Iranian Journal of Ergonomics

Iran J Ergon, 2025; 13(3): 235-248 DOI:10.53208/IJE.13.3.235

https://journal.iehfs.ir/

Original Article

An Analytical Perspective on Human Reliability Assessment and Human Error Risk Studies (2010–2023): Exploring the Role of Artificial Intelligence and Lights-Out Manufacturing

Ali Reza Nikray[1], Mohammad Reza Vesali Naseh[1], Abbas Mohammadi[2,3*]

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran
[2] Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran
[3] Department of Chemical Engineering, Safety and Protection Research Center (SPRC), University of Qom, Qom, Iran

Article History:
Received: 04 August 2025
Revised: 14 October 2025
Accepted: 17 October 2025
ePublished: 21 December 2025

***Corresponding author:**
Abbas Mohammadi, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran؛ Department of Chemical Engineering, Safety and Protection Research Center (SPRC), University of Qom, Qom, Iran

Email: mohammadi.a@qom.ac.ir

Abstract

Objectives: As industrial systems become increasingly complex and technologically advanced, the human role in ensuring safety and efficiency remains indispensable. This study aimed to present a comprehensive review of Human Reliability Assessment research published between 2010 and 2023. It compares human reliability assessment (HRA) methodologies with emerging technologies, such as artificial intelligence and lights-out manufacturing, identifies existing research gaps, and analyzes the analytical techniques employed and the industrial sectors addressed.

Methods: A systematic search of major scientific databases using domain-specific keywords yielded over 230 publications. After removing duplicate studies, 180 articles were selected for detailed analysis. Each article was evaluated based on methodology, industrial application, country, institutional affiliation, and publishing outlet.

Results: The results indicated that the most frequently applied approaches in HRA research were the systematic human error reduction and prediction approach (SHERPA), cognitive reliability and error analysis method (CREAM), and fuzzy mathematics. The United States, China, and South Korea emerged as leading contributors to this field. The findings revealed that neither qualitative nor quantitative methods alone are sufficient to fulfill the three core objectives of HRA: error identification, probability estimation, and control design. Therefore, a hybrid approach was recommended by integrating SHERPA and Tecnica Empirica Stima Errori Operatori (TESEO). SHERPA provides comprehensive coverage of error identification and the design of effective control measures, while TESEO facilitates rapid, conservative probability estimation. These methods provided a practical and efficient framework for achieving HRA objectives within operational constraints. Additionally, ten key research gaps were identified.

Conclusion: The SHERPA–TESEO hybrid framework presents a viable strategy for achieving the core goals of HRA. Nonetheless, a shift from static to dynamic and data-driven models is necessary in the context of intelligent environments and operator-free production. Recommended developments include revising SHERPA's cognitive task classifications, recalibrating TESEO's adjustment factors, and integrating real-time data with human–artificial intelligence (AI) interaction. These advancements are expected to significantly enhance real-time prediction of human error risks and support timely intervention strategies.

Keywords: Artificial intelligence, Human error, Hybrid framework, Human reliability, Lights-out manufacturing

Copyright © 2025 Iranian Journal of Ergonomics. 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

Technological advancements, while reducing human physical presence, have amplified the functional role of equipment. However, it has simultaneously increased the impact of human performance on efficiency, reliability, and safety. With the emergence of artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and concepts, such as lights-out manufacturing, human errors have shifted to higher levels, such as algorithm design and human–intelligent system interaction, thereby transforming the nature of errors. Existing evidence indicates that the interplay between technical and human micro-events within time–condition–action sequences is a significant cause of incidents, resulting in diverse losses. Therefore, safeguarding strategic industries requires a systematic approach to managing human error.

Human reliability assessment (HRA), relying on systems engineering and cognitive science, has evolved through three generations: the first with a success–failure orientation, the second with a cognitive approach, and the third emphasizing the dynamics and interdependencies of contributing factors. This study systematically reviews HRA research, examines the expansion of AI and lights-out manufacturing, and identifies existing research gaps, focusing on data-centered, real-time integration, and emerging technologies.

Materials and Methods

Relevant studies were retrieved using the keywords "Human Reliability," "Human Error," "Human Reliability Analysis," "Possibility of Human Error," and "System Safety" from Google Scholar, covering the period 2010–2023. For a complementary exploration and anticipation of contemporary research approaches, additional keywords, "AI," "Lights-Out Manufacturing (LOM)," and "IoT", were applied. Two independent reviewers screened titles, abstracts, and conclusions, excluding duplicates and irrelevant studies. The initial screening yielded over 230 publications, which were reduced to 180 after removing studies with overlapping results. The key data extracted included the methodology, the targeted industrial domain, the country of origin, and the affiliated research institution.

Results

The results revealed a substantial increase in the number and diversity of HRA studies. Between 2010 and 2015, the research volume grew by 200%, reached relative stability until 2020, and recently peaked. Technological advancement and the increasing complexity of modern equipment in the coming years are expected to further stimulate the development of HRA studies. Most HRA studies were concentrated in industries characterized by substantial human workforce or manually manufacturing or assembly workstations, production processes controlled by interactive systems, high accident potential, high potential to compromise product quality, products with critical sensitivity in production or use (e.g., pharmaceuticals, food), and specialized production processes. The most frequently studied sectors included nuclear, process, method development, maritime transport, healthcare, software development, industrial automation, railways, aviation, maintenance, manual assembly and construction, and road transport. The United States, China, and South Korea were identified as the major centers of knowledge production, with the Korea Atomic Energy Research Institute being the most active institution.

An analysis of HRA studies revealed ten main research gaps. A systematic analysis of related research published between 2010 and 2023 showed that 42% of studies applied fuzzy mathematics, cognitive reliability, and error analysis method (CREAM), or systematic human error reduction and prediction approach (SHERPA)—indicating their broad applicability across industries. To facilitate appropriate method selection, this study identified and compared the characteristics of commonly used HRA methods. The findings highlight that SHERPA, human error assessment and reduction technique (HEART), CREAM, and Tecnica Empirica Stima Errori Operatori (TESEO) techniques exhibit strong applicability and effectiveness in evaluating human reliability in a wide range of industries. Implementing SPAR-H and TESEO is relatively quick, whereas SHERPA, CREAM, and ATHEANA require longer analysis time. SHERPA, the only structured qualitative and task-based approach, proved effective for identifying critical points and designing preventive actions. TESEO was the only fully quantitative method. Accordingly, to fulfill the core objectives of HRA—identifying errors, estimating their probabilities, and proposing control measures—a hybrid qualitative–quantitative SHERPA-TESEO approach is proposed. This approach is broadly applicable, time-efficient, and capable of conservatively estimating error probabilities.

Discussion

With the widespread adoption of AI, traditional HRA methodologies require fundamental revisions. Such transformation should be guided by five pillars: transition from static to dynamic analysis, integration with cognitive and neuro-based sciences, convergence with digital modeling, standardization and policy-making integration, and proliferation of lights-out manufacturing systems. The rise of AI, IoT, and LOM technologies necessitates the redesign of the SHERPA–TESEO hybrid approach. Within SHERPA, task classifications should be extended to cognitive–managerial decision-making and algorithm design/data analytics roles. TESEO should incorporate corrective coefficients addressing software complexity, interface transparency, and automation dependency. Integrating real-time data and human–AI interaction will enable proactive error prediction and management of over-trust and misinterpretation.

Conclusion

This study provides a comprehensive overview of HRA research across various industries. A comparative analysis of existing methods underscores the need to adopt a hybrid strategy to achieve the fundamental objectives of HRA. In the future technological landscape, transitioning from static analyses to dynamic, data-driven models, integrating real-time data, and shifting from a human–machine to a human–AI perspective are imperative. Consequently, maintaining

the effectiveness of the proposed SHERPA–TESEO hybrid approach in intelligent, lights-out manufacturing environments requires revising cognitive task classifications in SHERPA and recalibrating correction coefficients in TESEO. These modifications strengthen real-time prediction of human error risk and timely interventions. Ultimately, ten research gaps, particularly related to data-drivenness and real-time analytics, were identified for future investigation.

Please cite this article as follows: Nikray AR, Vesali Naseh MR, Mohammadi A. An Analytical Perspective on Human Reliability Assessment and Human Error Risk Studies (2010–2023): Exploring the Role of Artificial Intelligence and Lights-Out Manufacturing. *Iran J Ergon*. 2025; 13(3): 235-248 DOI: 10.53208/IJE.13.3.235

مجله ارگونومی
دوره ۱۳، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴، صفحات: ۲۴۸-۲۳۵
DOI: 10.53208/IJE.13.3.235
https://journal.iehfs.ir/
UMSHA Press

مقاله پژوهشی

تحلیلی بر مطالعات ارزیابی قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک خطاهای انسانی با نگاهی بر گسترش هوش مصنوعی و کارخانهٔ تاریک

علیرضا نیک‌رای[۱]، محمدرضا وصالی ناصح[۱]، عباس محمدی[۲،۳]*

[۱] گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران
[۲] گروه مهندسی شیمی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران
[۳] گروه مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات ایمنی و حفاظت، دانشگاه قم، قم، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳
تاریخ داوری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۲۵
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

* **نویسنده مسئول:** عباس محمدی، گروه مهندسی شیمی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران؛ گروه مهندسی شیمی، مرکز تحقیقات ایمنی و حفاظت، دانشگاه قم، قم، ایران

ایمیل: mohammadi.a@qom.ac.ir

چکیده

اهداف: با پیچیده‌ترشدن سامانه‌های صنعتی و ورود فناوری‌های تجهیزمحور، نقش انسان در ایمنی و کارایی سیستم‌ها همچنان کلیدی باقی مانده است. این پژوهش با مرور مطالعات HRA در بازهٔ ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳، به شناسایی و مقایسهٔ روش‌های تحلیلی مختلف، انطباق آن‌ها با فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی و کارخانهٔ تاریک و استخراج شکاف‌های پژوهشی پرداخته است.

