



Determination of a Safe Buffer Zone for an Industrial Facility to Manage Air Pollutant Emissions

Jaber Ebrahimi^{a*}, Arezoo Gazory Neyshabouri^a, Seyyed Farid Mousavi^b

^aDepartment of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Engineering, Islamic Azad University, South Tehran Branch, Tehran, Iran.

^bDepartment of Operations Management and Information Technology, Faculty of Management, Kharazmi University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: jabber.ebrahimi@iau.ac.ir, <https://orcid.org/0009-0003-2304-2166>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 2026/01/27
Received in revised form:
2026/02/19
Accepted 2026/02/27
Available online: 2026/03/06

Keywords:
Risk assessment,
Restricted Area,
Steel company,
Consequence modeling,
Management air pollution.

ABSTRACT

Industrial facilities are continuously exposed to potential hazards that may lead to injuries, fatalities, and substantial financial losses. The development, advancement, and expansion of highly complex technologies in various industries have caused safety philosophy to shift from a post-incident approach to a pre-incident approach. The increasing application of this new approach and the reduction in the number of industrial accidents demonstrate the positive effects of this trend in accident reduction. The steel industry, as one of the key and strategic industries in the national economy, has always faced numerous challenges in the fields of safety, health, and environmental protection. The presence of hazardous materials and complex processes in this industry highlights the necessity of conducting detailed risk assessment and consequence modeling studies more than ever. In this study, credible scenarios were selected to determine fire zone distances, site boundaries, impacted areas around the industrial zone, individual risk assessment, and societal risk assessment. PHAST software was used for consequence modeling of process accidents, and SAFETI software was utilized for quantitative risk assessment. The results of consequence modeling showed that due to the presence of ammonia storage tanks in the studied company, most of the company's buildings are exposed to the harmful concentrations of this toxic substance. The harmful concentration of this toxic gas extends up to 190 meters outside the industrial site fence. Individual risk assessment revealed that the 10^{-4} per year risk contour covers parts of the area outside the industrial boundary, indicating unacceptable risk levels in some locations. Societal risk assessment also indicated that nearby residential areas are in the high-risk region. Therefore, it is necessary to strengthen safety protection layers, establish process safety management systems, and expand the company's boundary from the southeastern area by at least 190 meters to provide a suitable safe restricted area for air pollution management during emergency situations. The integration of consequence modeling with quantitative risk assessment enabled a comprehensive evaluation of both on-site and off-site hazards, providing a robust basis for evidence-based safety decision-making in complex industrial environments. The findings of this study provide a practical framework for land-use planning, emergency response preparedness, environmental protection, and sustainable safety management in steel production facilities.

Cite this article: Ebrahimi, J., Gazori Nyshabouri, A., & Mosavi, S. F. (2026). Determination of a Safe Buffer Zone for an Industrial Facility to Manage Air Pollutant Emissions. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 1(1), 1-21. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252436>



Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252436>

Introduction

The steel industry is recognized as one of the most important industrial sectors worldwide; however, it is associated with numerous process safety, environmental, and occupational health hazards. The storage and handling of hazardous materials such as ammonia, liquefied petroleum gas (LPG), hydrogen, natural gas, and hydrochloric acid can lead to severe incidents including toxic releases, fires, explosions, and environmental contamination. Modern safety management emphasizes proactive risk assessment and consequence modeling to prevent accidents before their occurrence. Accurate consequence assessment and quantitative risk analysis also provide a scientific basis for land-use planning, emergency preparedness, and the implementation of effective mitigation measures in high-hazard industrial facilities. The present study aimed to determine the safe restricted area and site boundary required for air pollution management and emergency planning in a steel manufacturing company. Specifically, the study focused on identifying credible accident scenarios, evaluating their consequences, determining Fire Zones (FZ), Restricted Areas (RA), and Impacted Areas (IA), and assessing individual and societal risks associated with process facilities.

Method

This research was conducted using a quantitative risk assessment (QRA) framework based on the requirements of IPS-C-SF-550, GS-EP-SAF-253, and DNV Technical Note 14 regarding process equipment failure frequencies. The study was performed in five stages: scenario selection, condition analysis, consequence modeling, frequency estimation, and risk evaluation. Credible scenarios involving ammonia vessels, LPG storage, hydrogen storage, natural gas pressure reduction stations, and acid storage tanks were identified through field investigations and process data analysis. Meteorological conditions were defined using regional wind rose data and three dominant weather categories (F/2, D/5, and D/15) representing different atmospheric stability classes and wind speeds. Consequence modeling was carried out using PHAST software to simulate toxic gas dispersion, jet fires, flash fires, pool fires, and vapor cloud explosions (VCE). The selected scenarios represented the most credible and potentially severe accidental releases based on the inventory of hazardous substances, operating conditions, and process configuration of the facility. Model input parameters, including operating pressure, temperature, inventory, and release characteristics, were obtained from plant technical documentation and validated through field observations. Subsequently, SAFETI software was employed to estimate individual and societal risk levels by integrating consequence severity with equipment failure frequencies. The analysis incorporated leak size categories, ignition probabilities, population distributions, occupancy assumptions, and explosion confinement characteristics to generate risk contours and evaluate safety distances around the industrial complex. The resulting risk contours and consequence distances were finally compared with internationally accepted risk acceptance criteria to identify vulnerable areas and support emergency response planning and land-use management decisions.

Results

The results demonstrated that ammonia storage facilities constituted the most significant hazard source within the studied steel company. Consequence modeling revealed that toxic ammonia releases generated the largest impact distances compared with fire and explosion scenarios. For Fire Zone determination, dominant consequences were identified as jet fires for ammonia and hydrogen systems, flash fires for LPG storage, and vapor cloud explosions for the natural gas pressure reduction station. The maximum fire zone distances reached 60 m for ammonia storage facilities and 63 m for LPG flash-fire scenarios. Restricted area assessment showed that ammonia release scenarios produced the most critical outcomes. The maximum toxic dispersion distance based on the LC1% criterion reached 218 m under unfavorable meteorological conditions. The results also demonstrated a strong influence of atmospheric

stability and wind speed on toxic dispersion distances, with stable atmospheric conditions producing the largest impact zones. These findings highlight the importance of incorporating site-specific meteorological data into quantitative risk assessments for industrial facilities. Evaluation of site boundaries indicated that harmful ammonia concentrations could extend approximately 190 m beyond the existing industrial fence line, particularly in the southeastern direction. Individual risk analysis demonstrated that the 10^{-4} per year risk contour extended beyond the process area and covered portions of the surrounding environment, indicating unacceptable risk levels in some locations. Furthermore, the ALARP (As Low As Reasonably Practicable) zone extended several hundred meters beyond the facility boundary. Societal risk assessment revealed that nearby residential areas could be exposed to elevated risk levels, placing the facility within the high-risk region of the societal risk acceptance criteria. Comparison of the analyzed scenarios indicated that toxic releases contributed more substantially to off-site risk than fire or explosion events, emphasizing the need to prioritize preventive and mitigation measures for ammonia storage systems. These findings indicate that ammonia storage units represent the dominant contributors to both individual and societal risks.

Conclusions

The findings confirm that consequence modeling and quantitative risk assessment provide effective tools for defining safe industrial boundaries and improving air pollution management during emergency situations. Among all identified hazards, ammonia release scenarios were found to be the governing factor in determining site boundaries and safety distances. Because toxic ammonia concentrations may extend up to 190 m outside the existing fence line, expansion of the southeastern site boundary is recommended. In addition, strengthening independent protection layers, implementing risk-based inspection programs, improving maintenance and integrity management systems, and enhancing process safety management (PSM) practices are necessary to reduce the likelihood and consequences of hazardous releases. Future development projects should consider the identified Fire Zones, Restricted Areas, and Impacted Areas to prevent the construction of vulnerable facilities within unacceptable risk regions. The integration of consequence modeling with quantitative risk assessment enabled a comprehensive evaluation of both on-site and off-site hazards, providing a robust basis for evidence-based safety decision-making in complex industrial environments. The results of this study provide a practical framework for land-use planning, emergency response preparedness, environmental protection, and sustainable safety management in steel production facilities. Furthermore, the findings emphasize that risk-informed design and operational decision-making can substantially enhance the resilience of industrial facilities against low-probability but high-consequence accidents. The generated risk contours may serve as valuable decision-support tools for regulatory authorities, plant managers, and emergency response organizations when establishing exclusion zones and prioritizing risk reduction measures. Although the present study focused on a steel manufacturing complex, the proposed methodology is transferable to other high-hazard industrial sectors where toxic and flammable materials are processed or stored. Future research should integrate dynamic operational data, real-time monitoring technologies, and probabilistic meteorological models to further improve the reliability of consequence prediction and emergency planning strategies.



