JOHE
Journal of Occupational Hygiene Engineering
J Occup Hyg Eng, 2025; 12(4): 279-293 Doi: 10.53208/joohe.12.4.279
https://johe.umsha.ac.ir

Original Aticle

Risk Assessment of Fuel Storage Tanks in Power Plants of Mashhad, Iran, Using the Bowtie Method with Emphasis on Key Control Measures

Meysam Rezaei[1], Zahra Abedi[1*], Hanieh Nikoomaram[1], Farzam Babaei[1]

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

Article history:
Received: April 21, 2026
Revised: June 29, 2026
Accepted: July 13, 2026
ePublished: July 28, 2026

***Corresponding author:** Zahra Abedi, Department of Environmental Management, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment, SR.C, Islamic Azad University, Tehran, Iran

E-mail: Z.abedi123@iau.ac.ir

Abstract

Background and Objective: Fuel storage tanks are among the major hazard sources in power plants, posing significant risks to personnel, equipment, and the environment. Therefore, identification and assessment of the associated safety and environmental risks, together with implementation of appropriate control measures to reduce the likelihood and consequences of accidents, is of paramount importance.

Materials and Methods: In this study, fuel leakage from diesel storage tanks was analyzed as a critical top event in power plants. Initially, the most significant causes leading to the occurrence of the top event were identified and evaluated using the Fault Tree Analysis method. Subsequently, the potential consequences resulting from the occurrence of the top event were predicted through the application of the Event Tree Analysis technique. Moreover, the most important control measures aimed at preventing fuel leakage and mitigating its consequences were identified and recommended according to their priority.

Results: Overall, five principal threats, together with 87 intermediate events, were identified as contributing factors to fuel leakage from diesel storage tanks in power plants. In addition, 49 control measures aimed at preventing the occurrence of fuel leakage were identified and proposed.

Conclusion: Based on the analysis of the results and the constructed diagrams, it was determined that the most important control measures for preventing fuel leakage from diesel storage tanks, in order of priority, include periodic inspection and maintenance, development of safety procedures, and the provision of relevant training programs.

Keywords: Control Measures, Diesel Fuel Tanks, Power Plant, Risk Assessment

Please cite this article as follows: Rezaei M, Abedi Z, Nikoomaram H, Babaei F. Risk Assessment of Fuel Storage Tanks in Power Plants of Mashhad, Iran, Using the Bowtie Method with Emphasis on Key Control Measures. J Occup Hyg Eng. 2025; 12(4): 279-293. DOI: 10.53208/joohe.12.4.279

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

Copyright © 2025 Journal of Occupational Hygiene Engineering. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

Extended Abstract

Background and Objective

Electrical power generation is a critical infrastructure, and reliable plant operation depends on safe management of fuel storage systems. Diesel storage tanks provide reserve fuel during peak demand, supply interruptions, and emergencies, but they also create important safety, environmental, operational, and economic hazards. Leakage can arise from human error, corrosion, equipment defects, inadequate maintenance, overflow, or external damage and may lead to pollution, fire, damage to nearby facilities, fuel loss, and interruption of production. The Bow-Tie method is useful because it integrates the causes of a critical event, preventive barriers, potential consequences, and mitigation measures within one visual framework. Previous assessments have often identified hazards without clearly prioritizing the most appropriate controls for each causal pathway. This study therefore aimed to assess and manage the risks associated with diesel storage tanks in power plants in Mashhad, Iran, using the Bow-Tie method, with emphasis on identifying and prioritizing effective control measures for major threats and consequences.

Materials and Methods

This descriptive-analytical study qualitatively evaluated factors contributing to fuel leakage from diesel storage tanks and the consequences that could follow. Mashhad has four power plants, and because their diesel tanks and storage processes were similar, detailed assessment was performed on one representative facility. The tanks were fixed-roof steel tanks with capacities of approximately 10, 15, and 20 million liters.

Fuel leakage was selected by expert judgment as the top event. A multidisciplinary team was formed from operation, maintenance, safety, firefighting, and management personnel. Information was collected through field inspections, incident records, technical documentation, operating procedures, and expert consultation sessions. Fault Tree Analysis was used to identify the principal threats, root causes, and intermediate events leading to leakage. Event Tree Analysis was then used to evaluate post-leakage scenarios according to the performance or failure of existing protective barriers. The two analyses were integrated into a Bow-Tie diagram using BowTieXP software. Preventive measures were placed on the causal side of the diagram and mitigative measures on the consequence side. The proposed controls were subsequently prioritized according to their recurrence and practical importance across the identified scenarios.

Results

Five major threats were identified: human error, defects in fittings and associated equipment, corrosion and reduction in tank-wall thickness, fuel overflow, and physical damage to the tank. Across these categories, 87 intermediate events were identified.

Human error accounted for 9 intermediate events, including mistakes during tank filling and valve operation, often associated with fatigue or inadequate training. Seven preventive measures were proposed, particularly development of procedures, training, and adequate staffing. Defects in fittings and equipment represented the largest threat category, with 32 intermediate events. Important contributors included valve malfunction, pipe and flange damage, blocked vents, excessive force during operation, corrosion, and inadequate servicing. Fourteen controls were proposed, including periodic maintenance, anti-corrosion coating, training, and initial fuel testing.

Corrosion and reduced tank-wall thickness accounted for 27 intermediate events. Moisture accumulation, loss of protective coating, fuel impurities, sludge deposition, unsuitable drainage or foundation conditions, inadequate cleaning, weak contractor performance, and poor supervision were important contributors. Fourteen control measures were suggested, especially regular maintenance, structural correction, procedures, training, and supervision. Fuel overflow was associated with 10 intermediate events, including level-gauge failure, failure to stop pumping, poor calibration, absence of automatic shutoff, and human error. Eight preventive measures were recommended, including periodic calibration, automatic cutoff systems, servicing, timely replacement of defective equipment, and training. Tank damage accounted for 9 intermediate events and included natural hazards, external impact, deliberate damage, and insufficient preventive planning. Six controls were recommended, including passive-defense measures, supervision, earthquake-resistant foundations, flood barriers, protective fencing, and training.

Overall, 49 preventive control measures were identified. Periodic inspection and maintenance ranked first with 9 occurrences, development of operational and safety procedures ranked second with 8 occurrences, and training ranked third with 7 occurrences. Event-tree analysis identified five major consequences of leakage: environmental pollution, fuel loss, generation of flammable vapors, damage to adjacent facilities, and pool fire.

Discussion

The findings show that diesel-tank leakage is produced by an interacting network of human, technical, maintenance, and organizational deficiencies rather than a single failure mode. Although human error was prominent, equipment defects and corrosion were also major contributors, indicating that prevention cannot rely only on worker behavior. Risk reduction requires coordinated technical and managerial measures.

The frequent appearance of maintenance-related causes explains why periodic inspection and maintenance became the highest-priority control measure. Aging equipment, deteriorated connections, valve malfunction, coating failure, and reduced reliability repeatedly appeared in the causal pathways. The high frequency of missing procedures and inadequate training also points to weaknesses in maintenance management and safety culture. Clear operating instructions, competency-based training, adequate supervision, and reliable maintenance can reduce variability in operator performance and improve the

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

consistency of filling, valve operation, inspection, and emergency response.

The identified consequences further demonstrate the need for rapid detection and containment. Environmental contamination and fuel loss can create major economic and ecological damage, while flammable vapor formation and pool fire can escalate leakage into a severe accident affecting workers and nearby facilities. Preventive controls should therefore be complemented by mitigation measures such as leak containment, reliable firefighting equipment, emergency shutdown arrangements, physical tank protection, and effective drainage.

The Bow-Tie approach provided an integrated view of the pathways from threats to leakage and from leakage to consequences. By linking barriers to specific threats and outcomes, it supports practical prioritization and helps reveal where controls are absent or repeatedly needed. The results indicate that sustainable safety improvement requires combining hardware measures, such as corrosion protection, calibration, automatic cutoff systems, and structural reinforcement, with organizational measures, including maintenance programs, procedures, training, contractor control, and supervision.