روش کار: با به‌کارگیری کلیدواژه‌های تخصصی در پایگاه‌های علمی، بیش از ۲۳۰ پژوهش شناسایی شد که پس از حذف نتایج تکراری، ۱۸۰ مطالعه برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. مقالات از نظر روش‌شناسی، صنایع هدف، کشور و مؤسسهٔ مجری و مجلات منتشرکننده، بررسی و مقایسه شدند.

یافته‌ها: روش‌های SHERPA، CREAM و Fuzzy Mathematics بیشترین کاربرد را در این مطالعات داشته‌اند. ایالات‌متحده، چین و کرهٔ جنوبی به‌عنوان کشورهای پیشرو شناخته شدند. تحلیل روش‌ها نشان داد هیچ روش کیفی یا کمّی‌ای به‌تنهایی قادر نیست اهداف سه‌گانهٔ HRA (شناسایی خطا، برآورد احتمال و طراحی کنترل‌ها) را محقق کند. لذا، اتخاذ رویکرد ترکیبی SHERPA–TESEO با شناسایی و کنترل خطاها با روش SHERPA و برآورد سریع و بدبینانهٔ احتمال خطا با روش TESEO، به‌عنوان رویکردی کارآمد پیشنهاد شد. در نهایت، ده شکاف پژوهشی شناسایی و ارائه شد.

نتیجه‌گیری: رویکرد ترکیبی SHERPA–TESEO راهکاری عملیاتی برای دستیابی به اهداف سه‌گانهٔ HRA است. باوجوداین، در محیط‌های هوشمند و تولید بدون اپراتور، گذار از تحلیل‌های ایستا به مدل‌های پویا و داده‌محور ضروری است. این پژوهش بازنگری وظایف شناختی در SHERPA، بازتنظیم ضرایب اصلاحی در TESEO و ادغام با داده‌های بلادرنگ و تعامل انسان با هوش مصنوعی را پیشنهاد می‌کند؛ تغییری که می‌تواند پیش‌بینی لحظه‌ای ریسک خطا و مداخلهٔ به‌هنگام را تقویت کند.

کلید واژه‌ها: خطای انسانی، رویکرد ترکیبی، قابلیت اطمینان انسانی، کارخانهٔ تاریک، هوش مصنوعی

استناد: نیک رای، علیرضا؛ وصالی ناصح، محمدرضا؛ محمدی، عباس. تحلیلی بر مطالعات ارزیابی قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک خطاهای انسانی با نگاهی بر گسترش هوش مصنوعی و کارخانهٔ تاریک. مجله ارگونومی، پاییز ۱۴۰۴؛۱۳(۳): ۲۴۸-۲۳۵

مقدمه

رشد سریع فناوری در بسیاری از صنایع، با کاهش حضور فیزیکی انسان، نقش مهم‌تری را به تجهیزات اختصاص داده است. باوجود کاهش حضور انسان، نقش نیروی انسانی در عملکرد، قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم‌ها افزایش یافته است [۱، ۲] و نیروی انسانی هنوز کلیدی‌ترین عامل در انجام فعالیت محسوب می‌شود [۳]. لذا، قابلیت اطمینان انسانی بالا تضمین‌کنندهٔ بهره‌وری و ایمنی سیستم خواهد بود [۴]. نفوذ

فناوری‌های نوینی چون هوش مصنوعی و اینترنت اشیا، رویکردهای تازه‌ای را در سازمان‌دهی محیط‌های کاری پدید آورده است. یکی از این مفاهیم کارخانه‌های تاریک است که به کارخانه‌های کاملاً خودکار اطلاق می‌شود و عملیات تولید، کنترل کیفیت و انبارش، بدون حضور مستقیم انسان انجام می‌گیرد. حذف نیروی انسانی از فرایندهای تولید ممکن است به‌منزلهٔ حذف کامل خطاهای انسانی تصور شود، اما در عمل، مسئولیت انسان به سطوح بالاتری چون طراحی الگوریتم‌ها انتقال یافته است. علاوه‌بر این، فناوری‌هایی نظیر هوش مصنوعی، باوجود کاهش حضور فیزیکی انسان، به ظهور گونه‌های جدیدی از خطاهای انسانی مرتبط با تعامل انسان و سیستم‌های هوشمند، منجر شده است. بنابراین، ضروری است تا در تحلیل‌های قابلیت اطمینان انسانی، به این تحولات فناورانه و نقش آن‌ها در خطاهای انسانی توجه شود.

در اغلب موارد، فجایع به‌دلیل ترکیبی از رویدادهای کوچک، شامل خطای سیستم و خطای انسانی، به وجود می‌آیند. این رویدادها به‌صورت جداگانه نامرتبط‌اند، لیکن ترکیب آن‌ها در یک توالی زمان ـ شرایط ـ اقدامات، می‌تواند به خسارات جبران‌ناپذیر مالی و جانی منجر شود [۵]. خطای انسانی شامل انحراف عملکرد انسان از قوانین و وظایف برنامه‌ریزی‌شده، شامل فعالیت ذهنی یا فیزیکی است که از حد قابل‌قبول سیستم فراتر می‌رود و در کارایی سیستم اثر نامطلوب می‌گذارد [۱، ۶]. بسیاری از رویدادهای فاجعه‌بار نظیر اتفاق تری‌مایل‌آیلند (Three Mile Island) (۱۹۷۹)، بوپال (Bhopal) (۱۹۸۴)، چرنوبیل (Chernobyl) (۱۹۸۶) و فوکوشیما (Fukushima) (۲۰۱۱)، ناشی از خطای انسانی بوده است [۵، ۷].

ارزیابی حوادث صنعتی بزرگ نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد حوادث در صنایع فرایندی، ۷۵ تا ۹۶ درصد حوادث در عملیات دریایی و بیش از ۹۰ درصد حوادث در نیروگاه‌های هسته‌ای ناشی از خطای انسانی بوده است [۸]. هاینریش با مطالعهٔ ۷۵هزار حادثه نشان داد که ۸۸ درصد علل وقوع حوادث را اعمال ناایمن، ۱۰ درصد را شرایط ناایمن و ۲ درصد را نیز عوامل غیرقابل‌پیشگیری به خود اختصاص داده است [۹]. تحلیل دوهزار حادثه در استرالیا، نقش عامل خطای انسانی را ۸۳ درصد تعیین کرده است [۱۰]. همچنین، مطالعه‌ای در دانشگاه فنی برلین نشان داد که ۶۴ درصد حوادث به‌دلیل خطای انسانی رخ می‌دهند [۱۰]. مطالعات کلتز و همکاران نشان داده است که ۶۰ تا ۹۰ درصد حوادث ناشی از خطای انسانی است [۱]. مطالعات حوزهٔ عوامل انسانی نشان‌دهندهٔ آن است که حدود ۸۰ درصد علل ریشه‌ای حوادث بزرگ، مرتبط با خطای انسانی بوده است و این خطاها نقش مؤثری در بروز حوادث دارند [۱۱]. در پژوهشی دیگر، عامل بیش از ۸۰ درصد از حوادث صنعتی، خطای اپراتور است [۱۲]. در صنایع دریایی نیز اغلب خرابی‌ها به عوامل انسانی نسبت داده می‌شود. چنین مواردی، ریسک پیامدهای زیست‌محیطی را به شدت افزایش داده [۱۳] و هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم سنگینی را به نیروی انسانی، منافع اقتصادی و حیثیت سازمان‌ها تحمیل می‌کند [۱۴].

در ایالات متحده، سالیانه حدود ۱۱/۳ میلیون نفر دچار جراحات شدید ناشی از حوادث شغلی می‌شوند و حدود یازده‌هزار نفر نیز در این حوادث جان خود را از دست می‌دهند [۱۵]. با اینکه آمار دقیقی از حوادث ناشی از کار در ایران وجود ندارد، مطالعات نشان می‌دهد که به‌ازای هر مرگ ناشی از حوادث شغلی، به‌طور میانگین ۳۲/۶ سال زندگی و ۱۵/۸ سال مشارکت اقتصادی از میان می‌رود [۱۵]. لذا، بیش از ۹۰ درصد از حوادث صنعتی به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم به خطای انسانی برمی‌گردد [۱۵]. اگرچه وقوع حوادث، بارزترین نتیجهٔ خطای انسانی است، تنها اثر آن نیست. خطای انسانی تأثیر مستقیمی در بهره‌وری فرایند دارد و به شدت در کیفیت محصول یا خدمات، حجم ضایعات و هزینه‌ها مؤثر است. این موضوع به تبعاتی جدی چون کاهش فروش و حذف از بازار رقابت منجر می‌شود [۵، ۸]. بنابراین، لزوم صیانت از صنایع راهبردی با حجم سرمایه‌گذاری زیاد در برابر خطاهای انسانی به‌شدت ضروری است [۱۶].

به‌منظور تحلیل قابلیت اطمینان و ارزیابی ریسک خطاهای انسانی سیستم‌ها، استفاده از روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان انسانی یا HRA (Human Reliability Assessment) توصیه شده است [۵]. این روش‌ها برپایهٔ مهندسی سیستم و روش‌های علوم شناختی ـ رفتاری در درک و ارزیابی سهم انسان در قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم استوار است [۱۷]. این خانواده از تکنیک‌ها به سه دستهٔ نسل اول، دوم و سوم تقسیم می‌شوند. تکنیک‌های نسل اول، انسان را جزئی در نظر می‌گیرند که تنها قادر به موفقیت یا شکست است. نسل دوم با تکامل روش‌های پیشین، به ادغام عوامل داخلی و خارجی مؤثر در قابلیت اطمینان انسانی می‌پردازند و تأثیر محیط در سطح شناختی را نیز منظور می‌کنند. در نهایت، نسل سوم بر رابطهٔ پویا و وابستگی میان عوامل مؤثر در عملکرد انسان تمرکز دارند [۵، ۱۸].

