Shahid Beheshti University of Medical Sciences

Irtiqa Imini Pishgiri Masdumiyat (i.e., Safety Promotion and Injury Prevention) Original Article
2026; Vol. 14; No. 1; 57-73 Journals.sbmu.ac.ir/spip

Development of a Hierarchical Integrated Risk Assessment Framework for Petrochemical Process Systems: A Case Study of a Triethylaluminum Production Unit

Mohammad Hossein Mohammadi Ashnani[*1,2], Ghazaleh Rafiei[3]

1. Department of Environmental Science, Faculty of Agriculture and Environment, University of Arak, Arak, Iran
2. Environmental Sciences Research Institute, University of Arak, Arak, Iran
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Arak, Arak, Iran

Received: 2026/08/16 Accepted: 2026/10/12

Abstract

Background and Aim: Occupational safety and accident prevention in process industries, particularly in petrochemical units that handle hazardous materials and interconnected systems, require systematic hazard identification and risk assessment methods suited to the nature of the process. This study aimed to develop a hierarchical integrated framework for risk assessment in petrochemical process systems.

Methods: The study followed a design science research approach, and the foundations of the framework were drawn from a systematic review of the literature and relevant standards. Five techniques were selected for the framework: HAZOP, FMEA, FTA, ETA, and Bow-Tie. Selection was based on applicability to industrial processes, scientific and standards-based support, coverage of different dimensions of risk assessment, and capacity for integration. The process system was then decomposed into functional nodes, each comprising a related set of equipment, lines, process streams, and control and protective components. A suitable technique or combination of techniques was assigned to each node according to its characteristics and analytical requirements. The proposed framework was implemented in a triethylaluminum (TEAL) production unit, a process system linked to the polyolefin production chain.

Results: Across eight process nodes, 17 technique applications were recorded. HAZOP was applied in five nodes, FMEA in four, FTA and Bow-Tie in three each, and ETA in two. In this case study, a node-based logic, in place of a uniform choice of method, allowed the combination of techniques to be matched to the characteristics of each part of the system. It may also help narrow the analytical gaps between hazard identification, cause and consequence analysis, and the evaluation of protective barriers.

Conclusion: The framework can provide a methodological basis for strengthening the identification and prevention of accident scenarios in complex petrochemical systems.

Keywords: *Integrated framework, Petrochemical industry, Process safety, Risk assessment, Triethylaluminum (TEAL)*

Please cite this article as:
Mohammadi Ashnani MH, Rafiei G. Development of a Hierarchical Integrated Risk Assessment Framework for Petrochemical Process Systems: A Case Study of a Triethylaluminum Production Unit. Irtiqa Imini Pishgiri Masdumiyat. 2026;14(1):57-73. https://doi.org/10.22037/iipm.v14i1.53182

[*] **Corresponding Author:** m-ashnani@araku.ac.ir

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی

ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها

مقاله پژوهشی

Journals.sbmu.ac.ir/spip

سال ۱۴۰۵، دوره ۱۴، شماره ۱، ۷۳-۵۷

توسعه چارچوب تلفیقی سلسله‌مراتبی ارزیابی ریسک در سامانه‌های فرایندی صنایع پتروشیمی مطالعه موردی: واحد تولید تری‌اتیل‌آلومینیوم

محمدحسین محمدی اشنانی*[۱و۲]، غزاله رفیعی[۳]

۱. گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲. پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۰

چکیده

سابقه و هدف: ایمنی شغلی و پیشگیری از حوادث در صنایع فرایندی، به‌ویژه در واحدهای پتروشیمیایی که با مواد خطرناک و سامانه‌های به‌هم‌پیوسته سروکار دارند، مستلزم شناسایی نظام‌مند خطرات و انتخاب روش‌های ارزیابی ریسک متناسب با ماهیت فرایند است. این پژوهش با هدف توسعه یک چارچوب تلفیقی سلسله‌مراتبی جهت ارزیابی ریسک در سامانه‌های فرایندی صنایع پتروشیمی انجام شد.

روش کار: پژوهش از نظر رویکرد، در چارچوب پژوهش طراحی علم می‌باشد و مبانی چارچوب از طریق مرور نظام‌مند ادبیات و استانداردهای مرتبط استخراج شد. بر اساس معیارهای کاربردپذیری در فرایندهای صنعتی، پشتوانه علمی و استانداردی، پوشش ابعاد مختلف ارزیابی ریسک و قابلیت تلفیق، پنج تکنیک HAZOP، FMEA، FTA، ETA و Bow-Tie برای چارچوب انتخاب شدند. در ادامه، سامانه فرایندی به گره‌های عملکردی شامل مجموعه مرتبطی از تجهیزات، خطوط، جریان‌های فرایندی و اجزای کنترلی و حفاظتی تفکیک و بر اساس ویژگی‌ها و نیاز تحلیلی هر گره، تکنیک یا ترکیب مناسب تعیین شد. چارچوب پیشنهادی در واحد تولید تری‌اتیل‌آلومینیوم (TEAL) به‌عنوان یک سامانه فرایندی مرتبط با زنجیره تولید پلی‌الفین‌ها پیاده‌سازی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که در هشت گره فرایندی، ۱۷ مورد به‌کارگیری تکنیک ثبت شد؛ به‌گونه‌ای که HAZOP در پنج، FMEA در چهار، FTA و Bow-Tie هرکدام در سه و ETA در دو گره به‌کار گرفته شدند. در مطالعه موردی حاضر، به‌کارگیری منطق گره‌محور به‌جای انتخاب یکنواخت روش، امکان تطبیق ترکیب تکنیک‌ها با ویژگی‌های هر بخش از سامانه را فراهم کرد و می‌تواند به کاهش شکاف‌های تحلیلی میان شناسایی خطر، تحلیل علل و پیامدها و ارزیابی موانع حفاظتی کمک کند.

نتیجه‌گیری: این چارچوب می‌تواند مبنایی روش‌شناختی برای تقویت فرایند شناسایی و پیشگیری از سناریوهای حادثه در سامانه‌های پیچیده پتروشیمیایی فراهم سازد.

واژگان کلیدی: *ارزیابی ریسک، پتروشیمی، پیشنهاد ایمنی فرایند، تری‌اتیل‌آلومینیوم، چارچوب تلفیقی*

به این مقاله، به صورت زیر استناد کنید:

محمدی اشنانی م ح، رفیعی غ. توسعه چارچوب تلفیقی سلسله‌مراتبی ارزیابی ریسک در سامانه‌های فرایندی صنایع پتروشیمی مطالعه موردی: واحد تولید تری‌اتیل‌آلومینیوم. ارتقای ایمنی و پیشگیری از مصدومیت‌ها. ۱۴۰۵؛۱۴(۱):۷۳-۵۷. https://doi.org/10.22037/iipm.v14i1.53182

***نویسنده مسئول مکاتبات:** m-ashnani@araku.ac.ir

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

مقدمه

ایمنی شغلی و پیشگیری از حوادث در صنایع فرایندی، به‌دلیل حضور هم‌زمان مواد خطرناک، انرژی‌های ذخیره‌شده و تجهیزات و فرایندهای به‌هم‌پیوسته، یکی از چالش‌های اساسی مدیریت ایمنی در محیط‌های صنعتی محسوب می‌شود. در این صنایع، یک انحراف فرایندی یا نقص در عملکرد تجهیزات می‌تواند در مدت کوتاهی به رویدادهایی نظیر نشت مواد شیمیایی، حریق، انفجار و انتشار مواد خطرناک منجر شود و در صورت شکست لایه‌های حفاظتی، سلامت و ایمنی کارکنان و افراد حاضر در محدوده تأسیسات را تحت تأثیر قرار دهد. بررسی حوادث بزرگ ثبت‌شده در سامانه گزارش‌دهی حوادث بزرگ اتحادیه اروپا (MARS) نیز نشان داده است که نقص تجهیزات و عوامل مرتبط با فرایند از عوامل مهم وقوع حوادث در صنایع شیمیایی و فرایندی بوده‌اند؛ موضوعی که اهمیت شناسایی نظام‌مند خطرات و کنترل پیشگیرانه سناریوهای حادثه را برجسته می‌کند (۱). پیچیدگی فزاینده سامانه‌های صنعتی نیز ضرورت استفاده از رویکردهای نظام‌مند و چندلایه برای شناسایی خطر، تحلیل علل و پیامدها و ارزیابی موانع حفاظتی را افزایش داده است (۲).

سامانه‌های فرایندی صنایع نفت و پتروشیمی از مجموعه‌ای به‌هم‌پیوسته از تجهیزات، خطوط انتقال، جریان‌های مواد، سامانه‌های کنترلی و لایه‌های حفاظتی تشکیل شده‌اند و رفتار ایمنی آن‌ها حاصل تعامل میان این اجزا در شرایط مختلف عملیاتی است. ازاین‌رو، وقوع یک حادثه معمولاً نتیجه یک خرابی منفرد نیست، بلکه می‌تواند از برهم‌کنش چندین عامل شامل انحراف فرایندی، نقص تجهیزاتی، خطای انسانی، شرایط عملیاتی نامطلوب و شکست یا ناکارآمدی موانع حفاظتی شکل گیرد. در چنین شرایطی، ارزیابی ریسک تنها به شناسایی خطرات محدود نمی‌شود، بلکه مستلزم تحلیل منظم علل، مسیرهای توسعه حادثه، پیامدهای بالقوه و میزان کفایت لایه‌های پیشگیرانه و کاهنده است. در چارچوب مدیریت ریسک، استانداردهای بین‌المللی نیز بر ضرورت شناسایی، تحلیل و ارزیابی نظام‌مند ریسک متناسب با ماهیت و زمینه سامانه تأکید دارند (۳ و ۴).

این ضرورت در فرایندهایی که با مواد بسیار واکنش‌پذیر و خطرناک سروکار دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. تری‌اتیل‌آلومینیوم (TEAL) یکی از مواد مهم مورد استفاده در زنجیره تولید پلیمر و به‌ویژه به‌عنوان هم‌کاتالیست در فرایندهای پلیمریزاسیون زیگلر–ناتا برای تولید پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن است. این ماده به دلیل ماهیت بسیار پیروفوریک خود، در تماس با اکسیژن یا رطوبت می‌تواند به‌سرعت واکنش داده و موجب ایجاد حریق شود. مطالعات تجربی نشان داده‌اند که واکنش TEAL با آب می‌تواند با افزایش قابل‌توجه دما و فشار همراه باشد و تشکیل گونه‌های واسط واکنش‌پذیر، رفتار حرارتی سامانه را پیچیده کند (۵). همچنین، مطالعات سینتیکی بر سرعت بالای واکنش و خوداشتعالی TEAL در تماس با اکسیژن تأکید کرده‌اند (۶). بنابراین، ایمنی واحدهای ذخیره‌سازی، رقیق‌سازی، انتقال و تزریق این ماده به عملکرد صحیح مجموعه‌ای از تجهیزات، شرایط عملیاتی و لایه‌های حفاظتی وابسته است و هرگونه از دست رفتن کنترل فرایند یا یکپارچگی سامانه می‌تواند به پیامدهای شدید منجر شود.

با وجود توسعه طیف گسترده‌ای از روش‌ها و تکنیک‌های ارزیابی ریسک، هر یک از این رویکردها معمولاً بر بخش یا جنبه مشخصی از مسئله ریسک تمرکز دارند و از نظر دامنه شناسایی خطر، سطح تحلیل، نحوه مدل‌سازی علل و پیامدها، توجه به وابستگی میان اجزای سامانه و ارزیابی موانع حفاظتی، دارای قابلیت‌ها و محدودیت‌های متفاوتی هستند. ازاین‌رو، اتکا به یک رویکرد منفرد ممکن است موجب ایجاد شکاف‌هایی در فرایند شناسایی و تحلیل خطر شود؛ به‌ویژه در سامانه‌هایی که در آن تجهیزات، جریان‌های فرایندی، شرایط عملیاتی، عوامل انسانی و لایه‌های حفاظتی به‌صورت متقابل بر یکدیگر اثر می‌گذارند. در سال‌های اخیر، به همین دلیل، توجه پژوهشگران به استفاده از رویکردهای ترکیبی و تلفیقی افزایش یافته است تا محدودیت‌های ناشی از تمرکز هر روش بر یک جنبه خاص از ریسک کاهش یابد (۲ و ۷).