تعیین حریم ایمن یک واحد صنعتی به منظور مدیریت انتشار آلاینده های هوا

جابر ابراهیمی^{a*}، آرزو گازی نیشابوری^a، سید فرید موسوی^b

^aگروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران جنوب، تهران، ایران.

^bگروه مدیریت عملیات و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: جابر ابراهیمی jabber.ebrahimi@iaui.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵

کلیدواژه ها:

ارزیابی ریسک،

حریم ایمن،

شرکت فولادی،

مدل سازی پیامد،

مدیریت آلودگی هوا.

همواره در دل صنایع، مخاطرات بالقوه ای وجود دارند که می توانند موجب بروز جراحات، صدمات جانی و خسارت های مالی گسترده شوند. توسعه، پیشرفت و گسترش فناوری های بسیار پیچیده در صنایع مختلف سبب شده است که فلسفه ایمنی از رویکرد پس از وقوع به رویکرد پیش از وقوع تغییر یابد. به کارگیری روزافزون این رویکرد جدید و کاهش تعداد حوادث در صنایع نشان دهنده اثرات مثبت این روند در کاهش حوادث می باشد. صنعت فولاد به عنوان یکی از صنایع کلیدی و راهبردی در اقتصاد کشورها، همواره با چالش های متعددی در زمینه ایمنی، بهداشت و محیط زیست مواجه بوده است. وجود مواد خطرناک و فرآیندهای پیچیده در این صنعت، ضرورت انجام مطالعات دقیق ارزیابی ریسک و مدل سازی پیامد را بیش از پیش نمایان می سازد. در این مطالعه، سناریوهای قابل اعتماد جهت تعیین فواصل منطقه آتش، مرز سایت، حاشیه اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی، ارزیابی ریسک فردی و ارزیابی ریسک جمعی انتخاب گردید. جهت مدل سازی پیامد حوادث فرآیندی، از نرم افزار PHAST و برای ارزیابی کمی ریسک از نرم افزار SAFETI استفاده شد. نتایج حاصل از مدل سازی نشان داد که با توجه به وجود مخازن ذخیره آمونیاک در شرکت مورد مطالعه، اکثر ساختمان های این شرکت در معرض غلظت آسیب رسان این ماده سمی قرار می گیرند. میزان غلظت آسیب رسان این گاز سمی تا ناحیه ۱۹۰ متری بیرون از فاس سایت صنعتی گسترش پیدا می کند. همچنین ارزیابی ریسک فردی نشان داد که منحنی ریسک ۱۰ به توان ۴- در سال، بخش هایی از خارج از محدوده صنعتی را تحت پوشش قرار می دهد. ارزیابی ریسک جمعی نیز بیانگر آن است که محدوده های مسکونی اطراف در ناحیه ریسک بالا قرار دارند. بنابراین لازم است ضمن تقویت لایه های حفاظت ایمنی و استقرار سیستم مدیریت ایمنی فرآیند، مرز شرکت از ناحیه جنوب شرقی به میزان حداقل ۱۹۰ متر گسترش یابد تا حریم ایمن مناسبی جهت مدیریت آلودگی هوا در شرایط اضطراری فراهم گردد.

استناد به این مقاله: ابراهیمی، جابر؛ گازی نیشابوری، آرزو و موسوی، سید فرید. (۱۴۰۴). تعیین حریم ایمن یک واحد صنعتی به منظور مدیریت انتشار آلاینده های هوا، راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۱(۱)، ۲۱-۱. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252436>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.252436>.

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

امروزه پیشرفت جمعیت و نیاز به توسعه فیزیکی و سازه‌ای و همچنین تمایل جوامع بشری به رشد، نیاز به استفاده روزافزون منابع و انرژی را باعث گردیده که استفاده از فلزات پرکاربرد صنعتی و ساختمانی از جمله فولاد را افزایش داده‌است (Jozi & Majd, 2014; Pandey et al., 2025). صنعت فولاد به‌عنوان یکی از صنایع کلیدی در اقتصاد جهانی، همواره با چالش‌های متعددی مواجه بوده است. در سال‌های اخیر، بحران‌های اقتصادی، محیط‌زیستی و سیاسی تأثیرات قابل توجهی بر این صنعت داشته‌اند (Nazaripour et al., 2018). برای مثال، در سال ۲۰۲۴، تولید فولاد خام چین به پایین‌ترین سطح پنج‌ساله خود رسید که عمده‌تأثیر آن کاهش تقاضا در بخش مسکن بود (Baird, 2024a, 2024b). در اروپا نیز، افزایش هزینه‌های انرژی و ظرفیت مازاد تولید، فشارهای زیادی بر تولیدکنندگان وارد کرده‌است. کشور ما نیز در جهت پیشبرد اهداف توسعه‌ای و همچنین بدست آوردن جایگاه مناسب در اقتصاد جهانی و جلوگیری از خام‌فروشی و با بهره‌گیری از منابع سرشار آهن سعی در افزایش سهم تولید این محصول ارزشمند را داشته‌است (Jozi & Majd, 2014). از طرفی مشخص شده‌است که آمار حوادث در کشورهای در حال توسعه بیشتر از کشورهای توسعه‌یافته‌است. حوادث زمانی رخ می‌دهند که نقصی در سیستم مدیریت ایمنی یا روش‌های مهندسی ایمنی وجود داشته‌باشد (Pandey et al., 2025). صنعت فولاد به‌عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه صنعتی و اقتصادی در کشورهای مختلف، همواره با چالش‌های متعددی در زمینه ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست مواجه بوده‌است (Nazaripour et al., 2018). در این میان، ارزیابی ریسک منابع فرآیندی به‌منظور شناسایی، تحلیل و مدیریت خطرات بالقوه، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Soltanzadeh et al., 2025).

مدل‌سازی پیامد به‌عنوان یکی از ابزارهای مؤثر در ارزیابی ریسک، با شبیه‌سازی نتایج احتمالی وقوع حوادث، امکان پیش‌بینی و برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات منفی را فراهم می‌آورد (Padash et al., 2024). این روش به‌ویژه در صنایع با فرآیندهای پیچیده مانند فولادسازی، کاربرد گسترده‌ای دارد (Zahmatkesh, 2022; Song et al., 2020). در این راستا، مطالعات متعددی در سال‌های اخیر به ارزیابی ریسک در صنایع فولادی پرداخته‌اند. برای مثال، تحقیقی در ایران با استفاده از روش TOPSIS به ارزیابی ریسک‌های محیط‌زیستی و ایمنی در یک مجتمع فولادی پرداخته‌است (Padash et al., 2024). یکی از مسائلی که در ایمنی صنایع مطرح است، تصمیم‌گیری در مورد با صرفه بودن یا نبودن سرمایه‌گذاری برای ایمن‌کردن فرایند است (Parpinchi et al., 2025). به بیان دیگر با توجه به تعداد زیاد حوادث محتمل در یک واحد فرآیندی و نیز محدود بودن منابع مالی، تعیین معیاری برای تصمیم‌گیری و اولویت‌بندی مخاطرات ضروری به نظر می‌رسد (Jafari, 2021; Kakavandi et al., 2014). طبعاً ابعاد حوادث محتمل در یک واحد یعنی میزان و شدت تأثیر آن‌ها بر انسان، تجهیزات و محیط زیست، عامل مهمی است که در این باره مطرح می‌گردد به همین دلیل است که امروزه در ایمنی صنعتی، تصمیم‌گیری و مدیریت بر مبنای ارزیابی پیامد انجام می‌گیرد.