ارزیابی قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک خطاهای انسانی بسیار گسترده است و دراین‌باره، مطالعات وسیعی صورت پذیرفته است. به‌منظور شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی موجود و تعیین نقشهٔ راه مطالعات آتی (در توسعهٔ روش‌های موجود یا تناسب هر تکنیک با صنعت هدف)، مروری بر نتایج این مطالعات و نوع روش‌های مورد استفاده، بسیار ارزشمند است. گستردگی و پراکندگی نتایج مطالعات موجود، اهمیت این موضوع را دو چندان کرده است. تاکنون به این موضوع کمتر توجه شده است. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی مطالعات ارزیابی قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک خطاهای انسانی، به تحلیل این مطالعات، روند انتشار آن‌ها، شناسایی صنایع هدف مورد ارزیابی، روش‌های مورد استفاده و کشورها، مؤسسات و نشریات پیشرو در این زمینه پرداخته است. در نهایت، با تمرکز بر داده‌محوری، تحلیل بلادرنگ‌سازی داده‌ها و اتکا بر قضاوت خبرگی و همچنین مفاهیم نوینی چون هوش مصنوعی و کارخانه‌های تاریک، شکاف‌های تحقیقاتی موجود در این حوزه استخراج شده است.

روش کار

جست‌وجوی مقالات با استفاده از واژگان کلیدی پرتکرار «Human Reliability»، «Human Error»، «Human Reliability Analysis»، «Possibility of Human Error» و «System Safety» در پایگاه دادهٔ گوگل اسکولار (Google Scholar) در بازهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۳ انجام شد. در بررسی‌های تکمیلی نتایج و پیش‌بینی رویکرد مطالعات نوین، از کلید واژه‌های

«Artificial Intelligence»، «Lights-Out Manufacturing» و «Internet of Things» نیز استفاده شد، اگرچه نتایج بیانگر تعداد بسیار اندک مطالعات هم‌زمان تحلیل قابلیت اطمینان انسانی و فناوری‌هایی چون کارخانهٔ تاریک و هوش مصنوعی است. جست‌وجوی حاضر بر مقالات انگلیسی زبان، اعم از مقالات مجلات یا کنفرانس‌های تخصصی متمرکز بوده و از بررسی منابعی با دسترسی محدودتر (گزارش‌ها و پایان‌نامه‌ها)، صرف‌نظر شده‌است.

پس از شناسایی و جمع‌آوری مطالعات موجود، دو پژوهشگر به‌صورت تیمی، عناوین، چکیده و نتیجه‌گیری مقالات را مطالعه و منابع نامرتبط یا تکراری حذف شد. این پالایش اولیه به شناسایی بیش از ۲۳۰ عنوان پژوهشی منجر شد که با حذف مواردی با یافته‌های مشابه، تعداد آن‌ها به ۱۸۰ پژوهش تقلیل یافت. تیم ارزیابی، مقالات منتخب را به‌دقت مطالعه و داده‌های لازم، شامل روش‌شناسی پژوهش‌ها، حوزهٔ صنعتی مرتبط، کشور و مؤسسهٔ مبدأ پژوهش و مجلهٔ منتشرکننده را استخراج و در جدول‌های آماری ثبت کردند. هرگونه اختلاف‌نظر احتمالی میان ارزیابان نیز با بحث و توافق جمعی مرتفع شد. جزئیات همکاری افراد موجود در تیم تحقیقاتی در بخش مشارکت‌های نویسندگان مقاله ذکر شده است.

این مطالعه در پاییز سال ۲۰۲۴ و ذیل پروژه صنعتی «ارزیابی قابلیت اطمینان و تحلیل ریسک خطاهای انسانی در فرایند تولید کیسهٔ خون» اجرا شده است. ازاین‌رو، پژوهش‌های منتشرشده پس از این دوره در آمار نتایج لحاظ نشده است. اگرچه اشاره به دو نکته ضروری است؛ نخست، تفاوت اساسی در نتایج اغلب مطالعات موجود، ناشی از تفاوت در نوع و ماهیت روش‌های مورد استفاده، اعم از روش‌های کیفی، کمّی یا کیفی ـ کمّی است (رجوع شود به بخش روش‌های مطالعهٔ قابلیت اطمینان انسانی). بررسی‌های اخیر تیم حاضر حاکی از آن است که در دو سال اخیر، تغییرات چندانی در روش‌های تحلیلی پیشین صورت نپذیرفته است. همچنین، باوجود توسعه‌نیافتن روش‌های نوین در مقایسه با روش‌های گزارش‌شده تا پایان سال ۲۰۲۳، در صورت مشاهدهٔ هرگونه یافته علمی حائز اهمیت پس از این بازهٔ زمانی، به‌طور مختصر در بخش بحث به آن اشاره شده است.

یافته‌ها

روش‌های مطالعهٔ قابلیت اطمینان انسانی

تکنیک‌های نسل اول تا سوم

وودورث با مطالعهٔ رفتار انسان، نخستین مدل روان‌شناختی مبتنی‌بر نقش محیط در شکل‌دهی رفتار را ایجاد کرد. نخستین پژوهش‌های نظام‌مند رفتار انسان در صنعت، موسوم به مطالعات هاثورن (Hawthorne)، به رهبری مایو در دانشگاه هاروارد طی دهه‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ انجام شد [۱۹]. از دههٔ ۱۹۵۰، توجه به خطای انسانی در ایمنی سیستم‌ها با هدف توسعهٔ روش ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی افزایش یافت. تلاش‌های اولیه برآورد نرخ احتمال خطای انسانی به‌منظور محاسبهٔ قابلیت اطمینان انسانی و قابلیت اطمینان سیستم، در سال ۱۹۵۲ در آزمایشگاه ساندیانشنال (Sandia National Laboratories) ایالات متحده آغاز شد. در دههٔ ۱۹۶۰، آکادمی علوم فرانسه قابلیت اطمینان انسانی را به‌عنوان شاخه‌ای از مهندسی به رسمیت شناخت و ازآن‌پس، تمرکز پژوهش‌ها بر راهکارهای محاسبهٔ نرخ خطای انسانی قرار گرفت. در سال ۱۹۶۴، بنیان نخستین روش‌های کمّی و نیمه‌کمّی HRA همچون TESEO، SLIM، HEART و HCR فراهم شد [۲۰].

از اوایل دههٔ ۱۹۶۰، برای دستیابی به اهدافی چون سنجش سهم قابلیت اطمینان انسانی در قابلیت اطمینان سیستم، شناسایی اقدامات خطای اپراتور، مدل‌سازی و کمی‌سازی احتمال خطای انسانی، تحلیل پیامدهای آن و ارائه راهکارهای کارآمد برای کاهش و کنترل آثار، روش‌های نظام‌مند ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی شکل گرفت. این روش‌ها در سه مرحله تکامل یافتند. در مرحلهٔ نخست (۱۹۶۰ تا ۱۹۹۰)، نسل اول روش‌های ارزیابی معرفی و در میانهٔ دههٔ ۱۹۸۰ به اوج رسید. روش‌های نسل اول بر برآورد احتمال خطای انسانی و ویژگی‌های وظیفهٔ شغلی تمرکز داشتند و انسان را همانند اجزای مکانیکی، با محدودیت ذاتی می‌دیدند که در انجام وظایف، احتمال بروز خطا دارد [۲۰، ۲۱].

در بازهٔ زمانی ۱۹۹۰-۲۰۰۵ دومین نسل از روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی مبتنی‌بر نقش فرایندهای شناختی اپراتور در پیش‌بینی و توضیح شکست‌های انسانی توسعه یافتند. هدف از روش‌های نسل دوم ارزیابی رفتار اپراتور و توصیف نحوهٔ تعامل او با فرایند کاری است [۲۱، ۲۲]. پرکاربردترین تکنیک‌های نسل اول و دوم در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است [۱۹، ۲۲-۲۴]. توسعهٔ نسل سوم این روش‌های ارزیابی با ایجاد پایگاه دادهٔ خطای انسانی، تأثیر متقابل عوامل شکل‌دهندهٔ عملکرد و احتمال خطای انسانی و همچنین ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی به‌صورت پویا و مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملکرد انسان، از سال ۲۰۰۵ آغاز شده است و تا امروز ادامه دارد [۲۱، ۲۲].

