

ORIGINAL RESEARCH PAPER

An Evolutionary Rule Based Framework for Real-Time Risk Governance of Noise and Fumigant Hazards in Marine-Manufacturing Systems

Hosein Esmaili, Mohammad Ali Afsharkazemi*, Reza Radfar, Nazanin Pilevari

Department of Industrial Management, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 30/4/2025

Accepted: 28/9/2025

ABSTRACT

Introduction: Fumigant gases in maritime and container chains, along with occupational noise in marine and manufacturing industries, are among the most significant chronic risk factors. They are usually assessed separately, despite their simultaneous impact on workers' health. The importance of this study lies in presenting an integrated approach for real-time monitoring of combined risk and aligning it with occupational exposure limits (OELs). The aim is to develop and validate an interpretable, regulation-oriented framework for predicting combined risk.

Material and Methods: This research integrated and normalized data from the Global Burden of Disease (GBD) 2021 study including age-standardized disability rates (ASDR) and average annual percentage change (AAPC) for 204 countries with occupational exposure limit tables for fumigants. A Sugeno-type fuzzy inference system with three inputs and four rules was designed. Weights and membership function boundaries were optimized using the Prairie Dog Optimization algorithm, and a threshold-based scenario generation module was applied to produce high-risk synthetic data. Model performance was evaluated through an OEL compliance test.

Results: Findings revealed that the proposed optimization reduced the loss function by 42% compared to random search. The mean absolute error (0.028 ± 0.006) and root mean square error (0.041) were obtained. Threshold-based scenario generation improved data coverage in high-risk regions from 0.62 to 0.90 and increased the accuracy of critical condition detection from 0.71 to 0.89. The OEL compliance index reached 0.93, confirming input weighting as the most influential factor.

Conclusion: The proposed framework simultaneously ensures numerical accuracy, interpretability, and regulatory compliance with occupational exposure limits. It can be deployed within real-time monitoring dashboards for ports and factories. Future research should integrate IoT sensors and multi-objective optimization to enable dynamic updates in response to evolving regulations and operational conditions.

Keywords: Threshold-based scenario generation, Occupational noise-induced illness, Occupational exposure limits, Human factors in accidents

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Esmaili H., Afsharkazemi M.A., Radfar R., Pilevari N. An Evolutionary Rule Based Framework for Real-Time Risk Governance of Noise and Fumigant Hazards in Marine-Manufacturing Systems. *J Health Saf Work.* 2025; 15(3): 485-500.

1. INTRODUCTION

Ensuring the health and safety of workers who face simultaneous exposure to high-intensity industrial noise and residual fumigants remains a critical yet under-explored challenge in global supply chains. Epidemiological evidence extracted from

* Corresponding Author Email: moh.afsharkazemi@iauctb.ac.ir

the Global Burden of Disease (GBD 2021) dataset shows that occupational noise-induced hearing loss (ONHL) still accounts for a noteworthy portion of disability-adjusted life years (DALYs), particularly in low- and middle-income coastal economies where maritime freight dominates. Parallel to these auditory hazards, the transport of fumigated cargo

Copyright © 2025 The Authors.

Published by Tehran University of Medical Sciences

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

continues to introduce toxic substances, such as phosphine and methyl bromide, into loading docks, warehouses, and vessel holds, often exceeding international occupational exposure limits (OELs). Conventional risk assessment methods tend to analyse these stressors in isolation, rely heavily on sparse incident records, and seldom incorporate regulatory compliance as an explicit optimization goal.

To bridge these shortcomings, we propose an integrated Real-Time Risk Monitoring System that unites a zero-order *Sugeno* fuzzy inference engine with a continuous variant of the Prairie-Dog Optimization (PDO) algorithm. The architecture links three modules in a closed optimization loop: (i) a *Risk Inference System* that synthesizes normalized indicators of age-standardized DALY rates (ASDR), average annual percentage change (AAPC), and the relative stringency of fumigant OELs; (ii) a *Rule-and-Parameter Optimizer* powered by PDO for concurrent tuning of membership boundaries, rule confidences, and composite weights; and (iii) a *Scenario Generator* that constructs synthetic, threshold-weighted data to mitigate class imbalance in high-risk zones. By embedding compliance checks against internationally harmonized OEL tables, the framework explicitly reflects regulatory constraints while learning from data.