Conclusion

Fuel leakage from diesel storage tanks in power plants can produce serious safety, environmental, operational, and economic consequences. The analysis identified five major threats, 87 intermediate events, five principal consequence categories, and 49 preventive control measures. Human error, equipment defects, corrosion, inadequate maintenance, insufficient procedures, and lack of training were among the most important contributors. Periodic inspection and maintenance, development and implementation of safety and operating procedures, and employee training were the highest-priority preventive measures. Effective risk management should therefore combine equipment integrity management, preventive maintenance, clear procedures, workforce competency, supervision, and robust systems for leak containment and fire control. Systematic implementation of these measures can reduce both the likelihood of fuel leakage and the severity of its consequences in power-plant operations.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

JOHE
مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای
دوره ۱۲، شماره ۴، زمستان۱۴۰۴، صفحات: ۲۹۳-۲۷۹
https://johe.umsha.ac.ir
UMSHA Press

مقاله پژوهشی

ارزیابی ریسک مخازن سوخت نیروگاه‌های برق شهر مشهد به‌روش Bow Tie با تأکید بر مهم‌ترین اقدامات کنترلی

میثم رضائی [۱]، زهرا عابدی [۱*]، هانیه نیکومرام [۱]، فرزام بابایی [۱]

۱. گروه مدیریت محیط زیست، دانشکده کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۲/۰۱
تاریخ ویرایش مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

* **نویسنده مسئول:** زهرا عابدی، گروه مدیریت محیط زیست، دانشکده کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

ایمیل: Z.abedi123@iau.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: مخازن ذخیرهٔ سوخت از مهم‌ترین منابع خطر در نیروگاه‌ها هستند و خطرات قابل‌توجهی برای کارکنان، تجهیزات و محیط‌زیست ایجاد می‌کنند. ازاین‌رو، شناسایی و ارزیابی ریسک‌های ایمنی و زیست‌محیطی مرتبط با این مخازن، همراه با اجرای اقدامات کنترلی مناسب برای کاهش احتمال وقوع و پیامدهای حوادث، از اهمیت بالایی برخوردار است.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه نشت سوخت از مخازن گازوئیل به‌عنوان یک رویداد اصلی مهم در نیروگاه‌های برق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، به‌طوری که ابتدا با روش تجزیه و تحلیل درخت خطا مهم‌ترین علل بروز رویداد اصلی شناسایی و ارزیابی گردید و سپس با استفاده از تکنیک تجزیه و تحلیل درخت رویداد پیامدهای احتمالی ناشی از بروز رویداد اصلی پیش‌بینی شد. همچنین مهم‌ترین اقدامات کنترلی به‌منظور پیشگیری از نشت سوخت و کاهش پیامدهای آن به‌ترتیبِ اولویت توصیه گردید.

یافته‌ها: ۵ علت اصلی به‌همراه ۸۷ رویداد میانی در بروز نشتی از مخازن گازوئیل نیروگاه‌های برق شناسایی شد. همچنین ۴۹ مورد اقدام کنترلی جهت پیشگیری از وقوع نشتی شناسایی و پیشنهاد گردید. همچنین ۵ پیامد اصلی شناسایی و مهم‌ترین اقدامات کنترلی به‌منظور کاهش پیامدها توصیه شد.

نتیجه‌گیری: با بررسی نتایج و دیاگرام‌های ترسیم‌شده مشخص شد که مهم‌ترین اقدامات کنترلی به‌منظور پیشگیری از نشت سوخت در مخازن گازوئیل به‌ترتیبِ اولویت عبارت‌اند از: سرویس و نگهداری دوره‌ای، تدوین دستورالعمل‌های ایمنی و ارائهٔ آموزش‌های مرتبط.

واژگان کلیدی: مخازن گازوئیل، نیروگاه برق، ارزیابی ریسک، اقدام کنترلی

استناد: رضایی، میثم؛ عابدی، زهرا؛ نیکومرام، هانیه؛ بابایی، فرزام. ارزیابی ریسک مخازن سوخت نیروگاه‌های برق شهر مشهد به‌روش Bow Tie با تأکید بر مهم‌ترین اقدامات کنترلی. مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای، زمستان ۱۴۰۴؛۱۲(۴): ۲۹۳-۲۷۹

مقدمه

انرژی الکتریکی یکی از زیرساخت‌های حیاتی جوامع مدرن محسوب می‌شود و نقش اساسی در توسعهٔ اقتصادی، صنعتی و رفاه اجتماعی ایفا می‌کند. تقریباً تمامی بخش‌های حیاتی ازجمله صنایع، حمل‌ونقل، سیستم‌های بهداشتی، ارتباطات و خدمات شهری به تأمین پایدار و مطمئن برق وابسته هستند. هرگونه اختلال در تولید برق می‌تواند منجر به خسارات گستردهٔ اقتصادی و اجتماعی شود [۱]. نیروگاه‌های برق به‌عنوان هستهٔ اصلی زنجیرهٔ تأمین انرژی الکتریکی، وظیفهٔ تبدیل انرژی اولیه به برق قابل‌مصرف را بر عهده دارند. در میان انواع نیروگاه‌ها، نیروگاه‌های حرارتی و سیکل ترکیبی سهم قابل‌توجهی در تولید برق جهانی دارند و به‌دلیل قابلیت تأمین بار پایه و پشتیبان شبکه، از اهمیت راهبردی برخوردارند [۲]. پایداری عملکرد نیروگاه‌ها مستقیماً با ایمنی تجهیزات حیاتی آن‌ها در ارتباط است. وقوع حوادث صنعتی

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

در نیروگاه‌ها، به‌ویژه در بخش ذخیره و انتقال سوخت، می‌تواند منجر به توقف تولید، خاموشی گسترده و تهدید ایمنی کارکنان و محیط‌زیست شود. ازاین‌رو، مدیریت ریسک و ایمنی فرایند در نیروگاه‌ها به‌عنوان یکی از ارکان اصلی بهره‌برداری پایدار و مطمئن شناخته می‌شود [۳].

مخازن ذخیرهٔ سوخت، بخش حیاتی زیرساخت نیروگاه‌های برق محسوب می‌شوند و نقش کلیدی در تأمین پیوسته سوخت و تضمین عملکرد پایدار نیروگاه دارند. این مخازن امکان ذخیرهٔ سوخت برای زمان‌های اوج مصرف، وقفه در تأمین سوخت و شرایط اضطراری را فراهم می‌کنند و در نتیجه، اطمینان از تولید برق مستمر و پایدار را افزایش می‌دهند [۲]. علاوه‌براین، طراحی مناسب مخازن سوخت و رعایت استانداردهای ایمنی، ریسک نشت، آتش‌سوزی و دیگر حوادث صنعتی را کاهش می‌دهد و از خسارات جانی، مالی و زیست‌محیطی جلوگیری می‌کند [۴]. بنابراین، مدیریت صحیح و نگهداری مستمر مخازن سوخت، جزو الزامات بهره‌برداری امن و پایدار نیروگاه‌ها است [۳]. این مخازن در پالایشگاه ها و کارخانجات وابسته شامل حجم زیادی از مواد شیمیایی قابل‌اشتعال و خطرناک است که همین امر باعث ایجاد پتانسل خطرات متعددی در آن‌ها می‌شود و در نتیجه، این خطرات باید در مرحلهٔ طراحی و بهره‌برداری مورد ارزیابی قرار گیرند. در همهٔ بخش‌های این پروسه اگر طراحی‌های انجام‌پذیرفته، بازرسی‌ها و نگهداری‌ها ضعیف انجام پذیرد ممکن است باعث ایجاد حوادث ناگواری شود [۵]. نگرانی‌های عمده‌ای در ارتباط با ذخیره‌سازی مواد خطرناک مانند LPG (Liquefied Petroleum Gas)، بنزین، گازوئیل، و ... در صنایع فرایندی وجود دارد که در صورت رهاسازی سریعاً در هوا منتشر می‌شوند و به‌علت اینکه از هوا سنگین‌تر هستند روی سطح زمین تجمع پیدا کرده و با کوچک‌ترین جرقه‌ای فاجعه‌ای عظیم را به‌بار می‌آورند [۶]. مخازن ذخیرهٔ سوخت در نیروگاه‌ها، به‌ویژه مخازن گازوئیل، با مجموعه‌ای از خطرات ایمنی، زیست‌محیطی و عملیاتی مواجه هستند. این خطرات می‌توانند ناشی از طراحی نامناسب، فرایندهای عملیاتی، خطای انسانی و عوامل محیطی باشند. نشت سوخت از مخازن ذخیرهٔ نیروگاه‌ها، به‌ویژه گازوئیل، می‌تواند پیامدهای ایمنی، زیست‌محیطی، عملیاتی و اقتصادی شدیدی به‌همراه داشته باشد [۷].