بااین‌حال، تلفیق چند روش به‌تنهایی به معنای ایجاد یک چارچوب ارزیابی ریسک منسجم نیست. در بسیاری از مطالعات، ترکیب روش‌ها در سطح کل سامانه یا برای یک سناریوی خاص از پیش تعیین می‌شود و کمتر به این مسئله پرداخته شده است که برای هر بخش از یک سامانه فرایندی، با توجه به ویژگی‌های عملکردی، نوع خطر، ساختار تجهیزات و خطوط، شرایط عملیاتی و نقش موانع حفاظتی، چه نوع تحلیل و چه ترکیبی از روش‌ها باید انتخاب شود. این خلأ روش‌شناختی از آن جهت اهمیت دارد که بخش‌های مختلف یک واحد فرایندی الزاماً ماهیت یکسانی ندارند و بنابراین نمی‌توان انتظار داشت

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

یک الگوی ثابت ارزیابی ریسک برای تمام بخش‌های سامانه، بالاترین سطح پوشش تحلیلی را فراهم کند. از این منظر، مسئله اصلی صرفاً انتخاب یک روش مناسب نیست، بلکه ایجاد قاعده‌ای ساختاریافته برای تصمیم‌گیری درباره انتخاب، توالی و تلفیق روش‌های ارزیابی ریسک متناسب با ویژگی‌های هر بخش از سامانه است.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف توسعه یک چارچوب تلفیقی سلسله‌مراتبی جهت ارزیابی ریسک در سامانه‌های فرایندی صنایع پتروشیمی انجام شده است. در این چارچوب، سامانه فرایندی ابتدا به گره‌های عملکردی تفکیک می‌شود و سپس بر اساس ویژگی‌های هر گره، ماهیت مسئله تحلیلی و نیازهای ارزیابی، روش یا ترکیبی از روش‌های مناسب تعیین می‌شود. در ادامه، خروجی‌های حاصل از مراحل مختلف تحلیل به‌صورت هدفمند در یک ساختار تصمیم‌گیری یکپارچه مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای نشان دادن نحوه کاربرد این چارچوب، واحد تولید تری‌اتیل‌آلومینیوم به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است؛ زیرا ماهیت بسیار واکنش‌پذیر ماده، تنوع تجهیزات و سامانه‌های فرایندی و حفاظتی و پیامدهای بالقوه ناشی از از دست رفتن کنترل فرایند، آن را به نمونه مناسبی برای آزمون یک رویکرد گره‌محور در ارزیابی ریسک تبدیل می‌کند. نوآوری اصلی پژوهش، نه در افزایش تعداد روش‌های ارزیابی، بلکه در سطح صورت‌بندی روش‌شناختی و توسعه منطق تصمیم‌گیری برای انتخاب و تلفیق هدفمند روش‌ها متناسب با ویژگی‌های هر گره فرایندی است.

پیشینه پژوهش

بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های ایرانی و بین‌المللی در زمینه ارزیابی ریسک واحدهای فرایندی، صرفاً بر پایه یک تکنیک واحد بنا شده‌اند. برای نمونه، در مطالعه‌ای بر روی واحد تانک‌فارم پالایشگاه گاز شهید هاشمی‌نژاد سرخس، شناسایی و ارزیابی مخاطرات فرایندی و زیست‌محیطی صرفاً با روش HAZOP انجام شده است (۸). به همین ترتیب، در واحد آمونیاک پتروشیمی خراسان نیز مطالعه مخاطرات و راهبری عملیات و آنالیز ریسک تنها بر پایه HAZOP صورت گرفته است (۹). این مطالعات اگرچه در شناسایی انحرافات فرایندی مؤثرند، اما به دلیل ماهیت کیفی HAZOP، قادر به کمّی‌سازی احتمال وقوع رویدادها، اولویت‌بندی خرابی تجهیزات یا مدل‌سازی مسیرهای توسعه پیامد نیستند. در سوی دیگر، مطالعاتی نیز صرفاً بر پایه FMEA انجام شده‌اند؛ برای مثال، شیائو و همکاران (۱۰) با معرفی عدد اولویت ریسک وزن‌دار، دقت اولویت‌بندی حالات خرابی چندگانه را در FMEA بهبود بخشیدند، اما این بهبود صرفاً در سطح یک روش باقی مانده و تعاملات علّی میان چند حالت خرابی را پوشش نمی‌دهد. آن و چانگ (۱۱) نیز با تلفیق منطق فازی با HAZOP، عدم قطعیت قضاوت کارشناسی را در همان چارچوب تک‌روشی کاهش دادند. این دسته از مطالعات به‌روشنی نشان می‌دهند که تقویت درون‌روشی (مثلاً فازی‌سازی یا وزن‌دهی) نمی‌تواند محدودیت‌های ذاتی هر تکنیک، مانند ناتوانی HAZOP در تحلیل عمق علّی یا ناتوانی FMEA در پوشش تعاملات چندجزئی را برطرف کند.

برای غلبه بر این محدودیت، گروهی از پژوهشگران به‌سمت ترکیب دو روش حرکت کرده‌اند. داووتولا و همکاران (۱۲) رویکرد AHP-FTA را برای رتبه‌بندی ریسک خطوط لوله نفتی بر مبنای داده‌های عینی و قضاوت ساختاریافته ارائه دادند. سِوِری و همکاران (۱۳) با تلفیق تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (FTOPSIS) با HAZOP، مخاطرات بحرانی یک واحد آزمایشی ارتقای بیوگاز را شناسایی و رتبه‌بندی کردند. سرافراز و همکاران (۱۴) نیز با ترکیب HAZOP، LOPA، فازی-LOPA و نمودار پاپیونی، ریسک ایمنی، بهداشتی و زیست‌محیطی واحد خروجی آروماتیک یک مجتمع پتروشیمی ایرانی را ارزیابی کردند. این دسته از پژوهش‌ها گامی روبه‌جلو نسبت به مطالعات تک‌روشی محسوب می‌شوند، زیرا حداقل بخشی از ضعف یک روش را با روش دوم پوشش می‌دهند. با این حال، این ترکیب‌ها معمولاً محدود به دو تکنیک هستند و به‌صورت یکنواخت بر کل واحد یا کل فرآیند اعمال می‌شوند (۱۴-۱۲)، بدون آنکه سازوکاری برای تطبیق ترکیب روش‌ها با ماهیت متفاوت خطر در بخش‌های مختلف همان واحد ارائه دهند؛ یعنی همان ترکیب ثابتِ روش‌ها، صرف‌نظر از اینکه گره فرایندی مورد بررسی با خطر شکست تجهیز سروکار دارد یا با خطر نشت ماده‌ای پیروفوریک، به‌کار گرفته می‌شود.

مرور نظام‌مند اخیر ادبیات ایمنی و امنیت فرایند نیز نشان می‌دهد که HAZOP، FMEA، FTA، ETA و Bow-tie هنوز پرکاربردترین تکنیک‌های ارزیابی ریسک صنایع فرایندی‌اند، اما روند روبه‌رشدی به‌سمت رویکردهای پویا و سیستمی (مانند FRAM و STAMP) برای پوشش تعاملات پیچیده سامانه‌ای وجود دارد (۲). با وجود این پیشرفت‌ها، حتی جامع‌ترین مدل‌های ترکیبی موجود، مجموعه‌ای از

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

روش‌ها را به‌عنوان یک بسته واحد و ثابت برای کل سامانه به‌کار می‌گیرند و منطق سلسله‌مراتبی و گره‌محور که در آن خروجی هر روش به‌طور مستقیم ورودی روش بعدی می‌شود و ترکیب روش‌ها از یک بخش فرایندی به بخش دیگر بر اساس ماهیت خطر آن بخش تغییر می‌کند، در هیچ‌یک از این مطالعات به‌صورت صریح صورت‌بندی نشده است.

از منظر موضوعی نیز، ادبیات موجود درباره تری‌اتیل‌آلومینیوم (TEAL) تقریباً به‌طور کامل بر شیمی واکنش و رفتار احتراقی این ماده متمرکز است، نه بر ارزیابی ریسک فرایندی واحدهای تولید آن. ساتو و همکاران (۵) خطرات واکنش TEAL با آب را تحت شرایط بسته بررسی کردند و فرولوف و همکاران (۶) مدل سینتیکی خوداشتعالی قطرات TEAL در هوا را ارائه دادند؛ اما هیچ‌یک از این مطالعات به شناسایی سناریوهای خطر در سطح تجهیزات (مخازن، پمپ‌ها، شبکه بلانکتینگ نیتروژن) یا به‌کارگیری فنون مهندسی ایمنی فرایند مانند HAZOP یا Bow-tie برای این نوع واحد نپرداخته‌اند. به بیان دیگر، در حالی که ماهیت پیروفوریک و خطرناک TEAL به‌خوبی در ادبیات علمی مستند شده، در جستجوی انجام‌شده مطالعه‌ای شناسایی نشد که یک چارچوب ارزیابی ریسک فرایندی را به‌طور اختصاصی برای واحد تولید یا تزریق TEAL به‌کار گرفته باشد.

بنابراین مرور پیشینه پژوهش سه شکاف به‌هم‌مرتبط را آشکار می‌سازد. نخست مطالعات تک‌روشی قادر به پوشش هم‌زمان ابعاد کیفی، نیمه‌کمّی و کمّی ریسک نیستند (۱۵)؛ همچنین مطالعات ترکیبی انجام شده، هرچند نقاط کور یکدیگر را تا حدی می‌پوشانند، اما یا محدود به تعداد کمی تکنیک‌اند یا به‌صورت یکنواخت و غیرِ سلسله‌مراتبی بر کل سیستم اعمال می‌شوند (۱۴-۱۲)، بدون سازوکاری برای انتخاب هدفمند ترکیب روش در سطح هر بخش فرایندی؛ و در نهایت، در حوزه موضوعی مواد فوق‌واکنش‌پذیر و پیروفوریک نظیر TEAL، با وجود مستندبودن گسترده خطر شیمیایی این مواد، هیچ چارچوب ارزیابی ریسک فرایندی متناسب با ویژگی‌های عملیاتی چنین واحدهایی ارائه نشده است. به همین دلیل، پژوهش حاضر بر آن است تا با توسعه یک چارچوب تلفیقی سلسله‌مراتبی گره‌محور، که در آن ترکیبی از روشهای مختلف ارزیابی برای هر گره فرایندی به‌صورت هدفمند و متناسب با ماهیت خطر، نوع تجهیز و نقش لایه‌های حفاظتی آن گره انتخاب می‌شود و خروجی هر روش به‌عنوان ورودی مرحله بعد به کار می‌رود، این سه شکاف را هم‌زمان پاسخ دهد؛ و کاربردپذیری این چارچوب را با اجرای عملی آن بر روی واحد تولید تری‌اتیل‌آلومینیوم (TEAL)، به‌عنوان نمونه‌ای واقعی و کم‌مطالعه از یک سامانه فرآیندی حاوی ماده پیروفوریک، نشان دهد.

