

Research Paper

Bow-tie Risk Assessment of Hydrogen Gas Leakage From the Chlorination Unit of a Combined-cycle Power Plant



Iraj Mohammadfam¹ , *Tahereh Eskandari² 

1. Department of Ergonomics, Health in Emergency and Disaster Research Center, University of Social Welfare and Rehabilitation Sciences, Tehran, Iran.

2. Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.



Citation Mohammadfam, I., & Eskandari, T. (2025). [Bow-tie Risk Assessment of Hydrogen Gas Leakage From the Chlorination Unit of a Combined-cycle Power Plant (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(2):230-241. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.2.811.1>

doi <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.2.811.1>

ABSTRACT

Background and objective The combined-cycle power plants are one of the important types of power plants in the world with high occupational accidents. To reduce the costs for occupational accidents and reduce the lost days, finding the root causes of accidents in these industries is necessary. This study aims to assess the risk of hydrogen gas leakage from the chlorination unit of a combined-cycle power plant with once-through cooling system using the Bow-tie risk assessment method.

Method At first, the hydrogen gas leakage from the chlorination unit of a combined-cycle power plant in Iran was selected as the scenario for probabilistic risk assessment. For finding the causes and consequences of the scenario, the bow-tie method was used.

Results We identified 44 basic events, three safety barriers that prevent the occurrence of the desired scenario (congestion, immediate ignition, and delayed ignition), and six consequences including flash fire, jet fire, fire ball, pool fire, explosion, and safe release of hydrogen gas. The probability of hydrogen leakage from the chlorination unit was 1.51×10^{-10} , and the most likely consequence was "explosion/jet fire/flash fire," with a probability of $4.89 \times 10^{-2}\%$.

Conclusion We identified the causes, safety barriers, and potential consequences of hydrogen gas leakage from the chlorination unit of a combined-cycle power plant. The malfunction of electrolyzers is the most significant cause and explosion/jet fire/flash fire is the most important consequence of hydrogen leakage.

Keywords Combined-cycle power plant, Hydrogen gas, Risk assessment, Bow-tie technique, Chlorination unit, Safety system, Gas leakage

Article Info:

Received: 07 Dec 2024

Accepted: 01 Mar 2025

Available Online: 01 Jul 2025

* Corresponding Author:

Tahereh Eskandari

Address: Department of Occupational Health Engineering, School of Public Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Tel: +98 (991) 0714120

E-mail: t.eskandari304@gmail.com



Copyright © 2025 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

Extended Abstract

Introduction

Combined-cycle power plants are one of the most important and efficient types of power plants worldwide, where exhaust gases from gas turbines are utilized for generating steam and additional energy. However, the presence of chemicals such as chlorine and flammable gases like hydrogen in various processes of these plants poses specific risks. Chlorination units, which are used to prevent scaling and microbial growth in cooling systems, are critical safety points due to the production of hydrogen gas, which is highly flammable and explosive. This study aims to identify and analyze the risks of hydrogen gas leakage from the chlorination unit of a combined-cycle power plant with once-through cooling system in Iran using the bow-tie risk assessment method. This method was selected due to its ability to simulate causes and consequences of industrial accidents, especially in complex processes like chlorination, where multiple factors interact with each other. It was used in this study to identify root causes, analyze the probability of hazardous events, and predict potential outcomes.

Methods

In this research, the scenario of hydrogen gas leakage from the chlorination unit was first selected. To simulate and analyze the probable cause-effect relationships of this scenario, the bow-tie technique was employed. This technique, which combines fault tree analysis (FTA) and event tree analysis (ETA), provides a graphical representation of causes and consequences of incidents. Initially, the causes and intermediate events leading to hydrogen leakage were identified, and then effective safety barriers to prevent the incident were simulated. Finally, the potential consequences of the scenario were examined.

Results

The results showed that hydrogen leakage from the chlorination unit occurs due to failures in three main systems: The chlorine storage tank, rectifier, and electrolyzers. A total of 44 root causes and 20 intermediate causes were identified that could lead to hydrogen leakage. Also, three effective safety barriers were identified: Congestion, immediate ignition, and delayed ignition. These safety barriers play a crucial role in preventing the leakage, and their success or failure can lead to different consequences such as flash fires, jet fires, pool fire, fire ball, explosion, or safe release of hydrogen gas. Quantitative analysis of this scenario indicated that the probability of hydrogen leakage from the chlorina-

tion unit was $1.51 \times 10^{-1}\%$, and the most likely consequence, "explosion/flash fire/jet fire," was identified with a probability of $4.89 \times 10^{-20}\%$.

Conclusion

The analysis using the Bow-tie method showed that the probability of hydrogen leakage from the chlorination unit increases significantly if safety systems fail. Furthermore, since the failure of electrolyzers was identified as the primary cause of this incident, it seems that this part of the system requires greater attention and improvements in safety and monitoring. Strengthening safety barriers can significantly reduce the risks associated with hydrogen gas leakage. The findings also indicate that the likelihood of consequences such as explosions and flash fires is very high if safety barriers do not function correctly. Therefore, measures to strengthen these barriers and reduce the likelihood of incidents are essential.

This study demonstrates that the bow-tie technique can be an effective tool for analyzing and assessing risks in complex systems such as the chlorination unit of combined-cycle power plants. The model is particularly useful in cases where factors such as sensitive equipment and environmental hazards interact with each other. This research can help power plants and similar industries and be a basis for future studies in industrial accident risk management of power plants.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

This research was conducted in compliance with all ethical principles. Since there was no experiment on human or animal samples, the need for an ethical code was waived.

Funding

This research did not receive any grant from funding agencies in the public, commercial, or non-profit sectors.

