

Fire Risk Assessment of Diesel Fuel Storage Tanks in Mashhad Power Plants Using the Bow-Tie Technique and the Development of Appropriate Control and Mitigation Measures

Meysam Rezaei¹ , Zahra Abedi² , Hanieh Nikoomaram³ , Farzam Babaei⁴

¹ Department of Environmental Management, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, SR. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² **Corresponding Author**, Department of Environmental Economics, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, SR. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

³ Department of Environmental Management, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, SR. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

⁴ Department of Environmental Management, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, SR. C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article type

Research Article

Article history

Received: 2026.04.01

Received in revised form: 2026.05.19

Accepted: 2026.05.24

Available online: 2026.05.27

Keywords

Risk Assessment

Fire

Diesel Tanks

Control Measures

ABSTRACT

In this study, fires in diesel storage tanks at power plants were analyzed as a primary event. Initially, the main causes of the event were identified and assessed using the Fault Tree Analysis (FTA) method. Subsequently, the potential consequences of the event were predicted through the Event Tree Analysis (ETA) technique. Finally, the incident pathway—from the cause phase to the consequence phase—was illustrated and examined using the Bow Tie diagram. Moreover, the most important control measures for preventing fuel tank fires and mitigating their consequences were recommended in order of priority. In total, five main threats, along with 79 sub-causes and intermediate events, were found to contribute to fires in diesel storage tanks at power plants. Fifty-two control measures (barriers) were identified and proposed to prevent the occurrence of such fires. Additionally, five primary safety, economic, and environmental consequences of tank fires were identified, and the most important control measures to mitigate these consequences were recommended. The analysis of the results and the illustrated diagrams revealed that the most important control measures for preventing fires in diesel storage tanks, in order of priority, are: the development and strict adherence to safety procedures, the provision of necessary training, and regular maintenance and servicing. Moreover, the key measures for mitigating the consequences of fuel tank fires include: enhancing fire suppression systems, timely activation of existing fire suppression systems, prompt firefighting, conducting periodic drills, and fuel replacement.

Introduction

Diesel storage tanks in power plants, as one of the strategic components of the fuel supply system, play a fundamental role in ensuring the continuity of electricity generation, particularly under emergency conditions, during constraints on natural gas supply, and throughout periods of peak demand. By providing a reliable reserve of fuel, these tanks enable the stable operation of power plants; consequently, their safety and reliability constitute essential requirements for the safe and sustainable operation of power generation facilities [1]. Despite the functional importance of these tanks, the storage of large quantities of diesel fuel, the flammable nature of the fuel, the potential generation of flammable vapors, and the possibility of uncontrolled fuel release expose them to hazards such as leakage, fire, and, under certain circumstances, explosion. In the event of a leak in the presence of a suitable ignition source, a fire may spread rapidly and, in addition to causing economic losses, may result in the interruption of electricity generation, damage to critical equipment, threats to personnel safety, and environmental contamination [2]. An examination of reported incidents in the process industries and energy facilities indicates that a considerable proportion of accidents associated with fuel storage tanks have resulted from equipment deficiencies, human errors, inadequate maintenance, and ineffective control measures [3]. Accordingly, the management of fire risk in diesel storage tanks has become one of the fundamental requirements of safety management in power plants. Hazard identification, analysis of accident scenarios, assessment of fire development

Cite This Paper:

Rezaei, Meysam., Abedi, Zahra., Nikoomaram, Hanieh., & Babaei, Farzam. (2026). Fire Risk Assessment of Diesel Fuel Storage Tanks in Mashhad Power Plants Using the Bow-Tie Technique and the Development of Appropriate Control and Mitigation Measures. *Fuel and Combustion*, 19 (2), 1-19. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.579816.1458> (In Persian)

© The author(s) retain the copyright.

Publisher: [Iranian Combustion Institute \(ICI\)](http://www.jfnc.ir).

ارجاع دهی به این مقاله:



pathways, and implementation of effective control measures play a significant role in reducing the likelihood of accidents, limiting their consequences, enhancing the resilience of power plants, and improving both safety and environmental protection [4]. Despite adherence to design requirements, fires in diesel storage tanks continue to be regarded as one of the major hazards in the oil, gas, and power generation industries. In many cases, the simultaneous occurrence of several contributing factors may give rise to complex accident scenarios and increase the severity of their consequences [5]. The Bow-Tie technique, through the integration of Fault Tree Analysis (FTA) and Event Tree Analysis (ETA), provides an integrated framework for representing the relationships among hazards, threats, the top event, control measures, and consequences. This feature enables the simultaneous identification of critical pathways, assessment of the effectiveness of preventive and mitigative barriers, analysis of accident escalation scenarios, and prioritisation of control measures [6]. Accordingly, the primary objective of this study is to assess the fire risk associated with diesel storage tanks in the power plants of Mashhad using the Bow-Tie technique; to identify the principal threats, intermediate events, control barriers, and accident consequences; and, ultimately, to propose and prioritise effective control measures aimed at enhancing safety and reducing fire risk.

Methodology

This study was applied in nature and was conducted using a descriptive–analytical approach, with the objective of qualitatively assessing the fire risk associated with diesel storage tanks in power plants in the city of Mashhad through the application of the Bow-Tie method. Initially, the required data were collected through field visits to the diesel storage tanks of the power plants under study, examination of technical records and documentation, operating procedures, accident and near-miss reports, safety procedures, and interviews with HSE, operations, and maintenance experts. In addition, authoritative scientific sources and relevant standards concerning risk management and process safety were consulted to supplement the collected information. Following the review of the collected information and the conduct of expert sessions, the hazards associated with the diesel storage tanks were identified. Subsequently, based on the frequency of occurrence, severity of consequences, and expert judgement, tank fire was identified as one of the principal top events that could lead to undesirable consequences. In the next stage, Fault Tree Analysis (FTA) was employed to identify all potential causes leading to the occurrence of the top event and to organise them hierarchically. Following the determination of the top event, the potential consequences resulting from its occurrence were examined using Event Tree Analysis (ETA). At this stage, the performance or failure of the existing protection layers was assessed, and consequences such as a confined fire, extensive fire, explosion, financial losses, injury to personnel, and environmental contamination were identified. Upon completion of the Fault Tree and Event Tree analyses, the existing and proposed control barriers were determined. Preventive barriers were identified with the aim of preventing the occurrence of the top event, whereas mitigative barriers were identified with the aim of reducing the severity of the consequences of the accident. These barriers were subsequently incorporated into the Bow-Tie diagram.

Results and Discussion

The results of the Fault Tree Analysis, Event Tree Analysis, and Bow-Tie modelling indicated that fires in diesel storage tanks result from the interaction of a combination of technical, managerial, and human factors and cannot be attributed to a single cause. Overall, five major threats, together with 79 underlying causes and intermediate events, were identified as contributing to the occurrence of fires in diesel storage tanks at the power plants. A total of 52 control measures were identified and proposed for preventing the occurrence of tank fires. The principal threats comprised temperature rise, human factors, spark generation, the presence of flammable vapours, and natural phenomena. These threats were identified through field inspections, examination of technical documentation, analysis of hazard scenarios, and consensus among the risk assessment team. They were selected as key threats because they encompassed all major pathways leading to the occurrence of the top event. Furthermore, five major safety, economic, and environmental consequences arising from tank fires were identified, and the most important control measures for mitigating these consequences were recommended. Examination of the results and the Bow-Tie diagrams demonstrated that the principal control measures for preventing fires in

diesel storage tanks, in order of priority, were the development and implementation of safety procedures, provision of the necessary training, and periodic inspection, servicing, and maintenance. The principal measures for mitigating the consequences of fires in fuel storage tanks included enhancement of fire-extinguishing systems, timely activation of existing fire-extinguishing systems, prompt fire suppression, conducting periodic emergency drills, and fuel switching.

Conclusion

This study employed a qualitative Bow-Tie analysis approach to assess fire scenarios involving diesel storage tanks at a selected power plant as a case study. The results demonstrated that, by integrating Fault Tree Analysis and Event Tree Analysis, this method enables the systematic identification of threats, the top event, consequences, and control barriers, and can serve as an effective tool for supporting decision-making in process risk management. Analysis of the accident pathways indicated that a considerable proportion of the intermediate events were associated with human and managerial factors, including deficiencies in the implementation of safety procedures, inadequate training, shortcomings in preventive maintenance programs, and insufficient supervision. This finding was derived from the analysis of hazard scenarios, the frequency of intermediate events, and the judgement of the expert team, and highlights the central role of human and managerial factors in the development and control of risk. Furthermore, the application of engineering barriers, such as fixed fire-extinguishing systems, fire detection and alarm systems, earthing and bonding systems, leak monitoring, and emergency response programs, plays an important role in reducing the likelihood of accident occurrence or limiting the consequences of an incident.

References

- [1] American Petroleum Institute. API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage. 13th ed. Washington, DC: API; 2020
- [2] National Fire Protection Association. NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code. 2021 ed. Quincy (MA): National Fire Protection Association; 2021.
- [3] Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Risk Based Process Safety. 2nd ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2018.
- [4] Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. 4th ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2022.
- [5] Mannan S, editor. Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2012.
- [6] Centre for Chemical Process Safety (CCPS). Bow Ties in Risk Management: A Concept Book for Process Safety. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2018.