روش کار

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نوع توسعه روش (Method Development Research) با رویکرد طراحی علم (Design Science Research) است که با هدف توسعه یک چارچوب سلسله‌مراتبی برای انتخاب و یکپارچه‌سازی روش‌های ارزیابی ریسک در صنایع فرایندی انجام شد. در این رویکرد، تمرکز پژوهش بر طراحی، توسعه و ارزیابی یک مصنوع پژوهشی (Research Artifact) در قالب یک چارچوب تصمیم‌یار است؛ ازاین‌رو، پژوهش حاضر در زمره مطالعات روش‌شناختی قرار می‌گیرد که هدف آن ارائه راهکاری نظام‌مند برای حل یک مسئله مهندسی است (۱۶ و ۱۷). فرآیند توسعه چارچوب پیشنهادی در سه مرحله اصلی شامل استخراج نظام‌مند دانش از ادبیات علمی و استانداردهای بین‌المللی مدیریت ریسک، انتخاب نظام‌مند تکنیک‌های ارزیابی ریسک و توسعه منطق تصمیم برای یکپارچه‌سازی آن‌ها در قالب یک چارچوب سلسله‌مراتبی و پیاده‌سازی و ارزیابی چارچوب در واحد تولید تری‌اتیل‌آلومینیوم (TEAL) انجام شد. این فرایند بر چرخه تکرارشونده «طراحی-ارزیابی» استوار است که هسته اصلی پژوهش‌های مبتنی بر طراحی علم را تشکیل می‌دهد (۱۶).

طراحی چارچوب بر مبنای اصول مدیریت ریسک مندرج در استاندارد ISO 31000:2018 و دستورالعمل انتخاب تکنیک‌های ارزیابی ریسک در IEC 31010:2019 انجام شد. این اسناد تأکید دارند که هیچ تکنیک منفردی قادر به پوشش تمامی ابعاد شناسایی مخاطرات، تحلیل علل، ارزیابی پیامدها و پشتیبانی از تصمیم‌گیری نیست؛ ازاین‌رو، انتخاب و تلفیق روش‌ها باید متناسب با اهداف تحلیل، ویژگی‌های سامانه و ماهیت مخاطرات صورت گیرد (۳ و ۱۸) بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در توسعه یک منطق تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی برای انتخاب و یکپارچه‌سازی هدفمند روش‌های ارزیابی ریسک است. توسعه چارچوب پیشنهادی بر استخراج نظام‌مند دانش موجود در زمینه روش‌های ارزیابی ریسک فرایندی استوار بود. ازاین‌رو،

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

مرور ادبیات نه به‌عنوان هدف اصلی پژوهش، بلکه به‌عنوان ابزاری برای شناسایی تکنیک‌های موجود، تحلیل قابلیت‌ها و محدودیت‌های آن‌ها و استخراج دانش موردنیاز برای توسعه چارچوب انجام شد. این رویکرد با اصول پژوهش‌های مبتنی بر طراحی علم همسو است که در آن، شواهد علمی به‌عنوان مبنای طراحی و توسعه مصنوعات پژوهشی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۶ و ۱۷).

به‌منظور افزایش قابلیت اعتماد و شفافیت فرایند انتخاب مطالعات، مراحل شناسایی، غربالگری، ارزیابی صلاحیت و انتخاب نهایی منابع بر اساس دستورالعمل PRISMA 2020 انجام شد (۱۹). جامعه پژوهشی این مطالعه شامل تمامی مطالعات علمی مرتبط با روش‌های ارزیابی ریسک در صنایع فرایندی، به‌ویژه صنایع نفت، گاز و پتروشیمی بود. جست‌وجوی منابع، بدون محدودیت زمانی و برای منابع انگلیسی زبان، در پایگاه‌های Web of Science، Scopus، ScienceDirect، PubMed و به‌منظور تکمیل جست‌وجو در Google Scholar انجام شد.

راهبرد جست‌وجو در دو مرحله طراحی شد. در مرحله نخست، جست‌وجوی اکتشافی با استفاده از کلیدواژه‌های عمومی شامل Process Safety، Risk Assessment، Risk Assessment Techniques، Process Hazard Analysis، Hazard Identification، Integrated Risk Assessment و Hybrid Risk Assessment و با بهره‌گیری از عملگرهای بولی AND و OR انجام شد تا طیف کاملی از تکنیک‌های ارزیابی ریسک مورد استفاده در صنایع فرایندی شناسایی شود. معیارهای ورود به مطالعه شامل مقالات علمی داوری‌شده، استانداردهای بین‌المللی و منابع مرجع تخصصی مرتبط با ارزیابی ریسک فرایندی بود که اطلاعات روش‌شناختی کافی برای تحلیل قابلیت‌ها، محدودیت‌ها و حوزه کاربرد روش‌های مختلف ارائه می‌کردند. در مقابل، مطالعات فاقد تشریح شفاف روش، پژوهش‌های نامرتبط با صنایع فرایندی، گزارش‌های غیرعلمی، منابع تکراری و مقالات مروری فاقد ارزش افزوده روش‌شناختی از فرایند انتخاب حذف شدند. غربالگری عنوان و چکیده و سپس بررسی متن کامل توسط دو پژوهشگر به‌طور مستقل، انجام شد و اختلاف‌نظرها با بحث یا نظر داور سوم رفع گردید.

پس از انتخاب مطالعات نهایی، تمامی تکنیک‌های ارزیابی ریسک شناسایی‌شده در ادبیات علمی و استاندارد IEC 31010:2019 به‌صورت تطبیقی مورد بررسی قرار گرفتند. انتخاب تکنیک‌های مورد استفاده در چارچوب پیشنهادی صرفاً بر مبنای فراوانی کاربرد آن‌ها انجام نشد، بلکه بر اساس معیارهای استخراج‌شده از استانداردهای ISO 31000:2018 و IEC 31010:2019 و منابع مرجع ایمنی فرایند، شامل کاربرد گسترده در صنایع فرایندی، پذیرش در استانداردها و ادبیات تخصصی، قابلیت پوشش یکی از مراحل اصلی زنجیره ارزیابی ریسک شامل شناسایی مخاطرات، تحلیل علل، تحلیل پیامدها و تحلیل موانع کنترلی و امکان یکپارچه‌سازی در قالب یک چارچوب سلسله‌مراتبی انجام شد (۳، ۱۸ و ۲۰). این چهار معیار با کدهای C1: کاربرد در صنایع فرایندی؛ C2: پذیرش در استانداردها و ادبیات؛ C3: توان پوشش یکی از مراحل اصلی زنجیره ارزیابی ریسک و C4: امکان یکپارچه‌سازی، «معیارهای ورود تکنیک» نامیده می‌شوند تا از «معیارهای تصمیم‌گیری گره» که در بخش بعدی ارائه می گردد، متمایز باشند. ادبیات نشان می‌دهد هیچ روش واحدی برای همه مسائل ریسک صنعتی کفایت نمی‌کند (۲۱) و انتخاب تکنیک نیازمند معیارهای صریح و تأییدشده توسط خبرگان است (۲۲). بر این اساس، تکنیک‌های HAZOP، FMEA، FTA، ETA و Bow-Tie به‌عنوان اجزای اصلی چارچوب انتخاب شدند؛ زیرا این روش‌ها به‌صورت مکمل، چرخه ارزیابی ریسک فرایندی را از شناسایی مخاطرات تا تحلیل علل، ارزیابی پیامدها و تحلیل موانع کنترلی پوشش می‌دهند. در مرحله بعدی، جست‌وجوی هدفمند با استفاده از نام تکنیک‌های منتخب و مترادف‌های آن‌ها انجام شد تا جزئیات روش‌شناختی، قابلیت‌ها، محدودیت‌ها، پیش‌نیازهای اجرایی و مطالعات کاربردی مرتبط با هر روش استخراج و مبنای توسعه چارچوب سلسله‌مراتبی پیشنهادی قرار گیرد. پس از انتخاب تکنیک‌های اصلی، توسعه چارچوب پیشنهادی بر پایه رویکرد سنتز طراحی (Design Synthesis) و مطابق با اصول پژوهش‌های طراحی علم (Design Science Research) انجام شد. در این مرحله، اطلاعات استخراج‌شده از مطالعات منتخب شامل هدف کاربرد، نوع مخاطرات قابل شناسایی، الزامات اجرایی، داده‌های ورودی، نوع خروجی، سطح تحلیل، قابلیت‌ها، محدودیت‌ها و حوزه کاربرد هر تکنیک به‌صورت تطبیقی کدگذاری و تحلیل شد تا قابلیت‌های مکمل، هم‌پوشانی‌های عملکردی و ارتباط میان تکنیک‌های مختلف ارزیابی ریسک شناسایی شود (۱۶ و ۱۷). این تحلیل، مبنای توسعه یک منطق تصمیم برای انتخاب و تلفیق نظام‌مند تکنیک‌های ارزیابی ریسک در چارچوب پیشنهادی قرار گرفت.

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

بر اساس اصول مدیریت ریسک مندرج در ISO 31000:2018 و دستورالعمل IEC 31010:2019، انتخاب یک تکنیک ارزیابی ریسک باید متناسب با زمینه کاربرد، هدف تحلیل، ماهیت مخاطره، ویژگی‌های سامانه و اطلاعات در دسترس انجام شود و هیچ روش منفردی قادر به پوشش هم‌زمان تمامی مراحل شناسایی مخاطرات، تحلیل علل، تحلیل پیامدها و ارزیابی اثربخشی موانع کنترلی نیست (۳ و ۱۸). بر همین اساس، در پژوهش حاضر به‌جای به‌کارگیری یک مجموعه ثابت از تکنیک‌ها برای کل سامانه، یک منطق تصمیم‌گیری گره‌محور (Node-Based Decision Logic) توسعه داده شد که انتخاب ترکیب مناسب روش‌های ارزیابی ریسک را متناسب با ویژگی‌های هر گره فرایندی امکان‌پذیر می‌سازد.

در این پژوهش، گره فرایندی (Process Node) به‌عنوان یک محدوده عملکردی مشخص از سامانه و واحد پایه تحلیل و تصمیم‌گیری در چارچوب پیشنهادی تعریف شد. مفهوم گره از منطق تقسیم‌بندی سامانه در مطالعات HAZOP اقتباس شده است؛ به‌گونه‌ای که در HAZOP، فرایند به بخش‌هایی با حدود مشخص و قصد طراحی (Design Intent) قابل‌بیان تقسیم می‌شود تا انحرافات هر بخش به‌صورت نظام‌مند بررسی شوند (۱۸). با این‌حال، متناسب با هدف چارچوب حاضر، گره صرفاً به یک تجهیز منفرد محدود نشد، بلکه شامل مجموعه‌ای از تجهیزات مرتبط، خطوط لوله و اتصالات، جریان‌های فرایندی، ابزار دقیق، اجزای کنترلی و لایه‌های حفاظتی مرتبط با یک عملکرد فرایندی مشخص در نظر گرفته شد. حدود هر گره بر اساس پیوستگی عملکردی، مسیر جریان، تغییرات معنی‌دار شرایط فرایندی و ارتباط میان اجزای سامانه تعیین شد. بنابراین، در چارچوب حاضر، گره علاوه بر آنکه واحد تحلیل فرایندی است، به‌عنوان واحد تصمیم‌گیری برای انتخاب و تلفیق تکنیک‌های ارزیابی ریسک نیز مورد استفاده قرار گرفت.