Authors' contributions

All authors contributed equally to the conception and design of the study, data collection and analysis, interpretation of the results, and drafting of the manuscript. Each author approved the final version of the manuscript for submission.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

This Page Intentionally Left Blank



مقاله پژوهشی

ارائه مدل ارزیابی و تحلیل ریسک دینامیک نشت گاز هیدروژن در یک واحد کلرزنی
نیروگاه سیکل ترکیبی با استفاده از تکنیک پاپیونیایرج محمدفام^۱، طاهره اسکندری^۲

۱. گروه ارگونومی، مرکز تحقیقات سلامت در حوادث و بلایا، دانشگاه علوم توانبخشی و سلامت اجتماعی، تهران، ایران.
 ۲. گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

Use your device to scan
and read the article online

Citation Mohammadfam, I., & Eskandari, T. (2025). [Bow-tie Risk Assessment of Hydrogen Gas Leakage From the Chlorination Unit of a Combined-cycle Power Plant (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(2):230-241. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.2.811.1>

doi <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.2.811.1>

حکیده

زمینه و هدف نیروگاه از نقطه نظر بروز حوادث شغلی از کانونهای فوق العاده حساس در جهان به شمار می‌رود. باتوجه به موقعیت حساس نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، جهت حفظ نیروی انسانی، کاهش هزینه‌های پرداختی بابت حوادث شغلی و کاهش روزهای تلف شده می‌بایست ریشه‌یابی اصولی حوادث در این صنایع مورد تحقیق، پژوهش و بررسی روزافزون قرار گیرد.

روش در ابتدا نشت گاز هیدروژن از واحد کلرزنی به عنوان سناریوی مورد مطالعه جهت ارزیابی ریسک احتمالی انتخاب شد. برای آنالیز علت - پیامد سناریوی مورد نظر از تکنیک پاپیونی (Bow-tie) استفاده شد. Bow-tie یک روش گرافیکی برای نشان دادن سناریوی کامل حادثه است که از علل حادثه شروع و با عواقب آن پایان می‌یابد.

یافته‌ها تحلیل نشت گاز هیدروژن از واحد کلرزنی با استفاده از تکنیک Bow-tie، ۴۴ علت پایه‌ای را شناسایی کرد. همچنین ۳ مانع ایمنی در پیشگیری از وقوع سناریوی مورد نظر شناسایی شد که موفقیت و شکست این موانع ایمنی منجر به تعیین ۶ پیامد نهایی شد.

نتیجه‌گیری تجزیه و تحلیل علت - پیامد سناریوی با استفاده از دیگرام Bow-tie، رویدادهای پایه‌ای، رویدادهای میانی، موانع ایمنی و شناسایی پیامدهای احتمالی ناشی از نشت هیدروژن از واحد کلرزنی انجام شد. براساس تحلیل تکنیک BT، نقص عملکرد الکترولایزرها به عنوان مهم‌ترین عامل و انفجار / آتش فورانی / آتش ناگهانی به عنوان مهم‌ترین پیامد در وقوع نشت هیدروژن از واحد کلرزنی شناخته شدند.

کلیدواژه‌ها تحلیل ریسک، تکنیک پاپیونی، گاز هیدروژن، نیروگاه

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۷ آذر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۱ اسفند ۱۴۰۳

تاریخ انتشار: ۱۰ تیر ۱۴۰۴

* نویسنده مسئول:

طاهره اسکندری

نشانی: تهران، دانشگاه علوم پزشکی ایران، دانشکده بهداشت، گروه بهداشت حرفه‌ای.

تلفن: ۰۲۱۴۱۲۰۷۱۴۱۲ (۹۹۱) +۹۸

پست الکترونیکی: T.eskandari304@gmail.com



Copyright © 2025 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.



مقدمه

کیلوژول بر مول است. در صورت ترکیب هیدروژن با هوا، ممکن است در اثر یک جرقه کوچک، مقدار اندکی گرما و یا نور خورشید انفجار رخ دهد. حوادث مربوط به گاز هیدروژن در صنعت به علت خصوصیات ویژه آن (قابلیت اشتعال بالا، انفجار و پراکندگی) متفاوت از سایر حوادث صنعتی است. برای مثال انفجار هیدروژن در پاسانادا^۵ آمریکا (سال ۱۹۹۲) منجر به کشته شدن ۲۳ نفر و زخمی شدن ۳۱۶ نفر شد. انفجار بر اثر نشت گاز هیدروژن در یک نیروگاه در هنگ کنگ (سال ۱۹۹۹) باعث مرگ ۲ نفر و مجروح شدن ۱۹ نفر شد. در همان سال آتش سوزی و انفجار هیدروژن در نیروگاهی در فلوریدا منجر به مرگ ۳ نفر و زخمی شدن ۵۰ نفر شد (باند و رید، ۲۰۲۰).

نیروگاه از نقطه نظر بروز حوادث شغلی از کانون های فوق العاده حساس در جهان به شمار می رود (فرشادمنش و همکاران، ۲۰۲۴). بنابراین باتوجه به موقعیت حساس نیروگاه های سیکل ترکیبی، جهت حفظ نیروی انسانی، کاهش هزینه های پرداختی بابت حوادث شغلی و کاهش روزهای تلف شده می بایست ریشه یابی اصولی حوادث در این صنایع مورد تحقیق، پژوهش و بررسی روزافزون قرار گیرد (روبین و ژای، ۲۰۱۲؛ لعل و همکاران، ۲۰۱۹). ارزیابی ریسک یکی از مهم ترین روش های کنترل هدفمند خطرات در صنعت است. همچنین مدیریت ریسک از مهم ترین ابزارهای تعیین استراتژی های کنترل است که باید در سطوح مختلف و ابعاد مختلف یک فرایند کاری بررسی شود (شیرالی و همکاران، ۲۰۱۳). از روش های مورد استفاده در ارزیابی ریسک، روش ارزیابی ریسک Bow-tie است که یک روش احتمالاتی یکپارچه در مدیریت ریسک است که با یافتن علل بنیادین بروز یک حادثه و روابط منطقی حاکم بر آن ها، به تجزیه و تحلیل پیامدهای آن و ارزیابی احتمالات و مسیر رخداد سناریوهای مختلف جهت جلوگیری، کنترل و کاهش رویدادهای ناخواسته می پردازد (حیرانی و بقائی، ۲۰۱۶).