آتش استخری (Pool Fire): نشت گازوئیل و تجمع آن در کف مخزن یا اطراف، در صورت وجود منبع جرقه، می‌تواند منجر به آتش‌سوزی گسترده شود [۴]. تشکیل بخار قابل‌اشتعال و انفجار بخار (Vapor Cloud Explosion): در محیط‌های بسته، تراکم بخار گازوئیل ممکن است خطر انفجار را افزایش دهد [۸]. آلودگی خاک و منابع آب: نشت گازوئیل به خاک و آب‌های زیرزمینی باعث آلودگی شدید و دشواری در پاکسازی می‌شود [۳]. در نتیجه، ارزیابی ریسک و مدیریت ایمنی مخازن سوخت، به‌ویژه برای سوخت‌هایی مانند گازوئیل که دارای پتانسیل آتش‌گیری و آلودگی محیطی بالاست، یک الزام ضروری در نیروگاه‌ها محسوب می‌شود [۴-۷]. نشت سوخت در مخازن نیروگاه‌ها یکی از مهم‌ترین خطرات عملیاتی است و می‌تواند به آتش‌سوزی، آلودگی محیطی و توقف تولید برق منجر شود [۷]. با توجه به خطرات شدید و پیامدهای جبران‌ناپذیر نشت سوخت گازوئیل، استفاده از روش‌های استاندارد ارزیابی ریسک مانند HAZOP، Bow-Tie و LOPA ضروری است [۳، ۴]. در حقیقت، مطالعهٔ ریسک به‌منظور پیشگیری از زیان‌ها و نتایج نامطلوب وقایع انجام می‌شود [۹]. در تجزیه و تحلیل خطرات اگرچه تمام خطرات بایستی بیان شود، معمولاً محدودیت‌های منابع مانع از انجام این کار می‌شود. به همین علت از ارزیابی ریسک استفاده می‌کنیم [۱۰].

تکنیک Bow-Tie یک ابزار بصری و تحلیلی برای مدیریت ریسک و ایمنی فرایند است که ارتباط بین علل وقوع رویدادهای خطرناک و پیامدهای آن‌ها را نشان می‌دهد. این روش به‌شکل یک پروانه است که در مرکز آن رویداد آغازگر یا رویداد اصلی (Top Event) قرار دارد و سمت چپ آن علل (Causes) و سمت راست آن پیامدها (Consequences)رسم می‌شوند. همچنین، کنترل‌ها و موانع (Barriers) بین علل و رویداد و بین رویداد و پیامدها مشخص می‌شوند [۳]. Bow-Tie، به‌عنوان یک ابزار ریسک‌محور و بصری، به تصمیم‌گیری در خصوص بهبود ایمنی فرایند کمک می‌کند و کاربرد آن در نیروگاه‌ها برای نشت سوخت به‌دلیل پیامدهای شدید و گسترده، بسیار مؤثر است [۷]. مخازن سوخت نیروگاه‌ها، به‌ویژه مخازن گازوئیل، به‌دلیل خطرات ایمنی، زیست‌محیطی و عملیاتی بالا نیازمند اقدامات کنترلی دقیق هستند. این اقدامات شامل موانع پیشگیرانه، پایش مستمر و سیستم‌های ایمنی فعال می‌شوند که هدف آن‌ها جلوگیری از نشت و کاهش پیامدهای احتمالی

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

است [۳]. بازرسی و نگهداری دوره‌ای، بررسی خوردگی کف، فلنج‌ها، ولوها و خطوط انتقال سوخت باعث کاهش ریسک نشت می‌شود [۷]. اجرای این اقدامات نه‌تنها خطر نشت سوخت را کاهش می‌دهد، بلکه امنیت نیروگاه و کارکنان، حفاظت محیط‌زیست و کاهش هزینه‌های احتمالی ناشی از حوادث را تضمین می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که ترکیب کنترل‌های پیشگیرانه و کاهش‌دهندهٔ پیامد در قالب نمودار Bow-Tie، یک ابزار مؤثر برای مدیریت ریسک نشت سوخت در نیروگاه‌ها است [۳-۸].

اولهلووا و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی با استفاده از روش ارزیابی آسیب زیست‌محیطی در تأسیسات ذخیره‌سازی مخزن سوخت دیزل در یک معدن شن و ماسه به صورت نیمه کمی تأثیر مخزن سوخت دیزل کار شده بر اجزای محیطی انتخاب شده و خطر آسیب احتمالی ناشی از نشت سوخت ذخیره‌شده را ارزیابی کردند [۱۱]. بارگز و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی روشی را برای تجزیه و تحلیل ریسک در صنایع شیمیایی و وابسته ارائه می‌کنند که مبتنی‌بر ترکیبی از تجزیه و تحلیل خطر و عملکرد (HAZOP) و یک تحلیل کمّی از مرتبط‌ترین ریسک‌ها ازطریق تجزیه و تحلیل درخت خطا (FTA) است. نتایج حاصل از FTA امکان اولویت‌بندی اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی را فراهم می‌کند [۱۲]. علی آبادی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی مخاطرات در مخازن LPG پالایشگاه تهران را توسط FTA شناسایی و پیامدهای رویداد را توسط تجزیه و تحلیل درخت رویداد (ETA) پیش‌بینی کردند. احتمالات رخدادها محاسبه و مسیر حادثه از فاز علل تا فاز پیامدها توسط نمودار Bow Tie ترسیم شد [۱۳]. محمد کاظم رمضانی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی با استفاده از روش Bow-Tie، خطرات ناشی از آزادسازی مواد قابل‌اشتعال از مخازن ذخیره را ارزیابی کرده و علل، سناریوها و پیامدهای احتمالی را مشخص کردند [۱۴]. دینگ دینگ یانگ و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی یک چهارچوب مدیریت ریسک پایدار را برای تأسیسات ذخیره‌سازی نفت معرفی می‌کند که Bow-Tie را با شبکه‌های بیزی پویا ترکیب می‌کند. مدل نشت مخزن را با تحلیل زمانی توسعه می‌دهد و احتمال بروز پیامدها را در طول زمان بررسی می‌کند [۱۵]. کینگ یوان ژو و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی مؤلفه‌های اولیهٔ خطر نشت مخزن ذخیره نفت شناسایی شده و سپس مدل Bow-Tie برای تعیین عوامل اصلی ریسک ساخته می‌شود. پس از آن با تلفیق Bow-Tie با شبکهٔ بیزی فازی احتمال وقوع نشت مخزن به‌صورت پویا تحلیل می‌شود. این روش به بررسی تغییرات احتمالات ریسک با ورود شواهد جدید می‌پردازد و می‌تواند دیدگاه‌های مفیدی در تحلیل نشت سوخت در مخازن نیروگاهی ارائه دهد [۱۶]. ویبا شرما و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به بررسی خطرات مخازن ذخیرهٔ سوخت و اقدامات کاهش‌دهندهٔ آن‌ها می‌پردازد. روش Bow-Tie برای شناسایی علل و پیامدهای نشت، آتش‌سوزی و انفجار به‌کار گرفته شده است. موانع پیشگیرانه و کاهش‌دهندهٔ پیامدها رسم شده و تأثیر هر کدام بر کاهش ریسک تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از Bow-Tie یک ابزار مؤثر برای مدیریت ایمنی و پیشگیری از حوادث مخازن سوخت است [۱۷].

با توجه به توضیحات بالا و همچنین نبودِ سابقهٔ ارزیابی ریسک با استفاده از روش Bow Tie در مخازن ذخیره‌سازی صنایع فرایندی، به‌نظر می‌رسد ارزیابی ریسک و همچنین تعیین سناریوهای حوادث مهم به صورت مصور و کمّی با استفاده از روش Bow Tie که از سال ۲۰۰۵ به بعد بیشتر مورد توجه پژوهشگران در دنیا قرار گرفته است [۱۸]. ازجمله مشکلات تحقیقات انجام‌شده تاکنون، عدم توجه و تأکید بر اقدامات کنترلی در نتایج ارزیابی ریسک و مشخص‌نبودن مناسب‌ترین اقدام کنترلی برای هر یک از علل اصلی و میانیِ به‌وجودآورندهٔ رویداد اصلی بوده است. بر این اساس هدف از این مطالعه ارزیابی و مدیریت ریسک مخازن ذخیره‌سازی در نیروگاه‌های برق شهر مشهد به‌روش Bow Tie با تأکید بر اقدامات کنترلی و شناسایی بهترین و موثرترین راهکارهای کنترلی برای هر یک از مخاطرات و تهدیدات است.

روش کار

این مطالعه از نوع توصیفی-تحلیلی بوده و با هدف شناسایی و ارزیابی کیفی عوامل مؤثر بر نشت سوخت از مخازن ذخیرهٔ گازوئیل نیروگاه‌های برق و همچنین بررسی پیامدهای احتمالی ناشی از آن انجام گردید. در این پژوهش از روش تحلیل ریسک Bow Tie که ترکیبی از تکنیک‌های FTA و ETA است، استفاده شد. در مرحلهٔ نخست، محدودهٔ مطالعه شامل مخازن ذخیرهٔ گازوئیل نیروگاه مورد بررسی قرار گرفت و با نظر خبرگان نشت سوخت از مخازن به‌عنوان رویداد اصلی تعیین شد. سپس به‌منظور شناسایی علل و عوامل مؤثر بر وقوع این رویداد، یک تیم کارشناسی متشکل از متخصصان بهره‌برداری، تعمیرات، ایمنی، آتش‌نشانی و مدیریت نیروگاه تشکیل شد. اطلاعات مورد نیاز ازطریق بازدیدهای میدانی، بررسی سوابق حوادث،

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

مستندات فنی، دستورالعمل‌های بهره‌برداری و جلسات کارشناسی جمع‌آوری شد. در ادامه، با استفاده از تکنیک FTA، تمامی علل بالقوه و عوامل مؤثر بر وقوع نشت سوخت شناسایی و در قالب درخت خطا سازمان‌دهی شدند. ارتباط منطقی میان عوامل مختلف تعیین گردید تا مسیرهای منتهی به وقوع رویداد اصلی مشخص شوند.