به‌منظور تعیین مناسب‌ترین ترکیب تکنیک‌های ارزیابی ریسک برای هر گره، یک قاعده تصمیم مبتنی بر پنج معیار تدوین شد. این معیارها با سنتز مفهومی استانداردهای ISO 31000 و IEC 31010 و همچنین منابع مرجع ایمنی فرایند استخراج شدند و که شامل ماهیت غالب مخاطره؛ نظیر انحراف فرایندی، خرابی تجهیز یا مخاطرات واکنش‌پذیری شیمیایی، هدف تحلیل؛ شناسایی مخاطره، تحلیل علل، تحلیل پیامدها یا ارزیابی موانع کنترلی، پیچیدگی عملکردی گره؛ تعداد و نوع تجهیزات، جریان‌های فرایندی، حلقه‌های کنترلی و میزان برهم‌کنش اجزا، شدت بالقوه پیامدهای حادثه و میزان وابستگی سیستمی گره؛ تأثیر خرابی گره بر عملکرد سایر بخش‌های سامانه بود (۳، ۱۸ و ۲۰). در ادامه، این معیارها با نمادهای N1 (ماهیت غالب مخاطره)، N2 (هدف تحلیل)، N3 (پیچیدگی عملکردی گره)، N4 (شدت پیامدهای بالقوه) و N5 (وابستگی سیستمی گره و اثر خرابی آن بر سایر بخش‌ها) نشان داده می‌شوند. این معیارها مبنای تصمیم‌گیری برای انتخاب یا ترکیب تکنیک‌های ارزیابی ریسک در هر گره را تشکیل دادند. بر اساس این منطق، تکنیک‌ها نه به‌عنوان ابزارهایی مستقل، بلکه به‌عنوان اجزای یک زنجیره تحلیلی در نظر گرفته شدند؛ به‌گونه‌ای که خروجی هر مرحله، اطلاعات موردنیاز مرحله بعد را فراهم می‌سازد. در این ساختار، HAZOP برای شناسایی نظام‌مند انحرافات فرایندی، FMEA برای تحلیل حالات خرابی تجهیزات و اجزای بحرانی، FTA برای مدل‌سازی روابط علّی و تحلیل علل ریشه‌ای، ETA برای تحلیل مسیرهای گسترش حادثه و Bow-Tie برای یکپارچه‌سازی علل، پیامدها و موانع پیشگیرانه و کاهنده به‌کار گرفته شدند. بنابراین، انتخاب یا حذف هر تکنیک در هر گره تابع قواعد تصمیم فوق بوده و به ویژگی‌های همان گره وابسته است، نه به یک توالی از پیش تعیین‌شده برای کل سامانه. این رویکرد، ضمن اجتناب از به‌کارگیری غیرضروری تکنیک‌ها، امکان توسعه یک چارچوب انطباق‌پذیر (Adaptive)، گره‌محور (Node-Based) و سلسله‌مراتبی (Hierarchical) را فراهم می‌سازد که قابلیت تعمیم به سایر سامانه‌های فرایندی را نیز دارد (۲ و ۷).

به‌منظور ارزیابی چارچوب توسعه‌یافته، واحد تولید تری‌اتیل‌آلومینیوم (TEAL) به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. در این مرحله، ابتدا نمودار جریان فرایند (PFD) و اطلاعات فنی واحد بررسی و سامانه به گره‌های فرایندی مجزا تفکیک شد. سپس، با اعمال قواعد تصمیم تدوین‌شده، ترکیب مناسب تکنیک‌های ارزیابی ریسک برای هر گره تعیین و اجرا گردید. در نهایت، خروجی‌های حاصل از تکنیک‌های منتخب در قالب چارچوب پیشنهادی تلفیق شدند تا امکان تحلیل پیوسته مخاطرات از مرحله شناسایی تا تحلیل علل، ارزیابی پیامدها و بررسی موانع کنترلی فراهم شود. جزئیات اجرای چارچوب و نتایج حاصل از کاربرد آن در واحد TEAL در بخش یافته‌ها و بحث ارائه شده است.

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

بر مبنای منطق تصمیم‌گیری تشریح‌شده، فرایند اجرای چارچوب پیشنهادی در هشت مرحله متوالی سازمان‌دهی شد. این مراحل از تعریف و شناخت سامانه فرایندی آغاز شده و با تفکیک سامانه به گره‌های فرایندی، شناسایی ویژگی‌های هر گره، تعیین هدف و ماهیت تحلیل، انتخاب تکنیک یا تکنیک‌های متناسب، اجرای تحلیل‌ها، انتقال و تلفیق خروجی‌های مرتبط و در نهایت تشکیل نمایه یکپارچه ریسک در سطح هر گره ادامه می‌یابد . مراحل متوالی اجرای چارچوب پیشنهادی در شکل ۱ ارائه شده است. این توالی، ساختار اجرایی چارچوب پیشنهادی را مشخص کرده و مبنای پیاده‌سازی آن در مطالعه موردی پژوهش قرار گرفت.

شکل ۱. مراحل اجرای چارچوب پیشنهادی برای انتخاب، به‌کارگیری و تلفیق تکنیک‌های ارزیابی ریسک در گره‌های فرایندی

بر مبنای شواهد استخراج‌شده از مرور نظام‌مند ادبیات، الزامات استانداردهای مدیریت و ارزیابی ریسک و تحلیل تطبیقی قابلیت‌ها و محدودیت‌های تکنیک‌های منتخب، در این پژوهش یک چارچوب سلسله‌مراتبی، گره‌محور و تلفیقی برای انتخاب و به‌کارگیری تکنیک‌های ارزیابی ریسک در سامانه‌های فرایندی توسعه داده شد. هدف چارچوب، جایگزین‌کردن یک تکنیک ارزیابی ریسک با تکنیک دیگر نیست؛ بلکه ایجاد یک منطق نظام‌مند برای تعیین این موضوع است که برای هر بخش عملکردی از یک سامانه فرایندی، کدام تکنیک یا ترکیب تکنیک‌ها بیشترین تناسب را با ماهیت مخاطره، هدف تحلیل و ساختار سامانه دارد.

این رویکرد با منطق استاندارد IEC 31010:2019 همسو است که بر انتخاب و کاربرد تکنیک‌های ارزیابی ریسک متناسب با شرایط، اهداف و ماهیت مسئله تأکید می‌کند (۴ و ۱۹). همچنین، در چارچوب مدیریت ریسک ISO 31000:2018، ارزیابی ریسک فرایندی وابسته به شناسایی، تحلیل و ارزیابی نظام‌مند ریسک‌هاست و انتخاب ابزارهای تحلیلی باید متناسب با زمینه و هدف ارزیابی انجام شود (۳). از منظر روش‌شناختی نیز، چارچوب توسعه‌یافته در این پژوهش به‌عنوان مصنوع پژوهشی (Research Artifact) در یک رویکرد Design Science طراحی شده است؛ به این معنا که دانش حاصل از مسئله و ادبیات موجود به یک راهکار ساختاریافته و قابل‌اجرا تبدیل شده و قابلیت آن در یک سامانه فرایندی واقعی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (۱۶ و ۱۷).

معماری و منطق عملکرد چارچوب پیشنهادی

معماری چارچوب پیشنهادی از شش لایه شامل؛ ورودی (تعریف و تفکیک سامانه به گره‌های فرایندی)، شناخت ویژگی‌ها و نیاز تحلیلی هر گره، تصمیم‌گیری و انتخاب تکنیک‌ها، اجرا و تولید خروجی‌ها، تلفیق و یکپارچه‌سازی، و خروجی نهایی (نمایهٔ یکپارچهٔ ریسک سامانه) تشکیل شده است. این معماری به‌گونه‌ای طراحی شده است که فرایند انتخاب روش از یک تصمیم کلی در سطح کل واحد به یک تصمیم ساختاریافته در سطح هر گره منتقل شود.

در لایه نخست، سامانه فرایندی بر اساس نمودار جریان فرایند (PFD)، روابط عملکردی و مسیرهای جریان به مجموعه‌ای از گره‌های فرایندی (Process Nodes) تفکیک می‌شود. در این پژوهش، گره فرایندی یک تجهیز منفرد نیست، بلکه یک واحد عملکردی و تحلیلی از سامانه است که می‌تواند شامل یک یا چند تجهیز، خطوط لوله و اتصالات مرتبط، جریان‌های ورودی و خروجی، تجهیزات ابزار دقیق، سامانه‌های کنترلی و شرایط عملیاتی وابسته باشد. بنابراین، مرزبندی گره بر مبنای همبستگی عملکردی و فرایندی اجزای آن انجام می‌شود، به‌گونه‌ای که اجزای درون گره در ایجاد، انتقال، کنترل یا تشدید یک سناریوی

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

خطر نقش مرتبط داشته باشند. این رویکرد با اصول تقسیم‌بندی سامانه در مطالعات شناسایی مخاطرات و ارزیابی ایمنی فرایند سازگار است (۲۰).

در لایه دوم، ویژگی‌های هر گره به‌صورت مستقل بررسی می‌شود. این ارزیابی صرفاً بر شناسایی نوع ماده یا تجهیز متمرکز نیست، بلکه مجموعه‌ای از ویژگی‌های مرتبط با رفتار ریسک گره را دربرمی‌گیرد. مهم‌ترین این ویژگی‌ها؛ ماهیت غالب مخاطره، هدف اصلی تحلیل، نوع رویداد ناخواسته، نقش گره در زنجیره حادثه، پیچیدگی روابط علّی، اهمیت عملکردی تجهیزات، شدت بالقوه پیامد و وابستگی گره به سایر اجزای سامانه و لایه‌های حفاظتی می باشد. این ویژگی‌ها مبنای تصمیم‌گیری درباره نیاز به شناسایی انحرافات فرایندی، تحلیل حالات خرابی، بررسی روابط علّی، تحلیل مسیرهای پیامد یا ارزیابی یکپارچه موانع حفاظتی قرار می‌گیرند.

در لایه سوم، بر اساس ویژگی‌های استخراج‌شده برای هر گره، تکنیک یا ترکیب تکنیک‌های ارزیابی ریسک از میان پنج تکنیک منتخب پژوهش، یعنی HAZOP، FMEA، FTA، ETA و Bow-Tie، تعیین می‌شود. انتخاب تکنیک در این مرحله بر اساس یک قاعده ثابت و از پیش تحمیل‌شده برای کل واحد انجام نمی‌شود؛ بلکه تابع تناسب میان ماهیت مسئله تحلیلی گره و قابلیت تکنیک مورد نظر است. به بیان دیگر، چارچوب پیشنهادی به‌جای آنکه یک بسته یکسان از روش‌ها را بر تمامی اجزای سامانه اعمال کند، یک منطق تخصیص انتخابی ایجاد می‌کند که امکان استفاده از یک تکنیک منفرد یا ترکیب چند تکنیک را برای گره‌های مختلف فراهم می‌سازد. این رویکرد با ماهیت انتخاب‌محور IEC 31010:2019 در زمینه تعیین تکنیک مناسب برای شرایط مختلف ارزیابی ریسک همخوانی دارد (۴).

در این منطق، HAZOP عمدتاً زمانی نقش محوری پیدا می‌کند که شناسایی انحراف از شرایط مورد انتظار فرایند و کشف علل و پیامدهای اولیه آن ضرورت داشته باشد؛ FMEA زمانی اولویت می‌یابد که تحلیل نظام‌مند حالات خرابی اجزا و اثر آن‌ها بر عملکرد گره مورد نیاز باشد؛ FTA برای تحلیل قیاسی علل یک رویداد ناخواسته سطح بالا و بررسی ترکیبات منطقی خرابی‌ها به کار گرفته می‌شود؛ ETA برای دنبال‌کردن مسیرهای ممکن توسعه پیامد پس از وقوع یک رویداد آغازگر و بررسی عملکرد موانع حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ و Bow-Tie هنگامی اهمیت پیدا می‌کند که لازم باشد روابط میان تهدیدها، رویداد مرکزی، پیامدها و موانع پیشگیرانه و کاهشی در یک ساختار واحد نمایش داده شود. این تقسیم نقش، به معنای محدودکردن مطلق هر تکنیک به یک کارکرد نیست، بلکه یک منطق غالب برای تخصیص تکنیک در چارچوب پیشنهادی ایجاد می‌کند (۴ و ۲۰).