مارکوفسکی و کوتینیا در سال ۲۰۱۲، مطالعه ای با عنوان «کاربرد مدل Bow-tie در آنالیز لایه های حفاظتی» به این نتیجه رسیدند که در میان مدل های کیفی مختلفی که برای ارائه سناریوی حادثه استفاده می شود، رویکرد Bow-tie بهترین نمایش تصویری روابط بین خطرات مختلف (علل، حوادث، سیستم های ایمنی و پیامدهای آن به شمار می رود. این مدل می تواند مجموعه ای کامل از رویدادهای مسیر را معرفی کند که می تواند برای همه سناریوهای احتمالی مورد استفاده قرار گیرد (مارکوفسکی و کوتینیا، ۲۰۱۱).

در مطالعه انجام شده توسط امیرحسین تکیه و همکاران، تحت عنوان «کاربرد تکنیک Bow-tie در آنالیز حادثه واحد SRP پالایشگاه شهید تندگویان تهران (سال ۱۳۹۰)» یکی از حوادث

نیروگاه ها شامل مجموعه ای از ماشین آلات و دستگاه ها هستند که برای تبدیل انرژی نهفته برخی از مواد قابل احتراق یا انرژی پتانسیل جریان آب به انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرند (آزاده و همکاران، ۲۰۰۷؛ فرشادمنش و همکاران، ۲۰۲۴). انواع نیروگاه ها شامل نیروگاه حرارتی (نیروگاه های هسته ای، بخاری، گازی، سیکل ترکیبی و دیزلی)، نیروگاه برقابی، نیروگاه بخار، نیروگاه گازی و نیروگاه های با انرژی تجدیدپذیر هستند (هرینچنکو و همکاران، ۲۰۲۳). نیروگاه سیکل ترکیبی پربازده ترین نوع نیروگاه در بین تمامی نیروگاه ها است. در چنین نیروگاه هایی انرژی حرارتی ناشی از گازهای خروجی توربین گاز به یک بویلر باز یافت با چرخه آب / بخار رفته و با چرخش پره های توربین سبب تولید برق می شود (کومار و همکاران، ۲۰۲۰). از آنجایی که یک نیروگاه سیکل ترکیبی دارای توربین بخار و کندانسور است، وجود سیستم خنک کننده در این نیروگاه لازم و ضروری است. باتوجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی این نیروگاه ها نوع سیستم خنک کننده کندانسور می تواند یکی از سیستم های برج خشک^۱، سیستم خنک کننده هوای کندانسور^۲ و یا سیستم یک بار - گذر^۳ باشد. سیستم یک بار - گذر برای نیروگاه های واقع در کنار دریا و یا رودخانه مناسب است (لین و همکاران، ۲۰۲۴).

به طور معمول نیروگاه های واقع در مجاورت دریا، آب را مستقیماً از دریا به داخل چرخه سیستم خنک کاری یک بار - گذر کشیده و نهایتاً دوباره آن را به داخل دریا تخلیه می کنند. شرایط در داخل چرخه سیستم خنک کاری محیط مناسبی جهت رسوب و رشد میکروارگانیسم های دریایی است. این رسوبات می تواند منجر به انسداد لوله ها و کانال ها شود (محمدفام و همکاران، ۲۰۲۳). غربالگری جریان آب خنک کننده و تمیز کردن رسوبات، جزء استراتژی های کنترل کننده مؤثر در سیستم های نیروگاهی است. دوزینگ شیمیایی نظیر کلرزی مکرر در سطوح پایین تر از سطح کشندگی^۴، روشی مؤثر برای پاک سازی فیزیکی آب است که به طور گسترده جهت کنترل رسوبات در کانال های خنک کننده نیروگاه برق مورد استفاده قرار می گیرد. فعل و انفعالات شیمیایی صورت گرفته در فرآیند تولید کلر مورد نیاز در واحد کلرزی نیروگاه های سیکل ترکیبی، منجر به تولید سدیم هیپوکلریت و گاز هیدروژن می شود (گلور و همکاران، ۲۰۲۰). گاز هیدروژن بسیار قابل اشتعال و انفجار است. به طوری که در ترکیب با هوا و در بازه گسترده ای از غلظت ۴ تا ۷۵ درصد حجمی، قابلیت اشتعال و انفجار را داراست و آنتالپی استاندارد سوختن آن ۲۸۶

1. Heller
2. Acc
3. Once-through
4. Sub- lethal)

5. Pasanada



لیمریک و همکاران، ۲۰۱۴.

باتوجه به موارد ذکر شده هدف مطالعه حاضر شناسایی و کمی سازی علل وقوع نشت گاز هیدروژن از واحد کلرزی یک نیروگاه سیکل ترکیبی با سیستم خنک کننده یک بار - گذر براساس تکنیک Bow-tie است.

روش

تکنیک Bow-tie

شناسایی و ارزیابی علل اصلی رخداد نشت گاز هیدروژن از واحد کلرزی، همچنین پیامدهای ناشی از رخداد آن براساس تکنیک Bow-tie انجام شد.

BT یا تکنیک پاپیونی یک روش گرافیکی برای نشان دادن سناریوی کامل حادثه است که از علل حادثه شروع و با عواقب آن پایان می یابد. این مدل درواقع از ترکیب ۲ روش تحلیل درخت خطا^۸ و تحلیل درخت رویداد^۹ تشکیل شده است. شناسایی و ارزیابی علل اصلی سناریوی موردنظر (رویداد اصلی) با استفاده از تکنیک تحلیل درخت خطا انجام شد (رضانی فر و همکاران، ۲۰۲۳). روش تحلیل درخت خطا، یک مدل منطقی و سلسله مراتبی است که چگونگی وقوع یک حادثه ناخواسته را از ترکیب رویدادهای میانی^{۱۰} و رویدادهای پایه ای^{۱۱} نشان می دهد. حادثه ناخواسته معمولاً به عنوان رویداد اصلی درخت خطا معرفی می شود. در این روش ارتباط بین رویدادها و علل آنها با استفاده از دوازدهای منطقی AND و OR نشان داده می شود (اسکندری و همکاران، ۲۰۱۹؛ رضانی فر و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین براساس ارتباط منطقی بین رویدادهای پایه با رویدادهای میانی، احتمال رویدادهای میانی و در نهایت احتمال رویداد اصلی از طریق قوانین ترکیب دروازه ها طبق فرمول های شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ محاسبه می شود.