پس از تکمیل تحلیل علل، به‌منظور بررسی پیامدهای احتمالی ناشی از نشت سوخت، از تکنیک ETA استفاده شد. در این مرحله سناریوهای مختلف پس از وقوع نشت سوخت با درنظرگرفتن عملکرد یا عدم عملکرد لایه‌های حفاظتی و اقدامات کنترلی موجود مورد ارزیابی قرار گرفت. پیامدهای احتمالی شامل آتش‌سوزی، انفجار، آلودگی محیط‌زیست، خسارات مالی، توقف تولید و آسیب به نیروی انسانی شناسایی و تحلیل گردید.

در نهایت، نتایج حاصل از دو تکنیک FTA و ETA در قالب نمودار تلفیق شد. در بخش چپ نمودار، تهدیدها و علل وقوع نشت سوخت به‌همراه موانع و اقدامات پیشگیرانه و در بخش راست نمودار، پیامدهای احتمالی و اقدامات کاهندهٔ اثرات رویداد نمایش داده شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده مهم‌ترین اقدامات کنترلی و راهکارهای مدیریتی جهت کاهش احتمال وقوع نشت سوخت و محدود نمودن پیامدهای ناشی از آن ارائه گردید.

معرفی نمونه مورد ارزیابی

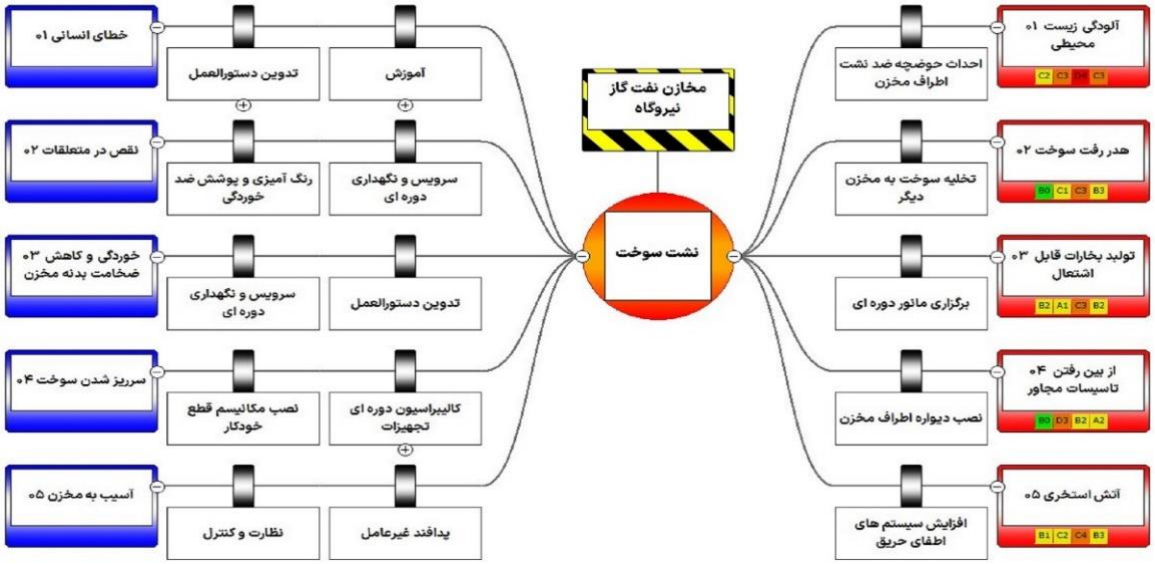
شهر مشهد دارای ۴ نیروگاه برق به نام‌های مشهد، شریعتی، طوس و فردوسی است. نیروگاه برق مشهد در ابتدای بلوار شهید عباسپور قرار داشته که سوخت اصلی نیروگاه گاز طبیعی و سوخت جایگزین گازوئیل است. نیروگاه سیکل ترکیبی شریعتی در کیلومتر ۱۰ جاده مشهد- سرخس واقع شده و سوخت اصلی آن گاز طبیعی و سوخت جایگزین گازوئیل است. نیروگاه حرارتی طوس در کیلومتر ۱۲ جاده مشهد- قوچان که سوخت اصلی آن گاز طبیعی و سوخت جایگزین مازوت است. نیروگاه سیکل ترکیبی فردوسی در کیلومتر ۱۴ جاده مشهد-قوچان بوده که سوخت اصلی آن گاز طبیعی و سوخت پشتیبان گازوئیل است. همهٔ مخازن گازوئیلِ موجود در این نیروگاه‌ها از نوع فلزی سقف ثابت و با ظرفیت‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میلیون لیتری است. با توجه به مشابهت مخازن و فرایند ذخیره‌سازی گازوئیل در نیروگاه‌های برق، مطالعه و ارزیابی ریسک در یکی از نیروگاه‌ها به‌صورت نمونه انجام پذیرفت.

یافته ها

طی بررسی‌های به‌عمل‌آمده و بررسی نظر کارشناسان نشت سوخت از مخازن به‌عنوان رویداد اصلی برای مخازن گازوئیل شناسایی گردید. در مرحلهٔ بعد با استفاده از تکنیک درخت خطا مهم‌ترین علل اصلی نشت سوخت در مخازن و سپس رویدادهای میانی برای هر یک از علل شناسایی گردید و همچنین با استفاده از تکنیک درخت رویداد مهم‌ترین پیامدهای ایمنی و زیست‌محیطی ناشی از نشت سوخت از مخازن گازوئیل شناسایی شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Bow Tie XP دیاگرام مربوطه ترسیم شد که در حال حاضر قدرتمندترین نرم‌افزار جهت اجرای مطالعات Bow Tie و رسم دیاگرام است و قادر است دیاگرام پاپیونی Bow Tie را با جزئیات کامل ترسیم کند. بعد از تشکیل تیم ارزیابی ریسک متشکل از نمایندگان واحدهای مرتبط در نیروگاه و انجام بازدیدهای میدانی، بررسی دستورالعمل‌ها و برگزاری جلسات متعدد، با توجه به بررسی‌های به‌عمل‌آمده و نتایج به‌دست‌آمده از روش درخت خطا ۵ تهدید اصلی در بروز نشت سوخت از مخازن شناسایی گردید که عبارت‌اند از: خطای انسانی، نقص در متعلقات، خوردگی و کاهش ضخامت بدنهٔ مخزن، سرریز شدن سوخت و آسیب به مخزن. همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از روش درخت رویداد ۵ پیامد اصلی ایمنی و زیست‌محیطی ناشی از نشت سوخت شناسایی گردید که عبارت‌اند از: آلودگی زیست‌محیطی، هدر رفت سوخت، تولید بخارات قابل‌اشتعال، ازبین‌رفتن تأسیسات مجاور و آتش استخری. در مرحلهٔ بعد براساس نتایج به‌دست‌آمده از FTA و ETA دیاگرام Bow Tie برای رویداد اصلی نشت سوخت از مخازن گازوئیل توسط نرم‌افزارBow Tie XP ترسیم گردید و علل اصلی به‌وجودآورنده و پیامدهای ناشی از آن بر روی دیاگرام ثبت گردید. برای هر علت اصلی دو اقدام کنترلی که دارای اهمیت بالاتری بودند و برای هر پیامد یک اقدام کاهشی پیشنهاد گردید. همچنین برای هر کدام از پیامدها سطح ریسک برای افراد، دارایی، محیط‌زیست و اعتبار به‌طور جداگانه محاسبه شده و در ذیل هر پیامد در دیاگرام آورده شده است. نتایج کلی مطالعات و نتایج به‌دست آمده از آنالیز و ارزیابی ریسک رویداد اصلی نشت سوخت از مخازن گازوئیل

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

نیروگاه‌های برق شهر مشهد توسط نرم‌افزار در دیاگرام شمارهٔ ۱ نشان داده شده است.