جدول ۱: متداول‌ترین تکنیک‌های نسل اول HRA

نام روش	شرح روش	پدیدآورنده و سال
TESEO	تکنیک تجربی تخمین خطای اپراتور	بلو و کلمبری (۱۹۸۰)
OAT	درخت اقدام اپراتور	ورثهال (۱۹۸۲)
THERP	روش پیش‌بینی میزان خطای انسانی	سواین و گاتمن (۱۹۸۳)
SHARP	روش قابلیت اطمینان فعالیت نظام‌مند انسان	هانامان و اسپورگین (۱۹۸۴)
SHERPA	روش پیش‌بینی و کاهش سیستماتیک خطای انسانی	امبری (۱۹۸۶)
HEART	روش ارزیابی و کاهش سیستماتیک خطای انسانی	ویلیامز (۱۹۸۸)

جدول ۲. متداول‌ترین تکنیک‌های نسل دوم HRA

نام روش	شرح روش	پدیدآورنده و سال
ATHEANA	روش واکاوی رویدادهای انسانی	کوپر و همکاران (۱۹۹۶)
CREAM	روش واکاوی خطا با تأکید بر قابلیت اطمینان شناختی انسان	هولناگل (۱۹۹۸)
SPAR-H	ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی به‌روش واکاوی ریسک استاندارد	گرتمن و همکاران (۲۰۰۵)

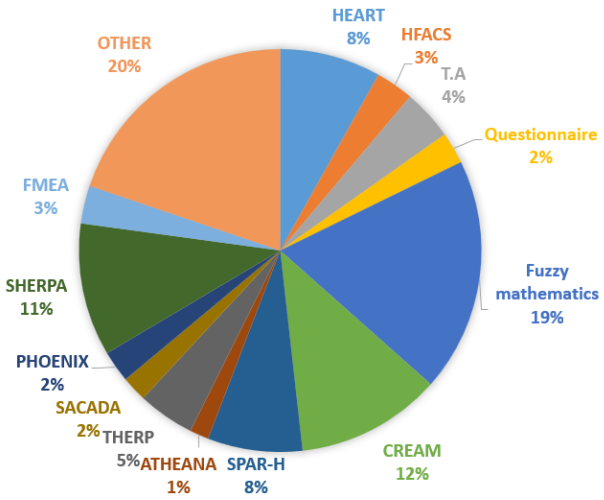
شناسایی و میزان پراکندگی روش‌ها

Mandal و همکاران با استفاده از روش‌های HTA، SHERPA، Fuzzy Vikor، به شناسایی خطای انسانی و اولویت‌بندی ریسک در عملیات جرثقیل سقفی پرداختند و روش جدیدی را برای شناسایی و مدیریت خطای انسانی در عملیات جرثقیل سقفی و کمّی‌سازی خطای انسانی توسعه دادند [۲۵]. Abílio Ramos و همکاران با هدف ارائهٔ یک روش ویژه (روش کیفی Phoenix-Pro)، به مطالعهٔ قابلیت اطمینان انسان در پالایشگاه‌های نفت و پتروشیمی پرداختند [۲۶]. Li و Zhu با استفاده از رویکرد مبتنی‌بر FMEA، SHERPA و Fuzzy Topsis، ریسک خطای انسانی در طراحی سیستم‌های تعاملی را تحلیل کردند. در این چهارچوب جدید از SHERPA برای شناسایی خطای انسانی، از FMEA برای تحلیل سیستماتیک خطای انسانی و از تاپسیس فازی (Fuzzy Topsis) برای رتبه‌بندی خطاها استفاده شد. با ترکیب روش Fuzzy Topsis و FMEA، نواقص محاسبه RPN روش FMEA سنتی برطرف شد [۶]. Catelani و همکاران به ارائهٔ روش پیشرفتهٔ E-SHERPA برای مطالعهٔ قابلیت اطمینان انسانی در مهندسی راه‌آهن پرداختند. در این روش، درنظرگرفتن کاهش احتمال خطا پس از وقفه در فعالیت در طول شیفت کاری موجود در روش SHERPA کلاسیک مرتفع شد. همچنین، تأثیر استرس بر عملکرد اپراتور، با استفاده از قانون یرکس ـ دادسون (Yerkes-Dodson) اعمال شد [۸].

Di Bona و همکاران به مطالعهٔ قابلیت اطمینان انسانی و ارزیابی احتمال خطای انسانی (HEP) در یک نیروگاه هسته‌ای پرداختند. هدف، توسعهٔ رویکردی جدید در ارزیابی HEP به نام تحلیل قابلیت اطمینان سیستماتیک انسانی (SHRA) بود. این رویکرد بر پایهٔ روش‌های قابلیت اطمینان اقدام هسته‌ای (NARA)، قابلیت اطمینان انسانی؛ ریسک تجزیه‌وتحلیل سادهٔ کارخانه (SPAR-H) و رابطهٔ شکل‌دهی عملکرد (PSFs) توسعه یافت که عوامل داخلی و خارجی مؤثر در عملکرد اپراتور را در نظر می‌گیرد [۱۸].

Torres و همکاران در پژوهشی به طبقه‌بندی و کمی‌سازی خطای انسانی در یک مجموعه مونتاژ دستی پرداختند. در گام نخست، از روش HTA برای شناسایی وظایف/ زیروظایف و سپس از تکنیک‌های SHERPA و HEART برای شناسایی و محاسبهٔ احتمال خطای انسانی استفاده شد [۲۷]. Primasari و Komdan به ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی و شناسایی علل خطا در شغل اپراتور ریخته‌گری با روش SHERPA پرداختند. نخست، با استفاده از روش HTA وظایف/ زیروظایف اپراتور مشخص و سپس با استفاده از روش SHERPA، خطاهای انسانی شناسایی شد [۲۸]. بررسی نظام‌مند پژوهش‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۳ نشان می‌دهد ۴۲ درصد مطالعات در تحلیل خطای انسانی از روش‌های Fuzzy Mathmatics، CREAM و SHERPA بهره‌گرفته‌اند. این یافته حاکی از کاربست‌پذیری بالای این روش‌ها در صنایع گوناگون است. شکل ۱ پراکندگی این روش‌های تحلیلی را نمایش داده است.

به‌منظور سهولت در انتخاب روش، در تحقیق حاضر به مقایسهٔ ویژگی‌ها، کاربردها و مزایا و معایب هریک از روش‌های رایج پرداخته شده است که نتایج آن در جدول ۳ آمده است. بر این اساس، روش‌های SHERPA، HEART، CREAM و TESEO در صنایع متنوعی قابل کاربرد است. اجرای SPAR-H و TESEO سریع است، درحالی‌که SHERPA، CREAM و ATHEANA زمان‌بر است. روش SHERPA تنها ابزار کیفی ساختاریافتهٔ جدول و مبتنی‌بر تحلیل وظیفه، کارآمد در شناسایی نقاط بحرانی و طراحی اقدامات پیشگیرانه است. روش TESEO نیز تنها روش محاسبه‌گر قابلیت اطمینان انسانی است.



شکل ۱: فراوانی کاربرد انواع روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان در بازهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۳

جدول ۳. مقایسهٔ متداول‌ترین روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان و خطای انسانی

روش	زمینه کاربرد	نوع تحلیل	مزایا	معایب
SHERPA	عمومی	کیفی	✓ سهولت در استفاده ✓ نیازنداشتن به تجربیات پیشین ✓ ارائهٔ رویکردی سازمان‌یافته و کامل برای پیش‌بینی خطای انسانی	• اجرای زمان‌بر
HEART	عمومی	کمّی و کیفی	✓ سهولت در استفاده ✓ توانایی کمّی‌سازی احتمال خطای انسانی	• دقت کم در شرایط پیچیده
CREAM	عمومی	کمّی و کیفی	✓ ارائهٔ رویکرد سازمان‌یافته در تحلیل خطای انسانی ✓ دقت زیاد	• اجرای زمان‌بر • پیچیدگی زیاد
THERP	صنایع هسته‌ای و فرایندی	کمّی و کیفی	✓ توانایی پیش‌بینی خطا در طراحی سیستم‌های انسانی	• ابهام در فرایند شناسایی خطا
SPAR-H	صنایع هسته‌ای و صنایع فرایندی	کمّی و کیفی	✓ سرعت زیاد اجرا ✓ آموزش آسان	• ابهام در فرایند شناسایی خطا • ضعف در طبقه‌بندی عوامل مؤثر در خطا
ATHEANA	صنایع هسته‌ای و صنایع مشابه	کمّی و کیفی	✓ بررسی نحوهٔ رخداد نقایص به‌صورت نظام‌مند	• اجرای زمان‌بر • پیچیدگی اجرا • محاسبه‌نکردن احتمال خطا
TESEO	عمومی	کمّی و کیفی	✓ اجرای آسان ✓ سرعت زیاد اجرا ✓ محاسبهٔ احتمال خطا ✓ محاسبهٔ قابلیت اطمینان انسانی	• کلی‌نگربودن برخی از عوامل اثرگذار در عملکرد برای محاسبهٔ احتمال خطا

بحث

خطاهای انسانی در همهٔ مراحل چرخهٔ عمر، سیستم سه‌گانهٔ انسان ـ تجهیزات ـ محصولات را در معرض ریسک قرار می‌دهند. لذا، انتخاب روش مناسب در ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی اهمیت دارد. در این زمینه، اهداف اصلی عبارت‌اند از: شناسایی خطاها، برآورد احتمال وقوع و ارائهٔ راهکارهای کنترل یا کاهش آن‌ها [۵]. روش‌های کیفی دو هدف شناسایی خطا و پیشنهاد اقدامات‌کنترلی را تأمین می‌کنند، اما توان کمّی‌سازی احتمال را ندارند. روش‌های کمّی باوجود محاسبهٔ احتمال و ارائهٔ راهکارها، در شناسایی و تحلیل کیفی ضعیف‌ترند [۲۹]. ازاین‌رو، رویکرد ترکیبیِ روش کیفی ـ کمّی توصیه می‌شود.

براساس شکل ۱، روش نظام‌مند SHERPA، به‌عنوان تنها روش کیفی پرکاربرد در تحلیل صنایع مختلف با نتایج قابل قبول [۳۰] شناسایی شد. ازاین‌رو، به‌کارگیری آن در مطالعهٔ صنایع جدید قابل توصیه است. به‌کارگیری روش SHERPA اهداف شناسایی خطا و ارائهٔ راهکارهای کنترلی را محقق می‌کند، اما برای برآورد احتمال خطای انسانی باید هم‌زمان از یک روش کمّی ارزیابی بهره برد. نظر به زمان‌بربودن اجرای SHERPA [۳۱]، استفاده از روش کمّی و سریع TESEO به‌عنوان مکمل توصیه می‌شود. TESEO احتمال خطای انسانی را به‌صورت بدبینانه محاسبه می‌کند و در نتیجه، هزینه‌های تحمیلی بر سیستم کاهش می‌یابد [۳۲]. لذا، کاربرد هم‌زمان SHERPA-TESEO تمام اهداف پژوهش‌های قابلیت اطمینان انسانی را در زمانی معقول برآورده می‌کند.