قوانین ترکیب دروازه ها:

1. AND Gate: $P(A.B) = P(A) \times P(B)$
2. OR Gate: $P(A+B) = P(A) + P(B) - P(A).P(B)$
3. $P_{And}(E) = \prod_{i=1}^k P(E_i)$
4. $P_{Or}(E) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - P(E_i))$

k: تعداد کل رویدادهای ورودی به دروازه موردنظر

$P_{And}(E)$: احتمال وقوع رویداد میانی یا رویداد اصلی با ورودی and

8. Fault Tree Analysis (FTA)
9. Event Tree Analysis (ETA)
10. Intermediate Events
11. Basic Events

فرایندی مهم منجر به فوت در شرکت ملی پالایش و پخش فراورده های نفتی ایران با استفاده از تکنیک پاپیون (Bow-tie) که از مؤثرترین و نوین ترین روش های تجزیه و تحلیل حوادث به شمار می رود، مدل سازی شد. این بررسی نشان داد استفاده از روش سیستماتیک و تحلیلی Bow-Tie ضمن تعیین علل ریشه ای حوادث، در تعیین وظایف بحرانی با هدف اطمینان از یکپارچگی و اثربخشی کنترل های جاری کاملاً مؤثر بوده و نقش مهمی در شناسایی شاخص های کلیدی عملکرد (ایمنی، بهداشت و محیط زیست -HSE)^۶ و بهبود آنها ارائه می دهد (تکیه، ۲۰۰۰).

در مطالعه ای که توسط لی و همکاران در سال ۲۰۱۸ در ارتباط با شبیه سازی سیستم مدیریت ایمنی پروسه کلرزی براساس روش سیستم پویا^۷ صورت گرفت، به این مهم اشاره شد که کارگران، تجهیزات، مواد، محیط زیست و انرژی در فرایند کلرزی در ارتباط بسیار نزدیک با هم هستند، در این مقاله با استفاده از تئوری و روش های پویایی سیستم، یک مدل دینامیکی سیستم کلرزی برای بررسی عوامل نااطمینانی که تأثیر قابل ملاحظه ای در فرایند کلرزی دارند شبیه سازی شده است. ۴ ماژول مربوط به کارگران، مدیریت، قوانین (و مقررات) و تجهیزات و همچنین یک عامل جهش مرتبط با درجه خوردگی، به طور جامع یکپارچه شده است. از طریق پیاده سازی یک سری از سناریوها با ورودی های مختلف، می توان دریافت مدل پیشنهادی دینامیکی سیستم می تواند الگوی نفوذ در میزان خوردگی تجهیزات را به دست آورد و مهارت کار، تأثیر مثبت و کاملی بر ایمنی سیستم دارد (لی و همکاران، ۲۰۱۸).

مارکوفسکی و کوتینیا در سال ۲۰۱۲، مطالعه ای با عنوان «کاربرد مدل Bow-tie در آنالیز لایه های حفاظتی» به این نتیجه رسیدند که در میان مدل های کیفی مختلفی که برای ارائه سناریو حادثه استفاده می شود، رویکرد Bow-tie بهترین نمایش تصویری برای روابط بین خطرات مختلف (علل)، حوادث، سیستم های ایمنی و پیامدهای آن به شمار می رود. این مدل می تواند مجموعه ای کامل از رویدادهای مسیر را معرفی کند که می تواند برای همه سناریوهای احتمالی مورد استفاده قرار گیرد (مارکوفسکی و کوتینیا، ۲۰۱۱).

در مطالعه انجام گرفته توسط بورگس-لیمریکو همکاران در سال ۲۰۱۴، به تجزیه و تحلیل پاپیونی یک برخورد کننده در یک معدن زغال سنگ زیرزمینی (معدن زغال سنگ زیرزمینی Queensland در سال ۲۰۰۷) با هدف آنالیز مرگ و میر پرداخته شد. در این مقاله برای تشریح از روش Bow-Tie استفاده شد و به این نتیجه رسیدند که نمایش پاپیونی ارائه دهنده یک روش مؤثر سیستماتیک بررسی دلایل، نتایج و پیشگیری احتمالی و کاهش اقدامات کنترل یا موانع مرتبط با تصادف قبلی است (بورگس-لیمریکو و همکاران، ۲۰۱۴).

6. Health, Safety and Environmental (HSE)
7. System Dynamics (SD)



رویدادها و حوادث مختلف پس از رویداد اصلی ترسیم شد. باتوجه به عملکرد موانع ایمنی یعنی شکست یا عملکرد صحیح و موردانتظار، سناریوی نشت هیدروژن از واحد کلرزی منجر به ۶ پیامد نهایی شد که آتش ناگهانی، آتش فورانی، آتش کروی، انفجار و انتشار مواد را شامل می‌شود.

بعد از ترسیم کیفی Bow-tie، احتمال رخداد رویدادهای پایه و موانع ایمنی با استفاده از پایگاه داده‌هایی مانند OREDA، نظر کارشناسان در این زمینه و داده‌های ارائه‌شده در راهنمای آنالیز ریسک (۲۰۰۰) استخراج شد و کمی‌سازی BT با استفاده از ترکیب دروازه‌های منطقی و فرمول‌های شماره ۳، ۴ و ۵ انجام گرفت (جدول‌های شماره ۱ و ۲).