در لایه‌های چهارم و پنجم، که نقطهٔ تمایز اصلی چارچوب پیشنهادی‌اند، تکنیک‌های منتخب اجرا می‌شوند و خروجی‌های تحلیلی آن‌ها تلفیق می‌گردد؛ لایه ششم نتایج را در قالب نمایهٔ یکپارچهٔ ریسک سامانه تجمیع می‌کند. در این مرحله، خروجی یک تکنیک، در صورت وجود ارتباط منطقی و روش‌شناختی، می‌تواند مبنای اجرای تکنیک بعدی قرار گیرد. برای نمونه، سناریوهای انحراف و علل اولیه شناسایی‌شده در HAZOP می‌توانند مبنای تعریف حالات خرابی تجهیز در FMEA یا تعیین رویدادهای پایه و ساختار علّی در FTA قرار گیرند. به همین ترتیب، خروجی تحلیل علّی می‌تواند در تعریف رویدادهای آغازگر و مسیرهای پیامد در ETA مورد استفاده قرار گیرد و در نهایت، اطلاعات مربوط به تهدیدها، رویداد مرکزی، پیامدها و موانع حفاظتی می‌تواند در قالب Bow-Tie یکپارچه شود. در نتیجه، ارتباط میان تکنیک‌ها صرفاً هم‌زمانی یا موازی‌سازی روش‌ها نیست، بلکه در مواردی که ارتباط تحلیلی وجود داشته باشد، به‌صورت زنجیره انتقال اطلاعات میان روش‌ها تعریف می‌شود.

از این منظر، چارچوب پیشنهادی یک ترکیب انباشتی برای روش‌های ارزیابی ریسک نیست، بلکه یک ساختار تصمیم‌گیری و تلفیق اطلاعات ایجاد می‌کند. در این ساختار، هر تکنیک بخشی از مسئله ریسک را که متناسب با قابلیت آن است تحلیل می‌کند و خروجی آن می‌تواند در صورت نیاز به تکمیل تحلیل، در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، هدف از تلفیق تکنیک‌ها افزایش تعداد روش‌های اجراشده نیست؛ بلکه کاهش شکاف‌های تحلیلی میان شناسایی خطر، تحلیل علّی، تحلیل پیامد و ارزیابی موانع حفاظتی است.

در این معماری، تصمیم‌گیری در سطح گره انجام می‌شود، اما نتایج تحلیل گره‌ها قابلیت تجمیع در سطح سامانه را دارند. ازاین‌رو، چارچوب هم‌زمان دو ویژگی را حفظ می‌کند :تفکیک‌پذیری تحلیلی در سطح گره و قابلیت یکپارچه‌سازی در سطح سامانه .این ویژگی برای سامانه‌های فرایندی پیچیده اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا یک رویداد در یک گره ممکن است از طریق خطوط، جریان‌های فرایندی، سامانه‌های

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

کنترلی یا شکست موانع حفاظتی بر گره‌های دیگر اثر بگذارد. بنابراین، گره به‌عنوان واحد پایه تحلیل در نظر گرفته می‌شود، اما مرز تحلیلی آن به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که وابستگی‌های مهم سامانه نادیده گرفته نشوند (۴ و ۲۰).

قاعده تصمیم‌گیری برای تخصیص تکنیک‌ها

برای جلوگیری از انتخاب سلیقه‌ای تکنیک‌ها، تخصیص روش در چارچوب پیشنهادی بر مبنای مجموعه‌ای از قواعد تصمیم انجام می‌شود. نخست، مشخص می‌شود که مسئله غالب در گره از چه نوعی است و می تواند شامل مواردی همچون انحراف فرایندی، خرابی تجهیز یا جزء، رویداد ناخواسته با ساختار علّی پیچیده، گسترش پیامد پس از یک رویداد آغازگر، یا نیاز به ارزیابی هم‌زمان تهدیدها، پیامدها و موانع حفاظتی باشد. سپس، هدف اصلی تحلیل و سطح جزئیات مورد نیاز تعیین می‌شود. در مرحله بعد، تکنیکی انتخاب می‌شود که بیشترین تناسب را با نیاز تحلیلی مورد نظر داشته باشد. این منطق با توصیه IEC 31010:2019 مبنی بر انتخاب تکنیک بر اساس هدف، شرایط و ویژگی‌های مسئله ارزیابی ریسک سازگار است (۴).

در این چارچوب، چهار قاعده تصمیم اصلی به‌کار گرفته می‌شود:

قاعده ۱- غلبه انحراف فرایندی: اگر مسئله اصلی گره، شناسایی انحرافات از قصد طراحی یا شرایط عملیاتی و بررسی علل و پیامدهای اولیه آن باشد، HAZOP به‌عنوان تکنیک پایه انتخاب می‌شود.

قاعده ۲- غلبه خرابی تجهیز: اگر سناریوی ریسک عمدتاً به خرابی عملکردی یک یا چند جزء وابسته باشد و اولویت‌بندی حالات خرابی مورد نیاز باشد، FMEA به‌عنوان تکنیک مکمل یا اصلی به‌کار گرفته می‌شود.

قاعده ۳- نیاز به تحلیل علّی یا پیامدی عمیق: چنانچه یک رویداد ناخواسته سطح بالا نیازمند تحلیل ساختاریافته علل باشد، FTA انتخاب می‌شود؛ و اگر تمرکز تحلیل بر مسیرهای مختلف پیامد پس از یک رویداد آغازگر و عملکرد موفق یا ناموفق موانع باشد، ETA به کار گرفته می‌شود.

قاعده ۴- نیاز به نمایش یکپارچه موانع: هنگامی که هدف تحلیل، یکپارچه‌سازی تهدیدها، رویداد مرکزی، پیامدها و موانع پیشگیرانه و کاهشی باشد، Bow-Tie به‌عنوان تکنیک تلفیقی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۱ قواعد فوق را به‌صورت پرسش‌های تشخیصی و تکنیک متناظر خلاصه می‌کند و الگوریتم ترتیب اعمال آن‌ها را نشان می‌دهد. این قواعد به‌صورت مستقل و مطلق اعمال نمی‌شوند. در صورتی که ویژگی‌های یک گره نشان دهد که یک تکنیک به‌تنهایی قادر به پوشش نیاز تحلیلی آن نیست، ترکیب دو یا چند تکنیک انتخاب می‌شود. در چنین شرایطی، انتخاب ترکیبی زمانی معتبر تلقی می‌شود که میان خروجی‌های تکنیک‌ها رابطه اطلاعاتی مشخص وجود داشته باشد؛ یعنی خروجی یک تکنیک بتواند ورودی یا مبنای منطقی تکنیک دیگر را فراهم کند. بدین ترتیب، معیار تلفیق صرفاً «استفاده از روش‌های بیشتر» نیست، بلکه مکمل‌بودن کارکرد تحلیلی و قابلیت انتقال اطلاعات میان روش‌ها است.

در نهایت، چارچوب پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده است که انتخاب تکنیک‌ها قابل ردیابی باشد؛ به این معنا که برای هر گره بتوان مشخص کرد چرا یک تکنیک انتخاب شده، چه خلأ تحلیلی را پوشش می‌دهد، خروجی آن چیست و این خروجی در کدام مرحله از تحلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد .این قابلیت ردیابی، امکان ارزیابی شفاف منطق تصمیم‌گیری و مقایسه عملکرد چارچوب با رویکردهای غیرتلفیقی را فراهم می‌کند و یکی از الزامات اساسی برای ارزیابی یک مصنوع طراحی‌شده در رویکرد Design Science محسوب می‌شود (۱۶ و ۱۷). برآیند این معماری و قواعد تصمیم‌گیری، یک جریان تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی ایجاد می‌کند که از تعریف سامانه و گره‌های فرایندی آغاز شده و پس از شناسایی ویژگی‌های هر گره، به انتخاب تکنیک یا ترکیب تکنیک‌های متناسب و در نهایت تلفیق خروجی‌ها در سطح گره و سامانه منتهی می‌شود. معماری نهایی چارچوب پیشنهادی در شکل ۲ ارائه شده است.

تفکیک واحد TEAL به گره‌های فرایندی

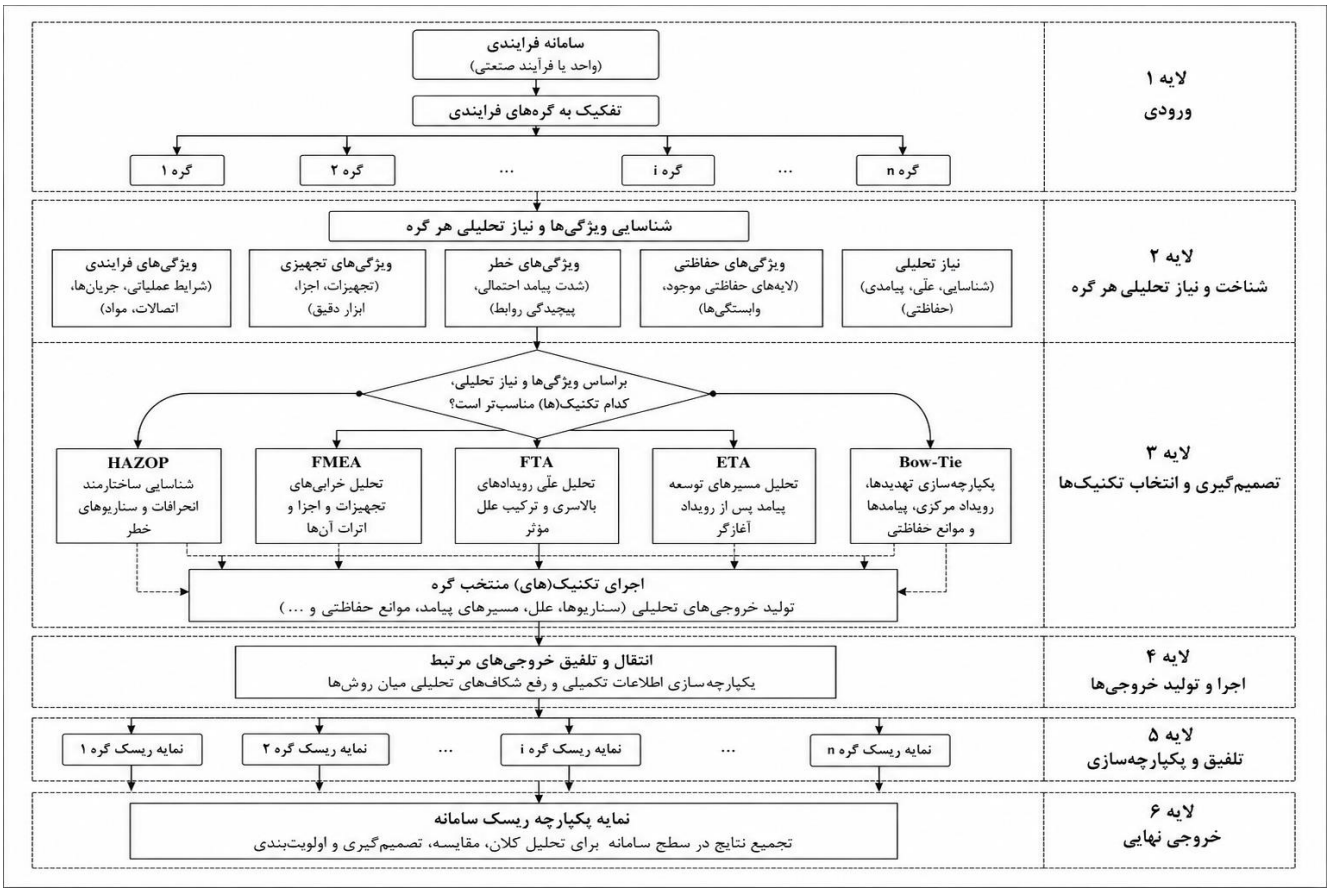
پس از تدوین چارچوب تصمیم‌گیری و تعیین قواعد انتخاب تکنیک‌ها، چارچوب پیشنهادی در واحد تولید و انتقال تری‌اتیل‌آلومینیوم (TEAL) پیاده‌سازی شد. در گام نخست، نمودار جریان فرایند (PFD) واحد بررسی و محدوده‌های عملکردی آن بر اساس ارتباط میان تجهیزات، خطوط لوله، جریان‌های فرایندی، ابزار دقیق، سامانه‌های کنترلی و لایه‌های حفاظتی مشخص شد. موقعیت و مرزبندی هشت گره فرایندی در واحد TEAL در شکل ۳ نشان داده شده است.