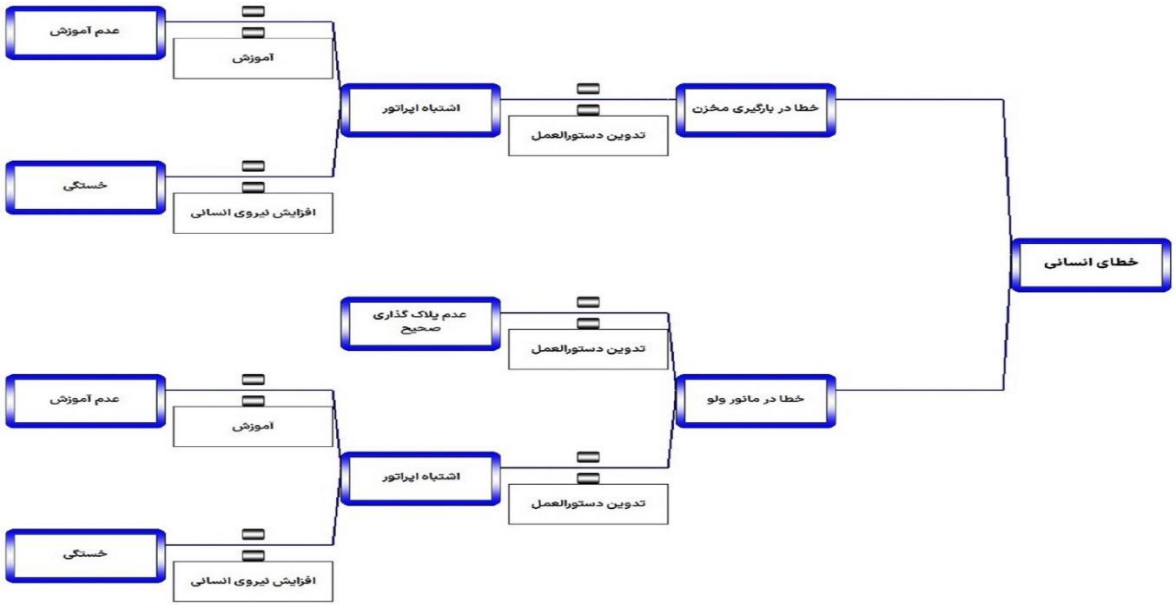


شکل ۱. دیاگرام کلی نشت سوخت

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

خطای انسانی

یکی از مهم‌ترین علل اصلی در نشت سوخت از مخازن خطای انسانی است که عمدتاً به‌دلیل اشتباه اپراتورها در طی فرایندهای مرتبط با ذخیره‌سازی انجام می‌پذیرد. ۹ رویداد میانی می‌تواند در بروز خطای انسانی نقش داشته باشد. اشتباه اپراتور در بارگیری مخزن و مانور ولو از مهم‌ترین علل بروز رویدادهای میانی بوده که عمدتاً براثر خستگی یا عدم آموزش اپراتورها بروز می‌یابد. برای پیشگیری از بروز آن ۷ اقدام کنترلی پیشنهاد شد. تدوین دستورالعمل‌های مرتبط، آموزش و افزایش نیروی انسانی از مهم‌ترین اقدامات کنترلی جهت پیشگیری از این تهدید است. در دیاگرام شمارهٔ ۲ رویدادهای میانی به‌همراه اقدامات کنترلی مناسب نشان داده شده است.



شکل ۲. دیاگرام علل خطای انسانی و اقدامات کنترلی

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

نقص در متعلقات

دومین علت اصلی در بروز نشتی از مخازن سوخت نقص در متعلقات است که عمدتاً براثر آسیب به تجهیزات به‌دلیل عدم سرویس و نگهداری مناسب بروز می‌نماید. ۳۲ رویداد میانی می‌تواند سبب بروز نقص در متعلقات گردد. نقص در عملکرد ولو، آسیب به لوله‌ها و فلنچ‌ها و انسداد ونت از مهم‌ترین علل آن است. عدم انجام مانورهای دوره‌ای، اعمال نیروی زیاد، خوردگی و استهلاک مهم‌ترین نقش را در بروز رویدادهای میانی دارد. برای پیشگیری از بروز آن ۱۴ اقدام کنترلی پیشنهاد شد. سرویس و نگهداری دوره‌ای، رنگ‌آمیزی و پوشش ضدخوردگی، آموزش اپراتورها و تست اولیهٔ سوخت از مهم‌ترین اقدامات کنترلی جهت پیشگیری از این تهدید است. در دیاگرام شمارهٔ ۳ رویدادهای میانی به‌همراه اقدامات کنترلی مناسب نشان داده شده است.



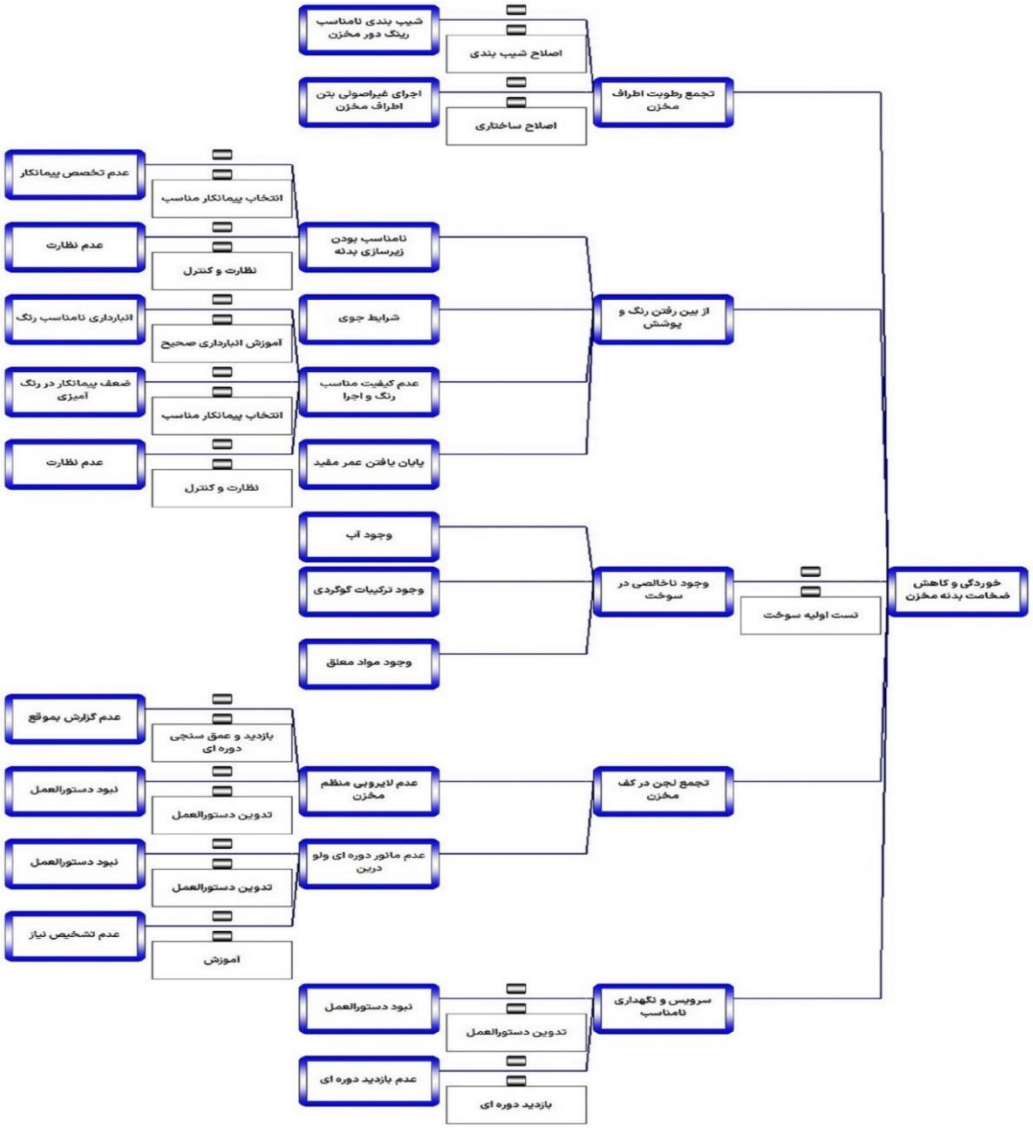
شکل ۳. دیاگرام علل نقص در متعلقات و اقدامات کنترلی

خوردگی و کاهش ضخامت بدنهٔ مخزن

سومین علت اصلی در بروز نشتی از مخازن گازوئیل نیروگاه‌های برق، خوردگی و کاهش ضخامت بدنهٔ مخزن است که عمدتاً ناشی از فرسودگی براثر رطوبت و عدم سرویس و