آیندهٔ قابلیت اطمینان انسانی با گسترش هوش‌مصنوعی

امروزه، قابلیت اطمینان انسانی صرفاً ابزاری تحلیلی در سنجش نرخ خطای اپراتورها نیست، بلکه حوزه‌ای میان‌رشته‌ای و پویاست که مرزهای مهندسی، روان‌شناسی، علوم داده و فناوری‌های شناختی را همگرا می‌کند.

جهش از تحلیل ایستا به سیستم‌های پویا

روش‌های سنتی چون THERP، HEART یا SHERPA، بر تحلیل‌های ایستا متکی است. آیندهٔ HRA در گرو گذار از رویکردهای ایستا به مدل‌های دینامیکی، داده‌محور و هوشمند است. در این زمینه، هوش مصنوعی و یادگیری ماشین با تحلیل مستمر داده‌های عملکرد انسانی در محیط واقعی و پیش‌بینی و حتی پیشگیری خطاها در زمان واقعی، نقشی کلیدی دارند. سامانه‌ها و الگوریتم‌هایی که از رفتار کاربر می‌آموزند و هشدارهای هوشمند ارائه می‌دهند، علاوه‌بر کاهش

احتمال بروز خطا، به‌عنوان دستیارهای شناختی برای اپراتورها عمل می‌کنند.

پیوند با علوم شناختی و عصب‌محور

از افق‌های پیش‌رو در تحلیل قابلیت اطمینان انسانی، تلفیق آن با علوم اعصاب، روان‌شناسی شناختی و فناوری‌های ردیابی مغز و چشم است. استفاده از فناوری‌هایی مانند ثبت امواج مغزی و ردیابی حرکات چشم، می‌تواند به تحلیل بار ذهنی، خستگی یا استرس لحظه‌ای اپراتور کمک کند. این اطلاعات در آینده می‌توانند به مدل‌های HRA اضافه کنند و دقت آن‌ها را بهبود دهند.

همگرایی با مدل‌سازی دیجیتال

تحلیل خطای انسانی در آینده، دیگر به چک‌لیست‌ها یا درخت‌های خطا محدود نخواهد بود، بلکه در قالب شبیه‌سازی دیجیتال آنی، می‌تواند شرایط عملکردی انسان ـ ماشین ـ محیط را به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی کند. فناوری Digital Twin، با ایجاد امکان پیش‌بینی پیش از وقوع حادثه، به تیم‌های ایمنی اجازهٔ اصلاح رفتار سیستم ـ انسان را در بهترین زمان می‌دهد.

استانداردسازی و جایگاه سیاست‌گذارانه

سهم عمدهٔ خطای انسانی در رخدادهای صنعتی، نهادهای بین‌المللی چون سازمان جهانی بهداشت، آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، سازمان بین‌المللی هوانوردی کشوری و سازمان بین‌المللی استانداردسازی را به به‌روزرسانی استانداردهای مدیریت خطای انسانی وادار کرده است. پیش‌بینی می‌شود HRA در صدور مجوز، بازرسی و تضمین کیفیت تجهیزات پزشکی و صنعتی الزامی شود. در نتیجه، در آینده، HRA از چهارچوبی ایستا به تحلیلی هوشمندِ پیش‌نگر دگرگون می‌شود. این رویکرد علاوه‌بر واکاوی رفتار گذشته، وضعیت جاری را رصد می‌کند، هشدار می‌دهد، آینده را پیش‌بینی و با اتکا به داده‌های بلادرنگ، با رویکرد باز (بهترین، ارزان‌ترین، زودترین)، پیشنهادهای اصلاحی ارائه می‌کند. این تحول ضمن کاهش خطاهای انسانی، به‌طور قابل‌توجه به ارتقای ایمنی، کیفیت قابل اتکا و بهره‌وریِ پایدار در سامانه‌های پیچیدهٔ عملیاتی انسان ـ ماشین کمک می‌کند.

پیش‌بینی آینده قابلیت اطمینان انسانی در کارخانه‌های تاریک

در کارخانه‌های تاریک، عملیات تولید تا ارسال بدون حضور مستقیم نیروی انسانی و با تجهیزات هوشمند و سیستم‌های خودکار انجام می‌گیرد. این مدل تولیدی نماد بلوغ چهارمین انقلاب صنعتی و نشان‌دهندهٔ اوج استفاده از فناوری‌های دیجیتال، اینترنت اشیا و هوش مصنوعی است. در ابتدا، ممکن است حذف اپراتورهای‌انسانی از محیط تولید به‌عنوان حذف خطاهای انسانی تلقی شود، لیکن نقش انسان نه‌تنها حذف نشده، بلکه به سطحی راهبردی‌تر منتقل شده است. در چنین کارخانه‌هایی، تصمیمات انسانی در حوزه‌هایی چون طراحی الگوریتم‌های‌کنترلی، برنامه‌ریزی فرایندها، تنظیمات نرم‌افزاری و تفسیر داده‌ها، نقشی حیاتی دارند. لذا، خطای انسانی در قالبی نوین نظیر اشتباه در تعریف توالی عملکرد ربات‌ها، نقص در الگوریتم‌های هوشمند یا تحلیل نادرست داده‌ها بروز می‌کند. بنابراین، در HRA به‌جای تمرکز بر اپراتورهای خط تولید، باید بر عملکرد و وظایف طراحان سیستم، برنامه‌نویسان و تحلیلگران داده متمرکز شد.

روش‌های سنتی نظیر THERP یا HEART (مبتنی‌بر وظایف تکراری انسانی)، کفایت لازم را ندارند و ضروری است تا روش‌های نوینی با ترکیب تحلیل‌شناختی، مدل‌سازی تصمیم‌گیری و یادگیری ماشین، توسعه یابند. لذا، کارخانه‌های تاریک در عمل بر پایهٔ تصمیمات انسان ساخته شده‌اند و با خطاهای سطح بالای انسانی مواجه‌اند و تحلیل دقیق، پویا و هوشمندانهٔ ریسک‌های انسانی در این محیط‌ها، از همیشه حیاتی‌تر خواهد بود.

حفظ کارایی روش ترکیبی SHERPA–TESEO در محیط‌های هوشمند

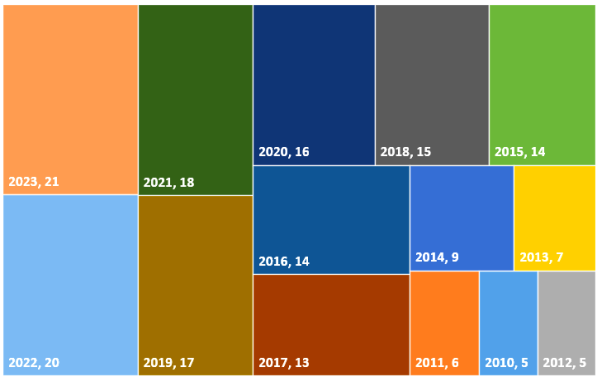
گسترش فناوری‌های هوش مصنوعی، اینترنت‌اشیا و کارخانه‌های تاریک، تحول روش‌های تحلیل سنتی نظیر SHERPA و TESEO را به‌منظور حفظ کارایی آن‌ها ضروری شاخته است. ترکیب این دو روش، به‌شرط هم‌سویی با الزامات فناوری‌های مدرن، می‌تواند همچنان مفید واقع شود. برای این منظور، نخست باید انواع وظایف انسانی در SHERPA به‌روزرسانی شود. در محیط‌های هوشمند، وظایف فیزیکی با وظایف شناختی ـ مدیریتی نظیر طراحی‌الگوریتم یا تحلیل داده جایگزین شده است. لذا، طبقه‌بندی وظایف در SHERPA باید شامل سطوح بالاتری از تصمیم‌گیری انسانی باشد.

در وهلهٔ بعد، TESEO نیازمند بازسازی ضرایب اصلاحی خویش است. پارامترهایی چون پیچیدگی نرم‌افزار، سطح شفافیت رابط‌های‌کاربری و میزان اتکای سیستم به تصمیم‌گیری خودکار، باید به عوامل سنتی نظیر نوع فعالیت اضافه شوند. این اصلاحات امکان تخمین دقیق‌تر احتمال خطا در محیط‌های هوشمند را فراهم می‌کند. روش ترکیبی نیز باید قابلیت ادغام با داده‌های بلادرنگ سیستم‌های هوشمند را داشته باشد. در این شرایط، مدل می‌تواند به‌صورت پویا به تحلیل وضعیت سیستم بپردازد و احتمال وقوع خطای‌انسانی را در زمان واقعی، پیش‌بینی کند. در نهایت، تمرکز تحلیل از تعامل انسان با ماشین باید به تعامل انسان با هوش‌مصنوعی منتقل شود. خطاهایی چون اعتماد بیش از حد به هوش مصنوعی و تفسیر اشتباه خروجی‌ها، در این نوع محیط‌ها بسیار رایج است و باید به‌طور خاص، بررسی شود. می‌توان گفت که با اعمال این تغییرات، مدل ترکیبی SHERPA–TESEO می‌تواند به‌عنوان ابزار مؤثری در تحلیل ریسک خطای انسانی محیط‌های تمام‌خودکار آینده، ایفای نقش کند.

