. شناسایی دقیق عوامل خطر، مدیریت ریسک، و ارتقای ایمنی در این صنایع برای کاهش خسارات جانی و مالی ضروری است. تحلیل حوادث برای تدوین برنامه‌های پیشگیرانه ایمنی در این صنایع اهمیت فراوانی دارد. کاهش احتمال یا دامنه حوادث مستلزم اجرای روش‌های مدیریت ریسک است که شامل ارزیابی ریسک و پیامدهای ناشی از آن به‌عنوان بخش کلیدی می‌باشد. برای مدیریت ریسک در پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها، ابتدا باید محدوده بررسی مشخص شده و داده‌های میدانی گردآوری شوند تا بر اساس شرایط موجود تصمیم‌گیری انجام گیرد. در تحلیل ریسک، دو عامل مهم بررسی می‌شوند: امکان تکرار حادثه و میزان خسارت آن. تحلیل این دو عامل به‌طور همزمان ضروری است، زیرا برخی حوادث کم‌احتمال ممکن است خسارات سنگینی به بار آورند، درحالی‌که حوادث پرتکرار خسارت کمتری دارند. بنابراین، معیارهای ارزیابی باید بر اساس ترکیب این دو عامل تعیین شوند تا در مدیریت ریسک اثربخش باشند (۱-۳).

کاهش احتمال یا شدت حوادث مستلزم اجرای روش‌های مدیریت ریسک است. این رویکرد شامل ارزیابی ریسک کمی<sup>۱</sup> (QRA) و تحلیل پیامدهای ناشی از آن به‌عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت ایمنی است. QRA معمولاً در هفت گام انجام می‌شود: (۱) تعیین اهداف ارزیابی، (۲) توصیف فرایند و گردآوری داده‌های فنی، (۳) شناسایی خطرات بالقوه، (۴) تعریف سناریوهای معتبر رهاش، (۵) مدل‌سازی پیامدها شامل پراکنش، آتش و انفجار، (۶) ارزیابی شدت پیامدها براساس معیارهای استاندارد آسیب، و (۷) یکپارچه‌سازی نتایج برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری. در این چارچوب، ریسک اغلب به‌صورت حاصل ضرب شدت پیامد در احتمال وقوع تعریف می‌شود (۵-۷).

2. Process Hazard Analysis Software Tool

1. Quantitative Risk Assessment

جدول ۱: نمونه‌های از حوادث گزارش شده انتشار  $H_2S$  در ایران و جهان

شماره حادثه	سال میلادی (شمسی)	محل/واحد	نوع حادثه	پیامد
۱	۱۳۸۶ (۲۰۰۷)	مسجد سلیمان، یکی از شیرها	نشت گاز $H_2S$	۳ نفر مصدوم
۲	۱۳۸۷ (۲۰۰۸)	بلژیک، پالایشگاه	نشت گاز $H_2S$ به دلیل نقص تجهیزات	۴ نفر فوت
۳	۱۳۸۸ (۲۰۰۹)	فرانسه، تانک ذخیره پالایشگاه	نشت گاز $H_2S$ ناشی از خوردگی	۵ نفر مصدوم
۴	۱۳۹۶ (۲۰۱۷)	پالایشگاه اهواز، واحد بهره‌برداری ۲	نشت گاز $H_2S$	۲ نفر مصدوم
۵	۱۳۹۸ (۲۰۱۹)	ایالت تگزاس، شرکت آگهورن	نشت گاز $H_2S$	۲ نفر فوت
۶	۱۳۹۹ (۲۰۲۰)	پالایشگاه آبادان، واحد SRU	نشت گاز $H_2S$	۱ نفر فوت
۷	۱۴۰۴ (۲۰۲۵)	پالایشگاه شیراز، پروژه پیش‌راه‌اندازی	نشت گاز $H_2S$	۳ نفر فوت، ۸ نفر مصدوم

کردند. آنها نشان دادند که مدل‌سازی نرم‌افزار PHAST می‌تواند تخمین مناسبی از چنین پیامدهایی ارائه دهد. در همان سال، ابراهیم‌زاده و همکاران (۱۵) خطرات ناشی از انتشار گاز  $H_2S$  را در پالایشگاه پارس جنوبی بررسی کرده و پیشنهاد کردند که کمپ‌های سکونتی در فاصله‌ای امن مستقر شوند. همچنین داوودی و همکاران (۱۶) تحلیل شبکه فلر در واحد فرآوری گاز پارس جنوبی را انجام داده و معیارهای طراحی مناسب برای کاهش مخاطرات را معرفی کردند.

در سال ۲۰۱۶، عبدالمهدی (۱۷) به ارزیابی پیامد انتشار  $H_2S$  در مجتمع پتروشیمی بوشهر پرداخت و نتایج نشان داد که شرایط جوی تأثیر قابل توجهی بر الگوی انتشار این گاز دارد. کلاته عربی (۱۸) در سال ۲۰۱۹ با مدل‌سازی پیامد BLEVE، شعاع ایمن از مرکز حادثه را ۳۸۲ متر برآورد کرد. همچنین علادی (۱۹) ریسک فوران چاه‌های نفتی را مدل‌سازی کرد و نشان داد که اختلاف فشار بین سیال مخزنی و گل حفاری نقش مهمی در انتشار و شعاع گسترش دارد. ریدوان و همکاران (۲۰) در همان سال مدل‌سازی نشت گاز  $H_2S$  در پالایشگاه کادونا نیجریه را انجام دادند. نتایج نشان داد گاز با غلظت ۰/۵۱ ppm تا فاصله ۱۸۳ متری پخش شده و مرگ آنی ایجاد می‌کند. همچنین صلوتیان (۲۱) پیامد انتشار گاز  $H_2S$  در واحد آمین پالایشگاه آبادان را با نرم‌افزار PHAST مدل‌سازی کرد. نتایج نشان داد در بدترین سناریو، ابر گاز تا ۱۲۲ متری برج احیا پیشروی می‌کند.

عمادی و همکاران (۲۲) در سال ۲۰۲۱ نشت گاز  $H_2S$

مطالعه کرد. بر اساس نتایج، انفجار مخزن LPG بیشترین فشار و تأثیرگذاری را داشت و موانع‌گذاری در مسیر آتش‌سوزی نقش مهمی در کاهش خسارات ایفا کرد. نورالدینی شاه‌آبادی (۱۰) در پژوهشی دیگر خطرات عملیاتی پالایشگاه NGL گچساران را ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که تخریب کامل مخازن می‌تواند محدوده‌ای تا ۱۱۲۰ متر را تحت تأثیر قرار دهد. در سال ۲۰۱۳، بیگلرزاده و همکاران (۱۱) پیامد آزادسازی مخزن کروسن را مدل‌سازی کرده و نشان دادند که در زمستان، خطرات ناشی از این آزادسازی به دلیل شرایط جوی افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای توسط جعفری و همکاران (۱۲) در سال ۲۰۱۳، ریسک آتش‌سوزی و انفجار در واحد تولید هیدروژن پالایشگاه تهران با نرم‌افزار PHAST بررسی شد. نتایج نشان داد که آتش‌سوزی جت و انفجار بخار، خطرناک‌ترین پیامدها هستند و تمام واحدها در محدوده خطر آتش‌سوزی (تا ۱۶۰ متر) قرار دارند. اقدامات ایمن‌سازی مانند مانع‌گذاری بلند در این مناطق پیشنهاد شد. همچنین، باقری و همکاران (۱۳) با استفاده از همین نرم‌افزار، حریم ایمن خطوط انتقال گاز ترش در بوشهر را بررسی کرده و نشان دادند که تغییر ضخامت لوله تأثیر قابل توجهی بر حریم ایمن دارد، به طوری که افزایش ۲ میلی‌متری ضخامت، فاصله ایمن را بیش از ۶۰ متر تغییر می‌دهد، در حالی که روش‌های پیشین چنین اثراتی را بررسی نمی‌کردند.

در سال ۲۰۱۵، لی و همکاران (۱۴) پیامدهای حادثه BLEVE در مخازن کروی LPG پالایشگاه ژاپن را تحلیل

## روش کار

### تعریف سناریوها و مدل سازی پیامدها

برای ارزیابی سناریوهای بالقوه در واحد فرآیندی، ابتدا اهداف کلی و جزئی بررسی پیامدها مشخص می شوند، از جمله تعیین محدوده خطر برای تجهیزات و ساختمان ها، برآورد تأثیرات زیست محیطی و بررسی ریسک فعالیت خطوط و ایستگاه ها. واحد فرآیندی با استفاده از نقشه ها، شرح فرآیند، خواص فیزیکی و شیمیایی مواد و معیارهای ایمنی مطالعه می شود. در ادامه، خطرات بالقوه شامل خسارت مالی، زیست محیطی و جانی شناسایی می شوند و از روش های استاندارد شناسایی مخاطرات مانند تجزیه و تحلیل خطر فرآیند<sup>۱</sup> (PHA)، مطالعات خطر و قابلیت بهره برداری<sup>۲</sup> (HAZOP)، تحلیل حالات خرابی و اثرات آن<sup>۳</sup> (FMEA) و آنالیز علت-پیامد<sup>۴</sup> (CCA) برای تحلیل جامع آن ها استفاده می شود. سپس سناریوهای مختلفی که ممکن است در واحد رخ دهند، شبیه سازی می شوند.

در این مطالعه، سناریوهای محتمل انتشار گاز H<sub>2</sub>S در واحد بازیافت گوگرد (SRU) انتخاب شدند تا پیامدهای آن ها به صورت کمی ارزیابی شوند. انتخاب سناریوها براساس معیارهای زیر انجام شد:

(۱) شدت و پیامد احتمالی حادثه: سناریوهایی که می توانند بیشترین خسارت به تجهیزات، ساختمان ها یا جان افراد را ایجاد کنند.

(۲) احتمال وقوع: سناریوهایی که بر اساس داده های عملیاتی و سوابق حوادث، احتمال وقوع بیشتری دارند.

(۳) نوع تجهیزات و نقاط بحرانی: محل نشستی در خطوط لوله، اتصالات و راکتورها که سابقه رخداد بیشتری دارند.

(۴) داده های مهندسی و تحلیل ریسک: استفاده از مشاوره مهندسی HSE و نتایج تحلیل های پیشین ریسک برای تعیین سناریوهای بحرانی.

برای محاسبه ریسک، رابطه استاندارد مرسوم به شکل

1. Process Hazard Analysis
2. Hazard and Operability
3. Failure Modes and Effects Analysis
4. Cause - Consequence Analysis

در درام واحد شیرین سازی گاز ترش فاز ۱۳ پارس جنوبی را بررسی کردند. نتایج نشان داد در انفجار ناگهانی درام، احتمال مرگ در ۱۰ متری ۸۰٪ و در صورت نشت، گاز تا ۴۰۰ متر پخش و مرگ آبی ایجاد می کند. در همان سال نجف پور دیوانی (۲۳) نشت آمونیاک در پتروشیمی لردگان را تحلیل کرد. بدترین سناریو نشان داد نشت تا ۲۷ کیلومتری در تابستان مشکلات جدی برای انسان و تجهیزات ایجاد می کند. شکاری (۲۴) نیز پیامد حوادث خطوط لوله گاز پالایشگاه فراش بند را ارزیابی کرد. بدترین حادثه مربوط به موج انفجار در نشستی افقی خط لوله ۴۲ اینچ بود که تا ۳۴۱۹ متر به انسان ها و تا ۱۲۶۰ متر به تجهیزات آسیب می زند. در سال ۲۰۲۱ هاشمی نسب (۲۵) پیامد نشت H<sub>2</sub>S از جداکننده فشار بالا در شناور کوروش را بررسی کرد. فاصله تأثیر در دو سناریو به ۸۰۴۴ و ۱۳۷۶۰ متر می رسد و احتمال مرگ در شرایط مختلف از ۱٪ تا ۱۰۰٪ متغیر است.