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

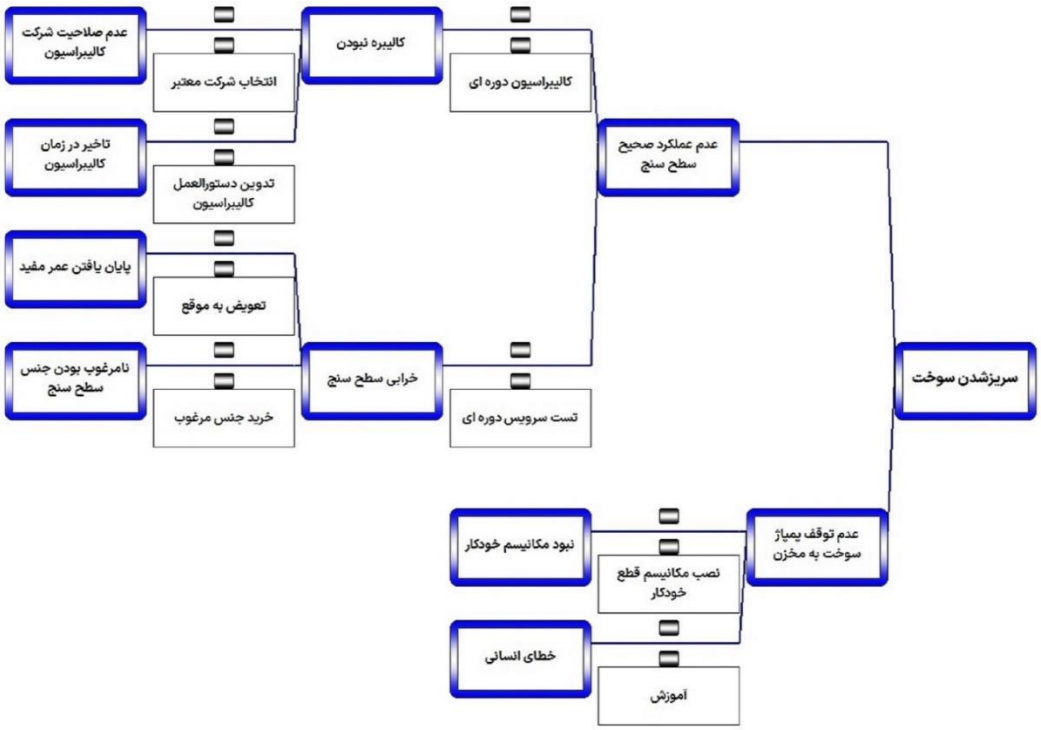
نگهداری مناسب اتفاق می‌افتد. ۲۷ رویداد میانی می‌تواند سبب خوردگی و کاهش ضخامت بدنهٔ مخزن گردد. تجمع رطوبت اطراف مخزن، ازبین‌رفتن رنگ و پوشش، وجود ناخالصی در سوخت، تجمع لجن در کف مخزن و سرویس و نگهداری نامناسب از مهم‌ترین علل آن است. شیب‌بندی نامناسب رینگ دور مخزن، نامناسب بودن زیرسازی بدنه، عدم لایروبی منظم مخزن، ضعف پیمانکار و عدم نظارت مهم‌ترین نقش را در بروز رویدادهای میانی دارد. برای پیشگیری از بروز آن ۱۴ اقدام کنترلی پیشنهاد گردید. تدوین دستورالعمل‌های مرتبط، سرویس و نگهداری دوره‌ای، اصلاح ساختاری مخزن، آموزش و نظارت و کنترل از مهم‌ترین اقدامات کنترلی جهت پیشگیری از این تهدید است. در دیاگرام شمارهٔ ۴ رویدادهای میانی به‌همراه اقدامات کنترلی مناسب نشان داده شده است.



شکل ۴. دیاگرام علل خوردگی و کاهش ضخامت بدنهٔ مخزن و اقدامات کنترلی

سرریز شدن سوخت: چهارمین علت در بروز رویداد اصلی سرریز شدن سوخت از مخازن ذخیره‌سازی است که عمدتاً براثر نقص در تجهیزات و خطای انسانی و نبود دستورالعمل‌های مناسب بروز می‌نماید. ۱۰ رویداد میانی می‌تواند سبب سرریز شدن سوخت از مخازن شود. عدم عملکرد صحیح سطح‌سنج و عدم توقف پمپاژ سوخت به مخزن از مهم‌ترین علل آن است. کالیبره نبودن تجهیزات، خرابی سطح‌سنج، نبود مکانیسم قطع خودکار و خطای انسانی مهم‌ترین نقش را در بروز رویدادهای میانی دارد. برای پیشگیری از بروز آن ۸ اقدام کنترلی پیشنهاد شد. کالیبراسیون دوره‌ای تجهیزات، نصب مکانیسم قطع خودکار، سرویس دوره‌ای، تعویض به‌موقع تجهیزات و آموزش از مهم‌ترین اقدامات کنترلی جهت پیشگیری از این تهدید است. در دیاگرام شمارهٔ ۵ رویدادهای میانی به‌همراه اقدامات کنترلی مناسب نشان داده شده است.

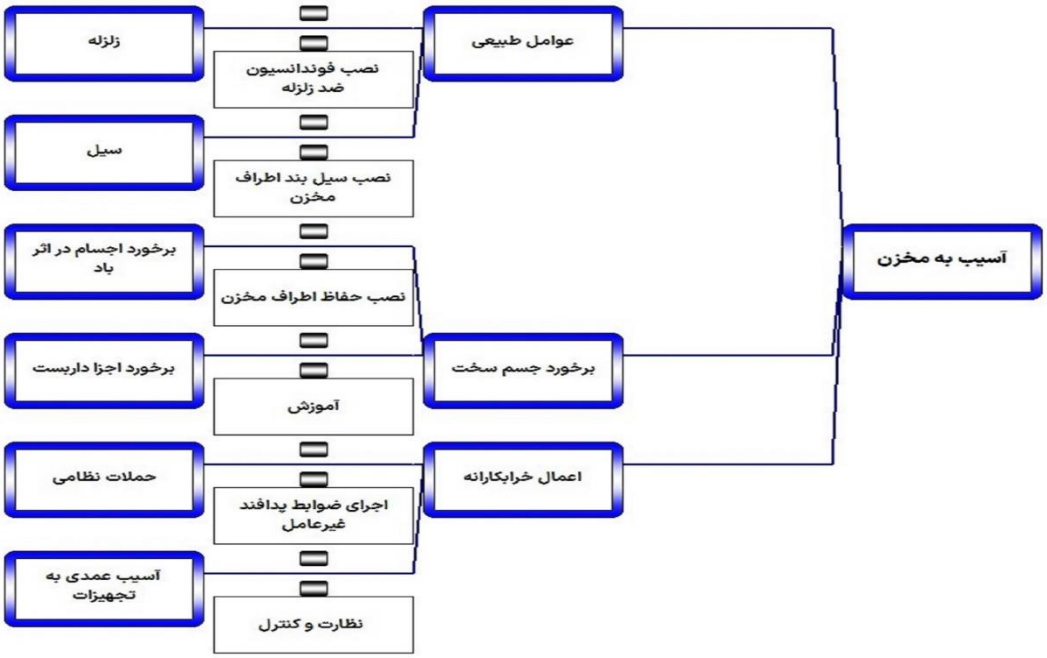
[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]



شکل ۵. دیاگرام علل سرریز شدن سوخت و اقدامات کنترلی

آسیب به مخزن

پنجمین علت اصلی شناسایی شده در بروز نشتی آسیب به مخزن بوده که عمدتاً براثر عدم پیش‌بینی‌های لازم و نظارت ناکافی ممکن است بروز نماید. ۹ رویداد میانی می‌تواند سبب بروز آسیب به مخزن شود. عوامل طبیعی، برخورد جسم سخت و اعمال خرابکارانه از مهم‌ترین علل آن است. زلزله، سیل، برخورد جسم خارجی، حملات نظامی و آسیب عمدی به تجهیزات مهم‌ترین نقش را در بروز رویدادهای میانی دارد. برای پیشگیری از بروز آن ۶ اقدام کنترلی پیشنهاد گردید. انجام اقدامات مرتبط با پدافند غیرعامل، نظارت و کنترل، نصب فوندانسیون ضدزلزله، اجرای سیل‌بند اطراف مخازن، نصب حفاظ و آموزش از مهم‌ترین اقدامات کنترلی جهت پیشگیری از این تهدید است. در دیاگرام شمارهٔ ۶ رویدادهای میانی به‌همراه اقدامات کنترلی مناسب نشان داده شده است.