ارزیابی ریسک آتش سوزی مخازن گازوئیل نیروگاه‌های برق مشهد با تکنیک Bow Tie و ارائه اقدامات کنترلی و کاهشی مناسب

میثم رضائی^۱، زهرا عابدی^۲، هانیه نیکومرام^۳، فرزاد بابایی^۴

^۱ دانشجوی دکتری مدیریت محیط زیست، دانشکده کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،

ایمیل: rezaee.hse@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار گروه مدیریت-اقتصاد محیط زیست، دانشکده کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه

آزاد اسلامی، تهران، ایران، ایمیل: Z.abedi123@iau.ac.ir

^۳ استادیار گروه مدیریت محیط زیست، دانشکده کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،

ایمیل: hani.nikoo@gmail.com

^۴ استادیار گروه مدیریت محیط زیست، دانشکده کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،

ایمیل: Farzam.babaie@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله مقاله پژوهشی	در این مطالعه آتش سوزی مخازن گازوئیل موجود در نیروگاه‌های برق به‌عنوان یک رویداد اصلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت به‌طوری‌که ابتدا با روش FTA مهمترین علل بروز رویداد اصلی شناسایی و ارزیابی شد و سپس با استفاده از تکنیک ETA پیامدهای احتمالی ناشی از بروز رویداد اصلی پیش‌بینی شد. و در نهایت با استفاده از دیاگرام Bow Tie مسیر حادثه از فاز علل تا فاز پیامدها ترسیم و بررسی شد و همچنین مهمترین اقدامات کنترلی به منظور پیشگیری از آتش سوزی مخازن سوخت و کاهش پیامدهای آن به ترتیب اولویت توصیه شد. در مجموع ۵ تهدید اصلی به همراه ۷۹ علل فرعی و رویداد میانی در بروز آتش سوزی مخازن گازوئیل نیروگاه‌های برق نقش داشته، که ۵۲ مورد اقدام کنترلی جهت پیشگیری از وقوع آتش سوزی شناسایی و پیشنهاد شد. همچنین ۵ پیامد اصلی ایمنی، اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از آتش سوزی مخازن شناسایی و مهمترین اقدامات کنترلی به منظور کاهش پیامدها توصیه شد. با بررسی نتایج و دیاگرام‌های ترسیم شده مشخص شد که مهمترین اقدامات کنترلی به منظور پیشگیری از آتش سوزی در مخازن گازوئیل به ترتیب اولویت عبارتند از: تدوین و رعایت دستورالعمل‌های ایمنی، ارائه آموزش‌های لازم و سرویس و نگهداری دوره‌ای. همچنین مهمترین اقدامات کاهش پیامدهای ناشی از آتش سوزی مخازن سوخت عبارتند از: افزایش سیستم‌های اطفای حریق، فعال‌سازی به موقع سیستم‌های اطفای حریق موجود، اطفای به موقع حریق، برگزاری مانور دوره‌ای و تغییر سوخت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۱/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۰۶	
کلیدواژه‌ها: ارزیابی ریسک آتش سوزی مخازن گازوئیل اقدام کنترلی	

مقدمه

مخازن ذخیره‌سازی گازوئیل در نیروگاه‌های برق به‌عنوان یکی از اجزای راهبردی سامانه تأمین سوخت، نقش اساسی در تضمین تداوم تولید انرژی الکتریکی، به‌ویژه در شرایط اضطراری، محدودیت تأمین گاز طبیعی و دوره‌های اوج مصرف ایفا می‌کنند. این مخازن با فراهم کردن ذخیره مطمئن سوخت، امکان بهره‌برداری پایدار از نیروگاه‌ها را فراهم ساخته و از این‌رو، ایمنی و قابلیت اطمینان آن‌ها از الزامات اساسی بهره‌برداری ایمن و پایدار نیروگاه‌های برق به شمار می‌رود [۱]. با وجود اهمیت عملکردی این مخازن، ذخیره حجم زیاد گازوئیل، ماهیت قابل اشتعال سوخت، امکان تولید بخارات قابل اشتعال و احتمال آزادسازی

Cite This Paper:

Rezaei, Meysam., Abedi, Zahra., Nikoomaram, Hanieh., & Babaei, Farzam. (2026). Fire Risk Assessment of Diesel Fuel Storage Tanks in Mashhad Power Plants Using the Bow-Tie Technique and the Development of Appropriate Control and Mitigation Measures. *Fuel and Combustion*, 19 (2), 1-19. <http://doi.org/10.22034/jfnc.2026.579816.1458> (In Persian)

© The author(s) retain the copyright.

Publisher: [Iranian Combustion Institute \(ICI\)](http://www.iraniancombustioninstitute.com).



کنترل نشده سوخت، آن‌ها را در معرض مخاطراتی نظیر نشت، آتش سوزی و در برخی شرایط انفجار قرار می‌دهد. در صورت وقوع نشت و وجود منبع اشتعال مناسب، آتش سوزی می‌تواند به سرعت گسترش یافته و علاوه بر خسارات اقتصادی، موجب توقف تولید برق، آسیب به تجهیزات حیاتی، تهدید ایمنی کارکنان و آلودگی محیط زیست شود [۲]. مخازن ذخیره سوخت در نیروگاه‌ها معمولاً به صورت مخازن اتمسفریک و با ظرفیت‌های بالا طراحی می‌شوند تا امکان ذخیره سوخت مورد نیاز برای بهره‌برداری مستمر نیروگاه را فراهم کنند. از این رو، طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری صحیح این مخازن، مطابق الزامات استانداردهای فنی و ایمنی، نقش تعیین کننده‌ای در کاهش احتمال وقوع حوادث بزرگ و افزایش قابلیت اطمینان سامانه تأمین سوخت دارد [۱]. بررسی حوادث گزارش شده در صنایع فرایندی و تأسیسات انرژی نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از حوادث مرتبط با مخازن ذخیره سازی سوخت، ناشی از نقص تجهیزات، خطاهای انسانی، ضعف در نگهداری و ناکارآمدی اقدامات کنترلی بوده است [۳]. از این رو، مدیریت ریسک آتش سوزی در مخازن ذخیره سازی گازوئیل به یکی از الزامات اساسی مدیریت ایمنی نیروگاه‌های برق تبدیل شده است. شناسایی مخاطرات، تحلیل سناریوهای حادثه، ارزیابی مسیرهای وقوع آتش سوزی و استقرار اقدامات کنترلی مؤثر، نقش مهمی در کاهش احتمال وقوع حوادث، محدودسازی پیامدها، افزایش تاب‌آوری نیروگاه‌ها و ارتقای سطح ایمنی و حفاظت از محیط زیست ایفا می‌کند [۴].

طراحی ایمن مخازن ذخیره سازی گازوئیل مستلزم رعایت الزامات استانداردهای معتبر از جمله NFPA، API Standard 650، NFPA 850 و 30 است. این الزامات شامل انتخاب مناسب مصالح، طراحی سازه‌ای، سیستم‌های تهویه، کنترل سرریز، حفاظت در برابر خوردگی، اتصال زمین، حفاظت در برابر صاعقه، حوضچه‌های جمع‌آوری نشت، سامانه‌های کشف و اطفای حریق، فاصله ایمن از تجهیزات مجاور و انجام برنامه‌های منظم بازرسی و نگهداری است. رعایت این الزامات احتمال وقوع حوادث را کاهش داده و در صورت بروز حادثه، از گسترش آن جلوگیری می‌کند [۵]. رعایت الزامات طراحی، وقوع آتش سوزی در مخازن ذخیره سازی گازوئیل همچنان یکی از مهم‌ترین مخاطرات صنایع نفت، گاز و نیروگاه‌های برق محسوب می‌شود. بررسی مطالعات و گزارش‌های حوادث نشان می‌دهد که آتش سوزی این مخازن معمولاً حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل فنی، انسانی و محیطی است. از مهم‌ترین عوامل ایجاد آتش سوزی می‌توان به نشت سوخت، تشکیل ابر بخار قابل اشتعال، وجود منابع اشتعال، تخلیه الکتریسیته ساکن، صاعقه، نقص تجهیزات، خوردگی، سرریز مخزن، ضعف در عملیات تعمیر و نگهداری و خطاهای انسانی اشاره کرد. در بسیاری از موارد، وقوع هم‌زمان چند عامل زمینه‌ساز شکل‌گیری سناریوهای پیچیده حادثه و افزایش شدت پیامدها می‌شود [۶]. پیامدهای آتش سوزی در مخازن ذخیره سازی گازوئیل تنها به سوختن مخزن محدود نمی‌شود، بلکه می‌تواند منجر به گسترش آتش به تجهیزات مجاور، ایجاد خسارات گسترده اقتصادی، توقف تولید برق، آسیب به کارکنان، انتشار آلاینده‌های خطرناک و آلودگی خاک، آب و هوا شود. علاوه بر این، وقوع چنین حوادثی می‌تواند قابلیت اطمینان شبکه تولید برق را کاهش داده و هزینه‌های قابل توجهی را برای تعمیر تجهیزات، بازسازی تأسیسات و جبران خسارات زیست محیطی به همراه داشته باشد. از این رو، شناسایی دقیق عوامل ایجاد آتش سوزی، تحلیل مسیرهای توسعه حادثه و استقرار اقدامات کنترلی مؤثر، از مهم‌ترین الزامات مدیریت ایمنی و مدیریت ریسک در نیروگاه‌های برق محسوب می‌شود [۴]. با توجه به پیچیدگی سناریوهای آتش سوزی در مخازن ذخیره سازی گازوئیل و نقش هم‌زمان عوامل فنی، انسانی و مدیریتی در ایجاد و توسعه حوادث، استفاده از روش‌هایی که بتوانند ارتباط میان علل، رویدادهای میانی، اقدامات کنترلی و پیامدهای حادثه را به صورت یکپارچه نمایش دهند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از روش‌های شناخته شده در این زمینه، تکنیک Bow-Tie است که با تلفیق روش تحلیل درخت خطا^۱ و

^۱ Fault Tree Analysis (FTA)

تحلیل درخت رویداد^۱، ضمن شناسایی مسیرهای وقوع حادثه، اثربخشی لایه‌های حفاظتی و اقدامات کنترلی را نیز ارزیابی می‌کند. به همین دلیل، این روش در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاه‌ها به‌طور گسترده برای مدیریت ریسک حوادث عمده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مدل Bow-Tie^۲، مخاطره^۳ به منبع، وضعیت یا فعالیتی اطلاق می‌شود که دارای پتانسیل ایجاد آسیب به انسان، تجهیزات، محیط‌زیست یا دارایی‌های سازمان باشد. تهدید^۴ به عواملی گفته می‌شود که می‌توانند باعث از دست رفتن کنترل بر مخاطره شده و وقوع رویداد ناخواسته را آغاز کنند. این عوامل ممکن است منشأ فنی، انسانی، مدیریتی یا محیطی داشته باشند. رویداد اصلی^۵ نقطه‌ای است که در آن کنترل بر مخاطره از دست می‌رود، اما پیامدهای نهایی هنوز رخ نداده‌اند. این رویداد، مرز بین علل ایجادکننده حادثه و پیامدهای ناشی از آن را مشخص می‌کند و هسته اصلی ساختار Bow-Tie را تشکیل می‌دهد. رویداد میانی^۶ به رویدادها یا شرایط واسطه‌ای گفته می‌شود که در مسیر بین تهدیدها و رویداد محوری قرار گرفته و احتمال وقوع حادثه را افزایش می‌دهند. این رویدادها معمولاً حاصل ترکیب چند علت اولیه بوده و نقش مهمی در توسعه سناریوی حادثه ایفا می‌کنند. مانع یا لایه حفاظتی^۷ به هر اقدام، تجهیز، سامانه یا فعالیت مدیریتی اطلاق می‌شود که با هدف جلوگیری از وقوع رویداد اصلی یا کاهش شدت پیامدهای آن طراحی و اجرا می‌شود. پیامد^۸ به نتایج و آثار ناشی از وقوع رویداد اصلی در صورت ناکارآمدی یا شکست لایه‌های حفاظتی اطلاق می‌شود. این پیامدها می‌توانند شامل تلفات انسانی، خسارات مالی، آسیب به تجهیزات، توقف تولید، آلودگی محیط‌زیست و سایر آثار نامطلوب باشند [۷]. با توجه به قابلیت Bow-Tie در نمایش هم‌زمان روابط میان مخاطره، تهدیدها، رویداد محوری، رویدادهای میانی، موانع کنترلی و پیامدها، این تکنیک چارچوبی جامع برای تحلیل سناریوهای آتش‌سوزی در مخازن ذخیره‌سازی گازوئیل فراهم می‌کند و امکان شناسایی نقاط بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات کنترلی را فراهم می‌سازد [۶].