روند انتشار مقالات HRA

شکل ۲ توزیع فراوانی پژوهش‌های مرتبط را در بازهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۳ نمایش داده است. یافته‌ها بیانگر افزایش چشمگیر تعداد و تنوع این پژوهش‌هاست. در فاصلهٔ ۲۰۱۰-۲۰۱۵، حجم

مطالعات حدود ۲۰۰ درصد رشد کرده و باوجود ثبات نسبی تا ۲۰۲۰، در سال‌های اخیر به بیشینهٔ حد رسیده است. این روند نشان‌دهندهٔ پویایی فزاینده این حوزه است.



شکل ۲: روند انتشار مقالات در بازهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۳

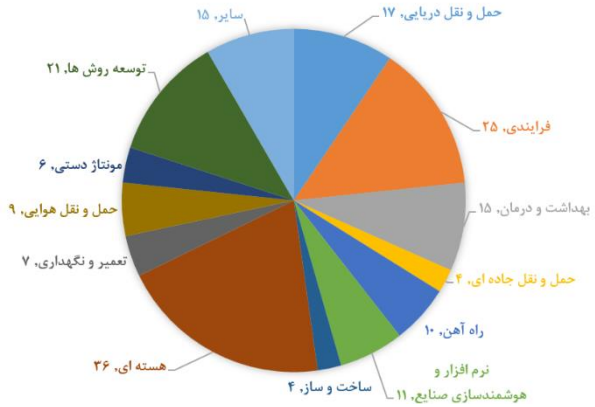
به‌دلیل رشد فناوری، افزایش پیچیدگی تجهیزات و آشنایی کمتر نیروی انسانی با دستگاه‌های مدرن، پیش‌بینی می‌شود نقش عوامل انسانی در خرابی سیستم‌ها افزایش یابد. لذا، در سال‌های پیش‌رو، مطالعات حوزهٔ HRA رشد قابل توجهی خواهد کرد.

صنایع هدف در HRA

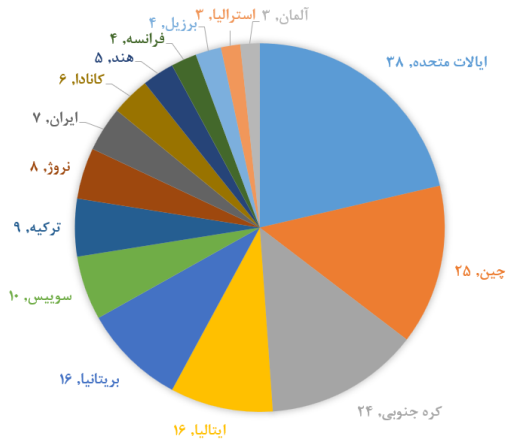
شکل ۳ به نمایش صنایع هدف در مطالعات HRA پرداخته است. نمودار بیانگر تمرکز پژوهش‌ها به‌ترتیب در صنایع هسته‌ای، فرایندی، توسعهٔ روش‌ها، حمل‌ونقل دریایی، بهداشت و درمان، توسعهٔ نرم‌افزار و هوشمندسازی صنایع، راه‌آهن، حمل‌ونقل هوایی، تعمیر و نگهداری، مونتاژ دستی و ساخت‌وساز و در نهایت، حمل‌ونقل جاده‌ای است. مطالعهٔ حاضر نشان داد که مطالعات HRA غالباً در صنایعی با یک یا چند ویژگی ذیل صورت پذیرفته است: ۱. دارای تعداد قابل توجه نیروی انسانی یا ایستگاه‌های تولید یا مونتاژ دستی، ۲. دارای فرایند تولید کنترل‌شونده توسط سیستم‌های تعاملی، ۳. دارای پتانسیل بالای ایجاد حادثه، ۴. دارای پتانسیل بالای آسیب به کیفیت محصول، ۵. دارای محصولاتی با حساسیت تولید و کاربری بالا (نظیر محصولات دارویی)، ۶. دارای فرایندهای ویژه در تولید. منظور از فرآیندهای ویژه فرایندهایی است که ارزیابی هم‌زمان کیفیت اجرای وظایف در حین تولید، در آن‌ها امکان‌پذیر نیست، یا خروجی آن با پایش و اندازه‌گیری‌های بعدی قابل تصدیق نیست یا عیوب محصول صرفاً پس از مصرف یا ارائه خدمت آشکار شود. مطابق استاندارد ISO-9001:2015، فرایندی ویژه است که انطباق خروجی آن با الزامات عملکردی یا استانداردی فوراً یا به‌صورت اقتصادی قابل صحه‌گذاری نباشد [۳۳]. بدیهی است به‌سبب هزینه‌زا و زمان‌بربودن تبعات خطای انسانی در این فرایندها، HRA و برآورد احتمال خطا بسیار ضروری و معنادار است.

کشورهای پیشرو در HRA

شکل ۴ توزیع مطالعات HRA را در بازهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۳ میان کشورهای مختلف نمایش داده است. بر این اساس، ایالات متحده با ۳۸، چین با ۲۵، کرهٔ جنوبی با ۲۴ و ایتالیا و بریتانیا با ۱۶ مطالعه، پیشروترین کشورها محسوب می‌شوند.



شکل ۳: صنایع هدف در مطالعات HRA (اعداد: تعداد پژوهش گزارش‌شده)



شکل ۴: توزیع مطالعات HRA در بازهٔ زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۳ میان کشورهای پیشرو

مؤسسات پیشرو در HRA

در جدول ۴، مؤسسات فعال حوزهٔ HRA آمده است. آستانهٔ ورود به جدول، انجام حداقل سه پژوهش بوده است. بر این اساس، مؤسسهٔ تحقیقات انرژی اتمی کره و مؤسسهٔ پل‌شرر سوئیس، فعال‌ترین نهادها محسوب می‌شوند. سهم ۶۸ درصدی دانشگاه‌ها در این فهرست، ضمن تأکید بر نقش محوری آن‌ها در پژوهش‌های HRA، بیانگر وجود نوآوری‌های لازم و شکاف‌های تحقیقاتی معنادار در این عرصه است. در ادامه، مهم‌ترین شکاف‌های تحقیقاتی HRA بیان شده است.

نشریات پیشرو در HRA

جدول ۵ به معرفی نشریات برتر حوزهٔ HRA در بازهٔ ۲۰۱۰-۲۰۲۳ پرداخته است. بر این اساس، *Reliability Engineering & System Safety* با انتشار ۵۸ مقاله، *Safety Science* با ۲۳ و *Annals of Nuclear Energy* با ۱۴ مقاله، فعال‌ترین نشریات بوده‌اند.

جدول ۴: مؤسسات پیشرو در تحقیقات قابلیت اطمینان انسانی برحسب تعداد مقالات

نام مؤسسه	کشور	تعداد مورد مطالعاتی
مؤسسهٔ تحقیقات انرژی اتمی کره	کرهٔ جنوبی	۱۹
مؤسسهٔ پل شرر	سوییس	۱۰
دانشگاه مریلند	ایالات متحده	۶
مؤسسه علوم و فناوری پیشرفتهٔ کره	کرهٔ جنوبی	۵
دانشگاه فنی استانبول	ترکیه	۵
کمیسیون تنظیم مقررات هسته‌ای آمریکا	ایالات متحده	۴
آزمایشگاه ملی آیداهو	ایالات متحده	۴
آزمایشگاه ملی ساندیا	ایالات متحده	۴
دانشگاه وندربیلت	ایالات متحده	۴
امپریال کالج لندن	بریتانیا	۴
دانشگاه استراسکلاید	بریتانیا	۴
دانشگاه بیهانگ	چین	۴
دانشگاه شانگهای	چین	۴
دانشگاه سالرنو	ایتالیا	۴
دانشگاه پلی تکنیک میلان	ایتالیا	۴
دانشگاه علم‌وصنعت نروژ	نروژ	۴
دانشگاه فنی بورسا	ترکیه	۴
دانشگاه ممورییال نیوفاندلند	کانادا	۴

جدول ۵: رتبه‌بندی نشریات پیشرو در حوزهٔ قابلیت اطمینان انسانی

نام نشریه	تعداد مقالات چاپ‌شده
Reliability Engineering & System Safety	۵۸
Safety Science	۲۳
Annals of Nuclear Energy	۱۴
Journal of Loss Prevention in the Process Industries	۶
Quality & Reliability Engineering International	۵
Ocean Engineering	۵
Nuclear Engineering and Technology	۵

شکاف‌های تحقیقاتی

براساس پژوهش حاضر، مهم‌ترین شکاف‌های تحقیقاتی موجود در این حوزه عبارت‌اند از:

۱) ادغام HRA با فناوری‌های نوینی چون هوش‌مصنوعی، اینترنت اشیا و کارخانه‌های تاریک؛

۲) بسیاری از قضاوت‌ها در HRA، متکی بر نظرهای فردی بوده است که به‌دلیل تجربیات متفاوت و گاهی محدود فرد، نقطه‌ضعفی در تحلیل دقیق یا نظام‌مند محسوب می‌شود؛

۳) بهبود فرایندهای جمع‌آوری اطلاعات؛ این موضوع غالباً نظام‌مند نبوده و امکان بروز خطا بسیار است؛

۴) ابهامات در کارایی روش‌های سنتی HRA در سامانه‌های دیجیتال نوین؛

۵) نبود بستری مطمئن در اجرای الگوریتم‌های HRA؛

۶) نبود امکان تعمیم نتایج به‌دلیل تمرکز مطالعات تنها در برخی از کشورها؛

۷) ادغام‌نشدن تحلیل علل رفتارهای ناایمن اپراتور با HRA؛

۸) اعمال‌نشدن شاخص‌های شکل‌دهندهٔ عملکرد در HRA؛

۹) ممکن‌نبودن اجرای راهکارهای اصلاحی پیشنهادی بسیاری از مطالعات؛

۱۰) تمرکز مطلق HRA بر جنبهٔ ایمنی و عدم کاربرد مطلوب در حوزهٔ کنترل‌کیفیت

هو و همکاران مطالعه‌ای مشابه را در بازهٔ ۲۰۰۹-۲۰۲۰ گزارش کرده‌اند [۳۴]. در ادامه، به مقایسهٔ نتایج حاضر و نتایج ایشان پرداخته شده است.