چنین یوقوش در سال ۲۰۲۳ (۲۶) به تحلیل پیامدها براساس سناریوهای مختلف انتشار گاز H<sub>2</sub>S پرداخت. نتایج نشان داد که اثرات تشعشع حرارتی و انفجار تقریباً مشابه اند، اما اثرات سمی بسته به مدل نرم افزاری متفاوت است.

با توجه به اهمیت ارزیابی پیامدهای نشت گاز H<sub>2</sub>S، موستاکیم و همکاران (۲۷) در یک مقاله مروری در سال ۲۰۲۵ این مطالعه را انجام داد که روش های مدیریت ریسک نشت گاز هیدروژن سولفید (H<sub>2</sub>S) در واحدهای فرآوری گاز را بررسی کرده و بر اهمیت روش های ارزیابی و سامانه های تشخیص خودکار و آموزش های ایمنی برای کاهش حوادث و افزایش ایمنی در این واحدها تأکید دارد به طور کلی، مرور ادبیات موجود بیانگر آن است که مدل سازی پیامدهای نشت و انفجار گازهای خطرناک مانند هیدروژن سولفید، به ویژه با استفاده از نرم افزار PHAST، ابزار مؤثری برای ارزیابی و مدیریت ریسک در صنایع نفت و گاز است. پژوهش حاضر نیز با تکیه بر این رویکرد، به تحلیل پیامدهای انتشار H<sub>2</sub>S در واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه آبادان می پردازد.

جدول ۲: سناریوهای تعیین شده برای واحد SRU

ردیف	محل سناریو	سناریو	اندازه نشتی (in)	فشار تجهیزات (bar)	دمای میانگین (°C)	ارتفاع از سطح زمین (m)	فصل
۱	خط لوله ورودی	خط لوله طولی <sup>۱</sup>	نشتی ۲۰٪	۰/۶	۲۵	۸	زمستان
۲	خط لوله ورودی	خط لوله طولی	نشتی ۲۰٪	۰/۶	۶۵	۸	تابستان
۳	راکتور R-901	آزادسازی لوله کوتاه متغیر با زمان <sup>۲</sup>	گسست ناگهانی	۰/۴	۲۵	۳	زمستان
۴	راکتور R-901	آزادسازی لوله کوتاه متغیر با زمان	گسست ناگهانی	۰/۴	۶۵	۳	تابستان
۵	راکتور R-901	پارگی فاجعه بار <sup>۴</sup>	گسست ناگهانی	۰/۴	۲۵	۳	زمستان
۶	راکتور R-901	پارگی فاجعه بار	گسست ناگهانی	۰/۴	۶۵	۳	تابستان
۷	راکتور R-901	نشتی متغیر با زمان <sup>۵</sup>	۵	۰/۴	۲۵	۳	زمستان
۸	راکتور R-901	نشتی متغیر با زمان	۵	۰/۴	۶۵	۳	تابستان

<sup>۱</sup> Long pipeline<sup>۲</sup> Breach ۲۰٪<sup>۳</sup> Time varying short pipe release<sup>۴</sup> Catastrophic rupture<sup>۵</sup> Time varying leak

جدول ۳: داده های فرآیندی واحد SRU

ردیف	نوع تجهیز	سایز (in)	حجم (m <sup>3</sup> )	فشار (bar)	ارتفاع از سطح زمین (m)	دمای در تابستان (°C)	دمای در زمستان (°C)	شدت جریان (kg/h)	دمای تجهیز (°C)	طول مسیر	نقطه رهاش
۱	خط لوله ورودی	۱۰	۵۸۳/۹	۰/۶	۸	۶۵	۲۵	۲۵۰۰	۵۰	۱۸۵	افقی
۲	راکتور R-901	-	۲۶	۰/۴	۳	۶۵	۲۵	۷۰۰۰	۲۴۵	۵	افقی

پالایشگاه آبادان را شناسایی کرد. در ارزیابی پیامد، سناریوهای بررسی شده است که احتمال رخ دادن آنها بیشتر و همچنین پیامدهای آنها دارای شدت و تأثیر زیاد باشند. با توجه به پیشینه پژوهش در مورد واحدهای بازیافت گوگرد و مشاوری با مهندسیین واحد در پالایشگاه آبادان، نشت گاز تنها از خط لوله ورودی (خوراک ورودی از واحد آمین) و از راکتور R-901 در واحد بازیافت گوگرد که در شکل ۲ با رنگ قرمز مشخص شده، مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای عملیاتی هر سناریو شامل دمای میانگین، فشار عملیاتی تجهیزات، شدت و اندازه نشتی، ارتفاع تجهیزات از سطح زمین، فصل و شرایط محیطی و نوع و ترکیب گاز یا ماده رها شده می باشد که در جداول ۲ الی ۴ آورده شده است.

ریسک=پیامد×احتمال وقوع استفاده می شود (۲۸). در این مطالعه، «تکرارپذیری سناریو» معادل احتمال وقوع یک حادثه در واحد زمان در نظر گرفته شده و بنابراین برای محاسبه ریسک، از رابطه زیر استفاده شده است:

پیامد × تکرارپذیری = ریسک

نرم افزار PHAST به طور پیش فرض پیامدهای ناشی از سناریوهای تعیین شده را محاسبه می کند (۲۹). لازم به ذکر است که نرم افزار PHAST تنها پیامدها را مدل سازی می کند و در این مطالعه احتمال وقوع حوادث با نرم افزارهایی مانند SAFETI محاسبه نشده است. با مقایسه نتایج خروجی نرم افزار PHAST با جدول سطوح آسیب ناشی از میزان انتشار هیدروژن سولفید، می توان نقاط و محدوده های پرخطر در واحد گوگردزایی

جدول ۴: آنالیز خوراک ورودی به واحد بر حسب kmol/hr

H <sub>2</sub>	Ar	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	COS	SO <sub>2</sub>	CS <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
۲/۳	۰/۶۲	۵۲/۶	۱/۳	۴/۹	۴/۲	۰/۷	۲/۳۶	۰/۱۶	۳۱/۰۵

جدول ۵: داده های هواشناسی براساس اطلاعات سازمان هواشناسی اهواز منطبق بر معیار پایداری جوی پاسکویل

فصل	دمای میانگین (°C)		میانگین نسبت رطوبت (%)	سرعت باد میانگین (m/s)	معیار پایداری جوی پاسکویل	
	روز	شب			روز	شب
زمستان	۲۵	۱۱	۴۸	۲	A/B	F
تابستان	۶۵	۳۰	۳۲	۲	A/B	F

پتروشیمی که فرآیندهای مربوط به گازهای طبیعی و نفت خام را انجام می دهند، به کار می رود تا گوگرد موجود در گازها و سوختها را به حداقل رسانده و از آلاینده‌گی‌های زیست محیطی ناشی از این مواد جلوگیری کند.

واحد بازیافت گوگرد در عین حال که به حفظ محیط زیست و کاهش آلاینده‌گی‌ها کمک می کند، با چالش‌ها و خطرات خاص خود نیز مواجه است. از جمله خطرات عمده این واحدها می توان به نشت گازهای سمی و قابل اشتعال مانند H<sub>2</sub>S و احتمال وقوع آتش سوزی‌ها و انفجارها اشاره کرد. بنابراین، این واحدها نیازمند طراحی ایمن، استفاده از سیستم‌های کنترل خودکار و مستمر و اقدامات پیشگیرانه برای کاهش خطرات احتمالی هستند (۳۰). واحد SRU در فاز سوم پالایشگاه آبادان براساس تولید ۱۰۰ تن گوگرد در روز طراحی شده است که در حال حاضر با توجه به شرایط واحد بالادستی و کمبود خوراک واحد، میزان تولید آن در حدود ۳۰ تن گوگرد در روز می باشد. در شکل ۱ تصویر هوایی GIS واحد SRU پالایشگاه آبادان نشان و موقعیت محدوده واحد مشخص شده است. در شکل ۲، نقشه جانمایی تجهیزات فرآیند بازیافت گوگرد نمایش داده شده است.

### یافته ها

#### ۱-۳- ارزیابی آسیب‌ها

نتایج خروجی نرم افزار PHAST برای سناریوهای تعیین شده بر مبنای معیارهای کلیدی آسیب‌های ایجاد

این سناریوها براساس نقشه‌های واحد، داده‌های فرآیندی و شرایط بخش‌ها (جدول ۳) و آنالیز خوراک ورودی واحد (جدول ۴) و داده‌های هواشناسی منطقه (جدول ۵) مطابق با معیار پایداری جوی پاسکویل<sup>۱</sup> (۲۱) در نرم افزار PHAST نسخه ۸،۴ مدل شدند.

پارامترهای زیر برای مدلسازی در نظر گرفته شدند:

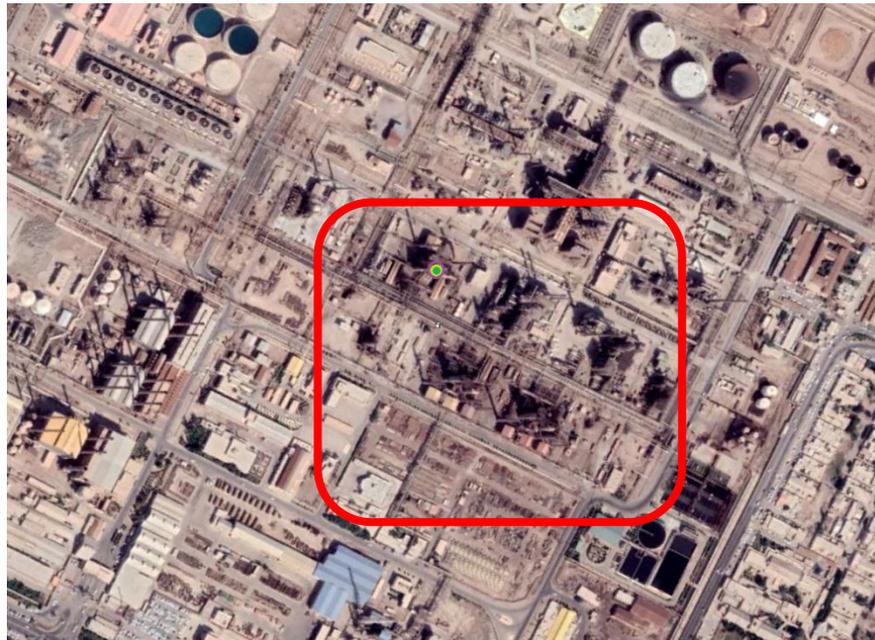
- مدل انتشار: تعیین نوع انتشار برای گازهای سمی و قابل اشتعال
- مدل منبع رهایش: شامل نشتی و گسست ناگهانی
- بارگذاری دما و فشار: مطابق داده‌های عملیاتی تجهیزات

- مدل‌های سم‌شناسی و ارزیابی پیامد: براساس استانداردهای DNV و CCPS
- کلاس جوی A/B براساس تقسیم بندی پاسکویل بیانگر جو ناپایدار که اغلب در روز با در نظر گرفتن میزان تابش آفتاب در منطقه و کلاس جوی F بیانگر جو پایدار که اغلب در شب با در نظر گرفتن خفیف بودن باد اختیار شدند.