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

جدول ۱. جدول تصمیم‌گیری برای تخصیص تکنیک به گره

قاعده	پرسش تشخیصی دربارهٔ گره‌ها	تکنیک	گره‌های مشمول
۱	آیا مسئله اصلی، شناسایی انحراف از قصد طراحی یا شرایط عملیاتی و بررسی علل و پیامدهای اولیه آن است؟	HAZOP	۱، ۲، ۳، ۵، ۶
۲	آیا سناریوی ریسک عمدتاً به خرابی عملکردی یک یا چند جزء وابسته است و اولویت‌بندی حالات خرابی لازم است؟	FMEA	۲، ۴، ۵، ۷
۳ الف	آیا رویداد نامطلوب سطح بالا نیازمند تحلیل ساختاریافته علل است؟	FTA	۳، ۷، ۸
۳ ب	آیا تمرکز بر مسیرهای گسترش پیامد پس از رویداد آغازگر و عملکرد موفق یا ناموفق موانع است؟	ETA	۶، ۸
۴	آیا هدف، نمایش یکپارچه تهدیدها، رویداد مرکزی، پیامدها و موانع پیشگیرانه و کاهنده است؟	Bow-Tie	۱، ۴، ۶

الگوریتم تخصیص تکنیک به گره i: ۱. گره i را بر پایه PFD و مرزهای عملکردی تعریف کنید. ۲. گره را با معیارهای N1 تا N5 توصیف کنید. ۳. قواعد ۱ تا ۴ را بر پایه N1 و N2 اعمال کنید و تکنیک(های) نامزد را مشخص کنید. ۴. اگر یک تکنیک به‌تنهایی نیاز تحلیلی را پوشش نمی‌دهد، ترکیب را فقط در صورتی بپذیرید که میان خروجی‌های تکنیک‌ها رابطه اطلاعاتی مشخص وجود داشته باشد. ۵. دلیل انتخاب را برای ردیابی ثبت کنید.



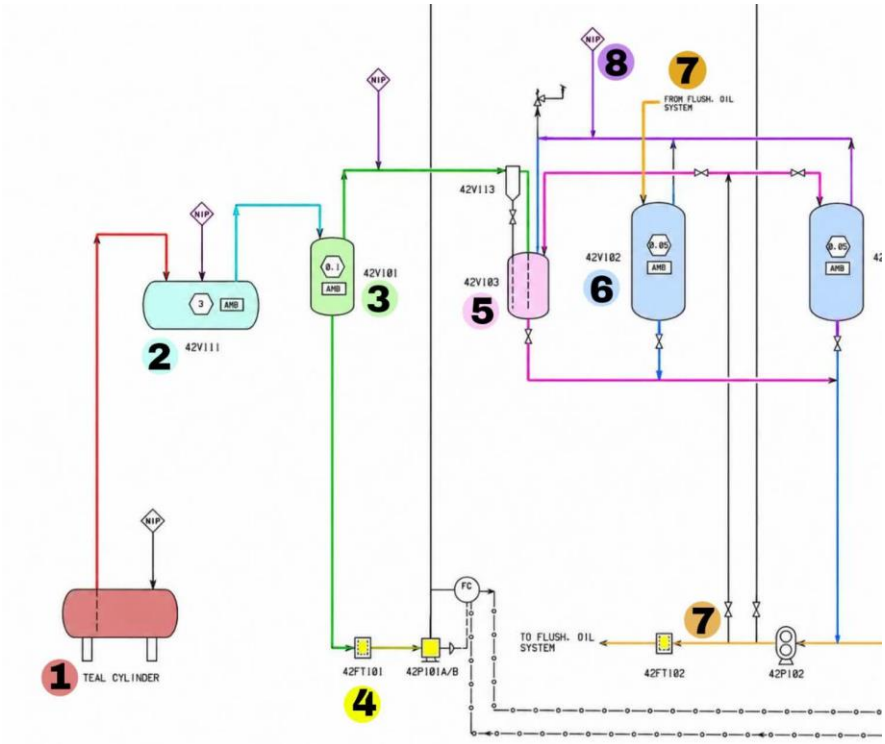
شکل ۲. چارچوب پیشنهادی تلفیقی سلسله‌مراتبی برای انتخاب و به‌کارگیری تکنیک‌های ارزیابی ریسک در سامانه‌های فرایندی

در این پژوهش، گره فرایندی به‌عنوان واحد تحلیل در نظر گرفته شد؛ به این معنا که گره یک تجهیز منفرد نیست، بلکه مجموعه‌ای عملکردی از تجهیزات و اجزای مرتبط است که در تعامل با یکدیگر وظیفه مشخصی را در بر این اساس، واحد TEAL به هشت گره فرایندی (Process Node) تفکیک شد که هر یک یک محدوده عملکردی مشخص از سامانه را دربر می‌گیرد و می‌تواند شامل مجموعه‌ای از تجهیزات، خطوط و اتصالات، جریان‌های فرایندی، ابزار دقیق و سامانه‌های کنترلی و حفاظتی مرتبط باشد. این هشت گره شامل محدوده ذخیره‌سازی اصلی TEAL، محدوده رقیق‌سازی، محدوده تغذیه، محدوده پمپاژ، محدوده جداسازی و فیلتراسیون، محدوده ذخیره‌سازی نهایی، محدوده سامانه Oil Flush و محدوده شبکه بالنکتینگ نیتروژن بودند. این تفکیک، مبنای اعمال قاعده تصمیم و تعیین تکنیک یا ترکیب تکنیک‌های ارزیابی ریسک متناسب با ماهیت و نیاز تحلیلی هر گره قرار گرفت.

پس از تفکیک واحد TEAL به هشت گره فرایندی، ویژگی‌های عملکردی، تجهیزات و اجزای مرتبط، جریان‌های فرایندی، شرایط

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

عملیاتی و لایه‌های کنترلی و حفاظتی هر گره بررسی شد. سپس، بر اساس قاعده تصمیم ارائه‌شده در چارچوب پیشنهادی، تکنیک یا ترکیب تکنیک‌های مناسب برای هر گره تعیین گردید. در این مرحله، انتخاب تکنیک بر اساس نام یا نوع یک تجهیز منفرد انجام نشد، بلکه ماهیت غالب مسئله ریسک در محدوده عملکردی هر گره مبنای تصمیم‌گیری قرار گرفت. نتایج تخصیص تکنیک‌های ارزیابی ریسک به هشت گره فرایندی، همراه با محدوده عملکردی و سناریوی غالب هر گره، در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۳. تفکیک واحد TEAL به هشت گره فرایندی بر اساس محدوده‌های عملکردی سامانه

جدول ۲. تخصیص تکنیک‌های ارزیابی ریسک به گره‌های فرایندی واحد TEAL بر اساس قاعده تصمیم پیشنهادی

گره	محدوده عملکردی گره	سناریوی غالب	تکنیک منتخب
۱	محدوده ذخیره‌سازی اولیه TEAL	نشت TEAL، از دست رفتن بالنکتینگ و بیش‌فشار	HAZOP + Bow-Tie
۲	محدوده رقیق‌سازی و اختلاط	رقیق‌سازی ناقص، جدایش فاز و اختلال کنترل سطح	HAZOP + FMEA
۳	محدوده تغذیه TEAL	ورود هوا در شرایط فشار پایین	HAZOP + FTA
۴	محدوده پمپاژ و انتقال	خرابی مکانیکی و نشت از سامانه	FMEA + Bow-Tie
۵	محدوده جداسازی و فیلتراسیون	گرفتگی، افزایش فشار و نشت	HAZOP + FMEA
۶	محدوده ذخیره‌سازی نهایی	نشت در مقیاس بزرگ و پیامدهای متعاقب	HAZOP + Bow-Tie + ETA
۷	محدوده سامانه Oil Flush	از دست رفتن عملکرد آب‌بندی	FMEA + FTA
۸	محدوده شبکه بالنکتینگ نیتروژن	خرابی سراسری تأمین N_2	FTA + ETA

گره ۱- محدوده ذخیره‌سازی اولیه: TEAL این گره محدوده عملکردی مرتبط با ذخیره‌سازی اولیه TEAL را دربر می‌گیرد و شامل مخزن ذخیره، مسیرهای ورودی و خروجی، خطوط و اتصالات مرتبط، سامانه بالنکتینگ و اجزای کنترلی و حفاظتی متناظر است. در این گره، HAZOP برای شناسایی انحرافات فرایندی، از جمله بیش‌فشار، کاهش جریان نیتروژن و شرایط منجر به نشت، و Bow-Tie برای صورت‌بندی سناریوی اصلی نشت TEAL و ارتباط میان تهدیدها، رویداد مرکزی، پیامدها و موانع حفاظتی انتخاب شد.

گره ۲- محدوده رقیق‌سازی و اختلاط: این گره محدوده عملکردی مربوط به رقیق‌سازی TEAL را شامل می‌شود که دربرگیرنده مخزن

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

۴۲ V111، مسیرهای ورود و خروج جریان، خطوط و شیرهای مرتبط، تجهیزات کنترل سطح و اجزای فرایندی وابسته است. در این محدوده، HAZOPبرای بررسی انحرافات فرایندی و FMEA برای تحلیل حالات خرابی تجهیزات و اجزای مرتبط به کار گرفته شد. سناریوهای اصلی شامل رقیق‌سازی ناقص، جدایش فاز، اختلال کنترل سطح و نشت از اجزای تحت فشار بود.

گره ۳- محدوده تغذیه: TEAL این گره محدوده عملکردی مرتبط با مخزن ۴۲ V101 و مسیرهای جریان ورودی و خروجی، خطوط، شیرها و اجزای کنترلی و حفاظتی مرتبط با کنترل فشار و جلوگیری از ورود هوا را دربرمی‌گیرد. HAZOP برای شناسایی انحرافات فشار و جریان و FTA برای تحلیل ساختار علّی سناریوی ورود هوا به سامانه انتخاب شد.

گره ۴- محدوده پمپاژ و انتقال :این گره شامل پمپ‌های ۴۲ P101A/B، تجهیزات اندازه‌گیری جریان از جمله ۴۲ FT101، خطوط مکش و دهش، شیرها، اتصالات و اجزای مرتبط با انتقال و کنترل جریان است. FMEA برای بررسی حالات خرابی اجزای تجهیزاتی، از جمله خرابی آب‌بند مکانیکی، یاتاقان و پروانه، و Bow-Tie برای صورت‌بندی سناریوی نشت و بررسی ارتباط آن با موانع پیشگیرانه و کاهشی به کار گرفته شد.

گره ۵- محدوده جداسازی و فیلتراسیون: این گره محدوده عملکردی مرتبط با ۴۲ V103را به همراه مسیرهای ورودی و خروجی، اجزای فیلتراسیون، خطوط، شیرها و تجهیزات مرتبط با کنترل و تخلیه دربر می‌گیرد. HAZOP برای شناسایی انحرافات فرایندی و FMEA برای تحلیل حالات خرابی اجزای مرتبط به کار گرفته شد. گرفتگی فیلتر، افزایش فشار و نشت یا تجمع TEAL در شرایط تعمیر و تمیزکاری، سناریوهای اصلی مورد توجه در این گره بودند.

گره ۶- محدوده ذخیره‌سازی نهایی: این گره محدوده عملکردی شامل مخازن ۴۲ V102/104، خطوط ارتباطی و انتقال، مسیرهای مرتبط و اجزای کنترلی و حفاظتی متناظر با ذخیره‌سازی نهایی را شامل می‌شود. HAZOP برای شناسایی انحرافات فرایندی، Bow-Tie برای سازمان‌دهی تهدیدها، پیامدها و موانع حفاظتی و ETA برای بررسی مسیرهای مختلف توسعه پیامد پس از وقوع سناریوی نشت در مقیاس بزرگ انتخاب شدند.