- برخلاف مطالعهٔ حاضر، این محققان ملاحظات مواجهه با رویکردهایی چون کارخانهٔ تاریک و هوش مصنوعی را بررسی نکرده‌اند؛
- پژوهش حاضر بیش از ۲۳۰ عنوان مقاله (شامل ۱۸۰

عنوان متفاوت) و هو و همکاران حدود ۲۷۰ مقاله را مرور کرده‌اند؛

- جست‌وجوی مقالات در پژوهش حاضر با هشت کلیدواژه انجام شد (رجوع شود به بخش روش کار). هو و همکاران از شش کلیدواژهٔ «Human Reliability Analysis»، « Human Error Probability»، «Human Error Analysis»، « Probabilistic Risk Assessment»، «Dependence Assessment» و « HRA Data Collection» استفاده کرده‌اند؛
- تمرکز هر دو پژوهش بر مقالات انگلیسی‌زبان بوده است؛ اگرچه پژوهش حاضر مقالات کنفرانس‌های بین‌المللی را نیز مرور کرده است؛
- هر دو پژوهش رشدی پایدار را در تعداد مطالعات نمایش می‌دهد؛
- مطالعهٔ حاضر پژوهش‌ها را برحسب کشورها و هو و همکاران برحسب قارهٔ مربوطه طبقه‌بندی کرده‌اند. هر دو پژوهش بیانگر توزیع ناهمگنی درخصوص مکان انجام تحقیقات است.
- پنج نشریهٔ پیشرو در هر دو پژوهش مشترک‌اند و نشریهٔ *Reliability Engineering & System Safety* رتبهٔ نخست را دارد؛
- هو و همکاران HRA را در هفت حوزه و پژوهش حاضر آن را در دوازده حوزهٔ مختلف مرور کرده است. در پژوهش حاضر، سه حوزهٔ پرتکرار به‌ترتیب صنایع هسته‌ای، صنایع فرایندی و توسعهٔ روش‌هاست، لیکن این ترتیب در تحقیق هو به‌صورت صنایع انرژی/شیمیایی (فرایندی)، صنعت دریایی و حمل‌ونقل است؛
- این پژوهش هجده مؤسسهٔ پیشرو و Hou و همکاران شانزده مؤسسه را شناسایی کرده‌اند. سیزده مؤسسه میان دو پژوهش مشترک‌اند و در هر دو پژوهش، مؤسسهٔ تحقیقات انرژی اتمی کره در صدر فهرست است.

مقایسهٔ نتایج حاضر با یافته‌های Hou و همکاران [۳۴] بیانگر هم‌سویی مطلوبی است. اگرچه مطالعهٔ حاضر با تحلیل موارد چهارگانهٔ ذیل، به رفع شکاف‌های پژوهشی تحقیقات پیشین چون پژوهش هو و همکاران پرداخته است:

(۱) شناسایی، طبقه‌بندی و مقایسه جامع روش‌های مختلف (رجوع شود به بخش روش‌های مطالعهٔ قابلیت اطمینان انسانی)؛

(۲) پیشنهاد چهارچوب ترکیبی SHERPA–TESEO به‌منظور تحقق اهداف سه‌گانهٔ HRA (شناسایی خطا، برآورد احتمال و طراحی راهکارهای کنترلی کارآمد)؛

(۳) تحلیلی بر آیندهٔ HRA با گسترش مفاهیم هوش مصنوعی و کارخانهٔ تاریک (رجوع شود به بخش آیندهٔ قابلیت اطمینان انسانی با گسترش هوش مصنوعی)؛

(۴) شناسایی مهم‌ترین شکاف‌های تحقیقاتی این حوزه (رجوع شود به بخش شکاف‌های تحقیقاتی).

این مطالعه تصویری جامع از وضعیت مطالعات قابلیت اطمینان انسانی در سالیان اخیر ارائه کرده است، لیکن اشاره به چند محدودیت آن ضروری است: ۱. دامنهٔ منابع مورد بررسی به مطالعات انگلیسی‌زبان محدود است و مقالات منتشرشده به سایر زبان‌ها لحاظ نشده است. این موضوع می‌تواند تاحدی به نادیده‌ماندن بخشی از داده‌ها منجر شود؛ ۲. بازهٔ زمانی منابع تا پایان سال ۲۰۲۳ تعریف شد. در پاراگراف آخر بخش روش، دلایل عدم تأثیر محسوس این موضوع در نتایج حاصل ذکر شده است؛ ۳. تمرکز بر مقالات منتشرشده در مجلات و کنفرانس‌های علمی بوده است. لذا مطالعات غیررسمی یا نتایج پروژه‌های صنعتی که در قالب مقالات علمی منتشر نشده‌اند، به‌دلیل محدودیت احتمالی دسترسی محققان بعدی به این منابع، در این مرور لحاظ نشده است. این سه محدودیت ممکن است در تعمیم‌پذیری مطلق نتایج حاصل تأثیرگذار باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با تمرکز بر مطالعات منتشرشده در بازهٔ زمانی ۲۰۲۳-۲۰۱۰، تصویری مطلوبی از وضعیت مطالعات ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی در صنایع مختلف ارائه شده است. نتایج بیانگر آن است که سه روش SHERPA، CREAM و Fuzzy Mathematics، پرکاربردترین روش‌ها در مطالعات اخیر بوده است و به‌دلیل گستردگی کاربرد و امکان انطباق با صنایع مختلف، نقطهٔ شروع قابل قبولی در پژوهش‌های آینده در صنایع جدید محسوب می‌شوند. مقایسهٔ روش‌های موجود نشان داد که هیچ‌یک از روش‌های اکیداً کیفی یا اکیداً کمّی، به‌تنهایی قادر نیستند اهداف سه‌گانهٔ کلیدی (یعنی شناسایی خطا، برآورد احتمال و طراحی کنترل‌های کارآمد) را در ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی محقق کنند. لذا، اتخاذ راهبرد ترکیبی توصیه شد. در این زمینه، ترکیب SHERPA-TESEO با پوشش کامل شناسایی و کنترل خطاها با روش SHERPA و برآورد سریع و بدبینانهٔ احتمال خطا با استفاده از روش TESEO به‌عنوان راهکاری کارآمد و اجرایی برای تحقق اهداف سه‌گانهٔ فوق در یک بازهٔ زمانی عملیاتی و معقول توصیه شد. برمبنای تحلیل روندها و حوزه‌های مطالعاتی، کشورهای ایالات متحده، چین و کرهٔ جنوبی به‌عنوان کانون‌های تولید دانش در حوزهٔ HRA شناسایی شدند و پرتکرارترین صنایع هدف، صنایع هسته‌ای، فرایندی، توسعهٔ روش‌ها، حمل‌ونقل دریایی، بهداشت و درمان، توسعهٔ نرم‌افزار و هوشمندسازی صنایع، راه‌آهن، حمل‌ونقل هوایی، تعمیر و نگهداری، مونتاژ دستی و ساخت‌وساز و در نهایت، حمل‌ونقل جاده‌ای بوده است.

در افق آیندهٔ فناوری، گذار از تحلیل‌های ایستا به مدل‌های پویا و داده‌محور، ادغام داده‌های بلادرنگ و انتقال تمرکز از رویکرد انسان ـ ماشین به رویکرد انسان ـ هوش‌مصنوعی ضرورت می‌یابد. در نتیجه، برای حفظ کارایی رویکرد ترکیبی پیشنهادی SHERPA-TESEO در محیط‌های هوشمند و کارخانه‌های تاریک، بازنگری طبقه‌بندی وظایف شناختی در روش SHERPA و بازتنظیم ضرایب اصلاحی در روش TESEO (با لحاظ پیچیدگی نرم‌افزار، شفافیت رابط‌ها و سطح خودکارسازی) پیشنهاد می‌شود؛ تغییری که امکان پیش‌بینی لحظه‌ای ریسک خطای انسانی و مداخلات به‌هنگام را تقویت می‌کند. در

نهایت، ده شکاف پژوهشی نیز با تمرکز بر مواردی چون داده‌محوری، تحلیل بلادرنگ داده‌ها و اتکا بر قضاوت خبرگی ارائه شد. این مطالعه ضمن ترسیم نقشهٔ وضعیت HRA و شکاف‌های تحقیقاتی، خط‌مشی روشنی برای کاربردهای عملی ارائه می‌کند. استقرار رویکرد ترکیبی SHERPA-TESEO به‌عنوان خط مبنا، همراه با نوسازی مفهومی و بازتنظیم پارامتری آن برای محیط‌های داده‌محور و خودکار، رویکردی است که انتظار می‌رود در آینده‌ای نه‌چندان‌دور، به کاهش ریسک‌های انسانی با پیامدهای ایمنی و کیفی بالا و ارتقای بهره‌وری و استانداردسازی الزامات ارزیابی در صنایع حساس بینجامد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله، کمال قدردانی خویش را از کلیه افراد یاری‌رسان در انجام این پژوهش، اعلام می‌دارد.

تضاد منافع

در این پژوهش هیچ تضاد منافعی وجود ندارد.