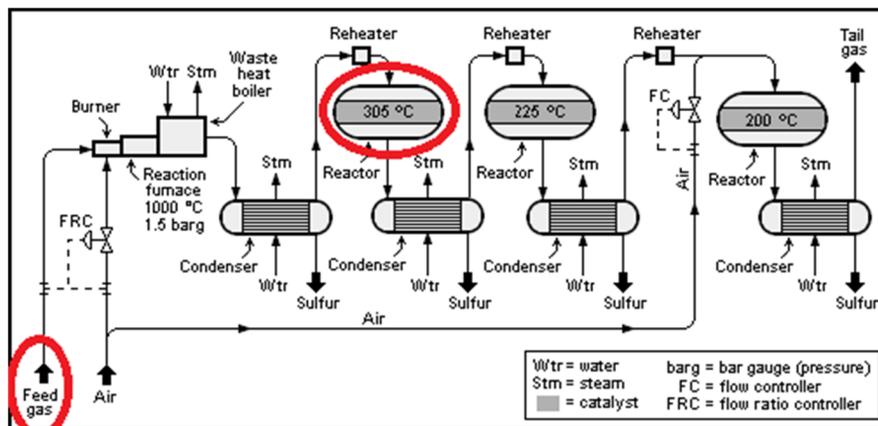
#### معرفی واحد بازیافت گوگرد

واحد بازیافت گوگرد<sup>۲</sup> (SRU) یکی از اجزای کلیدی در پالایشگاه‌های نفت و گاز است که به منظور حذف گوگرد از گازهای طبیعی و دیگر جریان‌های فرآیندی طراحی شده است. این واحد به‌ویژه در پالایشگاه‌ها و واحدهای

1. Pasquale  
2. Sulfur Recovery Unit



شکل ۱: تصویر هوایی GIS موقعیت واحد SRU در فاز سوم پالایشگاه آبادان



شکل ۲: نقشه جانمایی و نمای کلی فرآیند واحد SRU، شامل محل خوراک ورودی از واحد آمین و راکتور R-109

ایجاد شده در اثر تشعشع آتش (۳۱)، مشخص می‌گردد که در سناریوهای تعیین شده، تجهیزات دچار خسارت و افراد دچار مرگ آبی می‌گردند. با مقایسه نتایج به دست آمده طبق جدول ۸، از سناریوهای تعیین شده با جدول آسیب‌های ایجاد شده در اثر موج انفجار (۳۱) مشخص می‌گردد که موج انفجار سبب تخریب ساختمان‌ها، شکستن مخازن و خسارت به تجهیزات و ماشین آلات می‌گردد.

شده در اثر تشعشع آتش<sup>۱</sup> و شدت موج انفجار<sup>۲</sup> و انتشار مواد سمی<sup>۳</sup> طبق نمودارهای به دست آمده مورد بررسی قرار گرفته است. جدول ۶، معیارهای کلیدی آسیب را همراه با واحد اندازه‌گیری، اثرات اصلی و سطوح شدت هر معیار نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج به دست آمده در جدول ۷ از سناریوهای تعیین شده با جدول آسیب‌های

1. Fire radiation
2. Explosion wave
3. Toxic gas release

جدول ۶: معیارهای کلیدی آسیب شامل تشعشع آتش، موج انفجار و انتشار مواد سمی در سناریوهای حادثه‌های واحد SRU

معیار آسیب	واحد اندازه‌گیری	اثرات اصلی	سطح شدت / توضیح
تشعشع آتش	kW/m <sup>2</sup>	سوختگی افراد، آسیب تجهیزات و ساختمان‌ها	سطح پایین: ناراحتی حرارتی؛ سطح متوسط: سوختگی شدید، آسیب تجهیزات؛ سطح بالا: مرگ افراد، تخریب کامل تجهیزات
موج انفجار	bar	تخریب سازه‌ها، مخازن و تجهیزات	فشار پایین: آسیب جزئی؛ فشار متوسط: شکستن مخازن، خسارت به تجهیزات؛ فشار بالا: تخریب کامل ساختمان‌ها و تجهیزات
انتشار مواد سمی	ppm / kg/m <sup>3</sup>	آسیب فوری به سلامت انسان، تهدید ایمنی تجهیزات	غلظت کم: خطر محدود؛ غلظت متوسط: آسیب به سلامت؛ غلظت بالا: تهدید شدید زندگی انسان

جدول ۷: شدت تشعشع آتش فورانی بر حسب فاصله و شرایط آب و هوایی در سناریوهای مختلف واحد SRU

محل سناریو	سناریو	فصل	طول شعله (m)		
			فاصله در مسیر باد تا سطح شدت ۱ (kW/m <sup>2</sup> )	فاصله در مسیر باد تا سطح شدت ۲ (kW/m <sup>2</sup> )	فاصله در مسیر باد تا سطح شدت ۳ (kW/m <sup>2</sup> )
خط لوله ورودی	نشستی ۲۰٪	تابستان	۴۸/۹۶	۰/۹۵	n/a
		زمستان	۴۵	۰/۷۲۳	n/a
	آزادسازی لوله کوتاه متغیر با زمان	تابستان	۷۰/۰۲۷	۷۱/۰۲۷	n/a
		زمستان	۶۵/۰۸۳۸	۶۶/۰۸۳۸	n/a
		تابستان	۷۲/۳۳	۸۵/۳۲	n/a
		زمستان	۶۸/۶۶	۶۹/۴۸	n/a
		تابستان	۱۷/۴۲۶۹	۱/۴۳	n/a
		زمستان	۱۶/۳۲۱	۱/۵۶	n/a

جدول ۸: نتایج حاصل از شدت موج انفجار در سناریوی خط لوله طویل ورودی واحد SRU

محل سناریو	سناریو	فصل	سطح بیش از حد فشار (bar)	بیشترین فاصله (m)	قطر (m)
خط لوله ورودی	نشستی ۲۰٪	تابستان	۰/۰۲۰۶۸	۳۵/۴۰	۲۳/۳
			۰/۱۳۷۹	۲۰/۸۳	۸/۷
			۰/۲۰۶۸	۱۷/۷۳	۷/۲
		زمستان	۰/۰۲۰۶۸	۳۰/۱۵	۲۰/۴
			۰/۱۳۷۹	۱۳/۹۲	۶/۸
			۰/۲۰۶۸	۱۲/۹۴	۵/۷

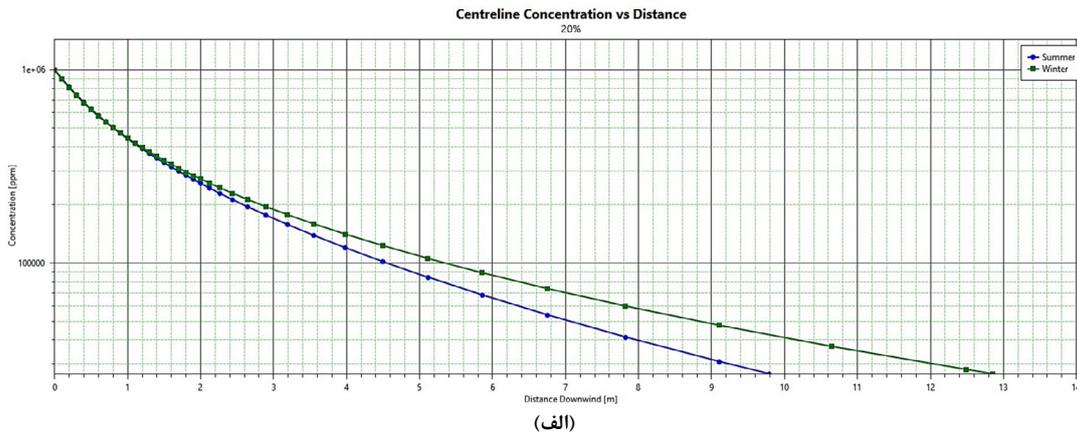
#### پیامد سناریوهای تعیین شده

#### خط لوله ورودی با سناریو اندازه نشستی ۲۰٪

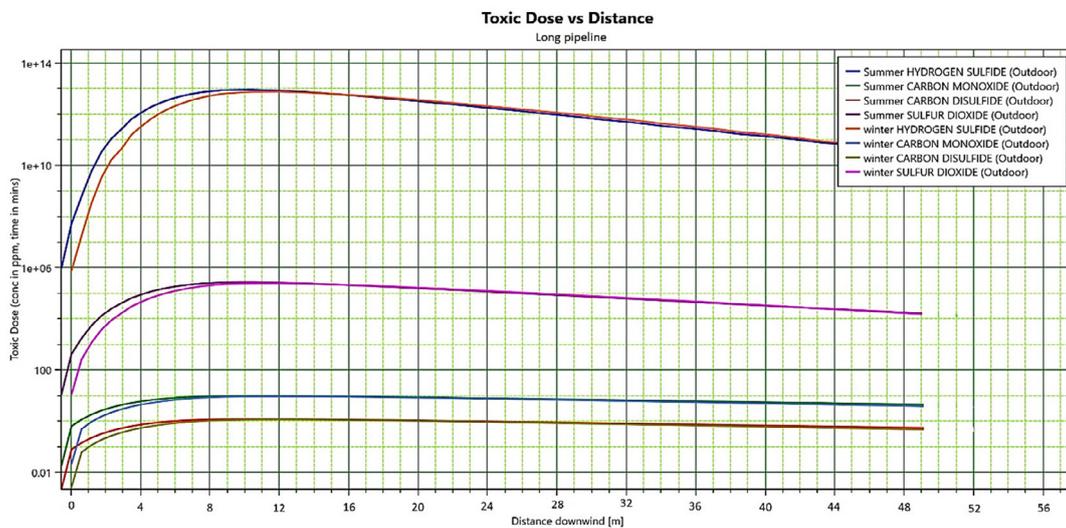
در ابتدا به بررسی سناریو خط لوله طویل ورودی با اندازه نشستی ۲۰٪ در فصل‌های تابستان و زمستان پرداخته شده است. با توجه به اینکه محتویات خط لوله اشتعال پذیر و سمی می‌باشد، انتشار مواد، سمیت، آتش فورانی، موج انفجار و آتش ناگهانی از پیامدهای مهم مربوط به این سناریو است. در شکل ۳ (الف) میزان

غلظت مواد منتشر شده بدون وقوع انفجار یا آتش سوزی نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که با توجه به شرایط دمایی در همان لحظه اول مخلوط مواد با غلظت ppm  $1 \times 10^6$  انتشار پیدا می‌کند و تا فاصله ۱۳ متری در زمستان و ۹/۸ متری در تابستان غلظت مواد به صفر می‌رسد.