ارزیابی پیامد خطراتی همچون رها شدن مواد پرخطر در محیط، یکی از ضروری‌ترین و اصلی‌ترین مراحل برای افزایش سطح ایمنی در واحدهای موجود یا در حال طراحی است، بنابراین احتمال وقوع حوادثی از قبیل انفجار، آتش‌سوزی و نشت مواد سمی در آنها وجود دارد (Nazemi et al., 2025; Schmitz et al., 2021). رشد صنایع در کنار رشد جمعیت انسانی نه تنها باعث تکرار حوادث، بلکه موجب افزایش خسارات ناشی از حوادث نیز شده‌است که بعضاً این خسارات سنگین و جبران‌ناپذیر می‌باشند. در این مطالعه با روند مطالعات ارزیابی پیامد و سناریوهای قابل اعتنا جهت تعیین فواصل منطقه آتش، مرز سایت، حاشیه اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی، ارزیابی ریسک فردی و ارزیابی ریسک جمعی انتخاب می‌گردد و فاصله لازم جهت مدیریت آلودگی هوا در مواقع شرایط اضطراری را بیان می‌کند. جهت مدل‌سازی پیامد حوادث فرآیندی و ارزیابی کمی ریسک، نتایج حاصل از مطالعات انجام شده براساس GS253،

IPS-C-SF-550 و مدرک (DNV Technical Note 14 (Process Equipment Failure Frequencies)، اهداف زیر را محقق خواهیم نمود:

الف) دستیابی به آرایش بهینه تجهیزات و واحدها از جمله تعیین Impacted Area, Restricted Area, Fire Zone جهت استفاده برای ایجاد شرایط ذیل:
پیش‌گیری از وقوع حریق یا انفجار
از اطلاعات خروجی مدرک حاضر، می‌شود برای تفکیک منابع جرقه از منابع سوختنی در سایر مدارک مربوط به این واحد بهره‌گیری کرد.
کاهش اثرات منفی حوادث

- به حداقل رساندن پیامدهای حریق، انفجار و دیگر مخاطرات
 - شناسایی پیامد میان مرزهای تجهیزات و پیشگیری از در معرض خطر قرار گرفتن عموم.
 - استفاده از اطلاعات این گزارش جهت لزوم تعیین نقشه جانمایی شناساگرهای گازهای سمی و قابل اشتعال
- ب) فرار، تخلیه و نجات
محافظت افراد در برابر آتش، انفجار و انتشار گازهای قابل اشتعال و سمی در مسیرهای فرار به سمت ناحیه امن. ابزارهایی فراهم شود تا ایمنی افرادی که ممکن است در معرض خطر قرار بگیرند، تضمین شود. این محافظت باید هم شامل افرادی شود که به طور دائمی در مجاورت سایت حضور دارند و هم افرادی که به طور تصادفی در حال تردد در نزدیکی سایت می‌باشند (Chen et al., 2022).

روش‌شناسی پژوهش

مرحله نخست، انتخاب سناریو

در تحلیل پیامد، کلیدی‌ترین مرحله همین گام نخست است. چرا که برگزیدن سناریوهای قابل اعتنا از بین تعداد بسیار زیادی گزینه، باعث کاهش زمان و حجم محاسبات به گونه‌ای چشمگیر می‌شود. مقصود از سناریوی قابل اعتنا، حادثه یا ترکیبی از حوادث است که اولاً محتمل باشد، یعنی حوادث نادر بررسی نمی‌شوند. دوم اینکه عواقب حادثه مورد نظر باید دارای شدت و تأثیر کافی باشند (Taheri et al., 2025).

مرحله دوم، تحلیل شرایط

در این مرحله سعی می‌شود تمام شرایط فیزیکی تأثیرگذار بر حادثه، شناسایی شود. یعنی برای هر یک از سناریوها به طور جداگانه، عواملی که بر چگونگی شکل‌گیری و پیشرفت آن مؤثرند، باید مشخص شوند (Khodadadi-Mousiri et al., 2023). در این سناریو، چگالی ماده رها شده نسبت به هوا، دمای انتشار، دمای محیط و نیز سرعت رهاش از جمله عوامل مؤثر هستند. کشف و در نظر گرفتن این عوامل، به برگزیدن مدل مناسب برای شبیه‌سازی حادثه در مرحله بعد کمک می‌کند (Taheri et al., 2025).

مرحله سوم، مدل‌سازی حادثه

خروجی این مدل‌ها اطلاعاتی از قبیل نوع و ابعاد شعله، نرخ رهایی حرارت، میزان تشعشع حرارتی و دمای شعله است. مدل‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی انفجار، فشار حاصل از انفجار را به صورت تابعی از مسافت نسبت به مبداء انفجار تخمین می‌زنند (Jafari et al., 2022). اکثر مدل‌های موجود پیچیده و شامل محاسباتی بسیار زمان‌بر هستند، لذا در این مرحله از نرم افزار PHAST استفاده خواهد شد (Bagheri & Habibi, 2025; Witlox, 2010).

مرحله چهارم، تجزیه، تحلیل تکرارپذیری و تخمین احتمالات

برای بدست آوردن تصویری واقع‌گرایانه از حوادث، علاوه بر شدت، عنصر احتمال را نیز باید در نظر گرفت. احتمال خرابی در تأسیسات فرآیندی و لوله‌ها را می‌توان از سوابق خرابی تجهیزات فرآیندی ایران یا جهان به دست آورد. در صورت عدم دسترسی به اطلاعات فوق برای تجهیزات در پروژه حاضر، جهت محاسبه فرکانس‌خرابی با استفاده از معادلات موجود در Process Equipment Failure Frequencies 14 Technical Note T، میزان احتمال خرابی مربوط به هر تجهیز تعیین می‌شود (Gao & Zhou, 2025; Pittiglio et al., 2014).

مرحله پنجم، محاسبه و ارزیابی ریسک (ارزیابی خسارات)

برای مقایسه اولویت سناریوهای مختلف حوادث، باید آن‌ها را نه بر حسب شدت تأثیر یا احتمال بروز، بلکه بر حسب ریسک، یعنی ترکیب این دو عامل، طبقه‌بندی کرد. برای آنالیز کمی ریسک از نرم‌افزار SAFETI استفاده شده‌است (Kwak et al., 2024; Rigaud et al., 2024).

شرایط آب و هوایی

با توجه به تأثیرگذار بودن نوع شرایط آب و هوایی بر روی نتایج حاصل از مدل‌سازی پیامد و ارزیابی کمی ریسک‌های حوادث فرآیندی، یکی از الزامات مدل‌سازی پیامد و ارزیابی کمی ریسک‌های فرآیندی، تعیین شرایط آب و هوایی و پارامترهای مشخص‌کننده وضعیت آب و هوا می‌باشد (Marx & Cornwell, 2009; Taheri et al., 2025). به منظور در نظر گرفتن تمامی شرایط آب و هوایی محتمل، مدل‌سازی‌ها و ارزیابی کمی ریسک در سه وضعیت آب و هوایی مختلف انجام می‌گیرد (جدول ۱ و ۲). در واقع به منظور مدل‌سازی و ارزیابی کمی ریسک سناریوها، سه وضعیت آب و هوایی غالب (با متوسط‌گیری از داده‌ها و اطلاعات موجود و با توجه به داده‌های سازمان هواشناسی کشور) در طول سال تعیین شده‌است (Marx & Cornwell, 2009; Nivolianitou et al., 2004; Taheri et al., 2025).

جدول ۱. اطلاعات گلباد منطقه

Table 1. Wind Rose Data of the Area

دسته هواشناسی			جهت
سرعت باد (متر بر ثانیه)			
۱۵-۶	۶-۴	۴-۰	
6~15 D	D/5	F/2	
%۰/۲	%۱	%۱۲/۸	N
%۰/۴	%۱/۱	%۱۱/۳	NE
%۰/۷	%۱/۶	%۱۲/۱	E
%۰/۳	%۰/۸	%۹/۱	SE
%۰/۱	%۰/۲	%۱۰/۵	S
%۰/۱	%۰/۳	%۳/۱	SW
%۰/۳	%۰/۸	%۱۰/۸	W
%۰/۳	%۰/۹	%۱۱/۲	NW
%۲	%۷	%۹۱	احتمال دسته‌ی آب‌وهوا
۱۵~۶	۵	۲	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۲۴	۲۴	۱۵	دما (درجه سانتی‌گراد)
۴۷	۴۷	۱۶	رطوبت %
۲۴	۲۴	۱۵	دمای زمین (درجه سانتی‌گراد)
۱	۱	۱	فشار محیط (اتمسفر)
۱	۱	۰	شار تابش خورشیدی (کیلووات بر متر مربع)

منبع: سایت WindRose.xyz

جدول ۲. اطلاعات مربوط به شرایط آب و هوایی

Table 2. Weather Condition Data

D/۵ شرایط آب و هوایی		F/۲ شرایط آب و هوایی	
C۲۴ °	دما	C۱۵ °	دما
۴۷ %	رطوبت	۱۶ %	رطوبت
m/s۵	سرعت باد	m/s۲	سرعت باد
kW/m ^۲ ۱	تشعشع ناشی از تابش خورشید	kW/m ^۲	تشعشع ناشی از تابش خورشید
D	کلاس پایداری جوی	F	کلاس پایداری جوی
D/۱۵ شرایط آب و هوایی			
C۲۴ °	دما		
۴۷ %	رطوبت		
m/s۱۵	سرعت باد		
kW/m ^۲ ۱	تشعشع ناشی از تابش خورشید		
D	کلاس پایداری جوی		

شرایط جغرافیایی

یکی از فاکتورهای بسیار موثر در چگونگی پخش سیالات قابل اشتعال و سمی، میزان پستی و بلندی‌های محیط پیرامون منبع نشر است. بنابراین برای ارزیابی پیامد صحیح باید به خوبی از وضعیت محیط پیرامون محل نشر آگاه بود (Lisbona et al., 2014; Teng et al., 2025).