گره ۷- محدوده سامانه Oil Flush: این گره شامل مسیرهای تأمین و گردش Flush Oil، خطوط، شیرها، اتصالات و اجزایی است که در حفظ آب‌بندی و عملکرد حفاظتی سامانه نقش دارند. FMEA برای تحلیل حالات خرابی اجزای سامانه و FTA برای بررسی ساختار علّی سناریوی از دست رفتن عملکرد آب‌بندی انتخاب شد.

گره ۸- محدوده شبکه بالنکتینگ نیتروژن :این گره شبکه تأمین و توزیع N_2، خطوط و مسیرهای اتصال به مخازن، شیرها، تجهیزات کنترل فشار و اجزای مرتبط با تداوم عملکرد بالنکتینگ را دربرمی‌گیرد. FTA برای تحلیل علل خرابی سراسری تأمین نیتروژن و ETA برای بررسی مسیرهای پیامدی ناشی از از دست رفتن این عملکرد حفاظتی مورد استفاده قرار گرفت.

الگوی نهایی تخصیص تکنیک‌ها نشان داد که در هیچ‌یک از گره‌های فرایندی، استفاده از مجموعه‌ای ثابت و از پیش‌تعیین‌شده از تکنیک‌ها الزامی نبود و ترکیب تکنیک‌ها متناسب با ویژگی‌ها و نیاز تحلیلی هر گره تغییر کرد. در مجموع، پنج تکنیک منتخب شامل HAZOP، FMEA، FTA، ETA و Bow-Tie در هشت گره فرایندی به کار گرفته شدند. برآیند این مرحله، یک ماتریس تخصیص گره-تکنیک بود که نشان می‌دهد هر گره بر اساس قاعده تصمیم پیشنهادی، تحت یک تکنیک منفرد یا ترکیبی از تکنیک‌ها قرار گرفته است. برای جمع‌بندی الگوی تخصیص تکنیک‌ها در سطح کل واحد، فراوانی به‌کارگیری هر یک از تکنیک‌های منتخب در گره‌های فرایندی در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳. فراوانی به‌کارگیری تکنیک‌های منتخب ارزیابی ریسک در گره‌های فرایندی واحد TEAL

تکنیک	گره‌های دارای تکنیک	تعداد گره
HAZOP	۱، ۲، ۳، ۵، ۶	۵
FMEA	۲، ۴، ۵، ۷	۴
FTA	۳، ۷، ۸	۳
Bow-Tie	۱، ۴، ۶	۳
ETA	۶، ۸	۲

در نتیجه، اجرای چارچوب در مطالعه موردی، یک الگوی گره‌محور برای تخصیص تکنیک‌های ارزیابی ریسک ایجاد کرد که در آن، هر گره بر اساس ویژگی‌های تعیین‌شده در قاعده تصمیم تحت یک تکنیک منفرد یا ترکیبی از تکنیک‌ها قرار گرفت. خروجی نهایی این مرحله، ماتریس تخصیص تکنیک‌ها به گره‌های فرایندی بود که مبنای تحلیل و تفسیر نتایج در بخش بعد قرار گرفت. برای بررسی روایی

• This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

محتوایی تفکیک گره‌ها، قواعد تخصیص و ماتریس تخصیص ، چارچوب به پانل ۹ نفرهٔ خبرگان با دست‌کم ۸ سال تجربهٔ اجرایی در HAZOP یا ارزیابی ریسک در صنایع فرایندی ارائه شد (۲۴-۲۲). هر خبره مرزبندی هشت گره، قواعد ۱ تا ۴ و تکنیک‌های تخصیص‌یافته به هر گره را در طیف «ضروری»، «مفید ولی غیرضروری» و «غیرضروری» رتبه‌بندی کرد و نسبت روایی محتوایی (CVR) محاسبه شد؛ حداقل مقدار پذیرش CVR، ۰/۷۸ بود. افزون بر این، پنج ویژگی چارچوب (وضوح منطق تصمیم، کامل‌بودن پوشش تحلیلی، قابلیت ردیابی، کاربردپذیری و تناسب با ماهیت گره) با لیکرت پنج‌درجه‌ای سنجیده شد و میانگین چهار یا بیشتر مبنای پذیرش بود.

یافته‌ها

یافته‌های پژوهش نشان داد که اجرای چارچوب پیشنهادی در واحد تولید TEAL به یک الگوی گره‌محور و غیر یکنواخت برای انتخاب و تلفیق تکنیک‌های ارزیابی ریسک منجر شد. در هشت گره فرایندی، در مجموع ۱۷ مورد به‌کارگیری تکنیک ثبت شد؛ به‌گونه‌ای که HAZOP در پنج گره، FMEA در چهار گره، FTA و Bow-Tie هرکدام در سه گره و ETA در دو گره به کار گرفته شدند. این توزیع نشان می‌دهد که چارچوب پیشنهادی نه بر اعمال یک تکنیک واحد بر کل سامانه استوار است و نه اجرای هم‌زمان تمامی تکنیک‌ها را برای همه گره‌ها ضروری می‌داند. چنین رویکردی با منطق IEC 31010:2019، که بر انتخاب و کاربرد تکنیک‌های ارزیابی ریسک متناسب با هدف و شرایط مسئله تأکید دارد، همخوان است (۴).

یکی از یافته‌های مهم پژوهش به تعریف و نقش گره فرایندی مربوط است. در چارچوب حاضر، گره صرفاً یک تجهیز منفرد نیست، بلکه یک محدوده عملکردی از سامانه است که می‌تواند مجموعه‌ای از تجهیزات مرتبط، خطوط و اتصالات، جریان‌های فرایندی، ابزار دقیق و اجزای کنترلی و حفاظتی را دربرگیرد. بنابراین، واحد تصمیم‌گیری از سطح تجهیز منفرد به سطح یکپارچه‌تری از فرایند منتقل می‌شود. این موضوع اهمیت ویژه‌ای در سامانه‌هایی دارد که عملکرد یک جزء یا زیرسامانه می‌تواند بر رفتار بخش‌های دیگر اثر بگذارد. برای نمونه، در محدوده شبکه بالنکتینگ نیتروژن، مسئله اصلی صرفاً خرابی یک تجهیز نیست، بلکه از دست رفتن یک عملکرد حفاظتی با قابلیت اثرگذاری بر چند بخش از واحد است. در محدوده Oil Flush نیز از دست رفتن عملکرد آب‌بندی می‌تواند پیامدهایی فراتر از اجزای همان محدوده ایجاد کند. بنابراین، مرزبندی گره در چارچوب پیشنهادی صرفاً یک مرحله برای تقسیم PFD نیست، بلکه بخشی از منطق تصمیم‌گیری برای تعیین سطح و نوع تحلیل ریسک است.

توزیع تکنیک‌ها در گره‌ها همچنین نشان داد که HAZOP عمدتاً نقش لایه شناسایی انحرافات فرایندی را ایفا می‌کند، اما الزاماً نقطه پایان ارزیابی نیست. در مواردی که مسئله غالب به خرابی اجزای تجهیزاتی مربوط بود، FMEA به کار گرفته شد؛ در مواردی که تحلیل یک رویداد ناخواسته با مجموعه‌ای از علل منطقی مورد نیاز بود، FTA انتخاب شد؛ و هنگامی که مسیرهای مختلف توسعه پیامد یا عملکرد موانع حفاظتی اهمیت داشت، ETA و Bow-Tie مورد استفاده قرار گرفتند. این تقسیم کار با ماهیت مکمل این تکنیک‌ها سازگار است و با ادبیات جدید ارزیابی ریسک در صنایع فرایندی که بر تنوع روش‌های مورد نیاز برای مواجهه با پیچیدگی‌های مختلف سامانه‌های فرایندی تأکید دارد، همخوانی دارد (۲).

از این منظر، ارزش روش‌شناختی چارچوب حاضر در تعداد تکنیک‌های مورد استفاده نیست، بلکه در قاعده‌ای است که تعیین می‌کند هر تکنیک در کدام محدوده عملکردی و برای پاسخ به کدام نیاز تحلیلی به کار گرفته شود. در این چارچوب، HAZOP برای شناسایی انحرافات فرایندی، FMEA برای بررسی حالات خرابی اجزا، FTA برای تحلیل ساختار علّی رویدادهای رأس، ETA برای بررسی مسیرهای توسعه پیامد و Bow-Tie برای سازمان‌دهی ارتباط میان تهدیدها، رویداد مرکزی، پیامدها و موانع حفاظتی به کار گرفته می‌شوند. در نتیجه، تلفیق روش‌ها به معنای اجرای موازی و مستقل چند تکنیک نیست، بلکه نوعی تقسیم کار تحلیلی میان تکنیک‌ها است که در آن هر روش برای پوشش بخشی از مسئله انتخاب می‌شود که روش دیگر در آن محدودیت بیشتری دارد (۲۵ و ۲۶).

این ویژگی، چارچوب پیشنهادی را از رویکردهای ترکیبی یکنواخت متمایز می‌کند. در برخی مطالعات، ترکیب چند تکنیک برای کل سامانه یا یک سناریوی مشخص از پیش تعیین می‌شود؛ درحالی‌که در رویکرد حاضر، ابتدا سامانه به گره‌های عملکردی تفکیک شده و سپس تکنیک متناسب با ویژگی‌های هر گره تعیین می‌شود. بنابراین، اگرچه مجموعه تکنیک‌های منتخب در کل واحد ثابت است، ترکیب عملیاتی آن‌ها از یک گره به گره دیگر تغییر می‌کند .این انعطاف‌پذیری با

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

دیدگاه IEC 31010 مبنی بر انتخاب تکنیک بر اساس زمینه و هدف ارزیابی سازگار است و با روندهای جدید ادبیات صنایع فرایندی که بر استفاده از روش‌های متنوع برای پوشش ابعاد مختلف ریسک تأکید دارند نیز مطابقت دارد (۲ و ۴).

یکی از پیامدهای مهم این منطق در مطالعه موردی TEAL، امکان توجه هم‌زمان به رفتار فرایند، یکپارچگی تجهیزات و عملکرد لایه‌های حفاظتی است. TEAL به دلیل واکنش‌پذیری شدید و قابلیت خوداشتعالی در تماس با هوا، می‌تواند در اثر نشت یا از دست رفتن شرایط حفاظتی مناسب به سناریوهای شدید آتش‌سوزی منجر شود؛ مطالعات تجربی نیز رفتار خوداشتعالی قطرات TEAL در تماس با هوا را بررسی کرده‌اند (۶). در چنین سامانه‌ای، بررسی یک انحراف فرایندی بدون توجه به خرابی تجهیزات یا عملکرد موانع حفاظتی می‌تواند تصویر ناقصی از سناریوی خطر ایجاد کند. چارچوب پیشنهادی با قرار دادن این ابعاد در یک منطق گره‌محور، امکان می‌دهد سطح تحلیل متناسب با ماهیت مسئله در هر محدوده تغییر کند.

بحث

نتایج نشان می‌دهد که تلفیق تکنیک‌ها می‌تواند ماهیتی زنجیره‌ای داشته باشد .به این معنا که خروجی یک تکنیک در صورت نیاز می‌تواند مبنای تعریف مسئله برای تکنیک بعدی قرار گیرد. برای مثال، یک سناریوی شناسایی‌شده در HAZOP می‌تواند مبنای تعریف رویداد رأس در FTA یا رویداد آغازگر در ETA قرار گیرد و در موارد مناسب، روابط علّی و پیامدی حاصل در قالب Bow-Tie سازمان‌دهی شود. در این حالت، ارزش تلفیق نه در افزایش تعداد تحلیل‌ها، بلکه در ایجاد پیوستگی میان مراحل مختلف تحلیل ریسک است. این رویکرد با هدف IEC 31010 در استفاده از تکنیک‌های ارزیابی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری در شرایط عدم‌قطعیت و به‌عنوان بخشی از فرایند مدیریت ریسک سازگار است (۴).