روش‌های متعددی برای شناسایی، ارزیابی و مدیریت ریسک در صنایع فرایندی توسعه یافته‌اند که هر یک با توجه به هدف مطالعه، نوع داده‌ها و سطح تحلیل، دارای قابلیت‌ها و محدودیت‌های خاص خود هستند. از جمله پرکاربردترین این روش‌ها می‌توان به HAZOP، FMEA، LOPA، ماتریس ریسک و Bow-Tie اشاره کرد. انتخاب روش مناسب، علاوه بر ماهیت فرایند، به نوع مخاطره، اهداف پژوهش و سطح جزئیات مورد نیاز برای تحلیل نیز وابسته است [۸]. تکنیک HAZOP یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های نظام‌مند برای شناسایی انحرافات فرایندی و تعیین علل بالقوه وقوع مخاطرات است و عمدتاً در مراحل طراحی و بازنگری فرایندها کاربرد دارد. با وجود توانایی بالای این روش در شناسایی مخاطرات، HAZOP ارتباط میان علل، لایه‌های حفاظتی و پیامدهای نهایی را به‌صورت یکپارچه نمایش نمی‌دهد و برای تحلیل مسیر توسعه حوادث عمده به روش‌های تکمیلی نیاز دارد [۹]. روش FMEA نیز با تمرکز بر شناسایی حالات خرابی تجهیزات و تعیین اثرات هر خرابی، ابزاری مؤثر برای افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات محسوب می‌شود. با این حال، این روش عمدتاً خرابی اجزای منفرد را بررسی می‌کند و وابستگی میان عوامل انسانی، تجهیزات، شرایط عملیاتی و توسعه سناریوهای پیچیده حادثه را به‌طور کامل نشان نمی‌دهد [۱۰]. روش LOPA با هدف ارزیابی کفایت لایه‌های حفاظتی مستقل و تعیین نیاز به اقدامات کنترلی تکمیلی توسعه یافته است. هرچند این روش

^۱ Event Tree Analysis (ETA)

^۲ Hazard

^۳ Threat

^۴ Top Event

^۵ Intermediate Event

^۶ Barrier

^۷ Consequence

در تصمیم‌گیری درباره کفایت لایه‌های حفاظتی کاربرد گسترده‌ای دارد، اما نمایش تصویری روابط میان تهدیدها، رویداد محوری، موانع و پیامدهای حادثه از قابلیت‌های اصلی آن محسوب نمی‌شود و معمولاً پس از انجام مطالعاتی مانند HAZOP به کار گرفته می‌شود [۱۱]. از سوی دیگر، ماتریس ریسک به دلیل سادگی اجرا، یکی از متداول‌ترین ابزارهای ارزیابی ریسک در صنایع مختلف است، اما این روش بر پایه برآورد احتمال و شدت پیامد عمل می‌کند و قادر به تحلیل روابط علت و معلولی، مسیرهای توسعه حادثه و اثربخشی لایه‌های حفاظتی نیست. در نتیجه، برای حوادث پیچیده‌ای مانند آتش‌سوزی مخازن ذخیره‌سازی سوخت، استفاده از ماتریس ریسک به‌تنهایی نمی‌تواند اطلاعات کافی برای تصمیم‌گیری مدیریتی فراهم کند [۸]. در مقابل، تکنیک Bow-Tie با تلفیق روش تحلیل درخت خطا و تحلیل درخت رویداد، چارچوبی یکپارچه برای نمایش ارتباط میان خطر، تهدید، رویداد اصلی، اقدام کنترلی و پیامد فراهم می‌کند. این ویژگی امکان شناسایی مسیرهای بحرانی، ارزیابی اثربخشی موانع پیشگیرانه و کاهشی، تحلیل سناریوهای توسعه حادثه و اولویت‌بندی اقدامات کنترلی را به‌صورت هم‌زمان فراهم می‌سازد. علاوه بر این، خروجی گرافیکی Bow-Tie، درک بهتر سناریوهای حادثه را برای مدیران، کارشناسان بهره‌برداری و متخصصان HSE تسهیل کرده و فرآیند تصمیم‌گیری در مدیریت ریسک را بهبود می‌بخشد [۷]. با توجه به اینکه هدف این پژوهش صرفاً شناسایی عوامل ایجاد آتش‌سوزی نبوده، بلکه تحلیل مسیرهای وقوع حادثه، ارزیابی لایه‌های حفاظتی و ارائه اقدامات کنترلی اولویت‌دار برای مخازن ذخیره‌سازی گازوئیل نیروگاه‌های برق است، تکنیک Bow-Tie به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای دستیابی به اهداف پژوهش انتخاب شد. این روش ضمن شناسایی تهدیدها و پیامدهای آتش‌سوزی، امکان تحلیل جامع موانع کنترلی و فراهم‌سازی اطلاعات مورد نیاز برای اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی را نیز فراهم می‌کند.

راضیه زواره و همکاران در پژوهشی یک چارچوب تحلیل ریسک محیطی برای آتش‌سوزی و انفجار در مخازن ذخیره سوخت (گازوئیل/بنزین) ارائه دادند. تحقیق نشان می‌دهد ذخیره‌سازی حجم زیاد سوخت در مخازن نفتی می‌تواند خطرات قابل‌توجهی برای ایمنی و محیط‌زیست داشته باشد، از جمله آتش‌سوزی، انفجار و انتشار آلاینده‌ها. این پژوهش نشان می‌دهد که ارزیابی ریسک مخازن ذخیره سوخت نباید تنها به پیامدهای ایمنی محدود شود، بلکه لازم است اثرات محیط‌زیستی نیز در قالب یک چارچوب جامع مورد بررسی قرار گیرند [۱۲]. فانتس بارگس و همکاران در پژوهشی روش ترکیبی مطالعه عملیات و خطر^۱ و آنالیز درخت خطا را برای تحلیل ریسک در ترمینال و مخازن ذخیره سوخت بررسی کردند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که مناطق بارگیری/تخلیه سوخت حساس‌ترین نقاط هستند و بیشترین خطر از ریزش سوخت ناشی می‌شود که می‌تواند به نشت، آتش‌سوزی و پیامدهای شدید منتهی شود. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد ترکیبی HAZOP و FTA علاوه بر شناسایی نقاط بحرانی، امکان اولویت‌بندی عوامل ریشه‌ای و اقدامات کنترلی را فراهم می‌کند [۱۳]. سونگو نام و همکاران در پژوهشی به بررسی رفتار آتش‌سوزی در مخازن بزرگ ذخیره بنزین می‌پردازد و نشان می‌دهد که آتش‌سوزی مخازن سوخت می‌تواند به تشکیل آتش سطح کامل و افزایش شدید تابش حرارتی منجر شود. این پژوهش اهمیت تحلیل دقیق پیامدهای حرارتی و سناریوهای گسترش آتش در مخازن ذخیره سوخت را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که طراحی لایه‌های حفاظتی، سامانه‌های اطفای حریق و اقدامات کنترلی باید با در نظر گرفتن خطر آتش سطح کامل و اثر دومینویی ناشی از تابش حرارتی انجام شود [۱۴]. ریکاردو ماچادو لیته و همکاران در پژوهشی به بررسی اثر قطر مخزن بر رفتار حرارتی آتش‌سوزی مخازن سوخت (گازوئیل و بنزین) می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قطر مخزن، نرخ سوختن، سرعت گرمایشی و ارتفاع شعله تغییر می‌کند و این پارامترها برای پیش‌بینی شدت آتش و اثرات تابشی ضروری هستند. همچنین مشخص شده که دمای بالاتر در

^۱ Hazard and Operability Study (HAZOP)