معرفی محدوده آتش‌های منتخب و شرایط فرایندی

در جدول ۳ محدوده آتش‌های منتخب و شرایط فرایندی ارائه شده است.

جدول ۳. سناریوها تعیین محدوده آتش، مرز سایت و حاشیه‌های اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی

Table 3. Scenarios for Determining Fire Zones, Site Boundaries, and Surrounding Impact Margins of the Industrial Area

منطقه آتش‌سوزی	نام سناریو	فاز انتشار	اندازه اتصال (اینچ)	تجهیزات درگیر	شناسه جریان	فشار عملیاتی (بار)	دمای عملیاتی (درجه سانتی‌گراد)
FZ-01	ایستگاه کاهش فشار	گاز	۴	ایستگاه کاهش فشار	گاز طبیعی	۱۷/۲	محیط
FZ-02	مخزن آمونیاک	مایع	۲	مخزن آمونیاک	آمونیایک	۱۰	محیط
FZ-03	مخزن LPG	مایع	۱	مخزن LPG	LPG	۵	محیط
FZ-04	انبار آمونیاک آنیل	مایع	۲	مخزن آمونیاک	آمونیایک	۱۷	محیط
FZ-04	انبار آمونیاک آنیل	مایع	۲	مخزن آمونیاک	آمونیایک	۱۷	محیط
FZ-05	انبار H ₂ آنیل	گاز	۱	مخزن H ₂	H ₂	۸	محیط
FZ-06	مخازن ذخیره اسید	مایع	اندازه منطقه دایک ۸ متر * ۴۲/۵ متر	مخزن HCL	HCL	اتم‌سفر	محیط

است. * میزان زبری سطح^۱ در پروژه‌ی حاضر، ۱ متر در نظر گرفته شده

^۱ Surface Roughness

است. * ارتفاع نشی^۱ در سناریوها غالباً ۱ متر در نظر گرفته شده

حدود پیامدها جهت تعیین محدوده آتش^۲، مرز سایت^۳ و حاشیه اثرپذیر^۴

پیامدهای حوادث محتمل در واحدهای فرآیندی مورد مطالعه به ۲ دسته تقسیم می‌شوند:

– پیامدهای ناشی از آتش‌سوزی مواد منتشر شده در محیط

– پیامدهای ناشی از انفجار ابر بخار مواد رها شده در محیط

معیارهایی که جهت بررسی نتایج آنالیز پیامد برای تعیین مرز سایت و حاشیه اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی مورد مطالعه، استفاده شده‌است در جدول ۴ ارائه شده‌است. جدول ۵ نیز قطر سایز نشی را برای هر مطالعه عنوان نموده‌است. جدول ۵ و ۶ به ترتیب بر اساس استاندارد IPS-C-SF-550 و بهره‌گیری از دستورالعمل GS-EP-SAF-253

ارایه گردیده‌است.

جدول ۴. سناریوها و معیارهای تعیین محدوده آتش، مرز سایت و حاشیه‌های اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی

Table 4. Scenarios and Criteria for Determining Fire Zones, Site Boundaries, and Surrounding Impact Margins of the Industrial Area

سناریو	پیامد	معیار تعیین محدوده آتش FZ	معیار تعیین مرز سایت RA	معیار تعیین حاشیه اثرپذیر IA
آتش ناگهانی	اشتعال	غلظت LFL ۱۰۰ درصد ماده اشتعال‌پذیر پخش شده	غلظت LFL ۱۰۰٪ ماده اشتعال‌پذیر پخش شده	
آتش استخری	تشعشع حرارتی	$9/5 \text{ kW/m}^2$	$4/7 \text{ kW/m}^2$	$3/2 \text{ kW/m}^2$
پراکنش سیالات سمی	مسمومیت تنفسی		LC1%	IDLH
آتش فورانی	تشعشع حرارتی	$9/5 \text{ kW/m}^2$	$4/7 \text{ kW/m}^2$	$3/2 \text{ kW/m}^2$
انفجار ابر بخار در واحد	افزایش فشار	GS-) mbar ۲۰۰/ (۵۵۰ IPS-) mbar ۱۷۰ (۲۵۳)	۱۴۰ mbar (GS-253)	۵۰ mbar

جدول ۵. قطر سایزهای نشی برای تعیین محدوده آتش، مرز سایت و حاشیه اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی

Table 5. Leak Size Diameters for Determining Fire Zones, Site Boundaries, and Surrounding Impact Margins of the Industrial Area

دسته‌بندی نشی	محدوده اندازه سوراخ نشی
منطقه آتش‌سوزی	قطر نشی ۲۰ میلی‌متر
منطقه محدود	قطر نشی در مقابل قطر لوله: ۰/۲ قطر لوله محدود به حداقل اندازه نشی ۲۰ میلی‌متر و حداکثر اندازه نشی ۱۵۰ میلی‌متر
منطقه تحت تأثیر	

¹ Release Location - Elevation

² Fire Zone

³ Restricted Area

⁴ Impacted Area

جدول ۶. قطر سایزهای نشتی برای تعیین محدوده آتش، مرز سایت و حاشیه اثرپذیر اطراف ناحیه صنعتی

Table 6. Leak Size Diameters for Determining Fire Zones, Site Boundaries, and Surrounding Impact Margins of the Industrial Area

دسته‌بندی نشتی	محدوده اندازه سوراخ نشتی
منطقه آتش‌سوزی	قطر نشتی ۲۰ میلی‌متر
منطقه محدود	۸۰ میلی‌متر برای ۴ اینچ < قطر لوله < ۱۰ اینچ
منطقه تحت تأثیر	۱۰۰ میلی‌متر برای قطر لوله > ۱۶ اینچ
	۱۲۰ میلی‌متر برای قطر لوله > ۲۴ اینچ
	۱۴۰ میلی‌متر برای قطر لوله < ۲۴ اینچ

در مطالعه حاضر مبنای مطالعات استاندارد IPS-C-SF-550 و همچنین بهره‌گیری از دستورالعمل GS-EP-SAF-253 شرکت TOTAL می‌باشد. لذا با توجه به سوابق مطالعات به دلیل معرفی بازه‌های نشتی توسط استاندارد IPS-C-SF-550 و همچنین اعلام قطعی سایزهای نشتی توسط دستورالعمل GS-EP-SAF-253 و نزدیک بودن مقادیر این سایزها برای تعیین ناحیه Restricted & Impacted Area جدول ۵ مبنای انتخاب سایز نشتی در مطالعات حاضر می‌باشد.

فرضیات ارزیابی کمی ریسک‌های فرآیندی

سایز نشتی برای سناریوهای مورد نظر جهت انجام ارزیابی ریسک واحدهای فرآیندی بر طبق OGP¹ و DNV Technical Note 14 (Process Equipment Failure Frequencies, 2006) به صورت جدول ۷ در نظر گرفته شد.

جدول ۷. سایزهای نشتی در نظر گرفته شده برای تجهیزات فرآیندی (جهت انجام مطالعات ارزیابی کمی ریسک)

Table 7. Leak Sizes Considered for Process Equipment (for Quantitative Risk Assessment Studies)

دسته بندی سایزهای نشتی	سایز بازه نشتی به میلی متر	سایز نشتی منتخب به میلی متر
کوچک	کوچکتر از ۵۰ میلی متر	۲۵
متوسط	بین ۵۰ و ۱۵۰ میلی متر	۱۰۰
بزرگ	بزرگتر از ۱۵۰ میلی متر	برابر با سایز کل اتصالات

منحنی‌های ریسک فردی و جمعی بر مبنای زیر ارائه خواهد شد:

در مناطقی که تجهیزات فرآیندی در فواصل نزدیک به مناطق مسکونی واقع هستند، منحنی‌های ریسک فردی و ریسک جمعی ارائه گردید.

در مناطقی که تجهیزات فرآیندی در نزدیکی مناطق مسکونی قرار ندارند فقط منحنی‌های ریسک فردی ارائه گردید. علاوه بر فرضیات بالا، فرضیات زیر در بخش تکرارپذیری حوادث و ریسک فردی و جمعی در نظر گرفته شد.

جمعیت مناطق مسکونی (جمعیت مورد بررسی برای مناطق شهری با دانسیته ۰/۰۱ نفر در متر مربع، در مناطق روستایی ۰/۰۵ نفر به ازای متر مربع و در مناطق صنعتی ۰/۰۰۱ نفر در متر مربع در نظر گرفته شده است).

مناطق محتمل برای جرقه با تأخیر، جادها، نواحی صنعتی و مناطق مسکونی می‌باشند. در مناطق شهری و روستایی احتمال حضور افراد درون ساختمان، ۵۰٪ و در مناطق صنعتی ۳۳ درصد در نظر گرفته شده است.