بااین‌حال، نتایج این مطالعه نباید به‌عنوان شواهدی مبنی بر کاهش کمی ریسک یا افزایش قطعی سطح ایمنی واحد تفسیر شوند. پژوهش حاضر یک چارچوب روش‌شناختی برای انتخاب و تلفیق تکنیک‌های ارزیابی ریسک ارائه کرده و کاربرد آن را در یک واحد TEAL برای نشان دادن قابلیت اجرایی چارچوب بررسی نموده است. ازاین‌رو، دستاورد اصلی مطالعه، بهبود ساختار تصمیم‌گیری و انسجام فرایند ارزیابی ریسک است، نه اثبات آماری یا کمی اثربخشی اقدامات کنترلی. برای ارزیابی چنین اثری، در مطالعات آینده باید داده‌های قابلیت اطمینان تجهیزات، نرخ خرابی، احتمال وقوع رویدادها، شدت پیامدها و عدم‌قطعیت پارامترها وارد مدل‌های کمی شوند.

همچنین، چارچوب پیشنهادی محدودیت‌های ذاتی تکنیک‌های تشکیل‌دهنده خود را حذف نمی‌کند. HAZOP همچنان به کیفیت اطلاعات طراحی و بهره‌برداری و قضاوت تیم کارشناسی وابسته است؛ FMEA در مواجهه با وابستگی‌ها و خرابی‌های هم‌زمان محدودیت دارد؛ FTA و ETA به تعریف مناسب رویداد و ساختار منطقی سناریو وابسته‌اند؛ و Bow-Tie نیز در نمایش پویایی برخی وابستگی‌های پیچیده محدودیت دارد. به‌طور خاص، مطالعات مربوط به تحلیل ایمنی سامانه‌های فرایندی نشان داده‌اند که روش‌های کلاسیک مانند FTA با محدودیت‌هایی در ساختار ایستا و نحوه مدیریت عدم‌قطعیت مواجه‌اند (۲۵). بنابراین، چارچوب حاضر نباید به‌عنوان جایگزینی برای قضاوت کارشناسی، داده‌های عملیاتی یا روش‌های پیشرفته‌تر تلقی شود؛ بلکه هدف آن ایجاد یک منطق ساختاریافته برای استفاده هدفمند از روش‌های موجود است.

از این منظر، چارچوب پیشنهادی را می‌توان یک معماری تصمیم‌گیری برای ارزیابی ریسک دانست، نه یک روش جدید محاسبه ریسک. نوآوری اصلی در این معماری، انتقال نقطه تصمیم‌گیری از سطح کل واحد به سطح گره‌های عملکردی و ایجاد رابطه مشخص میان ویژگی‌های هر گره، نیاز تحلیلی آن و تکنیک مناسب است. چنین ساختاری اجازه می‌دهد یک مجموعه محدود و شناخته‌شده از تکنیک‌ها بدون تحمیل یک الگوی یکنواخت به کل سامانه، به‌صورت هدفمند و مکمل مورد استفاده قرار گیرند. این ویژگی به‌ویژه برای واحدهای پتروشیمی و فرایندهای مرتبط با صنایع پلیمری که در آن‌ها تعامل میان مواد واکنش‌پذیر، تجهیزات، جریان‌های فرایندی و لایه‌های حفاظتی می‌تواند ساختار پیچیده‌ای از سناریوهای خطر ایجاد کند، اهمیت دارد. در مقایسه با مطالعات پیشین، نوآوری داووتولا و همکاران (۱۲)، سِوِری و همکاران (۱۳) و سرافراز و همکاران (۱۴) هر کدام دو تکنیک را در یک سامانه ترکیب کرده‌اند. پژوهش‌های جدیدتر نیز ترکیب‌های چندتکنیکی را گزارش کرده‌اند مانند مطالعه بواسلا و همکاران (۲۷) که توالی HAZOP، FTA، ETA و Bow-Tie را برای

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

یک کوره گرمایش نفت خام و مطالعه پیربالوتی و همکاران (۲۸) که ترکیب HAZOP، Bow-Tie و شبکهٔ بیزین را برای شناسایی تجهیزات ایمنی‌حیاتی در یک واحد پتروشیمی به‌کار برده‌اند و در این مطالعات، توالی تکنیک‌ها از پیش تعیین شده است. وجه تمایز چارچوب حاضر، انتقال سطح تصمیم‌گیری از «کل واحد» به «گره» و تعیین ترکیب تکنیک بر پایهٔ ویژگی‌های هر گره است. این تمایز مفهومی و روش‌شناختی است و بدون مقایسهٔ تجربی هم‌زمان با این رویکردها، برتری کمّی چارچوب حاضر نتیجه‌گرفتنی نیست.

نتیجه‌گیری

در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که ارزش اصلی چارچوب پیشنهادی در تبدیل انتخاب تکنیک ارزیابی ریسک از یک تصمیم کلی در سطح واحد به یک فرایند تصمیم‌گیری ساختاریافته در سطح گره‌های فرایندی است .در این رویکرد، گره یک تجهیز منفرد نیست، بلکه یک محدوده عملکردی از سامانه است و تکنیک ارزیابی بر اساس ماهیت خطر، مسئله تحلیلی، ویژگی‌های عملکردی گره و نقش آن در ساختار حفاظتی انتخاب می‌شود. مطالعه موردی TEAL نشان داد که این منطق می‌تواند به ترکیب‌های متفاوتی از HAZOP، FMEA، FTA، ETA و Bow-Tie در بخش‌های مختلف یک واحد منجر شود، بدون آنکه چارچوب به اجرای اجباری همه تکنیک‌ها در همه بخش‌ها وابسته باشد. بنابراین، چارچوب پیشنهادی را می‌توان به‌عنوان یک الگوی روش‌شناختی قابل آزمون برای سایر سامانه‌های فرایندی در صنایع پتروشیمی و فرایندهای مرتبط با تولید مواد پلیمری در نظر گرفت؛ هرچند تعمیم‌پذیری آن نیازمند ارزیابی در واحدهای دارای مواد، تجهیزات، ساختارهای فرایندی و لایه‌های حفاظتی متفاوت است.

تضاد منافع

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که یافته‌های این مقاله از نظر منافع، با هیچ فرد حقیقی و حقوقی وسازمان‌های دولتی و خصوصی در تضاد نمی باشد.

منابع مالی

این پژوهش بدون هیچ‌گونه کمک مالی از موسسات دولتی، سازمان‌ها یا انجمن‌های خصوصی انجام شده است.

نقش نویسندگان

نویسنده مسئول و نویسنده اول (استاد راهنما)، نویسنده دوم (دانشجو) بودند.

استفاده از هوش مصنوعی

بدین وسیله اعلام می‌شود در تدوین مقاله از هوش مصنوعی استفاده نشده است.

References

1. Nivolianitou Z, Konstandinidou M, Michalis C. Statistical analysis of major accidents in petrochemical industry notified to the major accident reporting system (MARS). Journal of Hazardous Materials. 2006;137(1):1-7. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.12.042
2. Ab Rahim MS, Reniers G, Yang M, Bajpai S. Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2024;88:105274. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105274
3. International Organization for Standardization (ISO). ISO 31000:2018 Risk management—Guidelines. Geneva: ISO; 2018.
4. International Electrotechnical Commission (IEC). Risk management—Risk assessment techniques. Geneva: IEC; 2019.
5. Sato Y, Okada K, Akiyoshi M, Tokudome K, Matsunaga T. Reaction hazards of triethylaluminum under closed conditions. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2011;24(5):656-661. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.05.009
6. Frolov SM, Basevich VY, Belyaev AA, Shamshin IO, Aksenov VS, Frolov FS, Storozhenko PA, Guseinov SL. Kinetic model and experiment for self-ignition of triethylaluminum and triethylborane droplets in air. Micromachines. 2022;13(11):2033. https://doi.org/10.3390/mi13112033
7. Tang Y, Jing J, Zhang Z, Yang Y. A quantitative risk analysis method for the high hazard mechanical system in petroleum and petrochemical industry. Energies. 2017;11(1):14. https://doi.org/10.3390/en11010014
8. Kasharou J, Saghatoleslami N. Investigation of important parameters in hazard and operability study (HAZOP) Shahid Hasheminejad Gas Refinery Tank Farm and Loading Unit. Iranian Journal of Gas Engineering. 2016;2(1):46-51 (In Persian). https://ijge.irangi.org/article_251830.html?lang=en
9. Miraj F. Study of hazards and operability (HAZOP) and risk analysis of the ammonia unit at Khorasan Petrochemical Complex [Master's thesis] (In Persian). Tehran: Sharif University of Technology; 2002.

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

10. Xiao N, Huang HZ, Li Y, He L, Jin T. Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. Engineering Failure Analysis. 2011;18(4):1162-1170. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.02.004

11. Ahn J, Chang D. Fuzzy-based HAZOP study for process industry. Journal of Hazardous Materials. 2016;317:303-311. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.096

12. Dawotola AW, Van Gelder PH, Vrijling JK. Risk assessment of petroleum pipelines using a combined analytical hierarchy process–fault tree analysis (AHP–FTA). In: Proceedings of the 7th International Probabilistic Workshop; 2009; Delft, The Netherlands.

13. Severi CA, Pérez V, Pascual C, Muñoz R, Lebrero R. Identification of critical operational hazards in a biogas upgrading pilot plant through a multi-criteria decision-making and FTOPSIS-HAZOP approach. Chemosphere. 2022;307:135845. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135845

14. Sarafraz P, Varshosaz K, Orak N, Jaafarzadeh N, Aghajari E. Safety, health, and environmental risk assessment of the aromatic outlet of Imam Khomeini Petrochemical Company using LOPA and fuzzy-LOPA and pollutants and control actions using the Bow-tie method. Frontiers in Public Health. 2023;11:1251548. https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1251548

15. Khan F, Rathnayaka S, Ahmed S. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. Process Safety and Environmental Protection. 2015;98:116-147. https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.07.005

16. Hevner AR, March ST, Park J, Ram S. Design science in information systems research. MIS quarterly. 2004;28(1):75-106. https://doi.org/10.2307/25148625

17. Peffers K, Tuunanen T, Rothenberger MA, Chatterjee S. A design science research methodology for information systems research. Journal of Management Information Systems. 2007;24(3):45-77. https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302

18. Ericson CA. Hazard analysis techniques for system safety. John Wiley & Sons; 2015. 640 p.

19. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. The bmj. 2021;372. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

20. Center for Chemical Process Safety (CCPS). Process safety leading and lagging metrics. New York (NY): American Institute of Chemical Engineers (AIChE); 2011.

21. Tixier J, Dusserre G, Salvi O, Gaston D. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2002;15(4):291-303. https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00008-6

22. Jahanvand B, Mortazavi SB, Mahabadi HA, Ahmadi O. Determining essential criteria for selection of risk assessment techniques in occupational health and safety: A hybrid framework of fuzzy Delphi method. Safety Science. 2023;167:106253. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106253

23. Venable J, Pries-Heje J, Baskerville R. FEDS: a framework for evaluation in design science research. European journal of information systems. 2016;25(1):77-89. https://doi.org/10.1057/ejis.2014.36

24. Lawshe CH. A quantitative approach to content validity. Personnel Psychology. 1975;28(4):563-575.

25. Khakzad N, Khan F, Amyotte P. Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. Reliability Engineering & System Safety. 2011;96(8):925-932. https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.03.012

26. DeRosier J, Stalhandske E, Bagian JP, Nudell T. Using health care failure mode and effect analysis: the VA National Center for Patient Safety's prospective risk analysis system. The Joint Commission Journal on Quality Improvement. 2002;28(5):248-267. https://doi.org/10.1016/S1070-3241(02)28025-6

27. Bouasla SE, Zennir Y, Mechhoud EA, Rodriguez M. Risk Assessment Using a Structured Combined Method. International Journal of Safety & Security Engineering. 2025;15(2):383. https://doi.org/10.18280/ijsse.150219

28. Pirbalouti RG, Behnam B, Dehkordi MK. A risk-based approach to identify safety-critical equipment in process industries. Results in Engineering. 2023;20:101448. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101448

 • This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License