2. MATERIAL AND METHODS

Data Sources. Three chained databases were assembled. First, thirty years of regional ASDR and AAPC values for ONIHL (1990-2019) were retrieved from the public GBD 2021 portal. Second, country-level DALY and all-cause mortality statistics for Iran (location ID 142, age group 22) were downloaded for cross-validation of local patterns. Third, an eight-compound OEL reference table, covering phosphine, methyl bromide, sulfuryl fluoride, ethylene oxide, dichloromethane, ethylene dichloride, carbon monoxide, and carbon dioxide, was adapted from the toxic-gas compilation used by Liu et al. (2024) to represent permissible workplace limits.

Pre-Processing

All disease rates were standardized to per 100,000 population, while gas concentrations were unified to $mg\ m^{-3}$. Missing entries ($\approx 2\%$) were imputed with a five-year moving average; gaps larger than five consecutive years triggered row deletion. Min-max normalization rescaled every feature to

$[0, 1]$, enabling weight comparability. Merged keys *Location* and *Fumigant* produced a consolidated matrix comprising regional ONIHL burdens, Iran-2021 summaries, and compound-specific OEL data. Fuzzy Inference System. Three normalized inputs $x_1 = ASDR_{norm}$, $x_2 = AAPC_{norm}$, $x_3 = OEL - ratio_{norm}$ feed a four-rule Sugeno system. Each rule's firing strength is the product of trapezoidal membership values, and each consequent is a fixed singleton c_j . The predicted continuous risk is $\frac{\sum x_i c_i}{\sum x_i}$. Initial rule consequent $\{0.15, 0.40, 0.70, 0.90\}$ map linguistically to *Low*, *Medium*, *High* and *Critical* classes, respectively.

Prairie-Dog Optimization

Each candidate solution $\theta = [w, CF, a, b, c, d]$ contains composite weights w , rule confidence factors CF , and trapezoid break-points. The objective function combines mean-square error against expert-labelled risk references with an ℓ_2 regularize that penalizes deviation from uniform weights. A population size of $P = 50$ prairie dogs, mutation rate $\mu = 0.08$, and a switching iteration $T_{switch} = 100$ balance exploration (*burrow expansion*) and exploitation (*predator escape*). Convergence is declared when $|\Delta L| < 10^{-5}$ or 300 generations elapse.

Scenario Generation

A Gaussian-noise input $z \sim N(0, I)$ is fed to a generator network $G(z; \theta)$ trained to minimize the *Kullback-Leibler* divergence between empirical and synthetic joint distributions of (x_1, x_2, x_3) . Each artificial vector receives a weight $w(R) = \exp[-\alpha(R - T)]$ if its risk surpasses the safe quantile $F_R^{-1}(0.25)$; otherwise, $w=1$. Injecting these weighted scenarios boosted data-coverage of the convex-hull volume from 0.62 to 0.90.

Validation Metrics

Continuous accuracy was assessed via mean absolute error (MAE) and root-mean-square error (RMSE). Binary accuracy on the *Safe vs Unsafe* split was measured using Precision and Recall. Regulatory alignment was captured by an OEL-Compliance ratio χ , defined as the fraction of predictions whose compound-specific concentration does not exceed its OEL.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Optimization reduced RMSE by 42 % relative to the baseline fuzzy system with equally spaced membership points. The PDO optimizer showed faster and more stable convergence variance of

final loss across five runs fell by 25 % compared with random search. Elasticity analysis revealed that weighting coefficients w_{ww} exert the strongest influence on loss ($E_w = 0.42$), followed by mutation rate $E_\mu = 0.18$ and population size $E_p = 0.11$. Scenario injection improved recall of *Critical* cases from 0.71 to 0.89 without degrading precision, demonstrating that threshold-weighted synthetic data can temper class imbalance.