در این مطالعات فرض بر این هست که در محیط صنعتی نفرات کل طول مدت هفته و روزانه ۸ ساعت در واحد صنعتی مشغول کار می‌باشند. فرضیات وجود جرقه به صورت جدول ۸ می‌باشد:

¹ International Association of Oil and Gas Producers

جدول ۸. فرضیات منبع جرقه

Table 8. Ignition Source Assumptions

منبع جرقه	میزان تردد خودروها (تعداد در ساعت)	سرعت متوسط عبور خودروها (کیلومتر در ساعت)
جاده روستایی (فرعی)	۳۶	۳۶
جاده اصلی	۶۰۰	۷۲

نواحی متراکم با وجود موانع با پتانسیل ایجاد موج انفجار

در محدوده مطالعه حاضر یک ناحیه با پتانسیل بروز انفجار ابر بخار شناسایی شده است که بعد از نشتی احتمالی در واحدهای فرآیندی، احتمال به دام افتادن گاز در آن نواحی وجود دارد. جدول ۹ به معرفی این ناحیه پرداخته شده است.

جدول ۹. مشخصات نواحی دارای پتانسیل انفجار ابر گاز

Table 9. Specifications of Areas with Gas Cloud Explosion Potential

منطقه آتش‌سوزی	منطقه شلوغ/متراکم	عرض (متر)	طول (متر)	ارتفاع (متر)	حجم (متر مکعب)	ضریب شدت
FZ-01 (ایستگاه کاهش فشار)	CA01 واحد ایستگاه کاهش فشار	۶	۱۵	۶	۵۴۰	۵/۵



شکل ۱. نمای کلی از ایستگاه تقلیل فشار گاز ورودی به شرکت به عنوان محلی دارای پتانسیل انفجار ابر گاز

Figure 1. Overall View of the Inlet Gas Let-Down Station as a Location with Gas Cloud Explosion Potential

تعیین محدوده آتش

نتایج حاصل از مدل‌سازی انتشار گازهای اشتعال‌پذیر به منظور تعیین محدوده آتش برای تمام سناریوهای معتبر، در جدول ۱۰ آورده شده است.

نتایج مدل‌سازی سناریوهای انفجار در جدول ۱۲ نشان داده شده‌است. طبق بررسی‌های انجام شده در هر ناحیه و استخراج بدترین سناریو و محاسبه حجم مخلوط سوخت و هوا برای سناریوی مد نظر، اینگونه نتیجه‌گیری شده‌است که بدترین سناریو در ناحیه‌های مورد مطالعه می‌تواند نصف فضای متراکم در هر ناحیه را پر کند. حجم فضای متراکم در هر ناحیه بر اساس ارتفاع معادل ناحیه و مساحت ناحیه متراکم محاسبه شده‌است.

جدول ۱۲. فاصله‌های تحت تأثیر ناشی از انفجار ابر گاز با موج انفجار با شدت‌های 170 mbar و 200 mbar

Table 12. Distances Affected by Gas Cloud Explosion with Overpressure Intensities of 170 mbar and 200 mbar

منطقه آتش‌سوزی	سناریو	حجم مخلوط گاز منتشر شده و هوا مرتبط با VCE (متر مکعب) ~ حجم محدود (متر مکعب)	فاصله تا ۱۷۰ میلی‌بار (متر)	فاصله تا ۲۰۰ میلی‌بار (متر)
FZ-01 (ایستگاه کاهش فشار)	CA01 واحد ایستگاه کاهش فشار	۶ متر * ۱۵ متر * ۶ متر = ۵۴۰ متر مکعب شعاع = ۵ متر شدت منبع محدود = ۵/۵	۱۹	۱۵

تعیین مرز سایت

نتایج مدل‌سازی سناریوهای انتشار گازهای سمی در جدول ۱۳ نشان داده شده‌است. طبق بررسی‌های انجام شده در سناریوهای مختلف، عمده سیال سمی شناسایی شده شامل آمونیاک می‌باشد که نتایج پراکنش آن‌ها با معیار LC1 درصد ذکر شده‌است.

جدول ۱۳. فاصله‌های تحت تأثیر ناشی از پراکنش گاز سمی NH3 با معیار LC1%=4767 ppm

Table 13. Distances Affected by NH3 Toxic Gas Dispersion Based on LC1% = 4767 ppm Criterion

سناریو	شرایط	اندازه نشتی (میلی‌متر)	فاصله تا ابر سمی NH3 (LC1% 4767 ppm) (متر)
			دسته آب‌وهوایی
			D/15 D/5 F/2
AKS-02-01	H	۲۰	۱۲۰
	HI		۱۳۶
	H		۱۹۲
	HI		۱۶۳
	H		۱۳۷
	HI		۱۵۳
	H		۱۲۲
	HI		۱۲۸
AKS-04-01	H	۲۰	۱۳۷
	HI		۱۵۳
	H		۱۲۲
	HI		۱۲۸
	H		۱۳۷
	HI		۱۵۳
	H		۱۲۲
	HI		۱۲۸

انتشار گازهای اشتعال‌پذیر^۱

نتایج حاصل از مدل‌سازی انتشار گازهای اشتعال‌پذیر به منظور تعیین مرز سایت برای تمام سناریوهای معتبر در جدول ۱۴ آورده شده‌است.

جدول ۱۴. فاصله‌های تحت تأثیر ۱۰۰ درصد LFL (تعیین مرز سایت)

Table 14. Distances Affected by 100% LFL (Site Boundary Determination)

سناریو	شرایط	اندازه نشتی (میلی‌متر)	فاصله تا ۱۰۰٪ LFL (متر)
			دسته آب‌وهوایی
			D/15 D/5 F/2
AKS-01-01	H	۲۰	۱
	HI		۱۱
AKS-02-01	H		۶
	HI		۱۷
AKS-03-01	H		۱۱
	HI		۴۴
AKS-04-01	H		۱۴
	HI		۶۳
AKS-04-01	H		۷
	HI		۱۱
AKS-04-02	H		۸
	HI		۱۵
AKS-04-02	H		۷
	HI		۹

^۱ Flash Fire

فاصله تا ۱۰۰٪ LFL (متر)			اندازه نشتی (میلی متر)	شرایط	سناریو
دسته آب و هوایی					
D/15	D/5	F/2			
۸	۱۵	۱۸		HI	AKS-05-01
۵	۹	۱۱		H	
۵	۹	۱۱		HI	
®	®	®		H	AKS-06-01
®	®	®	HI		

پیامدهای ناشی از آتش فورانی

نتایج مدل‌سازی سناریوها برای تعیین فواصل تحت تأثیر تشعشع حرارتی 4.7 kW/m^2 حاصل از آتش فورانی جهت تعیین مرز سایت در جدول ۱۵ ارائه شده‌است.

جدول ۱۵. فاصله‌های تحت تأثیر آتش فورانی با میزان تشعشع حرارتی 4.7 KW/m^2 (تعیین مرز سایت)
Table 15. Distances Affected by Jet Fire with Thermal Radiation Level of 4.7 KW/m^2 (Site Boundary Determination)

فاصله تا ۴/۷ کیلووات بر متر مربع (متر)			اندازه نشتی (میلی‌متر)	شرایط	سناریو
دسته آب‌وهوایی					
D/15	D/5	F/2			
۱۲	۱۴	۱۴	۲۰	H	AKS-01-01
۴۵	۵۰	۵۹	۲۰	H	AKS-02-01
۴۵	۴۵	۵۱	۲۰	H	AKS-03-01
۵۱	۵۶	۶۷	۲۰	H	AKS-04-01
۵۱	۵۶	۶۷	۲۰	H	AKS-04-02
۶	۷	۷	۲۰	H	AKS-05-01

انفجار ابر بخار^۱

نتایج مدل‌سازی سناریوهای انفجار در جدول ۱۶ نشان داده شده‌است. طبق بررسی‌های انجام شده در هر ناحیه و استخراج بدترین سناریو و محاسبه حجم مخلوط سوخت و هوا برای سناریوی مد نظر، اینگونه نتیجه‌گیری شده‌است که بدترین سناریو در ناحیه‌های مورد مطالعه می‌تواند تمام فضای متراکم در هر ناحیه را پر کند. حجم فضای متراکم در هر ناحیه بر اساس ارتفاع معادل ناحیه و مساحت ناحیه متراکم محاسبه شده‌است. در این جدول، فواصل تحت تأثیر افزایش فشار بر اساس دستورالعمل GS-EP-SAF-253، 140 mbar برای تعیین مرز سایت ارائه شده‌است. احتمال بروز انفجار در محدوده آتش FZ-01 محتمل می‌باشد.