نزدیکی مخازن بزرگتر و توزیع حرارت متفاوت می‌تواند خطر گسترش آتش به مخازن مجاور را افزایش دهد. این پژوهش نشان می‌دهد که ویژگی‌های هندسی مخازن، به‌ویژه قطر آن‌ها، از عوامل کلیدی مؤثر بر شدت پیامدهای حرارتی آتش‌سوزی هستند، از این‌رو در ارزیابی ریسک مخازن ذخیره سوخت، طراحی فواصل ایمنی، سامانه‌های خنک‌کننده و اقدامات کنترلی باید اثر اندازه مخزن بر تابش حرارتی و احتمال گسترش حریق به مخازن مجاور به‌طور دقیق مدنظر قرار گیرد [۱۵]. زهرا دجمایی و همکاران در پژوهشی چارچوب نوآورانه تحلیل ریسک برای مخازن ذخیره نفت ارائه می‌دهد که روش Bow-Tie را با شبکه بی‌زین^۱ تلفیق می‌کند تا با داده‌های نامطمئن عملیات تحلیل دقیق‌تری انجام دهد. این مدل باعث می‌شود تهدیدها و پیامدهای بالقوه ذخیره‌سازی سوخت بهتر شناسایی و اولویت‌بندی شوند و بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی برای کاهش ریسک‌های حادثه‌ای فراهم شود. این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب Bow-Tie با شبکه بی‌زین می‌تواند محدودیت ذاتی تحلیل ایستای Bow-Tie را برطرف کرده و با بهره‌گیری از استنتاج احتمالاتی و مدیریت عدم قطعیت، ارزیابی پویاتر و واقع‌بینانه‌تری از ریسک مخازن ذخیره‌سازی سوخت ارائه دهد. یافته‌های این مطالعه، اهمیت استفاده از مدل‌های ترکیبی در شناسایی و اولویت‌بندی تهدیدها، ارزیابی اثربخشی لایه‌های حفاظتی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی را تأیید می‌کند [۱۶]. کیوان سربانزاده و همکاران در پژوهشی ترکیبی از مطالعه عملیات و خطر و Bow-Tie را برای شناسایی تهدیدها، پیامدها و موانع ایمنی برای مخازن کروی ذخیره گاز مایع، به‌کار می‌برد و با استفاده از نقشه شناختی فازی، مؤثرترین موانع پیشگیرانه و کاهنده را تعیین می‌کند. رویکرد ترکیبی باعث می‌شود تحلیل ریسک در شرایط پیچیده عملیاتی دقیق‌تر و پویا انجام شود. این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق Bow-Tie، HAZOP و نقشه شناختی فازی می‌تواند محدودیت تحلیل‌های ایستا را برطرف کرده و با اولویت‌بندی پویای تهدیدها، پیامدها و لایه‌های حفاظتی، دقت ارزیابی ریسک را در شرایط پیچیده عملیاتی افزایش دهد [۱۷]. کریپا و همکاران در پژوهشی به توسعه و پیاده‌سازی یک سیستم مدیریت ریسک آتش‌سوزی برای عملیات ایمن مخازن ذخیره اتمسفریک بزرگ می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که مجموعه‌ای از تحلیل‌های ریسک سیستماتیک، ارزیابی گزینه‌های کنترل خطر، و مقایسه اقدامات کاهش ریسک می‌تواند به انتخاب استراتژی‌های کنترل مؤثر منجر شود. این استراتژی‌ها شامل فاصله‌گذاری مناسب، سیستم‌های خاموش‌کننده، حفاظت منفعل، و واکنش‌های اضطراری هماهنگ شده است که به‌طور مشترک احتمال وقوع آتش‌سوزی و شدت پیامدهای آن را کاهش می‌دهند این پژوهش اهمیت استفاده از یک سیستم مدیریت ریسک مبتنی بر عملکرد را برای مدیریت ایمنی مخازن ذخیره سوخت نشان می‌دهد و بیان می‌کند که انتخاب اقدامات کنترلی نباید صرفاً بر اساس الزامات مقرراتی، بلکه بر پایه ارزیابی هم‌زمان اثربخشی فنی، میزان کاهش ریسک و توجیه اقتصادی صورت گیرد [۱۸]. یانگ هوانگ و همکاران در پژوهشی به توسعه و تکنولوژی فعال خاموش‌کننده آتش با گاز بی‌اثر برای حریق‌های اولیه در مخازن ذخیره سوخت می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که تزریق هدفمند گازهای بی‌اثر مانند دی اکسید کربن می‌تواند با کاهش اکسیژن و سرمایش مستقیم، زمان خاموشی آتش را کوتاه‌تر کرده و پیامدهای حرارتی را کاهش دهد مخصوصاً، در مراحل اولیه آتش‌سوزی که سیستم‌های سنتی مؤثر نیستند. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سامانه‌های فعال اطفای حریق مبتنی بر گازهای بی‌اثر می‌تواند به‌عنوان یک لایه حفاظتی کاهنده^۲ نقش مهمی در کنترل سریع آتش‌سوزی‌های اولیه مخازن ذخیره سوخت ایفا کند [۱۹]. ژاکیان لی و همکاران در پژوهشی به‌طور آزمایشی و تحلیلی کارایی انواع فوم‌های آتش‌نشانی در خاموش کردن آتش‌های سطحی مخازن را بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب فوم‌ها و انتخاب نوع مناسب آن‌ها می‌تواند اثربخشی اطفای حریق را افزایش داده،

¹ Bayesian Network² Mitigative Barrier

زمان خاموشی را کاهش دهد و احتمال شعله‌ور شدن مجدد آتش را پایین آورد. این مقاله برای تحلیل مهارت انتخاب و تنظیم سیستم‌های فوم در مخازن نفتی بسیار کاربردی است. این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب نوع مناسب فوم و طراحی صحیح سامانه اطفای حریق، یکی از مهم‌ترین لایه‌های حفاظتی کاهنده در مدیریت ریسک آتش‌سوزی مخازن ذخیره سوخت است. افزایش سرعت خاموش‌سازی، کاهش تابش حرارتی و جلوگیری از شعله‌ور شدن مجدد، می‌تواند احتمال گسترش حریق و وقوع اثر دومینویی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد [۲۰].

مرور مطالعات پیشین نشان داد که اگرچه تحقیقات متعددی در زمینه ارزیابی ریسک مخازن ذخیره‌سازی سوخت و کاربرد روش Bow-Tie در صنایع فرایندی انجام شده است، اما هنوز خلأهایی در این حوزه وجود دارد. بخش عمده مطالعات منتشرشده بر شناسایی مخاطرات، تحلیل کیفی سناریوهای حادثه یا توسعه مدل‌های روش‌شناختی متمرکز بوده‌اند و کمتر به تحلیل جامع آتش‌سوزی مخازن ذخیره‌سازی گازوئیل در نیروگاه‌های برق پرداخته‌اند. همچنین، در بسیاری از این پژوهش‌ها ارتباط نظام‌مند میان تهدیدها، رویدادهای میانی، لایه‌های حفاظتی و پیامدهای حادثه به‌صورت یکپارچه بررسی نشده و اولویت‌بندی اقدامات کنترلی نیز کمتر بر مبنای نتایج ساختاریافته تحلیل Bow-Tie انجام گرفته است. بر این اساس، پژوهش حاضر تلاش می‌کند بخشی از این خلأ علمی را با به‌کارگیری تکنیک Bow-Tie در ارزیابی ریسک آتش‌سوزی مخازن ذخیره‌سازی گازوئیل نیروگاه‌های برق مشهد برطرف کند. در این مطالعه، ضمن شناسایی مخاطره، تهدیدها، رویداد اصلی، رویدادهای میانی، موانع پیشگیرانه و کاهشی و پیامدهای آتش‌سوزی، ارتباط میان این اجزا در قالب یک مدل منسجم تحلیل شده و اقدامات کنترلی بر اساس نتایج حاصل از تحلیل ریسک اولویت‌بندی می‌شوند. نوآوری این پژوهش در کاربرد نظام‌مند تکنیک Bow-Tie برای تحلیل سناریوی آتش‌سوزی مخازن ذخیره‌سازی گازوئیل در نیروگاه‌های برق، استخراج ساختاریافته مسیرهای وقوع حادثه، شناسایی موانع کنترلی مؤثر و ارائه چارچوبی برای اولویت‌بندی اقدامات کنترلی متناسب با شرایط بهره‌برداری نیروگاه‌های مورد مطالعه است. این رویکرد، علاوه بر ارائه تصویری جامع از مسیرهای توسعه حادثه، می‌تواند اطلاعات کاربردی موردنیاز مدیران، متخصصان HSE و بهره‌برداران نیروگاه را برای تصمیم‌گیری در زمینه کاهش ریسک فراهم سازد. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی ریسک آتش‌سوزی مخازن ذخیره‌سازی گازوئیل نیروگاه‌های برق مشهد با استفاده از تکنیک Bow-Tie، شناسایی مهم‌ترین تهدیدها، رویدادهای میانی، موانع کنترلی و پیامدهای حادثه و در نهایت ارائه و اولویت‌بندی اقدامات کنترلی مؤثر به‌منظور ارتقای ایمنی و کاهش ریسک آتش‌سوزی است. با توجه به اهمیت ایمنی مخازن ذخیره‌سازی سوخت در پایداری تولید برق و پیامدهای گسترده حوادث آتش‌سوزی، انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند علاوه بر توسعه دانش مدیریت ریسک در صنایع انرژی، مبنایی برای بهبود برنامه‌های مدیریت ایمنی، افزایش اثربخشی لایه‌های حفاظتی و ارتقای فرآیند تصمیم‌گیری در نیروگاه‌های برق فراهم آورد.

روش شناسی

این پژوهش از نوع کاربردی و با رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام شد و با هدف ارزیابی کیفی ریسک آتش‌سوزی مخازن ذخیره گازوئیل در نیروگاه‌های برق شهر مشهد با استفاده از روش Bow-Tie طراحی شد. در ابتدا اطلاعات موردنیاز از طریق بازدیدهای میدانی از مخازن گازوئیل نیروگاه‌های مورد مطالعه، بررسی مدارک و مستندات فنی، دستورالعمل‌های بهره‌برداری، گزارش‌های حوادث و شبه‌حوادث، دستورالعمل‌های ایمنی و مصاحبه با کارشناسان HSE، بهره‌برداری و تعمیرات جمع‌آوری شد. همچنین منابع علمی معتبر و استانداردهای مرتبط با مدیریت ریسک و ایمنی فرایند به‌منظور تکمیل اطلاعات مورد استفاده قرار گرفتند.

پس از بررسی اطلاعات جمع‌آوری شده و برگزاری جلسات کارشناسی، مخاطرات مرتبط با مخازن ذخیره گازوئیل شناسایی شدند. سپس بر اساس فراوانی وقوع، شدت پیامدها و نظر خبرگان، آتش سوزی مخازن به عنوان یکی از رویدادهای اصلی مهم که می‌تواند منجر به بروز پیامدهای ناخواسته شود، شناسایی شد. در مرحله بعد، با استفاده از روش تحلیل درخت خطا، تمامی علل بالقوه وقوع رویداد اصلی شناسایی و به صورت سلسله‌مراتبی سازمان‌دهی شدند. پس از تعیین رویداد اصلی، پیامدهای احتمالی ناشی از وقوع آن با استفاده از روش تحلیل درخت رویداد مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله، عملکرد یا عدم عملکرد لایه‌های حفاظتی موجود بررسی شد و پیامدهایی نظیر آتش‌سوزی محدود، آتش‌سوزی گسترده، انفجار، خسارات مالی، آسیب به کارکنان و آلودگی محیط‌زیست تعیین شد. پس از تکمیل دو بخش درخت خطا و درخت رویداد، موانع کنترلی موجود و پیشنهادی تعیین شدند. موانع پیشگیرانه با هدف جلوگیری از وقوع رویداد اصلی و موانع کاهنده با هدف کاهش شدت پیامدهای حادثه شناسایی و در نمودار Bow-Tie جانمایی شدند. این موانع شامل اقدامات مهندسی، مدیریتی، بازرسی و نگهداری، آموزش کارکنان، سیستم‌های اعلام و اطفای حریق و برنامه‌های واکنش در شرایط اضطراری بودند. در مرحله بعد، با ادغام نتایج حاصل از تحلیل درخت خطا و تحلیل درخت رویداد، نمودار Bow-Tie برای سناریوی منتخب با استفاده از نرم‌افزار Bow Tie XP ترسیم شد. این نرم‌افزار با یکپارچه‌سازی نتایج حاصل از FTA و ETA، نمودار نهایی Bow-Tie را تولید کرد و ارتباط منطقی میان تهدیدها، رویداد اصلی، پیامدها و لایه‌های حفاظتی را نمایش داد. خروجی نرم‌افزار برای بررسی کامل بودن مسیرهای وقوع حادثه، ارزیابی کفایت موانع پیشگیرانه و کاهنده، شناسایی نقاط ضعف سیستم ایمنی و تدوین اقدامات اصلاحی مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل نهایی بر اساس نمودارهای تولیدشده توسط نرم‌افزار و قضاوت تخصصی تیم پژوهش و خبرگان انجام شد. در پایان، بر اساس نتایج حاصل از تحلیل Bow-Tie، اقدامات کنترلی پیشنهادی با توجه به نقش آن‌ها در حذف یا کاهش علل ریشه‌ای، افزایش اثربخشی موانع پیشگیرانه و کاهش شدت پیامدهای احتمالی اولویت‌بندی شدند. این اولویت‌بندی با اتکا به نظر خبرگان، تعداد تکرار و میزان اثربخشی هر اقدام در کاهش ریسک انجام شد.