مشارکت‌های نویسندگان

مفهوم‌سازی: علیرضا نیک‌رای، عباس محمدی، محمدرضا وصالی ناصح

مدیریت داده‌ها: علیرضا نیک‌رای، عباس محمدی

تحلیل: علیرضا نیک‌رای، عباس محمدی، محمدرضا وصالی ناصح

جذب سرمایه: غیرکاربردی

تحقیق: علیرضا نیک‌رای، عباس محمدی، محمدرضا وصالی ناصح

روش‌شناسی: علیرضا نیک‌رای، عباس محمدی، محمدرضا وصالی ناصح

مدیریت پروژه: عباس محمدی، محمدرضا وصالی ناصح

منابع: علیرضا نیک‌رای

نرم‌افزار: غیرکاربردی

نظارت: عباس محمدی، محمدرضا وصالی ناصح

اعتبارسنجی: علیرضا نیک‌رای، عباس محمدی، محمدرضا وصالی ناصح

تجسم: غیرکاربردی

نوشتن پیش‌نویس اصلی: علیرضا نیک‌رای، عباس محمدی

نگارش، بررسی و ویرایش: علیرضا نیک‌رای، عباس محمدی، محمدرضا وصالی ناصح

ملاحظات اخلاقی

در این مطالعه موضوعیت ندارد.

حمایت مالی

در این مطالعه موضوعیت ندارد.

REFERENCES

1. Habibi EA, Gharib SA, Mohammadfam I, Rismanchian M. Human error assessment and management among Isfahan oil refinery control room operators by SHERPA technique. J Health Syst Res. 2012;7(4):391-400. [Link]
2. Hayadokht S, Jozi SA, Mirzaebrahimtehrani M. Human health risk analysis in the health, safety, and environment using EFMEA & SHERPA integrated methods (case study: car seat production company). J Environ Dev. 2018;3(61):49-60. [Link]
3. Ramezanifar S, Ramezanifar E, Khadiv E, Salehi Sahlabadi A, Eskandari D. Namdari M. Applying the HEART technique to identify and assess the human error in the central railway traffic control room. J Health Safety Work. 2022;12(3):595-616. [Link]
4. Nikray AR, Vesali Naseh MR, Mohammadi A. Evaluation of reliability studies and human error risk analysis worldwide (2010-2023 time frame). 18th National Congress of Chemical Engineering of Iran, Tabriz, Iran. [Link]
5. Di Pasquale V, Miranda S, Iannone R. Riemma S. A simulator for human error probability analysis (SHERPA). Reliab Eng Syst Saf. 2015;139:17-32. [DOI: 10.1016/j.ress.2015.02.003]
6. Li Y, Zhu L. Risk analysis of human error in interaction design by using a hybrid approach based on FMEA, SHERPA, and fuzzy TOPSIS. Qual Reliab Eng Int. 2020;36(5):1657-1677. [DOI: 10.1002/qre.2652]
7. Chen S, Zhang L, Zhang L. A human reliability analysis methodology based on an extended Phoenix method for severe accidents in nuclear power plants: Qualitative analysis framework. Reliab Eng Syst Saf. 2021;214:107750. [DOI: 10.1016/j.ress.2021.107750]
8. Catelani M, Ciani L, Guidi G, Patrizi G. An enhanced SHERPA (E-SHERPA) method for human reliability analysis in railway engineering. Reliab Eng Syst Saf. 2021;215:107866 [DOI: 10.1016/j.ress.2021.107866]
9. Habibzadeh, H. Investigation and evaluation of human errors in controlling the solid fuel production process in an industry using the C-REAM method. J Standard Qual Manag. 2013;3(3):72-81. [Link]
10. Afshari D, Jafarzadeh Z, Mousavian asl Z, Jahani F. Identification and evaluation of human errors using human factor analysis and classification system based on fuzzy hierarchy theory: a case study in the cement industry. Occup Med. 2019;11(1):42-58. [DOI: 10.18502/tkj.v11i1.1777]
11. Borgheipour H, Monazami Tehrani G, Eskandari D, Golmohammadi MR, Mohammadfam I. Assessment of human error probability in emergency evacuation using HEPI method in offshore industry. J Occup Hyg Eng. 2018;5(2):28-38. [DOI: 10.21859/johe.5.2.28]
12. Ghavam M.A, Mazloumi A, Hosseini M.R. Identification and evaluation of human error in operation of electrical installations of Tehran Province Electricity Distribution Company using SHERPA technique. J Health Safety Work. 2019;9(4):363-380. [Link]
13. Akyuz E, Celik M, Akgun I, Cicek K. Prediction of human error probabilities in a critical marine engineering operation on-board chemical tanker ship: The case of ship bunkering. Saf Sci. 2018;110:102-109. [DOI: 10.1016/j.ssci.2018.08.002]
14. Nikray AR, Vesali Naseh MR, Mohammadi A. Identification and classification of human errors in occupational accidents in Japan based on the Koltz approach. Eighth International Conference on Safety and Health. Tehran, Iran. [Link]
15. Mohamadfam I, Nikoumaram H, Yousefi H, Pirhadi M. Assessment and management of human errors in emergency situations by HEPI method (case study: a Manufacturing industry). JSMJ. 2012;4(4):47-57. [Link]
16. Nikray AR, Vesali Naseh MR, Mohammadi A. Assessing the contribution of human error to major industrial accidents. 18th National Congress of Chemical Engineering of Iran, Tabriz, Iran. [Link]

17. Sujan MA, Embrey D, Huang H. On the application of human reliability analysis in healthcare: opportunities and challenges. Reliab. Eng. Syst. Saf. 2020;194:106189. [DOI: 10.1016/j.ress.2018.06.017]
18. Di Bona G, Falcone D, Forcina A, Silvestri L. Systematic human reliability analysis (SHRA): a new approach to evaluate Human Error Probability (HEP) in a nuclear plant. Int J Math Eng Manag Sci. 2021;6(1):345-362. [DOI: 10.33889/ijmems.2021.6.1.022]
19. Pan X, Lin Y, He C. A review of cognitive models in human reliability analysis. Qual Reliab Eng Int. 2017; 33(7):1299-1316. [DOI: 10.1002/qre.2111]
20. Laidoune A, Rahal Gharbi M. Analysis testing of sociocultural factors influence on human reliability within sociotechnical systems: the Algerian oil companies. J Health Safety Work. 2016;7(3):194-200. [DOI: 10.1016/j.shaw.2015.12.005]
21. Di Pasquale V, Iannone R, Miranda, Riemma S. An overview of human reliability analysis techniques in manufacturing operations: operations management. In MM Schiraldi (ed.), Operations Management. Rijeka, Croatia; 2013. [DOI: 10.5772/55065]
22. Petrillo A, Falcone D, De Felice F, De Zomparelli F. Development of a risk analysis model to evaluate human error in industrial plants and in critical infrastructures. Int J Disaster Risk Reduct. 2017;23:15-24. [DOI: 10.1016/j.ijdrr.2017.03.012]
23. Ghasemi M, Nasleseraji J, Hoseinabadi S, Zare M. Application of SHERPA to identify and prevent human errors in control units of petrochemical industry. Int J Occup Saf Ergon. 2013;19(2):203-209. [DOI: 10.1080/10803548.2013.11076979]
24. Rasmussen M, Laumann K. The evaluation of fatigue as a performance shaping factor in the Petro-HRA method. Reliab Eng Syst Saf. 2020;194:106187. [DOI: 10.1016/j.ress.2018.06.015]
25. Mandal S, Singh K, Behera R.K, Sahu S.K, Raj N, Maiti J. Human error identification and risk prioritization in overhead crane operations using HTA, SHERPA, and fuzzy VIKOR method. Expert Syst Appl. 2015;42(20):7195-7206. [DOI: 10.1016/j.eswa.2015.05.033]
26. Abílio Ramos M, López Droguett E, Mosleh A, Das Chagas Moura M. A human reliability analysis methodology for oil refineries and petrochemical plants operation: Phoenix-PRO qualitative framework. Reliability Reliab Eng Syst Saf. 2020;193:106672. [DOI: 10.1016/j.ress.2019.106672]
27. Torres Y, Nadeau S, Landau K, Classification and quantification of human error in manufacturing: A case study in complex manual assembly. Appl. Sci. 2021;11(2):749-813. [DOI: 10.3390/app11020749]
28. Primasari IA, KomdanY. Analysis of human reliability on work casting operators using Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach (SHERPA). Proceedings of International Conference on Engineering Optimization and Management in Industrial Applications (ICEOMIA 2022). 2022. [Link]
29. Chandler FT, Chang YHJ, Mosleh A, Marble JL, Boring RL, Gertman DI. Human reliability analysis methods selection guidance for NASA. Washington D.C, NASA/OSMA Technical Report; 2006. [Link]
30. Sujan M, Pickup L, Kaya G.K, Earl L, McCulloch P. What kinds of insights do Safety-I and Safety-II approaches provide? A critical reflection on the use of SHERPA and FRAM in healthcare. Saf Sci. 2024;173:106450. [DOI: 10.1016/j.ssci.2024.106450]
31. Alexander TM. A case-based human reliability assessment using HFACS for complex space operations. J Space Saf Eng. 2019;6(1):53-59. [DOI: 10.1016/j.jsse.2019.01.001]
32. Cassis D. Validation of the TESEO human reliability assessment technique for the analysis of aviation occurrences. Master's Thesis. Milan: Politecnico University of Milan; 2017. [Link]
33. Anonymous. ISO 9001: 2015: Quality management systems–requirements. Switzerland, 2015. [Link]
34. Hou LX, Liu R, Chen Liu H, Jiang S. Two decades on human reliability analysis: A bibliometric analysis and literature review. Ann Nucl Energy. 2021;151:107969. [DOI: 10.1016/j.anucene.2020.107969].