^۱ Vapour Cloud Explosion (VCE)

جدول ۱۶. فاصله‌های تحت تأثیر ناشی از انفجار ابر گاز با موج انفجار 140 mbar

Table 16. Distances Affected by Gas Cloud Explosion with Overpressure of 140 mbar

فاصله تا ۱۴۰ میلی‌بار (متر)	حجم مخلوط گاز منتشر شده و هوا مرتبط با VCE (متر مکعب) ~ حجم محدود (متر مکعب)	سناریو	منطقه آتش‌سوزی
۳۰	۶ متر * ۱۵ متر * ۶ متر = ۵۴۰ متر مکعب شعاع = ۵ متر شدت منبع محدود = ۵/۵	CA01 واحد ایستگاه کاهش فشار	FZ-01 (ایستگاه کاهش فشار)

تعیین تکرارپذیری بروز نشتی از تجهیزات

تکرارپذیری بروز نشتی در هر یک از سناریوهای مربوطه با بهره‌گیری از معادلات تخمین تکرارپذیری^۱ DNV Technical Note 14 انجام شده و نیز سناریوهای منتخب به همراه تخمین تکرارپذیری آنها در جدول ۱۷ ارائه گردیده‌است. فرکانس خرابی تجهیزات، معمولاً از تجزیه و تحلیل سابقه حوادث ارائه شده توسط OGP است که دارای بانک اطلاعات جامعی از فرکانس خرابی‌ها برای پیش‌بینی فرکانس نشتی با سائز معین از تجهیزات مختلف می‌باشد.

جدول ۱۷. تکرارپذیری بروز نشتی برای هر یک از سناریوها

Table 17. Leak Occurrence Frequencies for Each Scenario

سناریو	شرایط نشتی	فراوانی شکست (سال ^{-۱})
AKS-01-01	نشتی کوچک	9/97E-3
	پارگی کامل	4/23E-5
AKS-02-01	نشتی کوچک	6/42E-3
	پارگی کامل	4/23E-5
AKS-03-01	نشتی کوچک	2/18E-3
	پارگی کامل	3/86E-5
AKS-04-01	نشتی کوچک	1/01E-2
	پارگی کامل	3/86E-5
AKS-04-02	نشتی کوچک	1/01E-2
	پارگی کامل	3/86E-5
AKS-05-01	نشتی کوچک	1/01E-2
	پارگی کامل	3/86E-5
AKS-06-01	نشتی کوچک	1/01E-2
	پارگی کامل	3/86E-5

نتایج آنالیز ریسک

ریسک فردی

نمودار ریسک فردی نشان دهنده ترازهای مختلف ریسک می‌باشد که به یک فرد وارد می‌شود. ناحیه بین ترازهای 10^{-4} بر سال (منحنی داخلی) تا 10^{-6} بر سال (منحنی خارجی) ناحیه ALARP بوده و نواحی خارج از تراز 10^{-6} بر سال ناحیه قابل قبول از نظر ریسک می‌باشد و حریم ایمن شرکت، جهت احداث مناطق مسکونی می‌باشد. فعالیت در داخل ناحیه با ریسک 10^{-4} بر سال، خطرناک محسوب می‌گردد.

ناحیه بین ترازهای 10^{-4} تا 10^{-6} بر سال، ریسک قابل تحمل را داشته و چنانچه کاهش ریسک مقرون به صرف نباشد، مورد پذیرش است (شکل ۲).

¹ Process Equipment Failure Frequencies



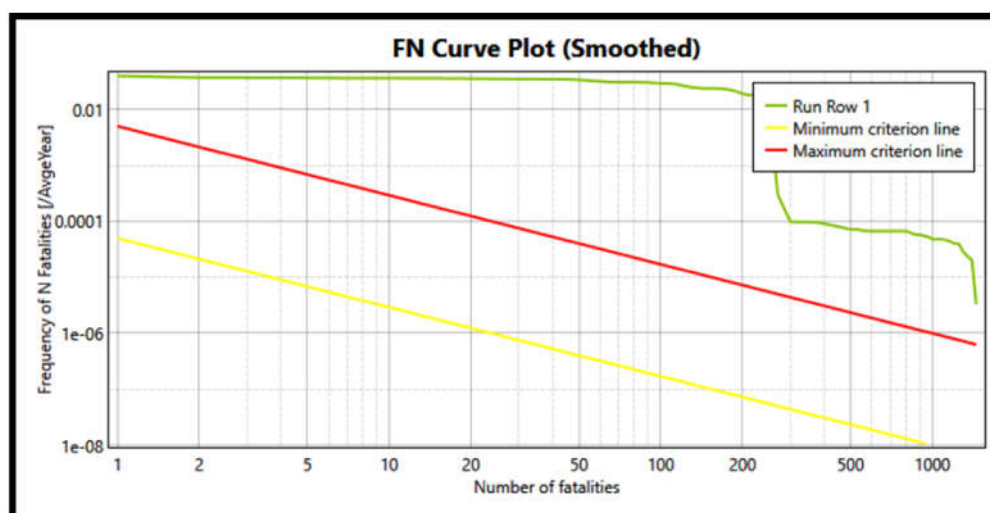
شکل ۲. نمودار ریسک فردی شرکت
Figure 2. Individual Risk Contour of the Plant

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌کنید، ریسک 10^{-4} برسال در محدوده داخل واحد فرآیندی و همچنین نواحی جنوب شرقی بیرون از واحد صنعتی (به اندازه ۲۶۰ متر) و از قسمت جنوب غربی بیرون از واحد صنعتی (به اندازه ۱۰۰ متر) را تحت پوشش قرار می‌دهد، لازم است از محل درآمد شرکت نسبت به برطرف نمودن مشکلات ایمنی این واحد صنعتی، تمهیدات مناسب و استاندارد اندیشیده شود. لازم به توضیح است تا فاصله حدود ۳۳۸ متر از جانب شمال شرق فنس سایت، ۶۰۰ متر از جانب جنوب شرق فنس سایت، ۳۳۰ متر از جانب جنوب غرب فنس سایت و ۶۸ متر از جانب شمال غرب مرز واحد فرآیندی بعنوان ناحیه ALARP ریسک فردی می‌باشد (شکل ۲) که بهتر است ساخت و ساز در این ناحیه محدود گردد.

شمال شرق فنس سایت، ۶۰۰ متر از جانب جنوب شرق فنس سایت، ۳۳۰ متر از جانب جنوب غرب فنس سایت و ۶۸ متر از جانب شمال غرب مرز واحد فرآیندی بعنوان ناحیه ALARP ریسک فردی می‌باشد (شکل ۲) که بهتر است ساخت و ساز در این ناحیه محدود گردد.

ریسک جمعی

با توجه به نمودار مربوط به شکل ۳ ارزیابی ریسک جمعی فعالیت شرکت، نشان می‌دهد که این واحد از منظر ریسک جمعی، محدوده مسکونی پیرامون خود را در ناحیه High Risk قرار می‌دهد و با توجه به عدم رعایت حریم ایمن این واحد، پیشنهادهایی از جنس انجام بازرسی، تست، تعمیرات و نگهداری واحد فرآیندی با دقت، نظم و حساسیت بیشتری صورت پذیرد تا حداقل امکان از بروز حوادث ناشی، پیش‌گیری صورت پذیرد، مخصوصاً ناشی در مخازن نگهداری آمونیاک و هیدروژن بیشتر خطر ساز خواهند بود.



شکل ۳. نمودار ریسک جمعی حاصل از فعالیت شرکت
Figure 3. Societal Risk Curve Resulting from Plant Operations

یافته‌ها و بحث

خلاصه جمع‌بندی حاصل از مطالعات آنالیز پیامد حوادث فرآیندی و ارزیابی کمی ریسک‌های فرآیندی شرکت به این صورت است که سناریوهای محتمل با توجه به برداشت اطلاعات میدانی انتخاب گردید، مدل‌سازی پیامد حوادث فرآیندی با کمک نرم‌افزار PHAST و ارزیابی کمی ریسک با نرم‌افزار SAFETI اجرا و اعمال محدوده‌های تحت تأثیر حوادث محتمل بر نقشه‌های ماهواره‌ای جهت تعیین محدوده Layout Impacted Area, Restricted Area, Fire Zone عنوان گردیده‌اند. همچنین نتایج مربوط به ریسک فردی و ریسک جمعی در متن این نتیجه‌گیری عنوان گردیده‌اند. نتایج سناریوهای محتمل بصورت سناریوهای غالب حاصل از مدل‌سازی پیامد حوادث فرآیندی برای همه محدوده‌های آتش تعیین شده، جهت تعیین محدوده Layout Impacted Area, Restricted Area, Fire Zone بطور خلاصه شده به شرح جدول ۱۸ الی ۲۰ نمایش داده شده‌است.