معرفی نمونه مورد ارزیابی

شهر مشهد دارای چهار نیروگاه برق شامل مشهد، شریعتی، طوس و فردوسی است که سوخت اصلی آن‌ها گاز طبیعی بوده و برای مصارف پشتیبان یا عملیاتی از سوخت‌های مایع شامل گازوئیل و در برخی موارد مازوت استفاده می‌شود. با توجه به هدف پژوهش، دامنه مطالعه صرفاً به مخازن ذخیره گازوئیل محدود شد. پس از بررسی اولیه مشخصات فنی و فرآیندهای بهره‌برداری، یک نیروگاه به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. معیارهای انتخاب شامل دسترسی به اطلاعات فنی و سوابق بازرسی، امکان انجام بازدیدهای میدانی، همکاری واحدهای بهره‌برداری و HSE و نماینده بودن از نظر نوع مخازن، فرآیند ذخیره‌سازی و شرایط بهره‌برداری نسبت به سایر نیروگاه‌های مورد بررسی بود. مخازن مورد مطالعه از نوع فلزی با سقف ثابت بوده و از نظر ظرفیت، فرآیند دریافت و انتقال سوخت، تجهیزات اصلی و الزامات بهره‌برداری با سایر مخازن مشابهت داشتند. عملیات دریافت سوخت از طریق تانکرهای جاده‌ای، سکوی آلودینگ، پمپ‌های انتقال و خطوط لوله انجام می‌شود و در طی آن، ملاحظات ایمنی از جمله ارتینگ خودرو، کنترل منابع اشتعال، بازرسی اتصالات و رعایت دستورالعمل‌های عملیاتی اعمال می‌شود. همچنین مشخصات فنی مخازن، سامانه‌های ایمنی موجود شامل سیستم‌های اعلام و اطفای حریق، دیواره حائل، سامانه ارتینگ و سایر موانع کنترلی موجود، به همراه ویژگی‌های محیطی و جانمایی نظیر دسترسی تجهیزات آتش‌نشانی، فاصله از تأسیسات مجاور و مسیرهای اضطراری، در ارزیابی لحاظ شد. لازم به ذکر است که موانع کنترلی موجود از اقدامات اصلاحی پیشنهادی حاصل از تحلیل Bow-Tie به طور کامل تفکیک شده‌اند. از این رو، نتایج این مطالعه در چارچوب یک مطالعه موردی تفسیر شده و قابلیت

استفاده برای نیروگاه‌هایی را دارد که از نظر مشخصات فنی، شرایط بهره‌برداری و سامانه‌های ذخیره‌سازی دارای ویژگی‌های مشابه باشند.

جدول ۱- مشخصات فنی مخازن موجود

Table 1- Technical specifications of the available tanks

Tank number	Material and type of the tank	Capacity of the tank	Fixed foam system	Cooling system	Fire hydrant	Dike wall
1	Metal fixed-roof	10 million liters	Manual	Available	foam	Available
2	Metal fixed-roof	10 million liters	Manual	Available	foam	Available
3	Metal fixed-roof	15 million liters	Automatic	Available	Water	Available
4	Metal fixed-roof	15 million liters	Automatic	Available	Water	Available

یافته‌ها

بررسی نتایج تحلیل درخت خطا، تحلیل درخت رویداد و مدل‌سازی Bow-Tie نشان داد که آتش‌سوزی مخازن ذخیره گازوئیل حاصل برهم‌کنش مجموعه‌ای از عوامل فنی، مدیریتی و انسانی است و نمی‌توان آن را به یک علت منفرد نسبت داد. تهدیدهای اصلی شامل افزایش دما، عوامل انسانی، ایجاد جرقه، وجود بخارات قابل اشتعال و پدیده‌های طبیعی پس از بازدیدهای میدانی، بررسی مستندات فنی، تحلیل سناریوهای خطر و اجماع تیم ارزیابی ریسک شناسایی و به دلیل پوشش تمامی مسیرهای اصلی منتهی به رویداد اصلی (Top Event) به‌عنوان تهدیدهای کلیدی انتخاب شدند. در میان آن‌ها، وجود بخارات قابل اشتعال، عوامل انسانی و افزایش دما بیشترین تعداد رویدادهای میانی و موانع کنترلی را به خود اختصاص دادند که بیانگر پیچیدگی بیشتر این سناریوها و نقش محوری آن‌ها در وقوع آتش‌سوزی است. همچنین نتایج نشان داد که بخش قابل توجهی از مسیرهای وقوع حادثه با ضعف در اجرای دستورالعمل‌های ایمنی، آموزش ناکافی، نظارت مدیریتی و برنامه‌های تعمیر و نگهداری پیشگیرانه ارتباط دارد و این موضوع اهمیت تقویت نظام مدیریت ایمنی را آشکار می‌سازد. در مقابل، موانع مهندسی نظیر سامانه‌های اعلام و اطفای حریق، سیستم‌های ارتینگ و باندینگ، حفاظت در برابر صاعقه، کنترل منابع اشتعال، پایش نشی و سایر تجهیزات ایمنی به‌عنوان لایه‌های دفاعی مکمل، نقش مهمی در پیشگیری از وقوع یا کاهش پیامدهای آتش‌سوزی دارند. در این پژوهش، انتخاب مهم‌ترین موانع کنترلی بر اساس نظر تیم خبرگان، میزان اثربخشی در کنترل سناریوهای خطر، قابلیت اجرا و انطباق با شرایط بهره‌برداری نیروگاه انجام شد و فراوانی تکرار اقدامات صرفاً به‌عنوان یک شاخص توصیفی گزارش شد، نه معیار نهایی اهمیت آن‌ها. در مجموع، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که کاهش ریسک آتش‌سوزی مخازن ذخیره گازوئیل مستلزم استقرار هم‌زمان موانع مدیریتی، انسانی و مهندسی در قالب یک رویکرد دفاع چندلایه^۱ است.

نتایج کلی مطالعات و نتایج بدست آمده از آنالیز و ارزیابی ریسک رویداد اصلی آتش‌سوزی مخازن گازوئیل نیروگاه‌های برق شهر مشهد توسط نرم‌افزار در شکل ۱ نشان داده شده است.

¹ Defence in Depth

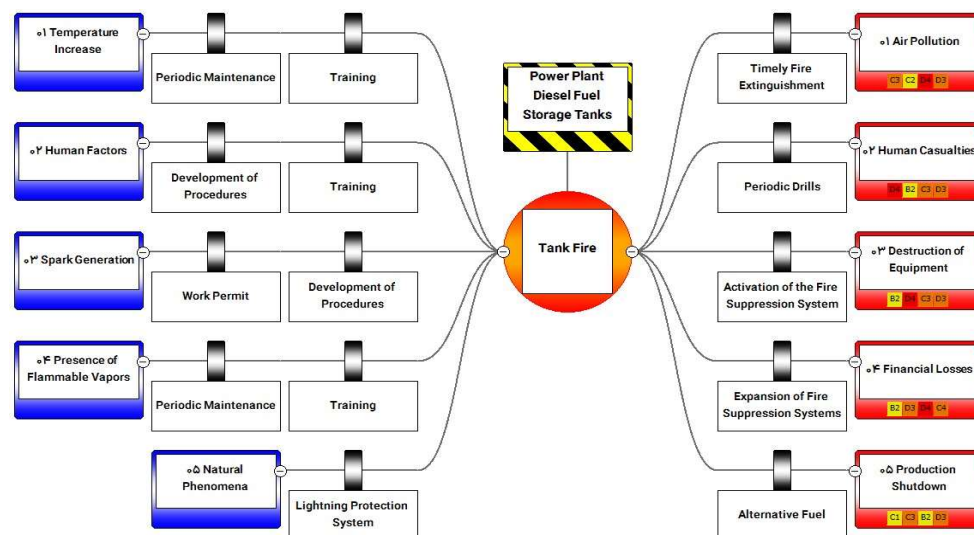


Figure 1- Bow-Tie Diagram of Fuel Storage Tank Fire

شکل ۱- دیاگرام Bow Tie آتش سوزی مخازن سوخت

سپس برای هریک از تهدیدهای شناسایی شده علل فرعی و رویدادهای میانی شناسایی و در نمودارهای جداگانه ترسیم شد. همچنین برای پیشگیری از بروز هریک از رویدادها اقدام کنترلی مناسب پیشنهاد شد. که در ادامه دیاگرام مربوط به هر کدام از تهدیدات اصلی به همراه رویدادهای میانی و اقدامات کنترلی پیشنهادی آورده شده است.

افزایش دما: نتایج تحلیل درخت خطا نشان داد که افزایش دما یکی از مهم‌ترین تهدیدهای آغازگر آتش‌سوزی مخازن گازوئیل است. در مجموع، ۲۰ رویداد میانی برای این تهدید شناسایی شد که بیانگر پیچیدگی سازوکارهای منجر به افزایش دمای مخزن است. از میان این رویدادها، آتش‌سوزی در مجاورت مخزن، نقص در عملکرد سیستم کنترل بخار بویلر کمکی، افزایش دمای محیط و برگشت گازهای داغ واحدهای گازی، نقش برجسته‌تری در ایجاد شرایط بحرانی دارند؛ زیرا هر یک می‌توانند به‌صورت مستقیم یا از طریق تشدید تنش حرارتی، احتمال رسیدن مخزن به شرایط مستعد آتش‌سوزی را افزایش دهند. بررسی رویدادهای میانی نشان داد که بخش قابل توجهی از عوامل شناسایی شده به ضعف در مدیریت ایمنی و نگهداری تجهیزات مربوط است. به‌طور مشخص، عدم رعایت دستورالعمل‌های ایمنی، نبود آموزش کافی کارکنان و اجرا نشدن برنامه‌های منظم سرویس و نگهداری، در شکل‌گیری بسیاری از رویدادهای میانی نقش مشترک دارند. این موضوع نشان می‌دهد که علاوه بر عوامل فنی، عوامل مدیریتی و انسانی نیز در کنترل این تهدید از اهمیت بالایی برخوردار هستند و بهبود عملکرد آن‌ها می‌تواند احتمال وقوع هم‌زمان چندین رویداد میانی را کاهش دهد. برای کنترل این تهدید، ۱۳ اقدام کنترلی پیشگیرانه پیشنهاد شد. بررسی اقدامات کنترلی نشان داد که آموزش مستمر کارکنان و اجرای برنامه‌های منظم سرویس و نگهداری، به دلیل تأثیر هم‌زمان بر چندین رویداد میانی، از بالاترین اولویت برخوردار هستند و نسبت به سایر اقدامات، نقش مؤثرتری در کاهش احتمال افزایش دمای مخزن ایفا می‌کنند. رویدادهای میانی و اقدامات کنترلی متناظر با آن‌ها در شکل ۲ ارائه شده است.