در شکل ۳ (ب) میزان دوز مواد سمی خروجی (هیدروژن سولفید، کربن مونوکسید، کربن دی سولفید



(الف)



(ب)

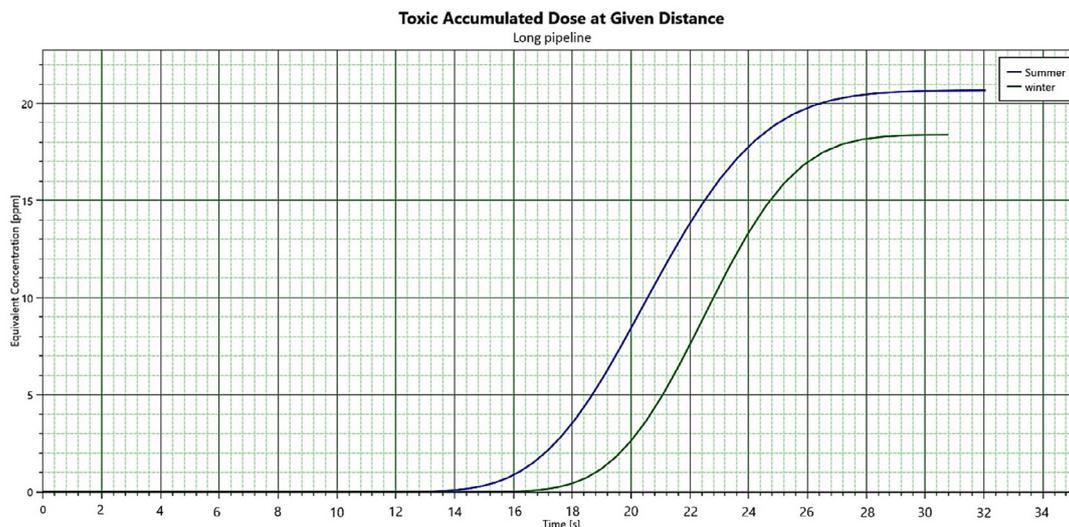
شکل ۳: (الف) میزان غلظت مواد منتشر شده و (ب) میزان سمیت بر حسب فاصله از محل انتشار در جهت وزش باد برای سناریو اندازه نشستی ۲۰٪.

در زمستان معادل ۱۸/۴ ppm در مدت ۳۰/۷ ثانیه است که بالاترین میزان مرگ و میر را در برخواهد داشت. در شکل ۵ محدوده احتمال ۹۹٪ مرگ و میر در جهت باد و خلاف جهت آن را نشان می‌دهد. براساس این نمودار مشخص می‌گردد که در محدوده ۶۱ متری در جهت وزش باد و ۹/۴ متری در خلاف جهت باد احتمال مرگ ۹۹ درصد خواهد بود.

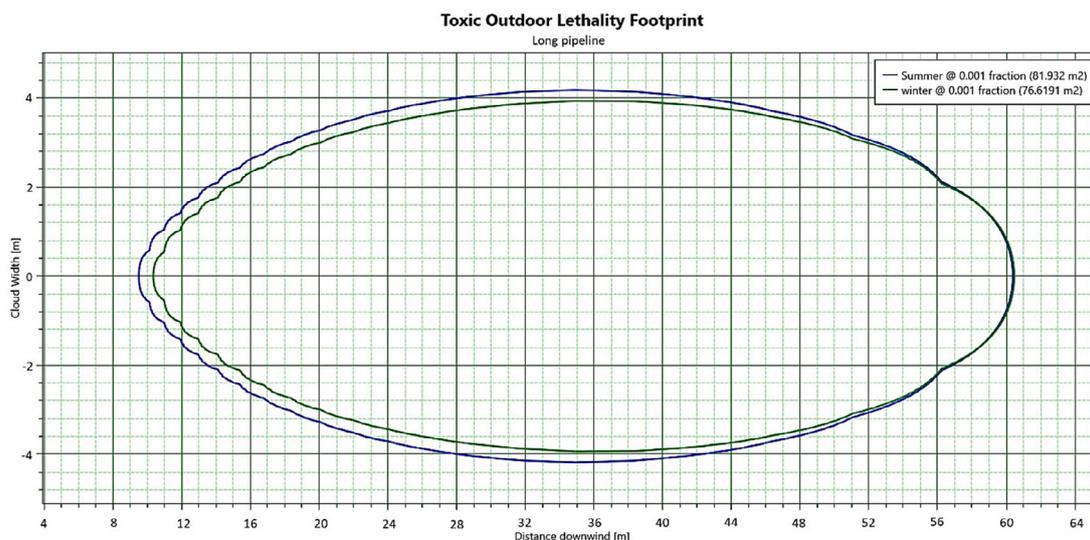
در پیامد آتش فورانی، محتویات قابل اشتعال به بیرون نشت می‌کند و در صورت وجود منبع جرقه در مجاورت آن (جرقه آبی) زبانه‌ای از آتش ایجاد می‌گردد که تا زمان اتمام محتویات تداوم خواهد داشت. همانطور

و گوگرد دی اکسید) بر حسب فاصله از محل انتشار در جهت وزش باد در فواصل مختلف را نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که در فاصله حدود ۹ متری از محل انتشار با بیشترین دوز سمی خروجی رو به رو هستیم که بالاترین میزان مرگ و میر را در بردارد و تا فاصله ۴۹ متری ادامه پیدا می‌کند. در این نمودار هر یک از خطوط که با رنگ های مختلف نشان داده شده است نشانگر هر یک از مواد سمی است.

شکل ۴، دوز انباشته شده ماده سمی برحسب زمان را نشان می‌دهد. براساس این نمودار انباشتگی غلظت مواد سمی در تابستان معادل ۲۰/۷ ppm در مدت ۳۲ ثانیه و



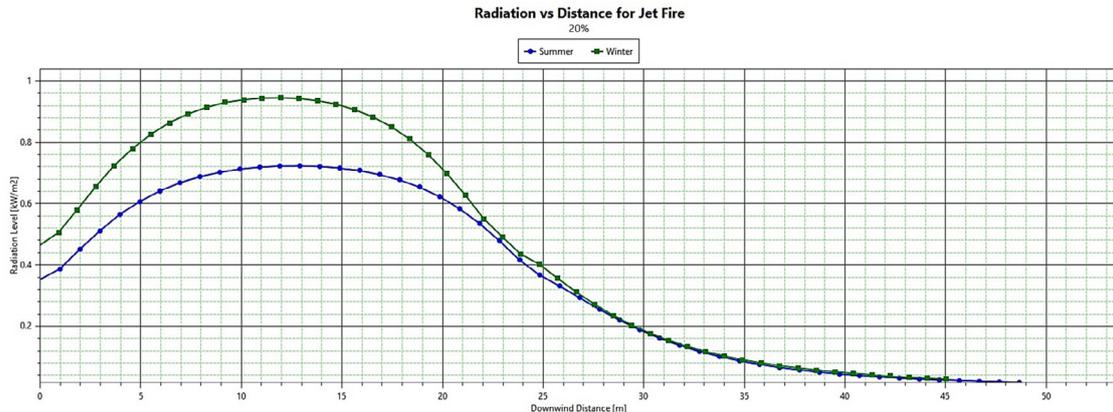
شکل ۴: دوز انباشته شده ماده سمی بر حسب زمان برای سناریو اندازه نشتی ۲۰٪



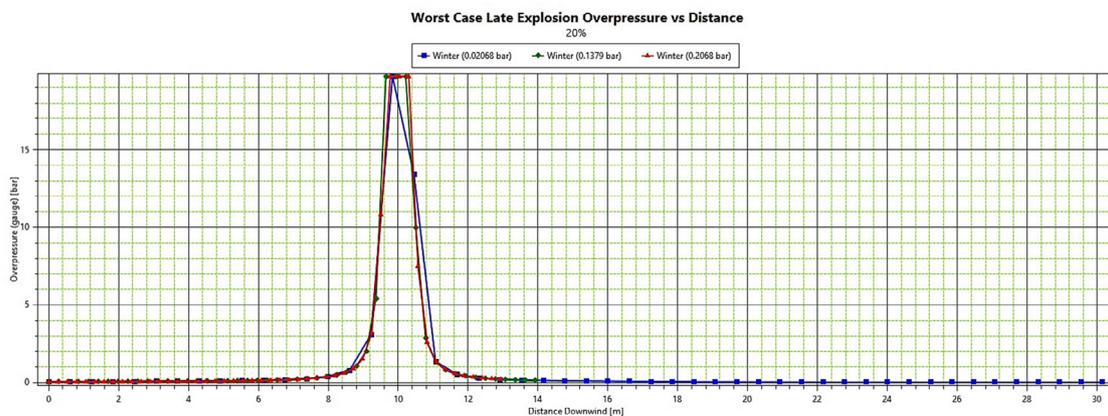
شکل ۵: احتمال مرگ و میر در اثر سمیت برای سناریو اندازه نشتی ۲۰٪

به نحوی که تغییرات گذرایی در چگالی، فشار و سرعت هوای اطراف ایجاد می‌گردد. با توجه به منطبق بودن نمودار مربوط به تابستان و زمستان، مشخص می‌شود که شرایط آب و هوایی مختلف در این پیامد بی تأثیر است. با توجه به این نمودار، بیشترین موج حاصل در فاصله ۱۰ متری با فشار ۲۰ bar صورت می‌گیرد. هنگامی که محتویات قابل اشتعال تحت فشار به فضای باز نشت کند و غلظت بخارات حاصله در محل تا محدوده اشتعال

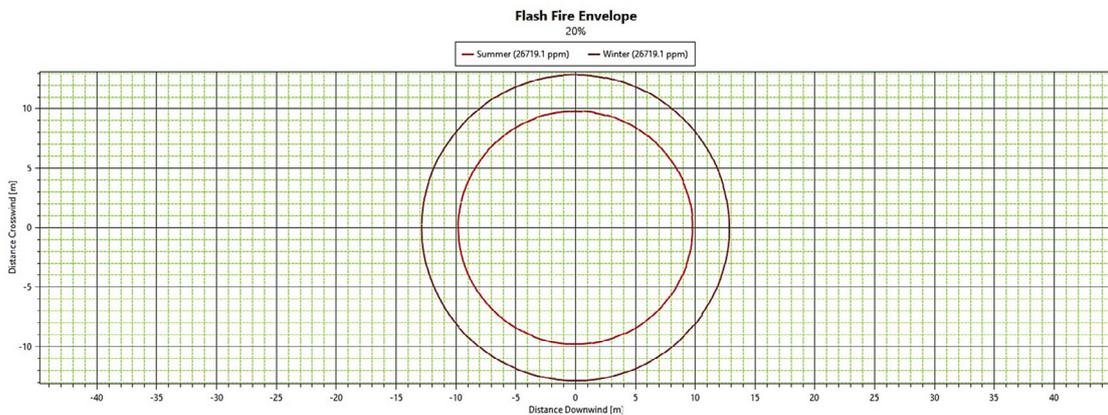
که در شکل ۶ (الف) مشاهده می‌گردد تشعشع آتش فورانی در فاصله ۱۲ متری در زمستان،  $0.723 \text{ kW/m}^2$  و در تابستان  $0.95 \text{ kW/m}^2$  بالاترین سطح را نشان می‌دهد و تا فاصله ۵۰ متری این تشعشع ادامه دارد. شکل ۶ (ب) نمودار مربوط به موج حاصل از انفجار ابر گاز بر حسب فاصله از محل انفجار را نشان می‌دهد. این نوع موج انفجار در اثر آزاد شدن انرژی به واسطه احتراق سریع گاز منتشر شده در حضور جرقه آبی است



(الف)



(ب)