شکل ۶. دیاگرام علل آسیب به مخزن و اقدامات کنترلی

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

تعداد اقدامات کنترلی برای هر یک از علل به‌صورت خلاصه در جدول شمارهٔ ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. اقدامات کنترلی پیشنهادی برای هر یک از علل بروز نشتی در مخازن

اولویت	علل	اقدام کنترلی	تعداد
۱	خطای انسانی	تدوین دستورالعمل	۳
		آموزش	۲
		افزایش نیروی انسانی	۲
۲	نقص در متعلقات	سرویس و نگهداری دوره‌ای	۶
		رنگ‌آمیزی و پوشش ضد خوردگی	۲
		استفاده از ابزار مناسب	۱
		افزایش نیروی انسانی	۱
		تدوین دستورالعمل	۱
		آموزش	۱
		هواگیری لوله	۱
		تست اولیه سوخت	۱
۳	خوردگی و کاهش ضخامت بدنهٔ مخزن	تدوین دستورالعمل	۳
		سرویس و نگهداری دوره‌ای	۲
		آموزش	۲
		نظارت و کنترل	۲
		انتخاب پیمانکار مناسب	۲
		تست اولیه سوخت	۱
		اصلاح شیب‌بندی	۱
		اصلاح ساختاری	۱
۴	سرریز شدن سوخت	کالیبراسیون تجهیزات	۱
		انتخاب شرکت معتبر	۱
		تدوین دستورالعمل	۱
		تعویض به موقع	۱
		آموزش	۱
		نصب مکانیسم قطع خودکار	۱
		تست و سرویس دوره‌ای	۱
		خرید جنس مرغوب	۱
۵	آسیب به مخزن	نصب فوندانسیون ضد زلزله	۱
		نصب سیل‌بند اطراف مخزن	۱
		نصب حفاظ اطراف مخزن	۱
		آموزش	۱
		پدافند غیرعامل	۱
		نظارت و کنترل	۱

جدول ۲. اولویت‌بندی اقدامات کنترلی جهت پیشگیری از نشت سوخت

اولویت	اقدام کنترلی	تعداد
۱	سرویس و نگهداری دوره‌ای	۹ مورد
۲	تدوین دستورالعمل	۸ مورد
۳	آموزش	۷ مورد
۴	نظارت و کنترل	۳ مورد
۵	افزایش نیروی انسانی	۳ مورد
۶	انتخاب پیمانکار مناسب	۳ مورد
۷	رنگ‌آمیزی	۲ مورد
۸	تست اولیهٔ سوخت	۲ مورد

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

۹	استفاده از ابزار مناسب	۱ مورد
۱۰	هواگیری	۱ مورد
۱۱	اصلاح شیب‌بندی	۱ مورد
۱۲	اصلاح ساختاری	۱ مورد
۱۳	کالیبراسیون	۱ مورد
۱۴	تعویض به موقع	۱ مورد
۱۵	نصب مکانیسم قطع خودکار	۱ مورد
۱۶	خرید جنس مرغوب	۱ مورد
۱۷	نصب فوندانسیون ضدزلزله	۱ مورد
۱۸	نصب سیل‌بند	۱ مورد
۱۹	نصب حفاظ	۱ مورد
۲۰	اقدامات مرتبط با پدافند غیرعامل	۱ مورد

بحث

هدف از ارزیابی کیفی ریسک به‌روش Bow Tie در این مطالعه، نه‌تنها شناسایی علل و پیامدهای نشت سوخت، بلکه ارائهٔ درکی سیستمی از زنجیرهٔ رویدادها جهت تدوین راهکارهای کنترلی مؤثر و اولویت‌بندی شده بود. یافته‌های این تحقیق نشان داد که از میان عوامل متعدد، خطای انسانی، خوردگی و نقص در متعلقات به‌عنوان اصلی‌ترین تهدیدات مؤثر در وقوع نشت از مخازن گازوئیل شناسایی شدند.

این یافته با نتایج پژوهش‌های مشابه در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی همسویی قابل‌توجهی دارد. در مطالعه‌ای که توسط بهنام ساروئی و همکاران (۱۴۰۳) در پتروشیمی شیراز با همین روش Bow Tie انجام شد، مشخص گردید که از میان ۲۳۳ مانع پیشگیرانه و کاهش‌دهندهٔ شناسایی‌شده، ۸۲.۸ درصد (۱۹۳ مورد) به عوامل انسانی مرتبط بودند که نشان‌دهندهٔ سهم بسیار بالای خطای انسانی در بروز حوادث این صنایع است [۱۹]. همچنین تحقیقی دیگر که توسط مقداد کاظمی و همکاران (۱۴۰۰) در پالایشگاه گاز ایلام با استفاده از رویکرد تلفیقی Bow Tie و FMEA، نشت و پارگی مخازن، خوردگی و سایش لوله‌ها و اتصالات و خطای انسانی را به‌عنوان مهم‌ترین تهدیدات معرفی کرده است [۲۰] که با نتایج مطالعهٔ حاضر کاملاً همخوانی دارد. بااین‌حال، تفاوت‌هایی نیز بین مطالعهٔ حاضر و برخی پژوهش‌های پیشین مشاهده می‌شود. درحالی‌که در مطالعهٔ پتروشیمی شیراز، عوامل انسانی با اختلاف معناداری بیشترین سهم را در ایجاد موانع پیشگیرانه داشتند، در پژوهش حاضر، خطای انسانی در کنار خوردگی و نقص در متعلقات به‌عنوان سه تهدید اصلی مطرح شده‌اند که نشان‌دهندهٔ اهمیت توأمان عوامل انسانی و فنی (سخت‌افزاری) در نیروگاه‌های برق است. این تفاوت را می‌توان به ماهیت متفاوت فرایندها و سطح پیچیدگی تجهیزات در نیروگاه‌های برق در مقایسه با صنایع پتروشیمی نسبت داد. یافته‌های مطالعهٔ حاضر نشان داد که خطای انسانی، نقص در تجهیزات و متعلقات، خوردگی مخزن و عدم انجام سرویس و نگهداری مناسب از مهم‌ترین عوامل مؤثر در بروز نشت سوخت از مخازن گازوئیل نیروگاه‌های برق هستند. این نتایج با نتایج مطالعهٔ انجام‌شده توسط ویسر و همکاران (۲۰۱۴) که با استفاده از روش Bow Tie ریسک نشت گازوئیل از مخازن زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند، همخوانی دارد. نتایج آن مطالعه نشان داد که بخش عمدهٔ حوادث مرتبط با مخازن ذخیرهٔ سوخت ناشی از خطاهای انسانی، نقص‌های عملیاتی و ضعف در کنترل‌های ایمنی بوده و مداخلهٔ به‌موقع اپراتورها و برنامه‌های پایش و نگهداری می‌تواند احتمال وقوع حوادث را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد [۲۱]. همچنین نتایج نشان داد که سرویس و نگهداری دوره‌ای تجهیزات بیشترین سهم را در میان اقدامات کنترلی پیشنهادی داشته است. این یافته بیانگر آن است که بخش قابل‌توجهی از سناریوهای نشت سوخت ناشی از فرسودگی تجهیزات، نقص در اتصالات، خرابی شیرآلات و کاهش قابلیت اطمینان تجهیزات بوده است. از میان ۸۷ رویداد میانی شناسایی‌شده، عدم انجام سرویس و نگهداری دوره‌ای، نبود یا عدم توجه به دستورالعمل‌ها و نداشتن آموزش‌های لازم بیشترین فراوانی را داشتند. این یافته نشان‌دهندهٔ ضعف در سیستم مدیریت تعمیرات و نگهداری (نت) و فرهنگ ایمنی در نیروگاه‌های مورد مطالعه است. به همین دلیل، در اولویت‌بندی اقدامات کنترلی پیشگیرانه، سرویس و نگهداری دوره‌ای (با ۹ مورد) و تدوین دستورالعمل (با ۸ مورد) بالاترین امتیاز را کسب کردند. در حوزهٔ نیروگاه‌های برق، پارک و همکاران (۲۰۲۴) به ارزیابی ریسک سامانهٔ ذخیره و تأمین سوخت هیدروژن در یک نیروگاه سیکل ترکیبی با استفاده از

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

روش Bow Tie پرداخته‌اند. این پژوهش بر اولویت‌بندی و مدیریت متمرکز بر موانع با اهمیت بالا تأکید دارد و راهکارهایی مانند طراحی ارگونومیک تجهیزات برای جلوگیری از خطای انسانی و سیستم توقف اضطراری را برای ارتقاء سطح ایمنی پیشنهاد می‌کند [۲۲]. این یافته با اولویت‌بندی اقدامات کنترلی در مطالعهٔ حاضر (سرویس و نگهداری دوره‌ای، تدوین دستورالعمل و آموزش) همخوانی دارد و نشان می‌دهد که ترکیب راهکارهای فنی (سخت‌افزاری) و انسانی (نرم‌افزاری) برای موفقیت بلندمدت ضروری است. یکی دیگر از یافته‌های مهم مطالعهٔ حاضر، شناسایی آتش استخری به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پیامدهای نشت سوخت بود. نتایج مطالعهٔ محمدرضا کریمی دهکردی و همکاران (۱۴۰۱) در ارزیابی ریسک مخازن ذخیرهٔ مواد شیمیایی نیز نشان داد که آتش استخری محتمل‌ترین پیامد ناشی از نشت مواد قابل‌اشتعال بوده و می‌تواند خسارات گسترده‌ای به تجهیزات، نیروی انسانی و محیط‌زیست وارد کند [۲۳]. این همخوانی بیانگر آن است که در مخازن ذخیرهٔ مواد سوختی، کنترل و مهار سریع نشت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در مجموع، نتایج مطالعهٔ حاضر نشان می‌دهد که مدیریت ریسک مخازن گازوئیل نیروگاه‌ها نیازمند رویکردی تلفیقی شامل کنترل‌های مدیریتی، فنی و عملیاتی است. از این میان، تدوین دستورالعمل‌های ایمنی، آموزش کارکنان و اجرای برنامه‌های منظم سرویس و نگهداری می‌توانند بیشترین تأثیر را در کاهش احتمال وقوع نشت سوخت داشته باشند، درحالی‌که توسعهٔ سامانه‌های مهار و کنترل نشتی و تقویت تجهیزات اطفای حریق نقش مهمی در کاهش شدت پیامدهای احتمالی ایفا می‌کنند.