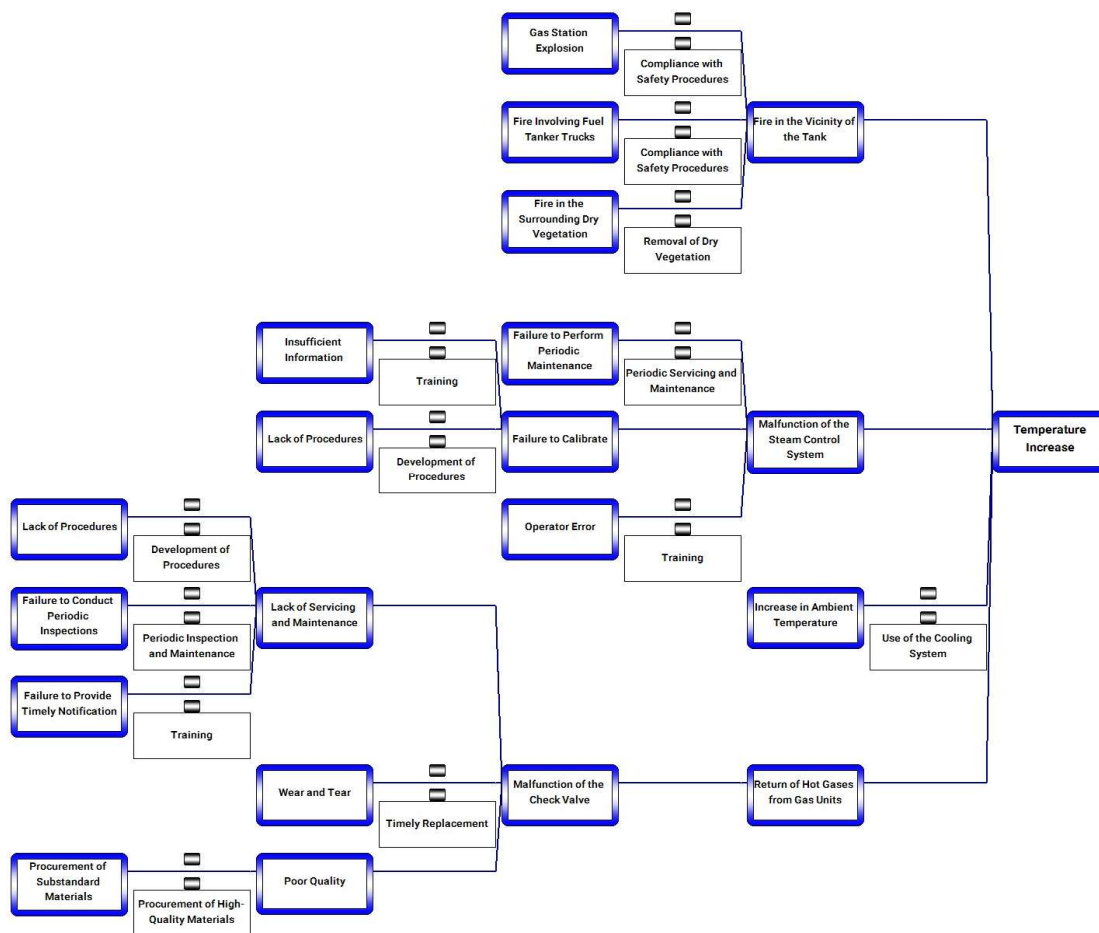


Figure 2- Diagram of the Causes of Temperature Increase in Fuel Storage Tanks

شکل ۲- دیاگرام علل افزایش دما مخازن سوخت

عوامل انسانی: نتایج تحلیل درخت خطا نشان داد که عوامل انسانی، دومین عامل اصلی در بروز آتش سوزی مخازن گازوئیل هستند و می‌توانند ناشی از خطاهای ناخواسته یا اقدامات عمدی باشند. برای این تهدید، ۲۱ رویداد میانی شناسایی شد که بیانگر پیچیدگی و گستردگی نقش انسان در شکل‌گیری این سناریو است. در میان خطاهای انسانی، عدم رعایت نکات ایمنی در هنگام تعمیرات، عدم استفاده از تجهیزات حفاظت فردی و عدم گاززدایی مخزن پیش از انجام عملیات، مهم‌ترین عوامل مؤثر در افزایش احتمال وقوع حادثه بودند. همچنین، در بخش عوامل عمدی، ایجاد شعله مستقیم و حملات نظامی به‌عنوان مهم‌ترین تهدیدهای بالقوه شناسایی شدند. تحلیل ساختار درخت خطا نشان داد که بخش عمده‌ای از رویدادهای میانی به ضعف در مدیریت ایمنی و کنترل‌های سازمانی مرتبط است. به‌طور مشخص، عدم رعایت دستورالعمل‌های ایمنی، نبود آموزش کافی، ضعف در نظارت و کنترل، کمبود تجهیزات مناسب و بی‌توجهی به اصول پدافند غیرعامل، بیشترین سهم را در ایجاد مسیرهای منتهی به این تهدید دارند. این یافته بیانگر آن است که کاهش ریسک ناشی از عوامل انسانی، بیش از هر چیز مستلزم تقویت فرهنگ ایمنی، ارتقای نظام‌های مدیریتی و افزایش اثربخشی کنترل‌های سازمانی است. برای کنترل این تهدید، ۱۴ اقدام کنترلی پیشگیرانه پیشنهاد شد. تحلیل موانع کنترلی نشان داد که آموزش مستمر کارکنان، تدوین و به‌روزرسانی دستورالعمل‌های اجرایی و ایمنی، تقویت نظام نظارت و پایش عملیات و رعایت الزامات پدافند غیرعامل، به دلیل تأثیرگذاری بر بخش قابل‌توجهی از علل ریشه‌ای و رویدادهای میانی، از مهم‌ترین و مؤثرترین موانع پیشگیرانه محسوب می‌شوند. شکل ۳، رویدادهای میانی مرتبط با عوامل انسانی و اقدامات کنترلی متناظر با هر یک را نشان می‌دهد.

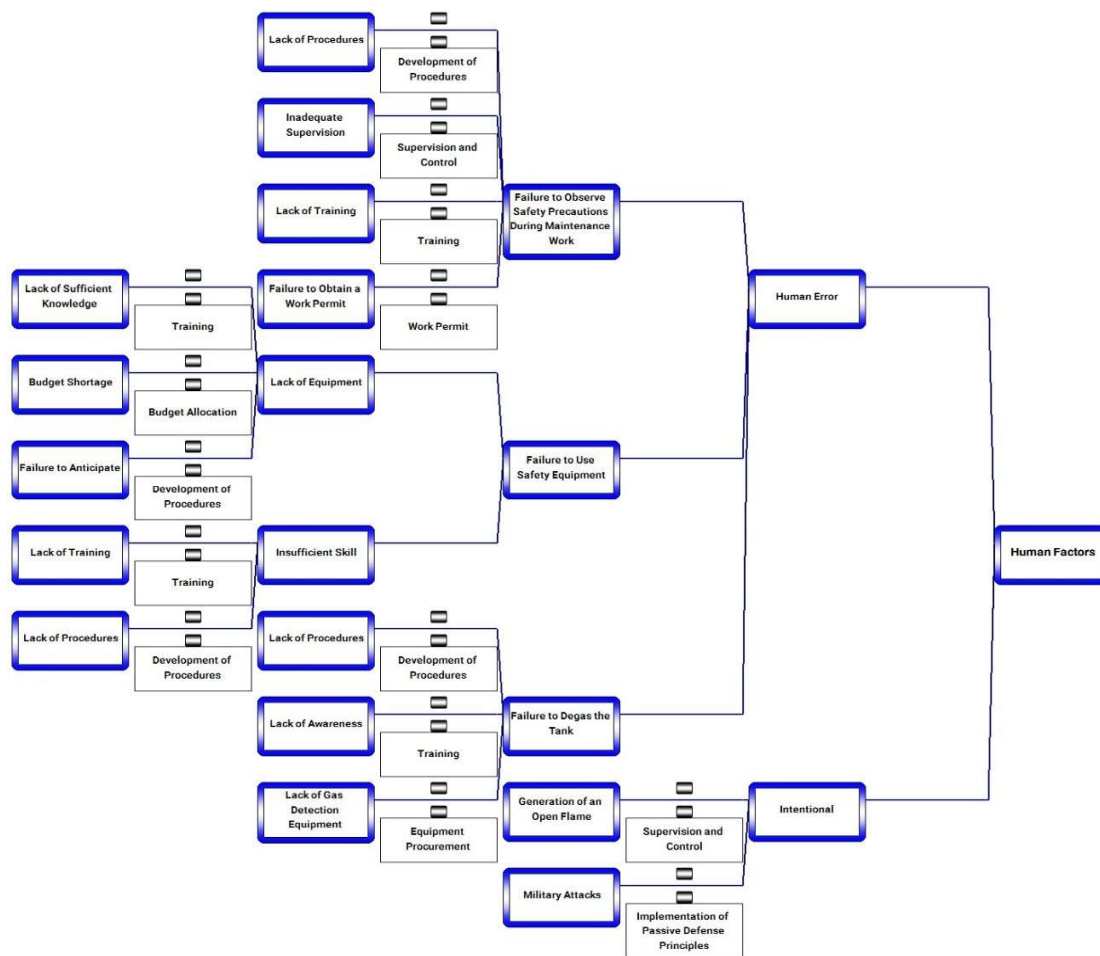
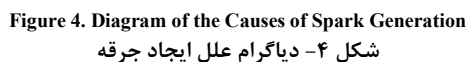