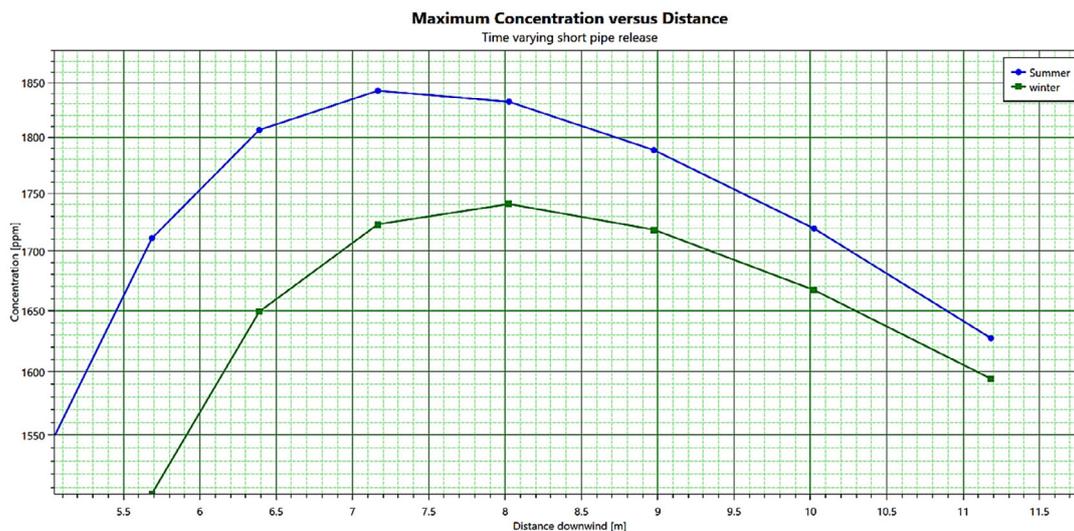


(ج)

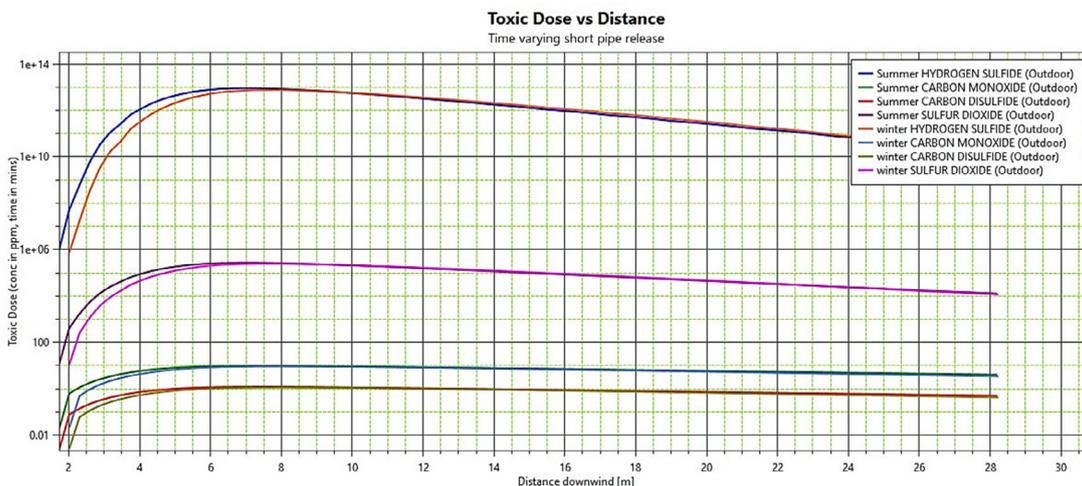
شکل ۶: (الف) سطح تشعشع آتش فورانی، (ب) موج حاصل از انفجار ابر گاز و (ج) شعاع اثر آتش ناگهانی بر حسب فاصله از محل انتشار برای سناریو اندازه نشتی ۲۰٪

گفته می‌شود. شکل ۶ (ج) نشان می‌دهد که شعاع ناشی از آتش ناگهانی با غلظت های برابر در زمستان ۱۲/۸۴ متر و در تابستان ۹/۸ متر می‌باشد.

پذیری آن (و نه محدوده انفجار) تراکم یافته و سپس در اثر یک منبع جرقه تاخیری، احتراقی کوتاه مدت در کمتر از ۰/۱ ثانیه به وقوع بپیوندد به آن آتش ناگهانی



(الف)

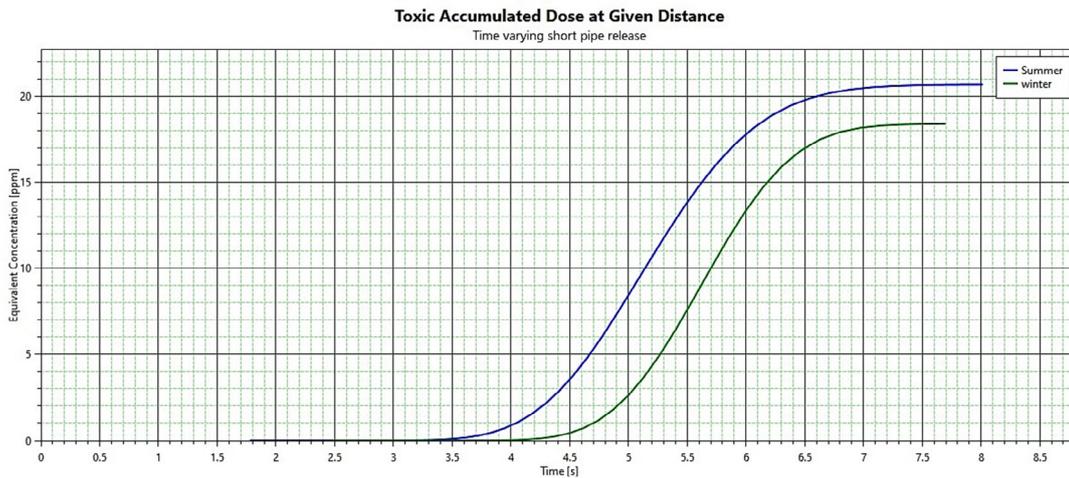


(ب)

شکل ۷: (الف) بیشترین غلظت ماده خروجی و (ب) میزان سمیت بر حسب فاصله از محل نشستی در جهت وزش باد برای سناریو آزادسازی لوله کوتاه متغیر با زمان

۱۷۴۰/۷ تا فاصله ۸ متری است که احتمال بروز اشتعال و انفجار را ایجاد می‌کند. در شکل ۷ (ب)، میزان دوز مواد سمی خروجی (هیدروژن سولفید، کربن مونوکسید، کربن دی سولفید و گوگرد دی اکسید) بر حسب فاصله نشان داده شده است. در این نمودار گاز هیدروژن سولفید به رنگ آبی و در ۷/۱۲ متری با بیشترین دوز، بالاترین میزان مرگ و میر را دارد و تا فاصله ۲۹ متری ادامه پیدا می‌کند. بر اساس این نمودار شکل ۸ انباشتگی غلظت مواد

راکتور R-901 با سناریو آزادسازی لوله کوتاه متغیر با زمان این سناریو شامل وقوع نشستی ناشی از خروج ماده‌ای دارای دبی متغیر از لوله‌ای کوتاه که به مخزن متصل است، می‌باشد. انتشار مواد، سمیت و آتش فورانی از پیامدهای مهم مربوط به این سناریو است. شکل ۷ (الف) بیشترین غلظت ماده خروجی بر حسب فاصله را نشان می‌دهد. بر اساس این سناریو، غلظت ماده خروجی در تابستان ppm ۱۸۴۲/۵۵ تا فاصله ۷/۱۲ متر و در زمستان



شکل ۸: دوز انباشته شده ماده سمی بر حسب زمان برای سناریو آزادسازی لوله کوتاه متغیر با زمان

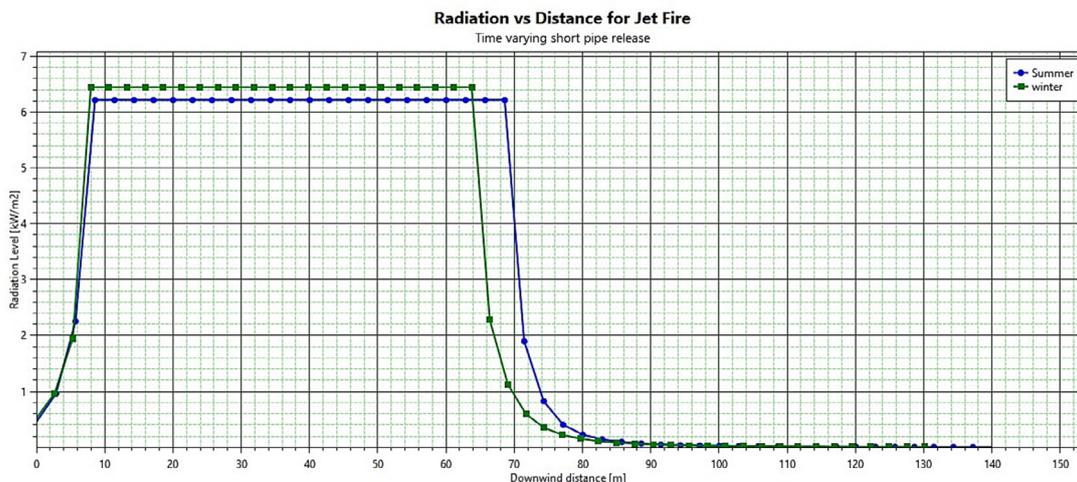
ماده خروجی برحسب فاصله در جهت باد در تابستان ppm ۲۹۸۰۱/۹ و در زمستان ppm ۳۱۰۴۵/۴۴ است که احتمال بروز اشتعال و انفجار را در بازه مورد نظر ایجاد می‌کند. شکل ۱۰ (ب) میزان دوز مواد سمی خروجی (هیدروژن سولفید، کربن مونوکسید، کربن دی سولفید و گوگرد دی اکسید) بر حسب فاصله از محل انتشار در جهت وزش باد در فواصل مختلف را نشان می‌دهد. خطوط مربوط به گاز هیدروژن سولفید در تابستان و زمستان به ترتیب به رنگ آبی و نارنجی دارای بیشترین غلظت و بالتبع آن بیشترین میزان مرگ و میر است و روند کاهشی آن تا فاصله ۱۹/۸ متری ادامه دارد.

نمودار شکل ۱۱، نشان می‌دهد که انباشتگی غلظت در تابستان معادل ppm ۳۴/۵۳ در مدت ۱۲ ثانیه و در زمستان ppm ۳۱/۲ در مدت ۱۲ ثانیه رخ می‌دهد که بیشترین میزان مرگ و میر به دلیل غلظت بالای ماده سمی را خواهد داشت. این انباشتگی در تابستان با خروج مواد از ثانیه ۱/۴ و در زمستان از ثانیه ۱/۶ شروع می‌شود. همچنین در نمودار شکل ۱۲، شعاع اثر آتش ناگهانی حاصل از پارگی فاجعه بار آورده شده است. شعاع ناشی از آتش ناگهانی در زمستان در فاصله حدوداً ۲ متری و در تابستان در فاصله ۱/۹۷ متری با غلظت ppm ۲۷۳۰۶۵ ایجاد می‌گردد که تقریباً مشابه می‌باشد و اختلاف

سمی در تابستان معادل ppm ۲۰/۷ در ۸ ثانیه و در زمستان معادل ppm ۱۸/۴ در ۷/۷ ثانیه را نشان می‌دهد که بیشترین میزان مرگ و میر را خواهد داشت. این انباشتگی در تابستان با خروج مواد از ثانیه ۱/۸ و در زمستان از ثانیه ۲/۵ شروع می‌شود. براساس نمودار شکل ۹ (الف)، در فصل تابستان سطح تشعشع آتش فورانی در ۸/۶ متری به بالاترین سطح با میزان  $۶/۲۲ \text{ kW/m}^2$  می‌رسد و تا فاصله ۶۸/۶ متری با همین سطح ادامه پیدا می‌کند و بعد از آن روند کاهشی تا فاصله ۱۴۰ متری ادامه پیدا می‌کند. در زمستان سطح تشعشع آتش فورانی در فاصله ۸ متری به بالاترین سطح با میزان  $\text{kW/m}^2$   $۶/۴۴$  می‌رسد و تا فاصله ۶۳/۸ متری ادامه پیدا می‌کند و بعد از آن کاهش می‌یابد. همچنین در شکل ۱۰ (ب) شعاع تشعشع آتش فورانی  $۴ \text{ kW/m}^2$  را نشان می‌دهد. این نمودار نشان می‌دهد که در تابستان شعاع تأثیر آتش فورانی در جهت باد بیشتر از زمستان است.