نتیجه گیری

یافته‌های مطالعهٔ حاضر نشان داد که نشت سوخت از مخازن گازوئیل موجود در نیروگاه‌های برق می‌تواند پیامدهای ایمنی، اقتصادی و زیست‌محیطی بسیار زیادی را به دنبال داشته باشد، لذا ارزیابی ریسک این مخازن نقش مهمی در شناسایی علل وقوع و پیشگیری از پیامدهای احتمالی دارد. با بررسی نتایج مشخص گردید که عامل انسانی مهم‌ترین نقش را در بروز نشتی از مخازن داشته، به‌طوری که خطاهای انسانی، نبود دستورالعمل‌های ایمنی، تأخیر در فرایندهای سرویس و نگهداری، عدم فراگیری آموزش‌های مناسب و نظارت ناکافی از مهم‌ترین علل است. لذا می‌توان براساس نتایج به‌دست‌آمده اولویت‌بندی مناسبی را در خصوص اقدامات کنترلی انجام داد؛ به‌طوری که مشخص گردید اقداماتی که مرتبط با عوامل انسانی بوده ازجمله سرویس و نگهداری دوره‌ای تجهیزات، تدوین و اجرای دستورالعمل‌های ایمنی و آموزش کارکنان مهم‌ترین نقش را در پیشگیری از وقوع رویداد اصلی خواهد داشت.

تشکر و قدردانی

در پایان، از مدیریت محترم نیروگاه برق شریعتی مشهد و کارکنان واحدهای HSE، بهره‌برداری، مهندسی، شیمی، تعمیرات به‌سبب همکاری در تدوین مطالعه نهایت تقدیر و تشکر به‌عمل می‌آید.

تضاد منافع

هیچ‌گونه تضاد منافعی در خصوص این مطالعه وجود ندارد.

ملاحظات اخلاقی

در پژوهش حاضر تمام ملاحظات اخلاقی و حفظ محرمانگی اطلاعات رعایت شده است و مقاله بخشی از پایان‌نامهٔ مقطع دکتری با کد ۱۲۳۴۴۸۷۲۲۹۶۵۸۸۷۳۵۵۰۳۶۱۶۲۸۱۱۶۵۸ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران است.

سهم نویسندگان

بازدیدهای میدانی، جمع‌آوری اطلاعات، رسم نمودارها و تهیهٔ پیش‌نویس اولیه توسط میثم رضائی انجام گردید. طراحی مطالعه، بازنگری، تفسیر نتایج و ویرایش نهایی توسط زهرا عابدی، هانیه نیکومرام و فرزام بابائی انجام پذیرفت.

حمایت مالی

در انجام این پژوهش از حمایت مالی خاصی استفاده نشده است.

REFERENCES

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2022. Paris: IEA; 2022. Link
2. International Energy Agency; International Renewable Energy Agency; United Nations Statistics Division; World Bank; World Health Organization. 2021. DOI: 10.1596/38016
3. Center for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for Risk-Based Process Safety. New York: American Institute of Chemical Engineers; 2007. Link
4. National Fire Protection Association (NFPA). NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code. Quincy (MA): NFPA; 2021. Link
5. Lees FP. Lees' loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control. 4th ed.

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]

Oxford: Butterworth-Heinemann; 2012. Link
6. Florea G, Popa M. Safety and security integration in LPG tank farm process control. *IFAC Proc Vol*. 2012;**45**(6):1828-31. DOI:10.3182/20120523-3-RO-2023.00436
7. Crowl DA, Louvar JF. Chemical process safety: fundamentals with applications. 4th ed. Harlow: Pearson Education; 2019. Link
8. Zhang S, Wang X, Cheng YF, et al. Modeling and analysis of a catastrophic oil spill and vapor cloud explosion in a confined space upon oil pipeline leaking. Petroleum Science. 2020;17(2):556-566. DOI:10.1007/s12182-019-00403
9. Covello VT, Merkhofer MW. Risk assessment methods: approaches for assessing health and environmental risks. New York: Springer; 2013. Link
10. Hurley MJ, Gottuk DT, Hall JR Jr, Harada K, Kuligowski ED, Puchovsky M, et al. SFPE handbook of fire protection engineering. 5th ed. New York: Springer; 2015. DOI:10.1007/978-1-4939-2565-0
11. Oulehlova A, Tušer I, Rehak D. Environmental risk assessment of a diesel fuel tank: a case study. *Sustainability*. 2021;**13**:6537. DOI: 10.3390/su13126537
12. 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
13. Mirzaei Aliabadi M, Mohammad Fam I, Kalatpour O, Babayi Mesdaraghi Y. Risk assessment of liquefied petroleum gas (LPG) storage tanks in the process industries using the Bowtie technique. *J Occup Hyg Eng*. 2016;**3**(2):1-11. DOI:10.21859/johe-03021
14. Ramezani Khoshnameh MK, Mirza Ebrahim Tehrani M, Babayi Mesdaraghi Y. Risk assessment of releasing flammable material from LPG tanks by Bowtie method and vulnerability zoning by PHAST software. *Occup Hyg Health Promot*. 2019;**3**(1):1-13. DOI: 10.18502/ohhp.v3i1.963
15. Yang D, Xing K, Pan L, Lu N, Yu J. Sustainable risk management framework for petroleum storage facilities: integrating Bow Tie analysis and dynamic Bayesian networks. *Sustainability*. 2025;**17**(6):2642. DOI: 10.3390/su17062642
16. Zhou QY, Li B, Lu Y, Chen J, Shu CM, Bi MS. Dynamic risk analysis of oil depot storage tank failure using a fuzzy Bayesian network model. *Process Saf Environ Prot*. 2023;**173**:800-11. DOI: 10.1016/j.psep.2023.03.072
17. Sharma V, Nandan A, Siddiqui NA. Study and analysis of storage tank hazards and its mitigation measures using Bow-Tie diagram. *Res Rev J Eng Technol*. 2018;**7**(3):1-8. Link
18. Cockshott J. Probability bow-ties: a transparent risk management tool. *Process Saf Environ Prot*. 2005;**83**(4):307-16. DOI: 10.1205/psep.04380
19. Saruei B, Sobhan Ardakani S, Jozi SA. Evaluation and analysis of risks of tanks containing flammable substances in Shiraz Petrochemical Company using bow-tie model. *J Res Environ Health*. 2024;**10**(3):39-51. DOI: 10.22038/jreh.2024.25291
20. Kazemi M, Abbasi A, Kazemi M, Jamshidzadeh N, Rashidi MA. Identification of hazards and risk assessment among various units of Ilam Gas Refinery using the integrated approach of Bow-tie and FMEA methods. *Sci J Ilam Univ Med Sci*. 2021;**29**(2):58-68. DOI: 10.52547/sjimu.29.2.1
21. Van Thienen-Visser K, Hendriks D, Marsman A, Nepveu M, Groenenberg R, Wildenborg T, et al. Bow-tie risk assessment combining causes and effects applied to gas oil storage in an abandoned salt cavern. *Eng Geol*. 2014;**168**:149-66. DOI:10.1016/j.enggeo.2013.11.002
22. Park HK, Jung SW, Choi YJ, Lee MC. Semi-quantitative risk assessment using Bow-tie method for the establishment of safety management system of hydrogen fuel storage facility in a combined cycle power plant. *J Korean Soc Saf*. 2024; **39**(2):75-86. DOI: 10.14346/JKOSOS.2024.39.2.75
23. Karimi Dehkordi M, Behnam B, Ghasemi Pirbalouti R. Probabilistic fire risk analysis of process pipelines. *J Loss Prev Process Ind*. 2022; **80**:104907. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104907

[Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-05]