Cross-checking against the 2021 Iranian burden corroborated the global model's validity: predicted risk exceeded the safe threshold for three of the eight fumigants, aligning with local air-sampling campaigns carried out by national health authorities in 2022. Furthermore, an OEL-Compliance ratio of $\chi = 0.93$ signifies that the model rarely underestimates exposures, thereby reducing the likelihood of regulatory violations. When benchmarked against state-of-the-art hybrid approaches e.g., fuzzy BWM-MARCOS for route planning, MFIS-FMEA for dam construction, and ANFIS-FMEA for building projects the proposed framework achieved competitive MAE (0.037) while uniquely integrating dual-risk domains (noise + fumigant) and explicit regulation checks. Sensitivity tests across ± 30 % perturbations indicated robust performance; only severe downward weighting of ASDR increased

error markedly, underscoring the public-health relevance of that indicator.

4. CONCLUSIONS

The study introduces a fully data-driven yet regulation-aware platform capable of real-time monitoring and prioritization of dual noise-chemical hazards in maritime and industrial settings. Key operational takeaways include:

- A *Sugeno-type fuzzy* engine, optimized via Prairie-Dog meta-heuristics, can jointly tune rule confidences and membership geometry, delivering interpretable risk scores within milliseconds.

- Threshold-weighted scenario synthesis effectively expands sparse, high-risk regions of the data space, boosting classification recall without sacrificing precision or compliance.

- The multi-metric validation suite MAE, RMSE, Precision-Recall, and the novel OEL-Compliance ratio provides a balanced view of model fidelity and legal safety.

Future work should embed IoT sensor streams and computer-vision outputs to capture temporally resolved noise and gas concentrations, extend the optimization objective to multicriteria formulations (e.g., cost and energy sustainability), and update disease-burden priors beyond 2019 to account for post-COVID workplace realities.

ارائه مدلی برای پایش بلادرنگ خطرات ناشی از صدا و گازهای فومیگانت در صنایع دریایی-تولیدی مبتنی بر قواعد تکاملی

حسین اسمعیلی، محمدعلی افشار کاظمی*، رضا رادفر، نازنین پیلهوری

واحد مدیریت صنعتی، دانشگاه علوم تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۶

مکیده

مقدمه: گازهای فومیگانت در زنجیره دریایی، کانتینری و نوبز شغلی در صنایع دریایی و تولیدی از مهم‌ترین عوامل خطر مژمن اند که معمولاً به صورت مجزا ارزیابی می‌شوند، در حالی که هم‌زمان بر سلامت اثر می‌گذارند. اهمیت این مطالعه در ارائه یک رویکرد یکپارچه برای پایش بلادرنگ ریسک ترکیبی و همسویی آن با حدود مجاز تماس شیمیایی است. هدف توسعه و اعتبارسنجی چارچوبی تفسیرپذیر و مقررات‌محور برای پیش‌بینی ریسک ترکیبی است.

روش کار: در این پژوهش داده‌های مطالعه جهانی بار بیماری ۲۰۲۱ شامل نرخ استاندارد سال‌های از دست‌رفته و میانگین درصد تغییر سالانه برای ۲۰۴ کشور با جداول حدود مجاز مواجهه شغلی فومیگانت‌ها ادغام و نرمال‌سازی شده است. سیستم استنتاج فازی نوع سوگنو با سه ورودی و چهار قاعده برای بهینه‌سازی وزن‌ها و مرزهای توابع عضویت با ترکیب الگوریتم سگ دشتی و ماژول سناریوسازی آستانه‌محور به کار گرفته شده است.