بحث

این مطالعه در صنایع نیروگاهی با هدف شناسایی و ارزیابی خطرات و تعیین ریسک‌های ایمنی مؤثر در واحد کلرزی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کاری یک بار - گذر با استفاده از جمع‌آوری داده‌ها از طریق روش‌های میدانی، شامل بررسی نقشه‌های دیاگرام جریان فرایند (PFD)^{۱۶} و نقشه‌های نمودار لوله کشی و ابزار دقیق (PID^{۱۷}) واحد کلرزی توسط اعضای تیم ارزیابی ریسک، بررسی حوادث و شبه‌حوادث واحد کلرزی نیروگاه مورد مطالعه و صنایع مشابه، مصاحبه با اپراتورها و خبرگان واحد کلرزی نیروگاه مورد مطالعه، بررسی دستورالعمل‌های کاری مکتوب جهت بهره‌برداری از سیستم، بررسی داده‌های نرخ نقص اجزای واحد کلرزی، بررسی لاگ شیت‌های راه‌اندازی و کنترل عملکرد روزانه سیستم و روش کتابخانه‌ای (استفاده از کتاب‌ها، مقاله‌ها، اینترنت و غیره) براساس روش تحلیل ریسک‌های نامطلوب سیستم با استفاده از روش Bow-tie صورت گرفته است. امروزه بیشتر مطالعات جهت طراحی استراتژی‌های پیشگیرانه و کنترلی حوادث در صنایع بر روی فرایند مدیریت ریسک تمرکز بیشتری دارند، زیرا در این فرایند رویدادهای پایه منجر به رخداد رویداد اصلی (سناریو) شناسایی می‌شوند تا امکان طراحی استراتژی‌های پیشگیرانه کارآمدتر فراهم شود (امین و همکاران، ۲۰۲۳).

در بین روش‌های تحلیل حوادث، تکنیک Bow-tie به‌عنوان یک روش کارآمد و قابل‌اعتبار به‌خاطر توانایی آن در نمایش علل رخداد یک حادثه در قالب یک مدل گرافیکی ثابت شده است (برقی‌پور و همکاران، ۲۰۲۱؛ آنگار و همکاران، ۲۰۲۳). Bow-tie، تکنیکی ثابت در مدیریت ریسک مرتبط و شناسایی علل مخاطرات است. این یک روش تجزیه و تحلیل جامع، سازمان‌یافته و منطقی با هدف شناسایی و ارزیابی مخاطرات سیستم‌های پیچیده است (برقی‌پور و همکاران، ۲۰۱۹).

$P_{Or}(E)$: احتمال وقوع رویداد میانی یا رویداد اصلی با ورودی OR

$P(E_k)$: احتمال رخداد رویدادها در درخت خطا E_k برای $k = 1, 2$

در ادامه به‌منظور شناسایی پیامدهای مختلفی که در صورت وقوع رویداد اصلی (نشت گاز هیدروژن از واحد کلرزی) و نقص هریک از موانع ایمنی ممکن است رخ دهد، از تکنیک آنالیز درخت رویداد^{۱۸} (ETA) استفاده شد (کورمانوف و همکاران، ۲۰۲۴).

ETA یک ابزار بسیار قدرتمند برای شناسایی و محاسبه ترتیب رخداد سناریوهای دخیل در حادثه بالقوه است و یک تکنیک مدل‌سازی قیاسی است که با ایجاد ۲ شاخه موفقیت و نقص به‌طور هم‌زمان به ارزیابی یک رویداد منفرد می‌پردازد. هدف این تکنیک، تعیین رخداد اولیه و پیامدهای آن در صورت عدم کارکرد صحیح سیستم‌های ایمنی است (اسکندر و همکاران، ۲۰۱۸؛ اندروز و اریکسون، ۲۰۰۰). در این رویکرد، احتمال رخداد هر پیامد از طریق فرمول شماره ۵ محاسبه شد.

$$5. \Pr(\text{Consequence}) = \Pr(TE) \times \prod_{j=1}^n \Pr(E_j)$$

در این رابطه $\Pr(\text{Consequence})$ احتمال رخداد هریک از پیامدها، $\Pr(TE)$ احتمال رویداد اصلی و $\Pr(E)$ احتمال شکست یا موفقیت موانع ایمنی است.

یافته‌ها

تصویر شماره ۱ دیاگرام Bow-tie حاصل از سناریو نشت گاز هیدروژن از واحد کلرزی را نشان می‌دهد که سمت چپ آن دیاگرام تحلیل درخت خطا و سمت راست آن دیاگرام ETA است.

در ابتدا ترسیم دیاگرام تحلیل درخت خطای نشت هیدروژن از واحد کلرزی (به‌عنوان سناریو اصلی) انجام شد. شناسایی علل اصلی نشت هیدروژن از واحد کلرزی از طریق مشاهدات مستقیم، مصاحبه با کارشناسان، بررسی اسناد و نقشه‌های عملیاتی جمع‌آوری شد. نتایج به ۳ علل اصلی، از جمله نقص در مخزن ذخیره کلر، نقص در عملکرد رکتی فایر و نقص عملکرد الکترولایزرها اشاره کرد. این علل اصلی به علل میانی و پایه‌ای بیشتر شکسته شدند. در مجموع ۶۴ علل یا نقص (۴۴ علل پایه‌ای و ۲۰ علل میانی) در وقوع نشت هیدروژن از واحد کلرزی شناسایی شد.

بخش درخت رویداد با در نظر گرفتن ۳ مانع ایمنی، تراکم و احتقان^{۱۳}، جرقه‌آنی^{۱۴} و جرقه تأخیری^{۱۵} با هدف تعیین توالی