#### راکتور R-901 با سناریو پارگی فاجعه بار

در این سناریو مخزن راکتور متلاشی شده و کل مواد موجود به محیط رها می‌شود. بنابراین انتشار مواد، سمیت و آتش ناگهانی از پیامدهای مهم مربوط به این سناریو است. بر طبق شکل ۱۰ (الف) بیشترین غلظت



(الف)



(ب)

شکل ۹: (الف) سطح تشعشع آتش فورانی و (ب) شعاع آتش فورانی بر حسب فاصله برای سناریو آزادسازی لوله کوتاه متغیر با زمان

ناچیزی در شعاع اثر آتش ناگهانی در شرایط آب و هوایی مختلف وجود دارد. هیدروژن سولفید با خط به رنگ آبی و نارنجی در تابستان و زمستان در فاصله ۷ متری بیشترین دوز و بالاترین میزان مرگ و میر را دارد و تا فاصله ۱۹/۲ متری از محل نشتی ادامه پیدا می‌کند. نمودار دوز انباشته شده ماده سمی (شکل ۱۴) نشان می‌دهد که در تابستان انباشتگی غلظت معادل ۱۹/۷۶ ppm در مدت ۱۲/۸۷ ثانیه و در زمستان ۲۲/۷۴ ppm در مدت ۱۳/۷۴ ثانیه است که بیشترین میزان مرگ و میر را خواهد داشت. براساس شکل ۱۵ در محدوده ۱۸/۸ متری در جهت وزش باد و ۴/۵ متری در خلاف جهت باد در فصل تابستان و در

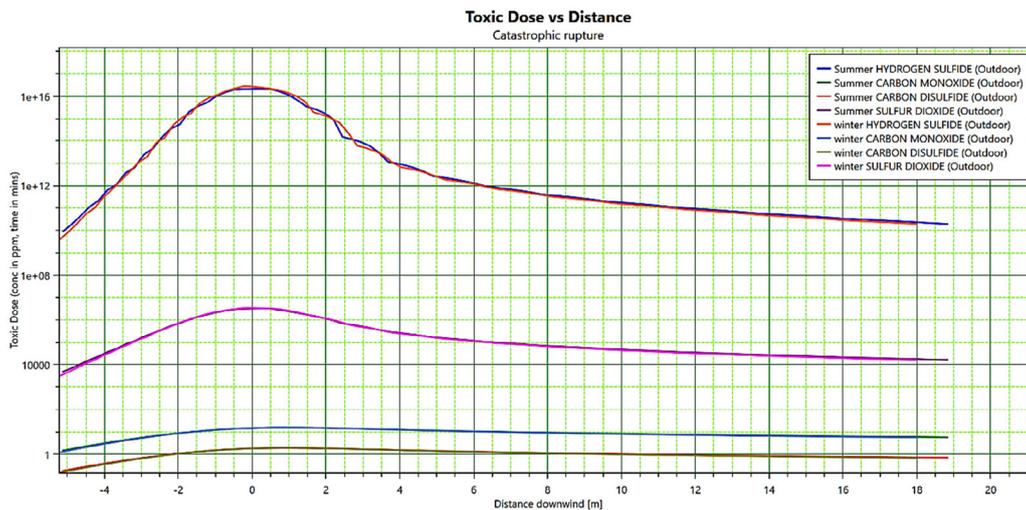
راکتور R-901 با سناریو نشتی متغیر با زمان در این سناریو شدت نشتی بیشتر بوده و خروج ماده از محل نشتی دارای دبی متغیر است که وقوع آن بر روی دما و فشار محتویات مخزن تأثیرگذار خواهد بود. سمیت و آتش فورانی از پیامدهای مهم مربوط به این سناریو است. شکل ۱۳ میزان سمیت دوز ماده خروجی را در فواصل مختلف نشان می‌دهد. براساس این نمودار، گاز

#### راکتور R-901 با سناریو نشتی متغیر با زمان

فصلنامه بهداشت و ایمنی کار، جلد ۱۵ / شماره ۴ / زمستان ۱۴۰۴



(الف)



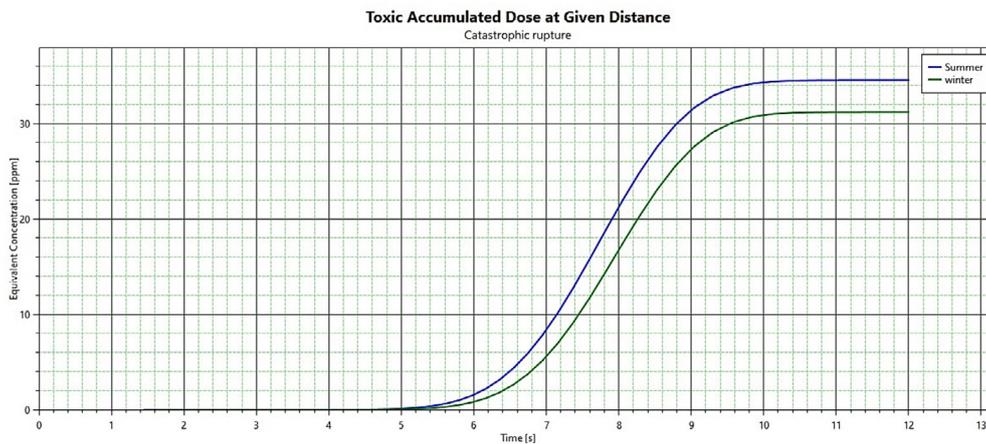
(ب)

شکل ۱۰: (الف) بیشترین غلظت ماده خروجی و (ب) میزان سمیت بر حسب فاصله در جهت وزش باد برای سناریو پارگی فاجعه بار

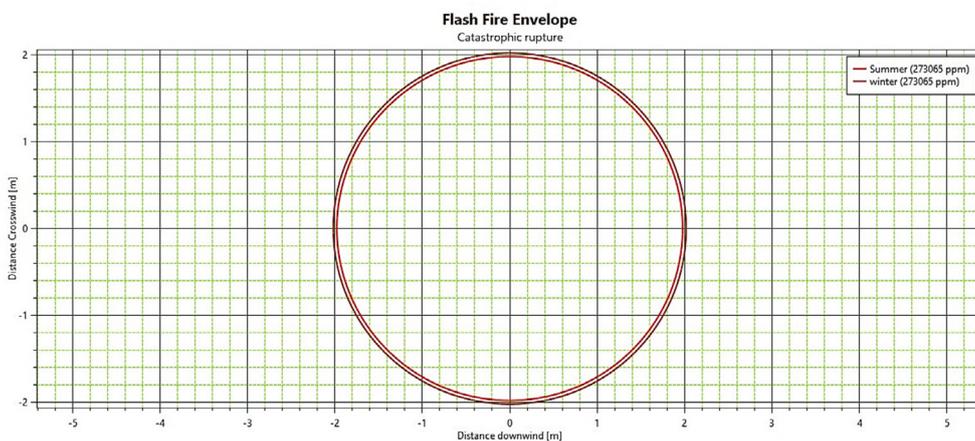
برای تفسیر بهتر نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، مقادیر بحرانی شاخص‌های اصلی شامل دوز هیدروژن سولفید، تشعشع آتش و موج انفجار استخراج شده و با معیارهای بین‌المللی مرجع مقایسه شد. جدول ۹، بیشینه مقادیر هر شاخص در سناریوهای تابستان و زمستان را به همراه فاصله یا شعاع اثر نشان می‌دهد و وضعیت بحرانی ناشی از هر سناریو را با سطوح استانداردهای بین‌المللی (IDLH<sup>۱</sup>، ERPG<sup>۲</sup>، AEGL<sup>۳</sup> و

1. Immediately Dangerous to Life or Health
2. Emergency Response Planning Guideline
3. Acute Exposure Guideline Levels

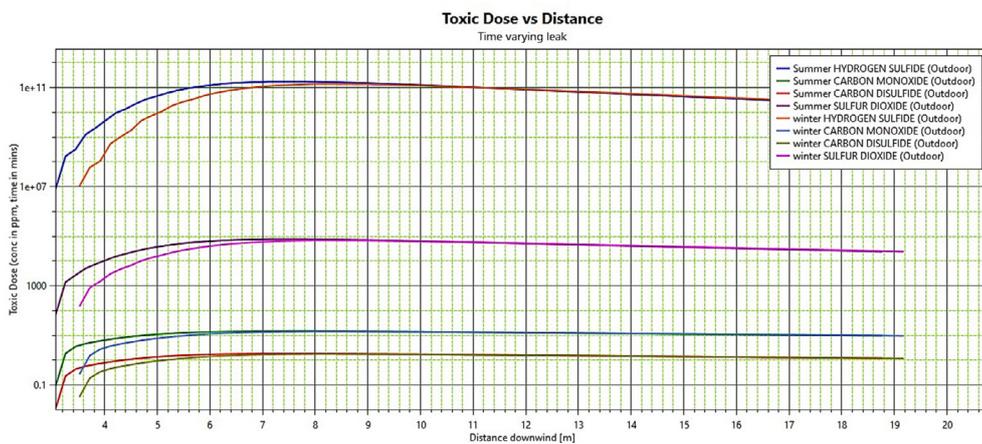
محدوده ۱۹/۱۷ متری در جهت وزش باد و ۵/۳ متری در خلاف جهت باد در فصل زمستان احتمال مرگ برای سناریو ناشی متغیر با زمان ۹۹ درصد خواهد بود. شکل ۱۶ سطح تشعشع آتش فورانی را در فواصل مختلف نشان می‌دهد. در تابستان سطح تشعشع در ۱۶/۳۶ متری به بالاترین سطح با میزان ۱/۴۳ kW/m<sup>2</sup> می‌رسد و بعد از آن روند کاهشی تا فاصله ۳۴/۸۵ متری ادامه پیدا می‌کند. در زمستان سطح تشعشع در ۱۵/۳۲ متری به بالاترین سطح با میزان ۱/۵۶ kW/m<sup>2</sup> می‌رسد و بعد از آن تا فاصله ۳۲/۶۴ متری کاهش می‌یابد.