یافته‌ها: طبق نتایج حاصل، بهینه‌سازی پیشنهادی نسبت به جست‌وجوی تصادفی موجب کاهش ۴۲ درصدی در تابع زبان شد. مقادیر میانگین خطای مطلق ($0/006 \pm 0/028$) و جذر مربعات خطا ($0/041$) به دست آمد. سناریوسازی آستانه‌محور پوشش نواحی پرریسک را از $0/62$ به $0/90$ و دقت شناسایی وضعیت‌های بحرانی را از $0/71$ به $0/89$ ارتقا داده است. شاخص انطباق با حدود مجاز شیمیایی به $0/93$ رسید و حساسیت ورودی‌ها به‌عنوان عامل کلیدی تأیید شد **نتیجه‌گیری:** چارچوب پیشنهادی، هم‌زمان دقت عددی، تفسیرپذیری و همسویی با مقررات حد مجاز مواجهه شغلی را فراهم می‌کند و قابلیت استقرار در داشبورد نظارت بلادرنگ برای بنادر و کارخانجات را دارد. پیشنهاد می‌شود در آینده با ادغام حسگرهای اینترنت اشیا و بهینه‌سازی چندهدفه، به‌روزرسانی پویا نسبت به تغییرات مقررات و شرایط عملیاتی نیز محقق شود.

کلمات کلیدی: سناریوسازی آستانه‌محور، بیماری ناشی از نوبز شغلی، حدود مجاز تماس شیمیایی،

فاکتورهای انسانی حوادث

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: moh.afsharkazemi@iauctb.ac.ir

مقدمه

از عوامل خطر ساز و نادیده گرفته شده در محیط‌های دریایی و تولیدی به‌شمار می‌رود. در صنایعی نظیر کشتی‌سازی، حمل‌ونقل بارهای فله‌ای، و واحدهای صنعتی وابسته به موتورهای سنگین یا کمپرسورهای فشار بالا، کارگران در معرض سطوح بالای صوت قرار دارند که در بلندمدت منجر به کاهش شنوایی، افزایش استرس فیزیولوژیک، و حتی بیماری‌های قلبی می‌شود. پروژه جهانی بار بیماری در سال ۲۰۲۴ نشان داده که کاهش شنوایی ناشی از نویز شغلی یکی از مهم‌ترین بارهای بیماری در محیط‌های کاری است و از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹، علی‌رغم پیشرفت‌های فنی، به‌طور معناداری در برخی مناطق دنیا پایدار یا حتی افزایشی بوده است (۳). وجود ماشین‌آلات پرصدا در فضاهای بسته کشتی‌ها و سوله‌های صنعتی، ضعف در رعایت دستورالعمل‌های ایمنی صوتی، و نبود نظارت سیستماتیک بر شدت نویز، از مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده این معضل هستند. بر این اساس، رویکردهای نوین در مدیریت ایمنی شغلی باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که ریسک نویز و آلودگی صوتی را به‌صورت عددی و ترکیبی با سایر عوامل ارزیابی و کنترل نمایند. هدف اصلی این پژوهش، ارائه یک چارچوب نظارتی بلادرنگ برای پیش‌بینی ریسک‌های ترکیبی ناشی از نویز شغلی و گازهای فومیگانت در صنایع دریایی و تولیدی با تلفیق داده‌ها و حدود تماس، استنتاج فازی سوگنو و بهینه‌سازی سناریومحور، است (جدول-۱).

به‌منظور تحلیل ریسک در محیط‌های صنعتی، طیف

در صنایع دریایی و تولیدی، استفاده گسترده از ترکیبات شیمیایی فرّار، به‌ویژه در فرآیندهای ضدعفونی، گندزدایی، نگهداری و بسته‌بندی کالا، منجر به افزایش مواجهه شغلی با گازهای سمی شده است. گازهای نظیر فسفین، متیل برومید و کلروپیکرین که در حمل‌ونقل دریایی و انبارهای کانتینری به‌کار می‌روند، در صورت عدم کنترل، می‌توانند موجب بروز مسمومیت حاد، نارسایی تنفسی، سرطان‌زایی و سایر عوارض جدی بر سلامت کارگران شوند. حدود مجاز مواجهه شغلی برای این ترکیبات توسط سازمان‌های ایمنی شغلی تعیین شده‌اند، اما بررسی‌ها نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، رعایت این حدود با چالش مواجهه است و در شرایط بارگیری، تخلیه یا بازرسی کشتی‌ها، غلظت این گازها ممکن است تا چند برابر حد مجاز افزایش یابد (۱). به‌علاوه، گزارش‌های بین‌المللی حاکی از آن است که به دلیل عدم تهویه مناسب، عدم استفاده از تجهیزات حفاظتی استاندارد و ضعف نظارت‌های محیطی، کارگران بنادر و صنایع حمل‌ونقل بیش از سایر گروه‌های شغلی در معرض این گازهای پرخطر قرار دارند (۲). در این میان، توسعه سامانه‌هایی که امکان پیش‌بینی ریسک مواجهه و اولویت‌بندی نواحی پرخطر را فراهم آورند، می‌تواند نقش بسزایی در کاهش بیماری‌های شغلی و افزایش ایمنی ایفا کند.