جدول ۱۸. نتایج حاصل از سناریوهای غالب جهت تعیین محدوده آتش اطراف ناحیه صنعتی

Table 18. Results of Dominant Scenarios for Determining Fire Zone Around the Industrial Area

LFL 100% (متر)	تأثیر VCE (متر)		تأثیر آتش استخری (KW/m2) (متر)	تأثیر آتش فورانی (KW/m2) (متر)	نام سناریو	منطقه آتش‌سوزی
	۲۰۰ میلی‌بار	۱۷۰ میلی‌بار				
۱۷	®	®	®	۵۴	AKS-02-01	FZ-02 (مخزن آمونیاک)
۶۳	®	®	®	۴۳	AKS-03-01	FZ-03 (مخزن LPG)
۱۸	®	®	®	۶۰	AKS-04-01	FZ-04 (انبار آمونیاک آنیل)
					AKS-04-02	
۱۱	®	®	®	۶	AKS-05-01	FZ-05 (انبار H2)
	®	®	®	®	AKS-06-01	FZ-06 (مخازن ذخیره اسید)

جدول ۱۹. نتایج حاصل از سناریوهای غالب جهت تعیین مرز ناحیه صنعتی

Table 19. Results of Dominant Scenarios for Determining the Boundary of the Industrial Area

منطقه آتش‌سوزی	نام سناریو	سمی (LC1%)(متر)	تأثیر آتش فورانی (۴/۷) (KW/m2) (متر)	تأثیر آتش استخری (۴/۷) (KW/m2) (متر)	تأثیر VCE (متر) ۱۴۰ میلی‌بار	LFL 100% (متر)
FZ-01 (ایستگاه کاهش فشار)	AKS-01-01	®	۱۴	®	۳۰	۱۱
FZ-02 (مخزن آمونیاک)	AKS-02-01	۱۹۲	۵۹	®	®	۱۷
FZ-03 (مخزن LPG)	AKS-03-01	®	۵۱	®	®	۶۳
FZ-04 (انبار آمونیاک آنیل)	AKS-04-01	۲۱۸	۶۷	®	®	۱۸
	AKS-04-02					
FZ-05 (انبار H2)	AKS-05-01	®	۷	®	®	۱۱
FZ-06 (مخازن ذخیره اسید)	AKS-06-01	®	®	®	®	®

جدول ۲۰. نتایج حاصل از سناریوهای غالب جهت تعیین حریم ایمن ناحیه صنعتی

Table 20. Results of Dominant Scenarios for Determining the Safety Buffer Zone of the Industrial Area

منطقه آتش‌سوزی	نام سناریو	سمی (IDLH) (متر)	تأثیر آتش فورانی (۳/۲) کیلووات بر متر مربع (متر)	تأثیر آتش استخری (۳/۲) کیلووات بر متر مربع (متر)	تأثیر VCE (متر) ۵۰ میلی‌بار
FZ-01 (ایستگاه کاهش فشار)	AKS-01-01	®	۱۵	®	۸۷
FZ-02 (مخزن آمونیاک)	AKS-02-01	۱۵۲۸	۶۴	®	®
FZ-03 (مخزن LPG)	AKS-03-01	®	۵۶	®	®
FZ-04 (انبار آمونیاک آنیل)	AKS-04-01	۱۸۵۲	۷۲	®	®
	AKS-04-02				
FZ-05 (انبار H2)	AKS-05-01	®	۷	®	®
FZ-06 (مخازن ذخیره اسید)	AKS-06-01	®	®	®	®

نتیجه‌گیری

سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-01 (Let Down Station) طبق جدول ۲۰، انفجار ابر گاز می‌باشد. این محدوده آتش از لحاظ اثرگذاری به سایر محدوده آتش‌ها، در ناحیه ایمن و استاندارد قرار گرفته است. باید به نتایج حاصل از این مطالعات در طرح‌های توسعه‌ی آتی شرکت توجه نمود.

سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-02 (Ammonia Vessel) که شامل دو مخزن آمونیاک می‌باشد، این محدوده آتش از لحاظ اثرگذاری اثر مخرب بر مخزن N2 خواهد داشت. برای بحث مربوط به تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-02 (Ammonia Vessels)، باید توجه داشت مخزن نیتروژن تحت تاثیر تشعشع حرارتی ناشی از آتش فورانی مخزن آمونیاک قرار می‌گیرد و لازم است برای پیش‌گیری از این حادثه، بازنگری در جانمایی این مخازن، احداث دیواره مقاوم در برابر آتش و سیستم F&G مناسب برای محوطه‌ی مخازن نیتروژن نصب گردد و همچنین در طرح‌های توسعه‌ی شرکت به نواحی تحت تاثیر این محدوده آتش توجه گردد.

سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-03 (LPG Vessel) آتش ناگهانی می‌باشد که اثر مخرب آن ایستگاه گاز کرومات، ناحیه پاتیل مذاب، ایستگاه گاز کوره، ساختمان HNX، مخزن آمونیاک و مخزن نیتروژن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. لازم است برای پیش‌گیری از این حادثه، بازنگری در جانمایی این مخزن و نصب سیستم F&G مناسب برای محوطه‌ی مخزن LPG در نظر گرفت و همچنین در طرح‌های توسعه‌ی شرکت به نواحی تحت تاثیر این محدوده آتش توجه گردد.

سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-04 (Anil Ammonia Storage) آتش فورانی می‌باشد. این محدوده آتش از لحاظ اثرگذاری اثر مخرب بر ساختمان سمت شمالی خود دارد. لازم است برای فایزون مورد نظر، ضمن تقویت لایه‌های حفاظتی به سیستم بازرسی مبتنی بر ریسک نیز پرداخته شود تا از نشتی‌ها پیش‌گیری لازم صورت پذیرد.

سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه FZ-05 (H2 Storage)، آتش فورانی می‌باشد که با توجه به تصویر موجود در پیوست ۱، این محدوده آتش از لحاظ اثرگذاری به سایر محدوده آتش‌ها، در ناحیه ایمن و استاندارد قرار گرفته است. باید به نتایج حاصل از این مطالعات در طرح‌های توسعه‌ی آتی شرکت توجه نمود. البته بحث انفجار فیزیکی مربوط به مخزن هیدروژن که احتمال خطر پرتاب ترکش وجود دارد، می‌شود این مخزن را با دیواره‌های مقاوم در برابر انفجار احاطه گردد. باید توجه داشت طبق تصویر موجود در پیوست ۱، طرح‌های توسعه‌ی شرکت به گونه‌ای باشد که اثرپذیر از این ناحیه نبوده و نیز اثر مخرب بر این ناحیه نداشته باشد. سناریوی غالب برای تعیین محدوده آتش ناحیه-FZ-06 (Acid Storage Tanks)، به دلیل آتش‌گیر و قابل انفجار بودن، قابل چشم‌پوشی است.

با توجه به موجود بودن مخازن آمونیاک در شرکت، اکثر ساختمان‌های این شرکت در معرض غلظت آسیب‌رسان این ماده سمی قرار می‌گیرند. همچنین به دلیل حادث شدن سناریوی نشتی در مخزن آمونیاک موجود در روبروی واحد آنیل، میزان غلظت آسیب‌رسان این گاز سمی تا ناحیه ۱۹۰ متری بیرون فانس سایت صنعتی گسترش پیدا می‌کند. لازم است ضمن تقویت لایه‌های حفاظت ایمنی، مرز شرکت از ناحیه جنوب شرقی، به میزان ۱۹۰ متر گسترش یابد.

جهت پیش‌گیری و پاسخ مناسب به حوادث فرآیندی و افزایش قابلیت اطمینان از طریق انجام پروژه و اجرای پیشنهادات حاصل از پروژه‌های، HAZID، HAZOP، LOPA، RAM Study، SIL Assignment، SIL Verification، استقرار سیستم مدیریت ایمنی فرآیند^۱ و چرخه عمر سیستم‌های ایمنی و ارتقاء ایمنی بهره‌برداری واحدهای فرآیندی (آموزش، بازرسی، استقرار بازرسی مبتنی بر ریسک، تعمیرات و نگهداری)، تمهیدات مناسب اندیشیده شود.