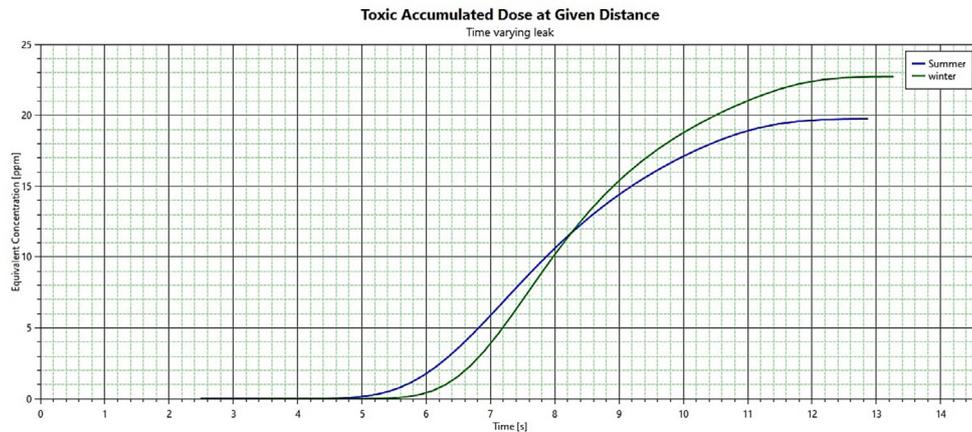
شکل ۱۱: دوز انباشته شده ماده سمی بر حسب زمان برای سناریو پارگی فاجعه بار



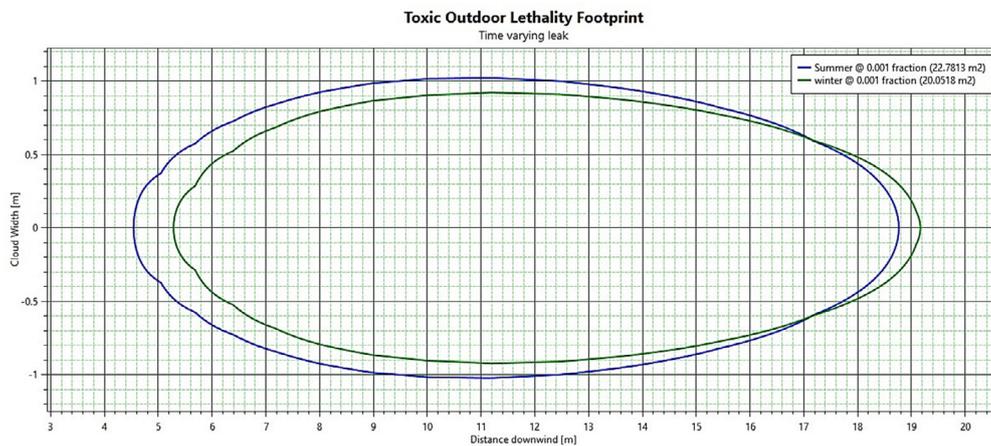
شکل ۱۲: شعاع اثر آتش ناگهانی بر حسب فاصله برای سناریو پارگی فاجعه بار



شکل ۱۳: میزان سمیت بر حسب فاصله از محل نشتی در جهت وزش باد برای سناریو نشتی متغیر با زمان



شکل ۱۴: دوز انباشته شده ماده سمی بر حسب زمان برای سناریو نشتی متغیر با زمان



شکل ۱۵: احتمال مرگ و میر در اثر سمیت برای سناریو نشتی متغیر با زمان

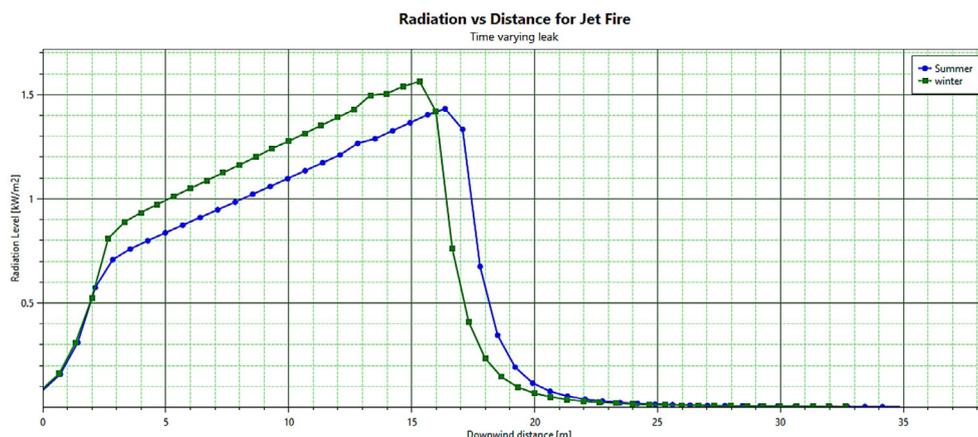
این جدول به‌طور شفاف اهمیت اتخاذ اقدامات پیشگیرانه و برنامه‌ریزی مناسب برای کاهش اثرات حوادث احتمالی در واحد SRU را تأکید می‌کند.

### محدودیت‌های مطالعه

محدودیت‌های این پژوهش باید به‌روشنی مدنظر قرار گیرد. نخست آن‌که تنها تعداد محدودی از سناریوهای بحرانی بررسی شده و ممکن است سایر شرایط عملیاتی یا رویدادهای نادر مد نظر قرار نگرفته باشند. دوم، شرایط جوی صرفاً برای دو حالت تابستان و زمستان لحاظ شده و تغییرات روزانه یا فصلی در پایداری جوی و سرعت باد

معیارهای آسیب تجهیزات) معیارهای آسیب تجهیزات) مقایسه می‌کند.

همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، دوز  $H_2S$  در تمامی سناریوها به‌طور قابل توجهی بالاتر از مقدار IDLH (۱۰۰ ppm) است که بیانگر احتمال بسیار بالای مرگ و میر برای کارکنان در معرض قرار گرفته می‌باشد. مقادیر تشعشع آتش در برخی سناریوها همچنان کمتر از سطح بحرانی تجهیزات ( $37/5 \text{ kW/m}^2$ ) بوده اما برای انسان‌ها خطرناک است. همچنین موج انفجار در سناریوی نشتی خط لوله ورودی مقادیر مشابه استانداردهای آسیب شدید به ساختمان و تجهیزات ( $\approx 0/2 \text{ bar}$ ) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶: سطح تشعشع آتش فورانی بر حسب فاصله برای سناریو نشتی متغیر با زمان

در شرایط آب و هوایی مشخص شده خطرناک‌ترین سناریو محسوب می‌شود. شدت تشعشع آتش با میزان  $71/027 \text{ kW/m}^2$  تا فاصله  $70/027$  متری موجب خسارت به واحدها و تجهیزات فرآیندی شده و خطر مرگ آنی برای افراد در معرض آن را به همراه دارد. در این حالت، ابر هیدروژن سولفید در جهت باد تا فاصله ۱۲۰ متر پیشروی کرده است، در حالی که کانکس‌های محل استراحت پرسنل و واحدهای همجوار در این محدوده قرار دارند. سناریوی پرخطر بعدی مربوط به نشتی خط لوله ورودی (به اندازه ۲۰ درصد قطر لوله) است که در شرایط آب و هوایی تابستان و زمستان، ابر هیدروژن سولفید تا فاصله ۱۳ متر گسترش یافته است. شدت انفجار نیز با فشار  $0/02068 \text{ bar}$  تا فاصله  $35/40$  متری در تابستان و  $30/15$  متری در زمستان می‌تواند منجر به تخریب ساختمان‌ها و تجهیزات شود. نتایج نشان داد که شدت موج انفجار مستقل از شرایط آب‌وهوایی است، اما در انتشار گاز و تشعشع آتش اختلاف معناداری میان تابستان و زمستان مشاهده می‌شود.

از منظر مقایسه با سایر مطالعات، باید توجه داشت که نرم‌افزار PHAST یک ابزار نیمه‌تجربی و مبتنی بر مدل‌های تحلیلی ساده‌سازی شده است. در حالی که نرم‌افزارهایی نظیر CFD یا SAFETI می‌توانند جزئیات دقیق‌تری از توزیع مکانی و زمانی گاز، الگوهای آشفستگی جریان و تأثیر موانع فیزیکی

می‌تواند بر نتایج تأثیرگذار باشد. سوم، برخی داده‌های فرآیندی بر اساس اطلاعات موجود و تخمین‌های مهندسی وارد مدل شده‌اند که می‌تواند منجر به عدم قطعیت در نتایج شود. در نهایت، به دلیل ماهیت مدل PHAST، فرضیات ساده‌کننده‌ای نظیر یکنواختی شرایط جوی و ایستایی محل نشت اعمال شده است که می‌تواند اختلافی میان نتایج شبیه‌سازی و واقعیت ایجاد کند.

### بحث

در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار PHAST و داده‌های فرآیندی نظیر دما، فشار، آنالیز گازهای ورودی و داده‌های هواشناسی، سناریوهای محتمل بر اساس پیشینه واحد و نقاط و محدوده‌های پرخطر، همچنین میزان انتشار گازهای سمی از جمله هیدروژن سولفید در این واحد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از ارزیابی پیامد برای حوادث محتمل در واحد گوگردزایی نشان داد که فواصل اطمینان برای کارکنان، ابعاد گسترش آتش فورانی و ناگهانی، شدت انفجار و گستره انتشار گاز سمی هیدروژن سولفید قابل توجه بوده و در برخی موارد از محدوده‌های ایمن طراحی فراتر می‌رود.

بررسی سناریوها و نمودارهای مربوطه نشان داد که تخلیه ناگهانی خط ورودی به راکتور و خود راکتور



سناریو تخلیه ناگهانی خط ورودی به راکتور است که موجب گسترش ابر هیدروژن سولفید تا فاصله حدود ۱۲۰ متر و تحت تأثیر قرار گرفتن کانکس‌های پرسنل و واحدهای مجاور می‌شود. شدت تشعشع آتش در این سناریو به حدود  $70 \text{ kW/m}^2$  می‌رسد و خسارت جدی به تجهیزات و تهدید جانی کارکنان را به همراه دارد. در سناریوی نشتی ۲۰ درصد قطر لوله، ابر سمی تا حدود ۱۳ متر گسترش یافته و فشار انفجار بیش از ۰/۰۲ bar می‌تواند موجب تخریب سازه‌ها شود. این نتایج نشان می‌دهد که حریم ایمن کارکنان باید بیش از ۱۲۰ متر از نقاط پرخطر در نظر گرفته شود. توصیه‌های عملی شامل انتقال محل استقرار پناهگاه‌ها، توزیع ماسک‌های  $\text{H}_2\text{S}$ ، آموزش‌های مداوم کارکنان، و نصب سیستم پایش مداوم گاز است.

با این حال، تحلیل حاضر محدود به حالات جوی مشخص، داده‌های موجود فرآیندی و فرض ثبات جوی یکنواخت است. بنابراین، نتایج برای شرایط دیگر ممکن است متفاوت باشد و مطالعه‌های دقیق‌تر با استفاده از مدل‌های CFD و هوش مصنوعی توصیه می‌شود.

در نهایت، مدل‌سازی پیامدها و تعیین حریم ایمن نقش حیاتی در ارتقای ایمنی کارکنان و حفاظت از محیط پیرامونی دارد و می‌تواند به عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های عملی در مدیریت ایمنی پالایشگاه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

### پیشنهادات صنعتی

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه ارزیابی پیامد انتشار گاز سمی هیدروژن سولفید در واحد بازیافت گوگرد، پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردد:

(۱) اعلام منطقه پرخطر: محدوده‌ای به شعاع ۱۲۰ متری اطراف راکتور به عنوان منطقه پرخطر تعیین و علامت‌گذاری شود.

(۲) انتقال کانکس‌ها به نقاط ایمن: کانکس‌های محل استقرار نفرات به مناطق ایمن‌تر در فاصله ۱۲۰ متری و در ارتفاعات بالاتر منتقل شوند.

(۳) توزیع ماسک‌های ضد گاز: تعداد کافی ماسک‌های

(مانند شبکه‌های عصبی و سامانه‌های AI-based EHS) می‌تواند امکان مدل‌سازی دقیق‌تر شرایط جوی و عملیاتی را فراهم آورد. همچنین توسعه مدل‌های تصمیم‌گیری هوشمند و توجه به رفتار ایمنی کارکنان، مسیر مناسبی برای ارتقای راهبردهای واکنش اضطراری و آینده‌پژوهی در حوزه ایمنی فرایندی خواهد بود.