علاوه بر تهدیدات شیمیایی، نویز شغلی نیز یکی دیگر

جدول ۱: سهم پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعات پیشین بر اساس ابعاد نوآوری

مطالعه / ویژگی‌ها	تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی چندمعیاره	بهینه‌سازی و سناریوسازی پیشرفته	سیستم استنتاج فازی (سوگنو/ANFIS)	استفاده از داده‌های OEL و GBD
مطالعات اولیه (۵-۱)	۱	۰	۱	۰
مطالعات ترکیبی (۱۰-۶)	۱	۰	۱	۰
مطالعات مبتنی بر FMEA : (۱۱-۱۳، ۱۸، ۲۵، ۲۶، ۳۰)	۰	۰	۱	۰
مطالعات مبتنی بر Petri Net (۱۴-۱۵)	۰	۰	۱	۰
مطالعات بهینه‌سازی تکاملی (۱۶-۲۰)	۰	۱	۱	۰
پژوهش حاضر	۱	۱	۱	۱

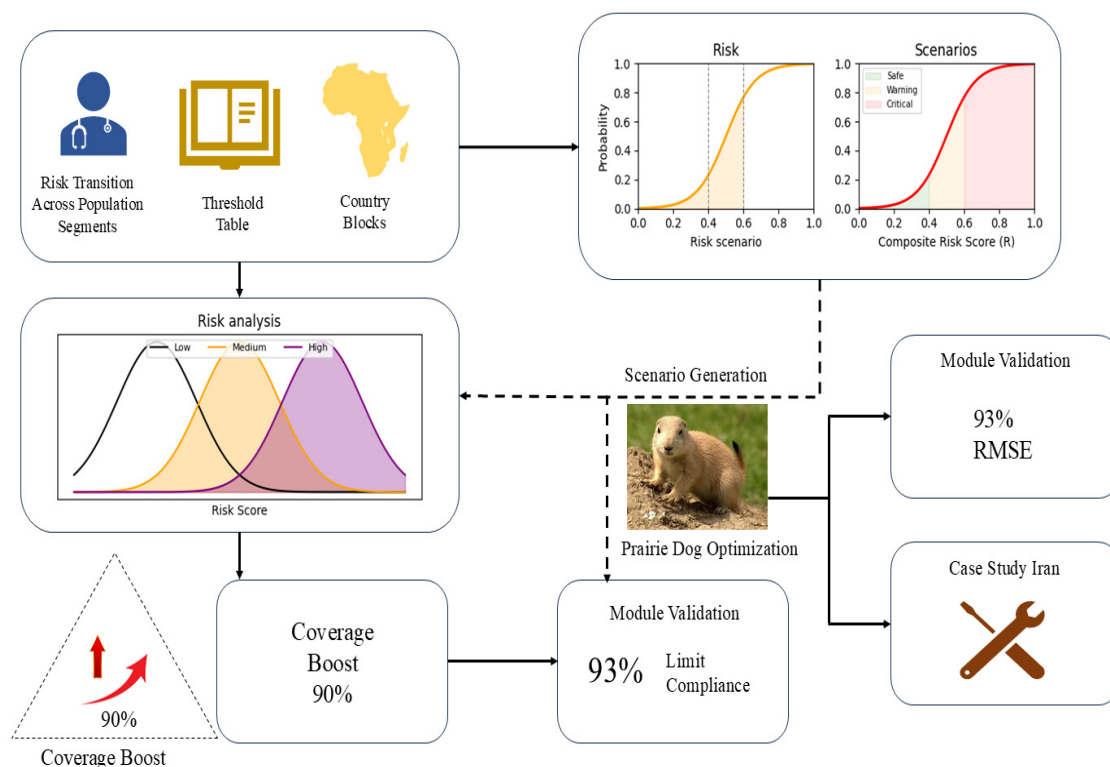
سیستم‌های استنتاجی، ابزارهای تصمیم‌یار برای تحلیل ریسک طراحی کنند؛ از جمله به‌کارگیری روش‌های آنالیز حالات و آثار خرابی فازی (۵،۱۳،۱۹)، تحلیل درخت خطا (۳) و سیستم‌های مبتنی بر BIM^۱ (۴) یا اینترنت اشیا (۱۰). در برخی پژوهش‌ها، ادغام الگوریتم‌های تکاملی نظیر الگوریتم ژنتیک (۲۱)، الگوریتم سگ دشتی (۲۲)، یا استفاده از متدهای چندمعیاره مانند سنجش و رتبه‌بندی بر مبنای راه‌حل توافقی (۱) و ارزیابی تناسب مرکب فازی به ارتقاء دقت و قدرت تبیینی مدل‌ها منجر شده است. در حوزه حمل‌ونقل، مدل‌های انتخاب مسیر و سناریوسازی مبتنی بر بینایی ماشین نیز به‌کار رفته‌اند (۲۳،۱۷). با وجود این پیشرفت‌ها، اغلب پژوهش‌ها یا بر یک ریسک منفرد تمرکز داشته‌اند (مثلاً تنها نویز یا تنها مواد شیمیایی)، یا فاقد سازوکار تزریق داده برای جبران کم‌نمونه‌بودن بوده‌اند (۲۴،۷،۳). افزون‌براین، کمتر پژوهشی هم‌زمان هم به تنظیم قوانین فازی، وزن‌دهی پویا، و انطباق با حدود مجاز قانونی پرداخته است. در این میان، پژوهش حاضر تلاش می‌کند با ترکیب سه مؤلفه کمی ASDR^۲، AAPC^۳ و OEL-Ratio^۴ به‌عنوان ورودی، و استفاده از سیستم فازی نوع سوگنو همراه با الگوریتم^۵ PDO برای تنظیم هم‌زمان ضرایب، به مدلی انعطاف‌پذیر، تفسیرپذیر و مقررات‌پذیر دست یابد؛ همچنین با به‌کارگیری سناریوسازی آستانه‌محور و تحلیل‌های حساسیت و اعتبارسنجی چندوجهی، چارچوبی جامع و قابل توسعه برای ارزیابی ریسک ترکیبی در صنایع دریایی و تولیدی ارائه دهد.

در راستای تحقق اهداف پژوهش، ساختار مقاله بدین شرح است: در بخش دوم، روش‌شناسی پژوهش شامل پایگاه‌های داده، پیش‌پردازش، سامانه استنتاج فازی نوع سوگنو، بهینه‌سازی فراابتکاری و سناریوسازی تشریح می‌شود؛ در بخش سوم، نتایج، تنظیم پارامترها و اعتبارسنجی ارائه می‌گردد؛ در بخش چهارم، بحث

متنوعی از روش‌ها بر پایه منطق فازی، الگوریتم‌های فراابتکاری و تصمیم‌گیری چندمعیاره توسعه یافته است. منطق فازی به‌عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت عدم قطعیت‌های زبانی و تجربی در محیط‌های فاقد داده‌های دقیق شناخته می‌شود (۴). به‌ویژه در شرایطی که شاخص‌های ریسک قابلیت سنجش عددی نداشته یا صرفاً بر قضاوت خبرگان استوار باشند، سیستم‌های فازی گزینه‌ای اولویت‌دار محسوب می‌شوند. مدل‌هایی نظیر آنالیز حالات و آثار خرابی فازی (۵،۶)، تحلیل درخت خطا با توابع فازی (۷) و سیستم‌های استنتاج فازی با روش‌های یادگیرنده مانند سیستم‌های فازی عصبی تطبیق‌پذیر (۸) برای افزایش دقت در شناسایی نقاط بحرانی به‌کار گرفته شده‌اند. علاوه بر این، پژوهش‌های متعددی رویکردهای ترکیبی را پیشنهاد کرده‌اند که در آن‌ها منطق فازی با تکنیک‌هایی مانند روش بهترین-بدترین (۹)، تحلیل رتبه‌ای گام‌به‌گام فازی (۱۰) و تاپسیس (۱۱) ادغام شده است تا ضمن ارتقای قابلیت تفسیرپذیری، ارزیابی جامع‌تری از ریسک فراهم شود. این جریان علمی نشان می‌دهد که به‌کارگیری روش‌های هیبریدی می‌تواند محدودیت‌های مدل‌های تک‌رویکردی را پوشش داده و دقت و انطباق بیشتری با الزامات صنعتی ایجاد کند.