Figure 3- Diagram of the Causes of Human Factors Occurrence

شکل ۳- دیاگرام علل وقوع عوامل انسانی

ایجاد جرقه: نتایج این مطالعه نشان داد که ایجاد جرقه یکی از مهم‌ترین عوامل آغازکننده آتش‌سوزی در مخازن گازوئیل نیروگاه‌های برق است. نقش پررنگ فعالیت‌های تعمیراتی، به‌ویژه عملیات جوشکاری و برشکاری، استفاده از تجهیزات نامناسب و تجمع الکتریسیته ساکن بیانگر آن است که بخش قابل توجهی از ریسک آتش‌سوزی به فعالیت‌های عملیاتی و نگهداری وابسته است. این یافته نشان می‌دهد که در صورت عدم کنترل منابع بالقوه اشتعال، حتی در شرایطی که سایر عوامل خطر کنترل شده باشند، احتمال وقوع آتش‌سوزی همچنان بالا خواهد بود. از سوی دیگر، شناسایی عواملی نظیر نبود دستورالعمل‌های ایمنی، عدم اجرای نظام مجوز انجام کار، استفاده نکردن از تجهیزات و البسه ضد جرقه و آموزش ناکافی کارکنان نشان می‌دهد که بسیاری از علل ریشه‌ای ایجاد جرقه، منشأ مدیریتی و سازمانی دارند. این موضوع بیانگر آن است که ضعف در مدیریت ایمنی می‌تواند زمینه بروز خطاهای انسانی و در نهایت ایجاد منابع اشتعال را فراهم کند. بنابراین، کاهش ریسک تنها از طریق بهبود تجهیزات امکان‌پذیر نیست و استقرار نظام‌های مدیریتی مؤثر، آموزش مستمر کارکنان و نظارت بر اجرای الزامات ایمنی نیز ضروری است. بر این اساس، اقدامات کنترلی پیشگیرانه، از جمله تدوین و اجرای دستورالعمل‌های ایمنی، استقرار کامل نظام مجوز انجام کار، استفاده از تجهیزات و ابزارهای ضد جرقه، کنترل الکتریسیته ساکن و آموزش مستمر کارکنان، علاوه بر کاهش احتمال ایجاد جرقه، می‌توانند به‌عنوان موانع پیشگیرانه مؤثر در ساختار Bow-Tie عمل کرده و احتمال وقوع آتش‌سوزی در مخازن گازوئیل نیروگاه‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش دهند.



وجود بخارات قابل اشتعال: یافته‌های این مطالعه نشان داد که وجود بخارات قابل اشتعال یکی از مهم‌ترین پیش شرط‌های وقوع آتش‌سوزی در مخازن گازوئیل نیروگاه‌های برق است. نتایج بیانگر آن است که افزایش دما و فشار داخل مخزن، دو عامل اصلی در تشکیل اتمسفر قابل اشتعال هستند. نقش عواملی مانند نقص در عملکرد سیستم کنترل بخار بویلر کمکی، آتش‌سوزی در مجاورت مخزن، افزایش دمای محیط، برگشت گازهای داغ واحدهای گازی، پمپاژ سوخت به مخزن و انسداد ونت نشان می‌دهد که وقوع این شرایط حاصل برهم‌کنش هم‌زمان عوامل فنی، عملیاتی و محیطی است. این موضوع اهمیت پایش مستمر پارامترهای فرایندی و حفظ شرایط بهره‌برداری ایمن را در جلوگیری از تشکیل بخارات قابل اشتعال آشکار می‌کند. از سوی دیگر، شناسایی عواملی نظیر عدم انجام سرویس و نگهداری دوره‌ای تجهیزات، نبود یا عدم رعایت دستورالعمل‌های ایمنی، آموزش ناکافی کارکنان، استفاده نکردن به‌موقع از سیستم خنک‌کننده مخزن، نقص در عملکرد چکولو و انسداد ونت نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از این تهدید ناشی از ضعف در مدیریت یکپارچه ایمنی و نگهداری است. بنابراین، تشکیل بخارات قابل اشتعال صرفاً نتیجه تغییرات فیزیکی دما و فشار نیست، بلکه پیامد کاستی در اجرای برنامه‌های تعمیرات پیشگیرانه، بازرسی فنی و مدیریت عملیات نیز محسوب می‌شود. این یافته بیانگر آن است که استقرار یک نظام نگهداری پیشگیرانه و پایش وضعیت تجهیزات می‌تواند احتمال ایجاد شرایط خطرناک را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. بر این اساس، اقدامات کنترلی پیشنهادشده در این پژوهش، از جمله اجرای برنامه‌های منظم سرویس و نگهداری، پایش مستمر فشار و دمای مخزن، اطمینان از عملکرد صحیح سیستم‌های ونت و چکولو، استفاده به‌موقع از سیستم خنک‌کننده، تدوین و اجرای دستورالعمل‌های عملیاتی و آموزش مستمر کارکنان، می‌توانند به‌عنوان موانع پیشگیرانه مؤثر در مدل Bow-Tie عمل کرده و احتمال تشکیل بخارات قابل اشتعال و در نتیجه وقوع آتش‌سوزی در مخازن گازوئیل نیروگاه‌ها را به‌طور چشمگیری کاهش دهند.

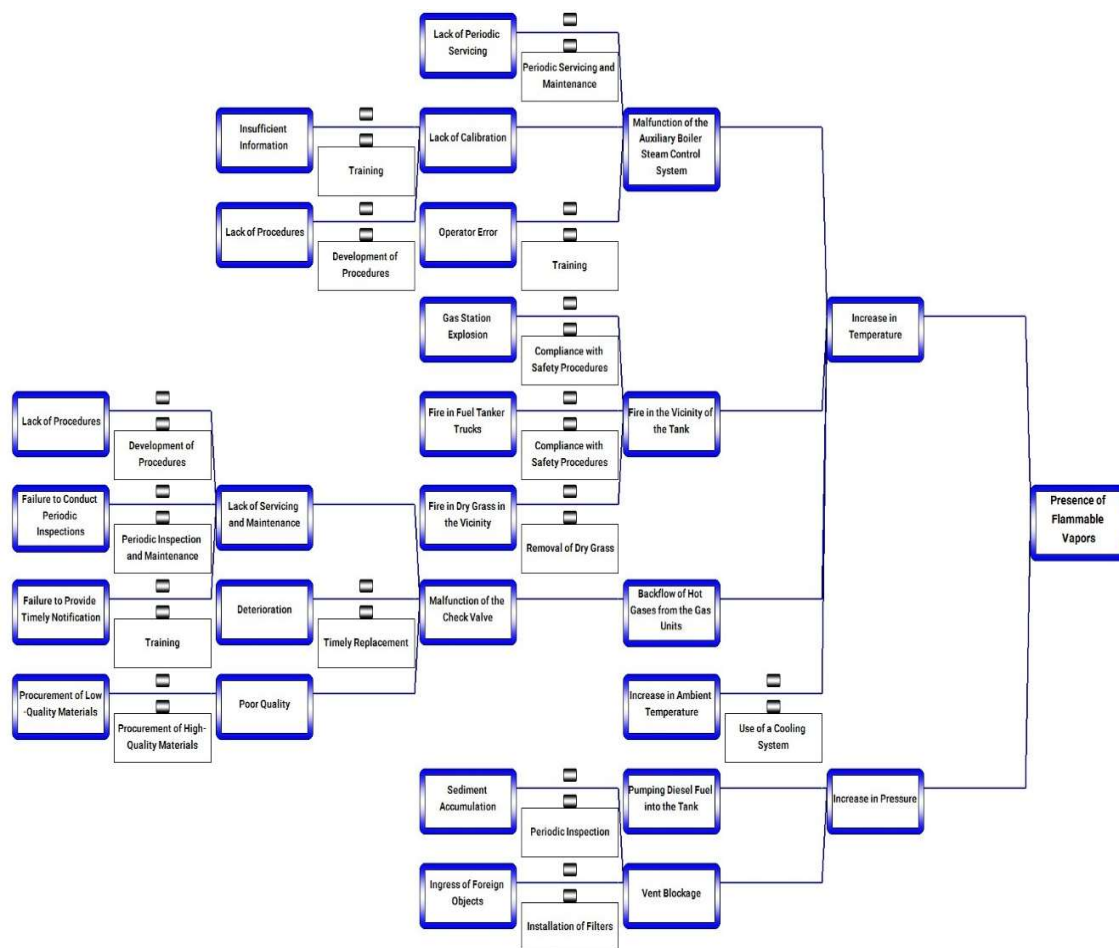


Figure 5- Diagram of the Causes of the Presence of Flammable Vapors

شکل ۵- دیاگرام علل وجود بخارات قابل اشتعال

پدیده‌های طبیعی: یافته‌های این مطالعه نشان داد که اگرچه پدیده‌های طبیعی در مقایسه با سایر عوامل، سهم کمتری در ایجاد آتش‌سوزی مخازن گازوئیل دارند، اما به دلیل غیرقابل کنترل بودن و توان بالای ایجاد منابع اشتعال، همچنان به‌عنوان یکی از علل مهم وقوع حریق باید مورد توجه قرار گیرند. در این پژوهش، صاعقه به‌عنوان مهم‌ترین عامل طبیعی مؤثر بر آتش‌سوزی مخازن شناسایی شد. در صورت برخورد مستقیم یا القای جریان الکتریکی به مخازن، به‌ویژه در شرایط وجود بخارات قابل اشتعال، احتمال ایجاد جرقه و آغاز حریق یا حتی انفجار به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. از این‌رو، هرچند احتمال وقوع این تهدید نسبت به عوامل عملیاتی و انسانی کمتر است، اما شدت پیامدهای آن می‌تواند بسیار بالا باشد. بر این اساس، نصب و نگهداری صحیح صاعقه‌گیر، همراه با بازرسی و آزمون دوره‌ای سیستم اتصال به زمین، می‌تواند به‌عنوان یک مانع پیشگیرانه مؤثر در مدل عمل‌کرد Bow-Tie و احتمال ایجاد جرقه ناشی از تخلیه الکتریکی اتمسفری را به حداقل برساند. علاوه بر این، ارزیابی دوره‌ای اثربخشی سیستم حفاظت در برابر صاعقه و انطباق آن با استانداردهای بین‌المللی، نقش مهمی در افزایش تاب‌آوری مخازن گازوئیل و کاهش ریسک آتش‌سوزی ایفا می‌کند.