12. Event Tree Analysis (ETA)

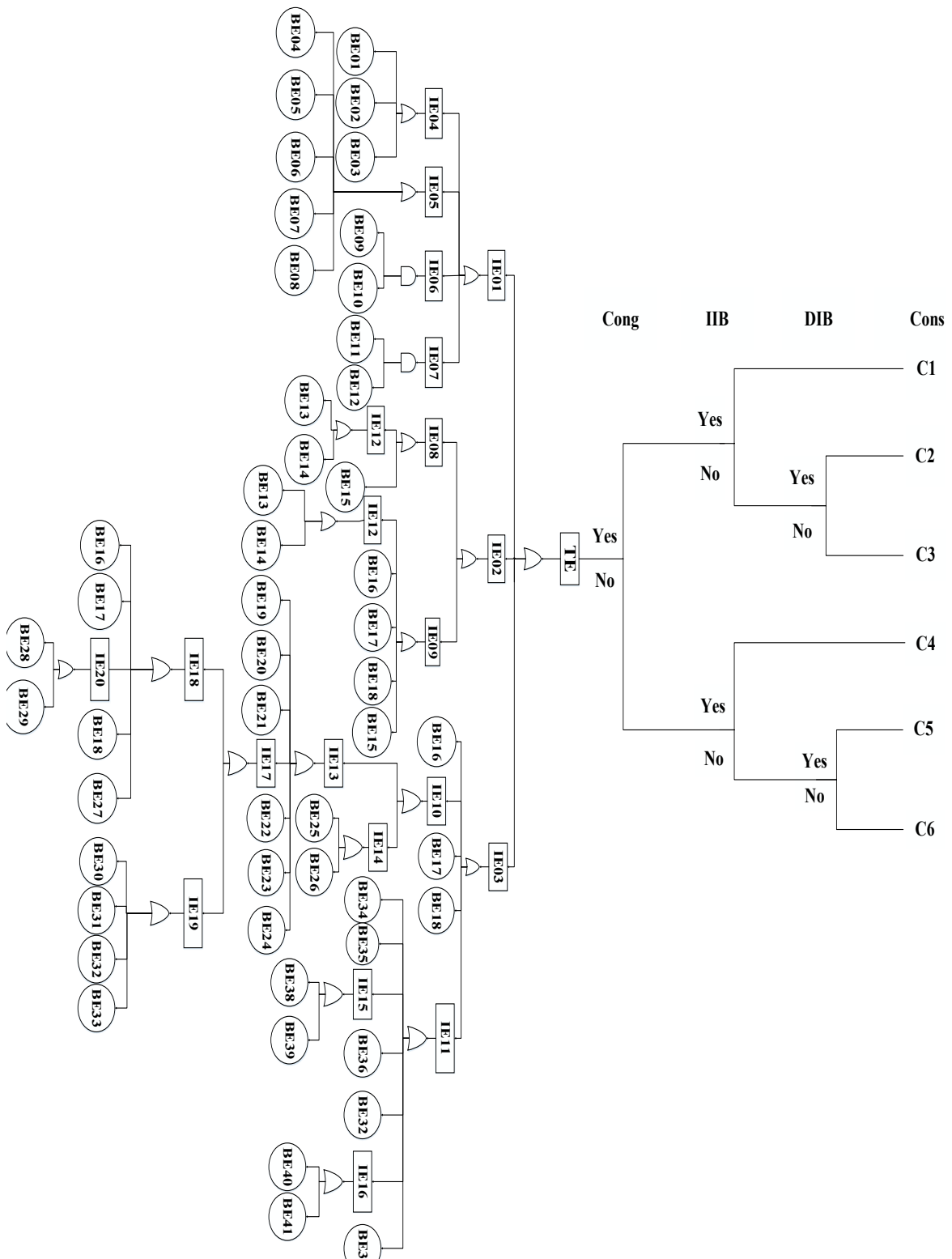
13. Congestion

14. Immediate ignition barrier

15. Delay ignition barrier

16. Process Flow Diagram

17. Piping and Instrumentation Diagram



تصویر ۱. دیاگرام Bow-tie سناریوی نشت گاز هیدروژن از واحد کلرزی



جدول ۱. نمادها، توصیف‌ها و احتمالات رویدادهای میانی (IE)

رویدادهای اصلی و میانی و پیامدها	توصیف	احتمال (BT)
Top Event	نشت هیدروژن از واحد کلرزنی	$1/51 \times 10^{-1}$
IE01	نقص در مخزن ذخیره کلر	$3/41 \times 10^{-2}$
IE02	نقص عملکرد رکتی فایر	$1/93 \times 10^{-2}$
IE03	نقص عملکرد الکترولایزرها	$1/03 \times 10^{-1}$
IE04	پایین بودن دبی تزریق	$6/44 \times 10^{-3}$
IE05	کاهش دبی هوای بلوئر	$2/78 \times 10^{-2}$
IE06	بالا بودن سطح مخزن	$1/78 \times 10^{-6}$
IE07	پایین بودن سطح مخزن	$1/59 \times 10^{-6}$
IE08	بالا بودن ولتاژ در رکتی فایر	$5/59 \times 10^{-3}$
IE09	جریان بالا در رکتی فایر	$1/38 \times 10^{-2}$
IE10	نقص سیستم تهیه آب نمک	$4/68 \times 10^{-2}$
IE11	بالا بودن فشار هیدروژن	$4/68 \times 10^{-3}$
IE12	خطای اپراتور	$7/99 \times 10^{-5}$
IE13	کاهش غلظت آب نمک	$4/24 \times 10^{-2}$
IE14	انتقال پایین نمک	$4/65 \times 10^{-3}$
IE15	نشت کلر از سل‌ها	$2/51 \times 10^{-2}$
IE16	گرفتگی مسیر تهویه هیدروژن	$7/71 \times 10^{-3}$
IE17	بروز تنش در سل‌ها	3×10^{-2}
IE18	جریان بالا	$1/68 \times 10^{-2}$
IE19	ولتاژ بالا	$1/34 \times 10^{-2}$
IE20	خطای انسانی	$1/14 \times 10^{-2}$

جدول ۲. نمادها، توصیف‌ها و احتمالات پیامدهای ناشی از نشت گاز هیدروژن

پیامدها	توصیف	احتمال (BT)
C1	آتش کروی / آتش فورانی	$9/06 \times 10^{-3}$
C2	انفجار / آتش فورانی / آتش ناگهانی	$4/89 \times 10^{-2}$
C3	رهایش ایمن	$3/26 \times 10^{-2}$
C4	آتش فورانی	$6/04 \times 10^{-3}$
C5	آتش فورانی / آتش ناگهانی	$3/26 \times 10^{-2}$
C6	رهایش ایمن	$2/17 \times 10^{-2}$