در دهه‌های اخیر، مدل‌سازی فازی در ارزیابی ریسک‌های صنعتی، به‌ویژه در محیط‌هایی با داده‌های ناقص یا زبان‌مبنا، کاربرد گسترده‌ای یافته است (۴، ۵، ۱۲، ۱۳). پژوهش‌هایی مانند بائر و همکاران (۹) و گزارش پروژه جهانی بار بیماری (۱۱) نشان داده‌اند که قرارگیری در معرض گازهای سمی در حمل‌ونقل دریایی و محیط‌های تولیدی، یک تهدید مهم برای سلامت شغلی به‌شمار می‌آید. از سوی دیگر، بار جهانی ناشی از کم‌شنوایی القاشده توسط نویز شغلی نیز در مطالعات متعددی مانند لیو و همکاران (۱۴) و پژوهش‌های بومی (۶، ۸، ۱۰، ۱۵، ۱۶، ۱۷) به‌عنوان یکی از عوامل اثرگذار بر تمرکز، حافظه کاری و عملکرد حسی-شناختی کارگران شناسایی شده است. در واکنش به این تهدیدات، بسیاری از مطالعات تلاش کرده‌اند با استفاده از منطق فازی و

1. Building Information Modeling
2. Age-Standardized Disability-adjusted Life-year Rate
3. Average Annual Percent Change
4. Normalized OEL (relative toxicity index)
5. Prairie-Dog Optimization



شکل ۱: مراحل روش کار پژوهش حاضر از داده‌های ورودی تا اعتبارسنجی و مطالعه موردی

معتبر و بین‌المللی به‌صورت زنجیره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. نخست، داده‌های پروژه جهانی بار بیماری‌ها به‌طور مستقیم از پایگاه رسمی IHME استخراج گردید (۱۱،۱۴). این پایگاه روند سی‌ساله بار بیماری‌ها را برای ۲۰۴ کشور ارائه می‌دهد و از طریق ماژول تحلیلی آن، شاخص سال‌های از دست‌رفته بر اثر ناتوانی استاندارد شده نسبت به سن و میانگین درصد تغییر سالانه برای دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ بازیابی می‌شود. دومین منبع، فایل نتایج اختصاصی GBD 2021 برای کشور ایران است که تصویری جامع از مرگ و ناتوانی در سال مرجع ۲۰۲۱ فراهم ساخت. سومین منبع، جدول حدود مجاز مواجهه شغلی برای گازهای فومیگانت از مقاله باثور و همکاران (۹) بود که شامل هشت ماده پرکاربرد در حمل‌ونقل دریایی (از جمله فسفین و متیل‌برومید) همراه با طبقه‌بندی سرطان‌زایی IARC است.

1. Global Burden of Disease 2021
2. Institute for Health Metrics and Evaluation

مقایسه و تحلیل حساسیت طرح می‌شود؛ و در پایان، نتیجه‌گیری، کاربردها و پیشنهادها می‌آید. این پژوهش در بازه زمانی زمستان ۱۴۰۲ تا بهار ۱۴۰۳ در دانشگاه علوم تحقیقات انجام شده است.