^۱ PSM

محدوده مرز سایت^۱ ناحیه‌ای از اطراف واحد فرآیندی می‌باشد که این ناحیه تحت کنترل شرکت و مالک آن خود شرکت می‌باشد لذا این ناحیه با فنس‌کشی مرزبندی می‌گردد. برای احداث سایر واحدهای صنعتی که مالک آن خود شرکت می‌باشد با رعایت ملاحظات ایمنی محدودیتی وجود نخواهد داشت اما برای احداث سایر واحدهای صنعتی در محدوده‌ی مرز سایت که مالک آن شرکتی دیگر باشد، ممنوعیت وجود دارد. طبق برآوردهای اولیه این گزارش، محدود مذکور به خارج از فنس کشیده شده است؛ در خصوص محدوده مذکور نیاز است تصمیم مدیریتی اتخاذ گردد البته لازم به توضیح است با رعایت و تقویت لایه‌های حفاظتی ایمنی می‌شود مکان پروژه را در وضعیت کنونی حفظ نمود. طبق TOTAL GS 021 لازم است ساختمان‌های شرکت خارج از محدوده Restricted Area قرار گیرد، در حال حاضر و بر اساس خروجی این گزارش، این موضوع رعایت نگردیده است (Esmacili et al., 2024). با توجه به ارزیابی پیامد در مطالعات آتی تاثیر تمام لایه‌های حفاظتی مستقل^۲ مانند دیواره‌های آتش و پرده‌های آب نصب شده در منابع فرآیندی تمرکز خواهند کرد که خطر اجتماعی و فردی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند (Adib, 2024).

References

- Adib, M. (2024). Determining the safe distance of CGS (city gas station) and TBS (town boarder station) pressure reduction stations using PHAST software Tabriz University of Medical Sciences, School of Health]. <https://www.elmnet.ir/doc/20768745-40256> [In Persian]
- Bagheri, A., & Habibi, E. (2025). Modeling the Consequences of Fire and Leakage of Toxic Substances of Methylmethanolamine Tank with PHAST Software (A Case Study in Phase 14 of the South Pars Refinery, Iran) [Research]. *Journal of Health System Research*, 20(4), 382-389. <https://doi.org/10.48305/jhsr.v20i4.1567> [In Persian]
- Baird, A. (2024a). Urban Residential Construction and Steel Demand in China. *Bulletin, Reserve Bank of Australia*.
- Baird, A. (2024b). Urban Residential Construction and Steel Demand in China| *Bulletin*–April 2024.
- Chen, J., Ji, J., Guo, X., & Ding, L. (2022). An Improved Approach for Spatial and Temporal Individual Risk Assessment Considering Synergistic Effects of Multiple Fires Occurred Sequentially. *Fire Technology*, 58. <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01236-z>
- Esmacili, S. V., Esmacili, R., Mohsenian, A., & Alboghobeish, A. (2024). Consequence Analysis and Safety Assessment of an Ethylene Oxide Unit in a Petrochemical Complex. *International Journal of Environmental Health Engineering*, 13(6), 23. https://doi.org/10.4103/ijehe.ijehe_7_24 [In Persian]
- Gao, F., & Zhou, D. (2025). A novel decision-making approach for risk assessment of converter steelmaking process based on fuzzy Dematel method. *Alexandria Engineering Journal*, 115, 222-237. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.025>
- Jafari, B. (2021). Risk Assessment by Job Safety Analysis and William Fine Method and Comparison with Workers' Risk Perception Results. *Archives of Occupational Health*, 5(4), 1109-1117. <https://doi.org/10.18502/aoh.v5i4.7972> [In Persian]
- JAFARI, M., DAVAZDAH EMAMI, S., & VELAYATZADEH, M. (2022). Consequences of fire and explosion in distillation unit of Persian Gulf star gas condensate refinery using PHAST software. *Occupational Hygiene and Health Promotion Journal*, 6(1), 13-28. https://ohhp.ssu.ac.ir/browse.php?a_id=382&sid=1&slc_lang=fa&html=1 [In Persian]
- Joz, S., & Majd, N. M. (2014). Health, safety, and environmental risk assessment of steel production complex in central Iran using TOPSIS. *Environmental monitoring and assessment*, 186(10), 6969-6983. [In Persian] <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3903-6>
- Kakavandi, M. G., Rajati, F., Ashtarian, H., & Hosseini, S. Y. Risk assessment of Kermanshah gas storage tanks by energy trace and barrier analysis (2014). *Journal of Inflammatory Diseases*, 20(20), 59-52. e155992. [In Persian]

¹ Restricted Area

² IPL

- Khodadadi-Mousiri, A., Yaghoot-Nezhada, A., Sadeghi Yarandi, M., & Soltanzadeh, A. (2023). Consequence modeling and root cause analysis (RCA) of the real explosion of a methane pressure vessel in a gas refinery. *Heliyon*, 9, e14628. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14628> [In Persian]
- Kwak, H., Kim, M., Min, M., Park, B., & Jung, S. (2024). Assessing the quantitative risk of urban hydrogen refueling station in Seoul, South Korea, using SAFETI model. *Energies*, 17(4), 867. <https://doi.org/10.3390/en17040867>
- Lisbona, D., McGillivray, A., Saw, J. L., Gant, S., Bilio, M., & Wardman, M. (2014). Risk assessment methodology for high-pressure CO₂ pipelines incorporating topography. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(1), 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2013.07.012>
- Marx, J. D., & Cornwell, J. B. (2009). The importance of weather variations in a quantitative risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(6), 803-808. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.08.009>
- Nazaripour, E., Halvani, G., Jahangiri, M., Fallahzadeh, H., & Mohammadzadeh, M. (2018). Safety performance evaluation in a steel industry: A short-term time series approach. *Safety science*, 110, 285-290. [In Persian] <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.08.028>
- Nazemi, A., Zare, S., & Baniasadi Zare, M. (2025). Modeling the consequences of benzene leakage from tanks using PHAST software in a process industry. *Health and Development Journal*, 14(1), 1-8. <https://doi.org/10.34172/jhad.1167> [In Persian]
- Nivolianitou, Z. S., Synodinou, B. M., & Aneziris, O. N. (2004). Important meteorological data for use in risk assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 17(6), 419-429. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2004.08.00>
- Padash, A., Fattahi, R., & Vahidi, H. (2024). A novel hybrid risk assessment approach under fuzzy environment in steel industry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108655. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108655> [In Persian]
- Pandey, S., Singh, A. K., Parhi, S., & Jha, S. K. (2025). Towards safer steel operations with a multi model framework for accident prediction and risk assessment simulation. *Scientific Reports*, 15(1), 13293. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96028-0>
- Parpinchi, S., Najafi, A., & Mohammadi, N. (2025). Identification and Prioritization of Critical Supply Chain Risks in the Steel Industry under Conditions of Uncertainty. *Journal of Operational Research in its Applications*, 22(3). https://jorar.lahijan.iau.ir/article_716911.html [In Persian]
- Pittiglio, P., Bragatto, P., & Delle Site, C. (2014). Updated failure rates and risk management in process industries. *Energy procedia*, 45, 1364-1371. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.143>
- Rigaud, M., Buekers, J., Bessems, J., Basagaña, X., Mathy, S., Nieuwenhuijsen, M., & Slama, R. (2024). The methodology of quantitative risk assessment studies. *Environmental Health*, 23(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s12940-023-01039-x>
- Schmitz, P., Reniers, G., & Swuste, P. (2021). Determining a realistic ranking of the most dangerous process equipment of the ammonia production process: A practical approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 70, 104395. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104395>
- Soltanzadeh, A., Zarei, E., Mahdinia, M., Hosseinzadeh, K., & Sadeghi-Yarandi, M. (2025). Introducing FMEA plus method for comprehensive safety risk assessment in the steel industry. *Plos one*, 20(10), e0331748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0331748> [In Persian]
- Song, Y., Chen, Z., Zhang, S., Wang, J., Li, C., Li, X., Yuan, J., & Zhang, X. (2020). Comprehensive evaluation system of occupational hazard prevention and control in iron and steel enterprises based on a modified Delphi technique. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(2), 667. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020667>
- Taheri, A., Beryani, A. A., Motavassel, M., & Nassab, E. A. (2025). Integrated quantitative explosion risk assessment and safety zone delineation applied in a pressure vessel adopting PHAST numerical simulation approach: an Iranian case analysis. *Results in Engineering*, 26, 105581. [In Persian] <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105581>
- Teng, L., Wang, K., Liu, B., Li, W., Yin, P., Li, Z., Huang, X., Luo, Y., & Jiang, L. (2025). The consequence distance of liquid ammonia release from a pipeline in complex terrain. *Process Safety and Environmental Protection*, 196, 106921. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106921>

- Witlox, H. (2010). OVERVIEW OF CONSEQUENCE MODELLING IN THE HAZARD ASSESSMENT PACKAGE PHAST. <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/163731.pdf>
- Zahmatkesh, F., Kiani Sadr, Maryam, Cheraghi, Mehrdad. (2022). Environmental risk assessment of steel plant using ANP and TOPSIS methods (Case study: Hamadan Wian Steel Plant). Journal of Environmental Science and Technology, 24(3), 157-169. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jest.2018.21029.3007>