باتوجه به پیچیدگی‌های فرایند و تأثیرات احتمالی آن، استفاده از مدل Bow-tie در شبیه‌سازی و تحلیل حوادث سیستم‌های پیچیده، مانند نیروگاه‌های سیکل ترکیبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مدل با ارائه تصویری شفاف از علل و پیامدهای حادثه، امکان شناسایی راه‌های مقابله با خطرات و طراحی استراتژی‌های مؤثر برای کاهش ریسک‌ها و پیامدهای ناخواسته را فراهم می‌آورد. در نتیجه، استفاده از این روش در تحلیل ریسک‌های مرتبط با واحدهای کلرژنی نیروگاه‌ها می‌تواند به افزایش ایمنی و کاهش خطرات منجر شود.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود نیروگاه‌ها به‌طور مداوم بر سیستم‌های کنترل ایمنی نظارت داشته باشند و از نتایج این مطالعه برای بهبود برنامه‌های ایمنی و پیشگیری از حوادث استفاده کنند. این امر نه تنها به حفظ سلامت کارکنان و محیط زیست کمک خواهد کرد، بلکه به کاهش هزینه‌های اقتصادی ناشی از حوادث نیز منتهی می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این تحقیق با رعایت تمام اصول اخلاقی انجام شد. از آنجایی که هیچ آزمایشی روی نمونه‌های انسانی یا حیوانی انجام نشد، نیازی به رعایت اصول اخلاقی نبود.

حامی مالی

این پژوهش هیچ گونه کمک مالی از سازمان‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت‌نویسندگان

همه نویسندگان به‌طور یکسان در مفهوم و طراحی مطالعه، جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج و تهیه پیش‌نویس مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

Bow-tie دارای توانایی استدلال استقرایی است که احتمال وقوع رویداد اصلی را پیش‌بینی می‌کند (میرزایی علی‌آبادی و همکاران، ۲۰۱۶؛ پاپاژورگیو و همکاران، ۲۰۲۳). نتایج استدلال استقرایی به‌منظور پیش‌بینی احتمال نشت گاز هیدروژن از واحد کلرژنی با رویکرد BT نشان داد احتمال وقوع به‌دست‌آمده $10^{-1} \times 1/51$ است. همچنین نتایج استدلال استقرایی سناریوی نشت گاز هیدروژن از واحد کلرژنی با استفاده از مدل Bow-tie نشان داد پیامد دوم (انفجار / آتش‌فروانی / آتش‌ناگهانی) محتمل‌ترین پیامد ناشی از نشت گاز هیدروژن از واحد کلرژنی با احتمال وقوع $10^{-2} \times 4/89$ است.

نتایج حاصل، حاکی از توان بالای این روش در تحلیل خطرات و ریسک‌ها با ارائه یک تحلیل روشن و قابل‌فهم برای همگان از اقدامات پیشگیرانه و واکنشی مطلوب است که این موضوع با یافته‌های تحقیق تکیه و همکاران در سال ۱۳۹۰ (تکیه، ۲۰۰۰)، مبنی بر نقش مهم Bow-tie در شناسایی شاخص‌های کلیدی عملکرد HSE و بهبود آن‌ها و همچنین مطالعه بورگس-لیمریکو در سال ۲۰۱۴ (بورگس-لیمریکو، ۲۰۱۴)، مبنی بر امکان ارائه یک روش مؤثر سیستماتیک بررسی دلایل، نتایج و پیشگیری احتمالی و کاهش اقدامات کنترل یا موانع مرتبط با تصادف قبلی با استفاده از روش Bow-tie، هم‌راستا است.

مطالعه حاضر یک رویکرد جامع تحلیل کمی ریسک نشت هیدروژن از واحد کلرژنی یک نیروگاه سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده یک بار - گذر ارائه می‌دهد. نشت هیدروژن از واحد کلرژنی (سناریوی اصلی) و پیامدهای ناشی از آن برای تحلیل ریسک احتمالی مدنظر قرار گرفت. تجزیه و تحلیل علت - پیامد سناریو با استفاده از دیاگرام Bow-tie، رویدادهای پایه‌ای، رویدادهای میانی، موانع ایمنی و شناسایی پیامدهای احتمالی ناشی از نشت هیدروژن از واحد کلرژنی انجام شد. براساس تحلیل تکنیک Bow-tie، نقص عملکرد الکترولایزرها به‌عنوان مهم‌ترین عامل و انفجار / آتش‌فروانی / آتش‌ناگهانی به‌عنوان مهم‌ترین پیامد در وقوع نشت هیدروژن از واحد کلرژنی شناخته شدند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از تکنیک تحلیل Bow-tie، خطرات و ریسک‌های ناشی از نشت گاز هیدروژن از واحد کلرژنی یک نیروگاه سیکل ترکیبی با سیستم خنک‌کننده یک بار - گذر شناسایی و ارزیابی شد. نتایج نشان داد وقوع نشت هیدروژن از واحد کلرژنی ممکن است به پیامدهای جدی همچون انفجار، آتش‌فروانی و آتش‌ناگهانی منجر شود. از آنجایی که نقص عملکرد الکترولایزرها به‌عنوان مهم‌ترین علت در وقوع این حادثه شناسایی شد اقدامات پیشگیرانه باید بر بهبود عملکرد این سیستم و پایش دقیق آن متمرکز شود.