مقایسه نتایج حاصل از ارزیابی پیامد انتشار  $\text{H}_2\text{S}$  در واحد بازیافت گوگرد پالایشگاه آبادان با یافته‌های سایر پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی نشان می‌دهد که محدوده پرخطر ابر هیدروژن سولفید تا ۱۲۰ متر پیشروی کرده که تقریباً با نتایج صلوتیان (۲۱) در واحد آمین پالایشگاه آبادان (۱۲۲ متر) همخوانی دارد، اما کمتر از گزارش عمادی و همکاران (۲۲) در درام واحد شیرین‌سازی فاز ۱۳ پارس جنوبی و نجف‌پور دیوانی (۲۳) در پتروشیمی لردگان است که این اختلاف می‌تواند ناشی از حجم و نوع ماده، شرایط عملیاتی و سناریوهای انتخاب شده باشد. مقایسه با مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد که در پالایشگاه کادونا، نیجریه، ریدوان و همکاران (۲۰)  $\text{H}_2\text{S}$  با غلظت ۰/۵۱ ppm تا فاصله ۱۸۳ متر گسترش یافته و مرگ آنی ایجاد می‌کند، که بیانگر تأثیر شرایط جوی، میزان گاز و طراحی واحد بر نتایج است. علاوه بر این، مقایسه با حوادث خطوط لوله و مخازن بزرگ، همانند مطالعات شکاری (۲۴) و هاشمی‌نسب (۲۵)، نشان می‌دهد که شدت و دامنه تأثیر انفجار و انتشار گاز در واحدهای بزرگ و تحت فشار بسیار بالاتر است، که تفاوت آن با مطالعه حاضر عمدتاً ناشی از مقیاس، فشار و فرضیات مدل‌سازی نرم‌افزار PHAST است. به طور کلی، این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که نتایج مطالعه حاضر با توجه به محدودیت‌ها و شرایط خاص واحد، تصویر محافظه‌کارانه و قابل اعتمادی از محدوده خطر و پیامدهای احتمالی حوادث ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و ارتقای ایمنی واحد باشد.

### نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که خطرناک‌ترین

1. Artificial Intelligence-based Environment, Health, and Safety

با گاز هیدروژن سولفید ( $H_2S$ ) واکنش داده و ترکیب آمونیوم هیدروژن سولفید را تشکیل می‌دهد. این ترکیب به‌عنوان یک ماده پایدارتر و کم‌خطرتر عمل می‌کند و به این ترتیب اثرات سمی  $H_2S$  کاهش می‌یابد (۳۲).

۶) برگزاری مانورهای مقابله با حوادث: مانورهای مقابله با نشتی و انتشار هیدروژن سولفید به‌صورت منظم و برنامه‌ریزی‌شده در محل واحد برگزار شود.

۷) استفاده از دستگاه‌های سنجش هیدروژن سولفید: دستگاه‌های سنجش غلظت هیدروژن سولفید در اختیار کارکنان قرار گیرد تا در مواقع نشتی یا حادثه، امکان شناسایی سریع و کاهش آسیب فراهم شود. این اقدامات می‌تواند به‌طور مؤثری ایمنی کارکنان و کاهش خسارت‌های احتمالی را تضمین کند.

ضد گاز تهیه و در اختیار کارکنان قرار گیرد. جعبه‌های حاوی ماسک در مسیرهای پرتردد به فاصله ۵ متری نصب شود. آموزش نحوه استفاده از ماسک‌ها به تمامی کارکنان ارائه گردد.

۴) نصب پرچم‌های تعیین جهت باد: با همکاری تیم ایمنی، پرچم‌های مخصوص در چند نقطه کلیدی واحد نصب شود. این پرچم‌ها به‌منظور مشخص کردن جهت باد استفاده شوند تا در مواقع نشتی، نفرات از قرار گرفتن در جهت باد اجتناب کنند.

۵) تهیه کپسول آمونیاک: کپسول‌های آمونیاک جهت استفاده اضطراری (برای کاهش اثرات گاز) در اختیار کارکنان قرار گیرد. کپسول‌های آمونیاک در شرایط اضطراری می‌توانند گاز آمونیاک آزاد کنند، که

## REFERENCES

1. Abdulhamidzadeh B, Badrin N. Quantitative and qualitative assessment of risk in process industries and description of industrial hazard identification methods with a focus on HAZOP method. Tehran: Andishe Sara Publications; 2019. [Persian]
2. Rafieifar S. A life free from the risk of intentional and unintentional injuries. Tehran: Mehrravosh Publications; 2019. [Persian]
3. Budiarta KGW, Handan DW, Dinariyana AAB. Quantitative risk assessment of LNG terminal. IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2022;557:012022.4.
4. Rigaud M, Buekers J, Bessems J, Basagaña X, Mathy S, Nieuwenhuijsen M et al. The methodology of quantitative risk assessment studies, Environ Health. 2024;23:13.
5. Parvini M, Kordrostami A. Consequence modeling of explosion at Azad-Shahr CNG refueling station. J Loss Prev Process Ind. 2014;30:454-7.
6. Mousavi J, Parvini M. A sensitivity analysis of parameters affecting the hydrogen release and dispersion using ANOVA method. Int J Hydrogen Energy. 2016;41(9):5188-201.
7. Khalilipour Langroudi MM, Shahraki F, Goharokhim M. Evaluation and identification of process hazards of sulfur recycling unit of Sarkhas Refinery using HAZOP technique. Master's Thesis, Chemical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran; 2009. [Persian]
8. Pandya N, Gabas N, Marsden E. Sensitivity analysis of Phast's atmospheric dispersion model for three toxic materials (nitric oxide, ammonia, chlorine). J Loss Prev Process Ind. 2012;25(6):966-73.
9. Shakeri HR, Abbasi F, Kashi E. Consequence analysis and modeling of process incidents in Shiraz Refinery using PHAST software. In: Proceedings of the 1st National Conference on the Development of Knowledge Base of Oil, Gas and Petrochemical Industries; 2013; Tehran, Iran. [Persian]
10. Nouraldini Shah Abadi A, Shahraki F, Kashi A. Consequence analysis and process risk assessment in Gachsaran 1200 NGL Refinery [master's thesis]. Zahedan (Iran): University of Sistan and Baluchestan; 2013. [Persian]
11. Biglarzade B, Shekarian A, Shokohi Y. Investigating the instantaneous release of Krosen farm holding tank by PHAST software. In: Proceedings of the 1st International Oil, Gas, Petrochemical and Power Plant Conference; 2013 Jun; Tehran, Iran. [Persian]
12. Jafari MJ, 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). J Health Saf

- Work. 2013;3(1). [Persian]
13. Bagheri M, Badri N, Rashtchian D, Eghbalian H. Determination of safe distance for sour gas pipelines based on quantitative risk assessment. *Iran J Chem Chem Eng.* 2013;32(2):57-71. [Persian]
  14. Li X, Koseki H, Mannan MS. Case study: Assessment on large scale LPG BLEVEs in the 2011 Tohoku earthquakes. *J Loss Prev Process Ind.* 2015;35:257-66.
  15. Ebrahemzadieh M, Foroghi Nasab F, Mortazavi M, Soltani Gerdefaramarzi R. Analysis of processing accidents due to H<sub>2</sub>S in Clot Stuck Unit of one of the South Pars Refineries leakage using determination of safe privacy approach. *Occup Med Q J.* 2015;7(3):11-8. [Persian]
  16. Davoudi M, Aleghafouri A, Safadoost A. Flaring networks assessment in South Pars Gas processing plant. *J Nat Gas Sci Eng.* 2014;21:221-229.
  17. Abdulahi S, Ghayazi F. Evaluation of the consequences of hydrogen sulfide release at the sweetening site of Bushehr Petrochemical Complex using PHAST and ALOHA models. Master's Thesis, Chemical Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran; 2016. [Persian]
  18. Kalate Arabi M, Jahangiri M, Parvini M. Investigation and evaluation of BLEVE outcome using PHAST software. Master's Thesis, Chemical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran; 2017. [Persian]
  19. Aladi A, Mousavi B. Eruption risk assessment during drilling in Ahvaz oil field using PHAST software. Master's Thesis, Chemical Engineering, Islamic Azad University, Gachsaran Branch, Iran; 2019. [Persian]
  20. Ridwan SA, Abubakar ZU, Waziri SM. Modelling dispersion and toxicity consequences due to accidental release of hydrogen sulphide in a crude oil refinery. *Saf Eng.* 2019;9(2):59-64. [Serbian]
  21. Salavatian AM, Rezaei Behbahani P. Modeling the consequences of hydrogen sulfide gas release in the amine unit of Abadan Refinery [master's thesis]. Abadan (Iran): Islamic Azad University of Abadan; 2019. [Persian]
  22. Emadi J, Amin Salehi F, Ghorbaniya Z, Nowrozi A. Consequence Modeling of H<sub>2</sub>S Leakage in One of the Drums of the Sour Gas Sweetening Unit at the Refinery Using PHAST Software (Case Study: South Pars Phase 13). In: *The 4th International Conference on Technology Development in Oil, Gas, Refining and Petrochemical;* 2020. [Persian]
  23. Najafpour Diwani A, Motavasel M, Fattahi M. Modeling the consequences of an ammonia storage tank accident using PHAST and ALOHA software. Master's Thesis in Chemical Engineering, Abadan Oil Industry University, Abadan, Iran; 2021. [Persian]
  24. Shekari M, Amini Nasab AS. Assessment of consequences of gas pipeline accidents in Farashband Gas Refinery using PHAST method. Master's Thesis in Chemical Engineering, Mehr Arvand Institute of Higher Education, Abadan, Iran; 2020. [Persian]
  25. Hashemi Nesab SA, Falah Madvari R, Akhavan A. Modeling the consequences of hydrogen sulfide gas leakage from HP Separator in Koroosh processing float. Master's Thesis in Chemical Engineering, Yazd University of Science and Arts, Iran; 2021. [Persian]
  26. Çetinyokuş S. Consequence analysis in industrial organizations containing H<sub>2</sub>S gas through accident scenarios based on chemical source selection. *Process Saf Prog.* 2023;42(3):469-480.
  27. Mustakim D, Ramadhan GA, Husin Z, Zulfikar AJ. Hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S) leak risk management in gas plant facilities: A review. *Teknosains: J Sci Technol Informatics.* 2025;12(2).
  28. CCPS. *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis.* 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley; 2008.
  29. Parvini M, Sharifi Sudkalai Z. PHAST software practical training for chemical, safety, environmental and HSE engineers. Tehran, Iran: Idepardazan Sharif Engineering Company Publications; 2019. [Persian]
  30. Andarani P, Priyatna MNR. Analysis of Sulfur Recovery Unit (SRU) Refinery as Sulfur Emission Control Unit at PT X, Indonesia. *World J Adv Res Rev.* 2023;18(3):1260-1267.
  31. Sepehrudin KS. Analysis of the consequences of the explosion and fire accident in the suburban natural gas pressure reduction station number two, Urmia city [master's thesis]. Urmia (Iran): Urmia University of Technology; 2016. [Persian]
  32. Jiang Q, Li T, He Y, Wu Y, Zhang J, Jiang M. Simultaneous removal of hydrogen sulfide and ammonia in the gas phase: a review. *Environ Chem Lett.* 2022;20:1403-19.