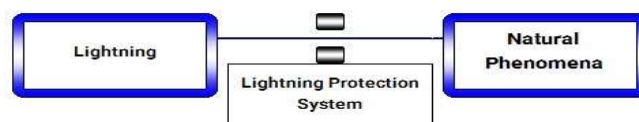


Figure 6- Diagram of the Causes of Natural Phenomena

شکل ۶- دیاگرام علل وقوع پدیده‌های طبیعی

تعداد اقدامات کنترلی برای هر یک از تهدیدها به صورت خلاصه در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲- اقدامات کنترلی جهت پیشگیری از وقوع هر تهدید

Table 2- Control Measures for Preventing the Occurrence of Each Threat

Priority	Threat	Barrier	Number of Measures
1	Temperature Increase	Training	3
		Periodic Maintenance	2
		Development of Guidelines	2
		Compliance with Safety Guidelines	2
		Removal of Dry Grass	1
		Use of Cooling System	1
		Timely Replacement of Components	1
		Procurement of High-Quality Materials	1
2	Human Factors	Training	4
		Development of Guidelines	4
		Monitoring and Control	2
		Work Permit	1
		Budget Allocation	1
		Equipment Procurement	1
3	Spark Generation	Passive Defense	1
		Development of Guidelines	3
		Work Permit	2
		Equipment Procurement	1
		Training	1
		Grounding System Inspection	1
4	Presence of Flammable Vapors	Use of Anti-Static Clothing	1
		Periodic Maintenance	3
		Training	3
		Development of Guidelines	2
		Compliance with Safety Guidelines	2
		Removal of Dry Grass	1
		Timely Replacement of Components	1
		Filter Installation	1
5	Natural Phenomena	Use of Cooling System	1
		Procurement of High-Quality Materials	1
		Lightning Rod Installation	1

با بررسی نتایج بدست آمده، اقدامات کنترلی جهت پیشگیری از آتش سوزی مخازن گازوئیل نیروگاه‌های برق به ترتیب اولویت عبارتند از: تدوین و رعایت دستورالعمل‌های ایمنی ۱۵ مورد، آموزش ۱۱ مورد، سرویس و نگهداری دوره‌ای ۵ مورد، مجوز انجام کار ۳ مورد، هرس کردن علف‌های خشک ۲ مورد، استفاده از سیستم کولینگ ۲ مورد، تعویض به موقع قطعات ۲ مورد، خرید جنس مرغوب ۲ مورد، نظارت و کنترل ۲ مورد، خرید تجهیزات ۲ مورد، تخصیص بودجه ۱ مورد، بازدید سیستم ارت ۱ مورد، استفاده از البسه ضد الکتریسیته ۱ مورد، نصب فیلتر ۱ مورد، نصب صاعقه‌گیر ۱ مورد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با استفاده از رویکرد کیفی تحلیل Bow-Tie، سناریوهای آتش سوزی مخازن ذخیره گازوئیل را در یک نیروگاه منتخب به‌عنوان مطالعه موردی ارزیابی کرد. نتایج نشان داد که این روش، با ترکیب تحلیل درخت خطا و درخت رویداد، امکان

شناسایی نظام‌مند تهدیدها، رویداد اصلی، پیامدها و موانع کنترلی را فراهم کرده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر برای حمایت از تصمیم‌گیری در مدیریت ریسک فرایند مورد استفاده قرار گیرد.

بر اساس تحلیل انجام‌شده، پنج تهدید اصلی و پنج پیامد عمده برای سناریوی آتش‌سوزی مخازن شناسایی شد. بررسی مسیرهای وقوع حادثه نشان داد که بخش قابل توجهی از رویدادهای میانی با عوامل انسانی و مدیریتی، از جمله ضعف در اجرای دستورالعمل‌های ایمنی، آموزش ناکافی، کاستی در برنامه‌های تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه و نظارت ناکافی ارتباط دارند. این نتیجه بر پایه تحلیل سناریوهای خطر، فراوانی رویدادهای میانی و نظر تیم خبرگان حاصل شد و بیانگر نقش محوری عوامل انسانی و مدیریتی در شکل‌گیری و کنترل ریسک است.

در مجموع، ۵۲ مانع کنترلی پیشگیرانه و ۵ اقدام کاهشی برای کاهش پیامدهای آتش‌سوزی شناسایی شد. بررسی فراوانی و کاربرد این موانع در سناریوهای مختلف نشان داد که اجرای دستورالعمل‌های ایمنی، آموزش کارکنان و تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه از پرکاربردترین اقدامات کنترلی هستند، با این حال، این موضوع به‌تنهایی به معنای برتری مطلق آن‌ها نبوده و اثربخشی هر مانع باید متناسب با سناریوی خطر، شدت پیامد، قابلیت اطمینان و امکان اجرای آن ارزیابی شود. همچنین، استفاده از موانع مهندسی نظیر سامانه‌های ثابت اطفای حریق، سامانه‌های تشخیص و اعلام حریق، ارتینگ و باندینگ، پایش نشتی و برنامه‌های واکنش اضطراری، نقش مهمی در کاهش احتمال وقوع یا محدودسازی پیامدهای حادثه دارد. با توجه به اینکه این پژوهش به‌صورت مطالعه موردی در یک نیروگاه انجام شده است، تعمیم مستقیم نتایج به تمامی نیروگاه‌ها باید با احتیاط صورت گیرد. با این وجود، به دلیل شباهت طراحی مخازن، فرآیند ذخیره‌سازی سوخت و اصول بهره‌برداری، یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان چارچوبی برای ارزیابی و مدیریت ریسک در نیروگاه‌های دارای ویژگی‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد. از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به انجام مطالعه در یک نمونه، ماهیت کیفی ارزیابی، اتکا به قضاوت خبرگان در شناسایی سناریوها و موانع کنترلی و نبود داده‌های کمی برای محاسبه احتمال وقوع و ریسک باقیمانده اشاره کرد.

پیشنهاد پژوهش‌های آینده

با توجه به محدودیت‌های پژوهش حاضر، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از رویکردهای کمی و نیمه کمی برای برآورد احتمال وقوع سناریوهای آتش سوزی و محاسبه سطح ریسک استفاده شود. همچنین انجام تحلیل هزینه-فایده موانع کنترلی، ارزیابی ریسک باقیمانده پس از استقرار موانع، مدل سازی پیامدهای حرارتی و گسترش آتش با استفاده از نرم افزارهای تخصصی، و اجرای مطالعات مقایسه‌ای در چند نیروگاه با ویژگی‌های فنی و عملیاتی متفاوت، می‌تواند به افزایش دقت نتایج، بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی و ارتقای قابلیت تعمیم یافته‌ها کمک کند.

تشکر و قدردانی

در پایان از مدیریت محترم نیروگاه برق شریعتی مشهد و کارکنان واحدهای HSE، بهره برداری، مهندسی، شیمی، تعمیرات به سبب همکاری در تدوین مطالعه نهایت تقدیر و تشکر بعمل می‌آید.

ملاحظات اخلاقی

در پژوهش حاضر تمام ملاحظات اخلاقی و حفظ محرمانگی اطلاعات رعایت شده است و مقاله بخشی از پایان نامه مقطع دکتری با کد ۱۳۴۴۸۷۲۲۹۶۵۸۸۷۳۵۵۰۳۶۱۶۲۸۱۱۶۵۸ در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران است.

References

- [1] American Petroleum Institute. API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage. 13th ed. Washington, DC: API; 2020

- [2] National Fire Protection Association. NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code. 2021 ed. Quincy (MA): National Fire Protection Association; 2021.
- [3] Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Risk Based Process Safety. 2nd ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2018.
- [4] Center for Chemical Process Safety. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. 4th ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2022.
- [5] National Fire Protection Association. NFPA 850: Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations. 2025 ed. Quincy (MA): National Fire Protection Association; 2025.
- [6] Mannan S, editor. Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2012.
- [7] Centre for Chemical Process Safety (CCPS). Bow Ties in Risk Management: A Concept Book for Process Safety. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2018.
- [8] International Electrotechnical Commission. IEC 31010:2019. Risk management—Risk assessment techniques. Geneva: International Electrotechnical Commission; 2019
- [9] Centre for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. 3rd ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2008.
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC 60812:2018. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). Geneva: International Electrotechnical Commission; 2018
- [11] Centre for Chemical Process Safety (CCPS). Layer of Protection Analysis: Simplified Process Risk Assessment. New York: American Institute of Chemical Engineers; 2001.
- [12] Doregar Zavareh R, Dana T, Roayaei E, Monavari SM, Jozi SA. The environmental risk assessment of fire and explosion in storage tanks of petroleum products. Sustainability. 2022;14(17):10747. “(in Persian)”
- [13] Fuentes-Bargues JL, González-Cruz MC, González-Gaya C, Baixauli-Pérez MP. Risk analysis of a fuel storage terminal using HAZOP and FTA. Int J Environ Res Public Health. 2017;14(7):705. doi:10.3390/ijerph14070705
- [14] Seo D, Nam S, Cho Y, Lee K, Kim E, Lee B. An empirical study on the fire behavior and emergency response technique in gasoline storage tank. J Loss Prev Process Ind. 2026;99:105792. doi:10.1016/j.jlp.2025.105792.
- [15] Leite RM, Centeno FR. Effect of tank diameter on thermal behavior of gasoline and diesel storage tanks fires. J Hazard Mater. 2018;342:544-552. doi:10.1016/j.jhazmat. 2017.08.052
- [16] Djemai Z, Aissani N, Bekrar A, Lounis Z. Risk analysis of petroleum storage tank based on uncertain data incorporated into mapped Bow-tie to Bayesian network. Process Saf Environ Prot. 2024;190:1202-1221. doi:10.1016/j.psep.2024.07.114
- [17] Sarebanzadeh K, Hasheminejad N, Alimohammadlou M, Es'haghi M. Using fuzzy cognitive map in bow tie method for dynamic risk assessment of spherical storage tanks: A case study. Heliyon. 2024;10(5). “(in Persian)”
- [18] Crippa C, Fiorentini L, Rossini V, Stefanelli R, Tafaro S, Marchi M, et al. Fire risk management system for safe operation of large atmospheric storage tanks. J Loss Prev Process Ind. 2009;22(5):574-581.
- [19] Huang Y, Tao A, Lu H, Wang L. Research on inert gas active fire extinguishing technology for storage tank initial pool fire. Process Saf Prog. 2025;44(4):694-703. doi:10.1002/prs.70029.
- [20] Li Z, Zhu H, Qiu F, Zhao J, Tian C. Experiment study on the effectiveness of various and mixed kinds of low expansion foam of 120# gasoline pool fire suppression. Fire. 2023;6(3):121.