References

- Alencar, M., Silva, L., Bhardwaj, U., & Guedes Soares, C. (2023). Risk identification and Bowtie analysis for risk management of subsea pipelines. Paper presented at: *The 33rd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023)*, 3 – 8 September 2023, Southampton, UK. [DOI:10.3850/978-981-18-8071-1_P195-cd]
- Amin, Z., & Mohammad, R. (2023). Bowtie analysis for risk assessment of confined space at sewerage construction project. *Progress in Energy and Environment*, 24, 22-34. [DOI:10.37934/progress.24.1.2234]
- Andrews, J., & Ericson, C. A. (2000). Fault tree and Markov analysis applied to various design complexities. *Proceedings of the 18th international system safety conference*. [Link]
- Azadeh, A., Mohammad, F. I., & Garakani, M. (2007). A total ergonomic design approach to enhance the productivity in a complicated control system. *Information Technology Journal*, 6(7), 1036-1042. [DOI:10.3923/ij.2007.1036.1042]
- Bond, J., & Reid, D. (2020). Explosion at the Phillips' Houston chemical complex, Pasadena, 23 October 1989. *Loss Prevention Bulletin*, 272, 29-31. [Link]
- Borgheipour, H., Tehrani, G., Eskandari, T., Mohammadi, O., & Mohammadfam, I. (2021). Dynamic risk analysis of hydrogen gas leakage using Bow-tie technique and Bayesian network. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18, 3613-3624. [DOI:10.1007/s13762-020-03090-4]
- Borgheipour, H., Tehrani, G. M., Tehrani, N. A., Lomer, S. N., Esfahani, A. N., & Mohammadfam, I. (2019). Health Safety and Environmental Hazards of the Chlorination Unit of Combined Cycle Power Plants by Using HAZOP and Bow-Tie Methods. *Occupational Hygiene and Health Promotion*. [DOI:10.18502/ohhp.v3i2.1391]
- Burgess-Limerick, R., Horberry, T., & Steiner, L. (2014). Bow-tie analysis of a fatal underground coal mine collision. *Ergonomics Australia*, 10, 1-5. [Link]
- Eskandari, T., Aliabadi, M. M., & Mohammadfam, I. (2018). Dynamic analysis of the consequences of gas release in process industries using event tree technique and bayesian network. *International Journal of Occupational Hygiene*, 10(3), 151-157. [Link]
- Eskandari, T., Mohammadfam, I., & Mirzaei Aliabadi, M. (2019). [Dynamic Safety Analysis CNG Stations Using Fault Tree Approach and Bayesian Network (Persian)]. *Journal of Health and Safety at Work*, 9(4), 250-264. [Link]
- Fam, I. M., Azadeh, A., & Azadeh, M. A. (2023). Modeling an integrated health, safety and ergonomics management system: Application to power plants. *Journal of Research in Health Sciences*, 7(2), 1-10. [Link]
- Farshadmanesh, P., Beal, J., Sakurahara, T., Reihani, S., Kee, E., & Rowell, A., et al. (2024). Modeling interconnections of safety and financial performance of nuclear power plants part 1: Categorical review and theoretical bases. *Progress in Nuclear Energy*, 171, 105123. [DOI:10.1016/j.pnucene.2024.105123]
- Glover, A., Baird, A., & Brooks, D. (2020). *Final report on hydrogen plant hazards and risk analysis supporting hydrogen plant siting near nuclear power plants*. New Mexico: Sandia National Laboratories. [DOI:10.2172/1678837]
- Heyrani, P., & Baghaei, A. (2016). [Risk assessment in gas and oil pipelines based on the fuzzy Bow-tie technique (Persian)]. *Journal of Health and Safety at Work*, 6(1), 59-70. [Link]
- Hrinchenko, H., Koval, V., Shmygol, N., Sydorov, O., Tsimoshynska, O., & Matuszewska, D. (2023). Approaches to sustainable energy management in ensuring safety of power equipment operation. *Energies*, 16(18), 6488. [DOI:10.3390/en16186488]
- Kumar, P., Singh, L. K., & Kumar, C. (2020). Performance evaluation of safety-critical systems of nuclear power plant systems. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(3), 560-567. [DOI:10.1016/j.net.2019.08.018]
- Kurmanov, A., Bekmagambetov, A., Daumova, G., Issamadiyeva, G., & Kulmagambetova, E. (2024). Event tree analysis as a method of assessing occupational risks in the production of titanium ingots. *International Journal of Safety and Security Engineering*, 14(5), 1371-1376. [DOI:10.18280/ijss.140503]
- Laal, F., Fallah Madvari, R., & Halvani, G. (2019). The impact of safety programs on accident indicators in a combined cycle power plant. *Health in Emergencies and Disasters Quarterly*, 5(1), 45-52. [DOI:10.32598/hdq.5.1.320.1]
- Li, C. Y., Wang, J. H., Zhi, Y. R., Wang, Z. R., & Gong, J. H. (2018). Simulation of the chlorination process safety management system based on system dynamics approach. *Procedia Engineering*, 211, 332-342. [Link]
- Lin, H., Zhang, S., Cao, R., Yu, S., Bai, W., & Zhang, R., et al. (2024). A review on the risk, prevention and control of cooling water intake blockage in coastal nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*, 56(2), 389-401. [DOI:10.1016/j.net.2023.10.009]
- Markowski, A. S., & Kotynia, A. (2011). "Bow-tie" model in layer of protection analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 89(4), 205-213. [DOI:10.1016/j.psep.2011.04.005]
- Mirzaei Aliabadi, M., Mohammad Fam, I., Kalatpour, O., & Babayi Mesdaraghi, Y. (2016). [Risk assessment of liquefied petroleum gas (LPG) storage tanks in the process industries using the Bowtie technique (Persian)]. *Journal of Occupational Hygiene Engineering*, 3(2), 1-11. [DOI:10.21859/johe-03021]
- Papageorgiou, P., Dermatis, Z., Anastasiou, A., Liargovas, P., & Papadimitriou, S. (2023). Using a Proposed Risk Computation Procedure and Bow-Tie Diagram as a Method for Maritime Security Assessment. *Transportation Research Record*, 2678(2), 318-339. [DOI:10.1177/03611981231173641]
- Ramezanifar, E., Gholamizadeh, K., Mohammadfam, I., & Aliabadi, M. M. (2023). Reliability assessment of fixed foam systems of storage tank based on fuzzy fault tree analysis. *Journal of Health & Safety at Work*, 13(1), 1-17. [Link]
- Rubin, E. S., & Zhai, H. (2012). The cost of carbon capture and storage for natural gas combined cycle power plants. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3076-3084. [DOI:10.1021/es204514f] [PMID]
- Shirali, G. A., Mohammadfam, I., Ebrahimipour, V. (2013). A new method for quantitative assessment of resilience engineering by PCA and NT approach: A case study in a process industry. *Reliability Engineering & System Safety*, 119, 88-94. [DOI:10.1016/j.res.2013.05.003]
- Tekyeh, A. H., Jafari, M. J., & Mortazavi, S. B. (2000). [Application of Bow-Tie technique in the accident analysis of SRP Unit of Shahid Tondogon Refinery in Tehran (Persian)]. Paper presented at: The 7th National Conference on Occupational Health, Qazvin, Iran, 3 May 2011. [Link]

This Page Intentionally Left Blank