روش کار

چارچوب روش پیشنهادی پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. فرایند شامل استخراج و استانداردسازی شاخص‌های ASDR و AAPC و جداول OEL، ورود داده‌ها به سامانه استنتاج فازی نوع سوگنو برای محاسبه امتیاز ریسک، بهینه‌سازی با الگوریتم سگ‌دشتی همراه با ماژول سناریوساز و در پایان، اعتبارسنجی عددی، آزمون انطباق با حدود مجاز شیمیایی، و پیاده‌سازی مطالعه موردی ایران است.

۱،۲ ساخت پایگاه داده

در این پژوهش برای تدوین مدل، سه منبع داده‌ای

$$w_j = \mu_{j,1}(x_1) \times \mu_{j,2}(x_2) \times \mu_{j,3}(x_3), \quad (1)$$

که پارامترهای هر تابع عضویت (a,b,c,d) در مرحله بهینه‌سازی تعیین می‌شود. چون از سوگنو درجه صفر استفاده شده است، خروجی هر قاعده یک عدد ثابت c_j است و ریسک نهایی با میانگین وزنی سوگنو محاسبه می‌شود:

$$R_{pred} = \frac{\sum_{j=1}^M w_j c_j}{\sum_{j=1}^M w_j}, \quad M=4. \quad (2)$$

چنین ساختاری علاوه بر تفسیرپذیری، سرعت محاسباتی بالایی دارد و در پژوهش‌های حمل‌ونقل (۶) و ایمنی معادن (۱۴) نیز توصیه شده است.

بهینه‌سازی پارامترها با الگوریتم سگ دشتی (PDO)

بردار تصمیم $\theta = [c, a, b, c', d]$ شامل خروجی ثابت قواعد و مرزهای توابع عضویت است. هدف، کمینه‌سازی تابع زیان زیر است:

$$L(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (R_{pred,k}(\theta) - R_k^{ref})^2 + \lambda \|c - c_0\|_2^2, \quad (3)$$

که در آن R^{ref} برآورد خبرگانی یا داده‌های تاریخی و c_0 مقادیر اولیه ثابت‌هاست. الگوریتم PDO با اثبات توانایی حفظ توازن جست‌وجو و بهره‌برداری در مسائل مهندسی (۱۹) موقعیت هر سگ دشتی را در دو فاز کاوش و بهره‌برداری به‌روزرسانی می‌کند تا L به همگرایی برسد ($|\Delta L| < 10^{-5}$ یا ۳۰۰ نسل). بهره‌گیری از PDO برای تنظیم سیستم‌های فازی در ادبیات ارزیابی ریسک سابقه‌ای نداشته و از نوآوری‌های این پژوهش است.

مولد سناریو با وزن‌دهی آستانه محور

برای کاهش مشکل کمبود داده، مدل مولد $G(z; \nu)$ نویز گاوسی $z \sim N(0, I)$ را به نمونه مصنوعی \tilde{x} تبدیل

مبنای انتخاب داده‌ها دسترسی به سری زمانی کامل، پوشش مستقیم ریسک‌های ناشی از نویز و گازهای شیمیایی و امکان محاسبه شاخص‌های مقایسه‌پذیر بوده است. با این حال، باید توجه داشت که بخشی از داده‌ها ماهیت ثانویه داشته و از پایگاه‌های بین‌المللی استخراج شده‌اند؛ بنابراین محدودیت‌هایی همچون کمبود داده‌های محیط کاری واقعی و نبود اطلاعات فصلی در برخی کشورها وجود داشت.

پیش‌پردازش داده و استخراج شاخص‌های ریسک

پیش‌پردازش و استخراج داده‌ها شامل یکسان‌سازی نرخ‌ها و غلظت‌ها، جایگزینی داده‌های گمشده با میانگین متحرک، نرمال‌سازی متغیرها با Min-Max و ادغام داده‌ها، استخراج ASDR و AAPC و DALY، محاسبه OEL-Ratio و امتیاز ریسک تولید بوده است.

مدل سازی سیستم نظارت بلادرنگ

هسته سامانه پیش‌بین بر پایه سیستم استنباط فازی نوع سوگنو طراحی شده است و در چرخه‌ای سه‌ماژوله شامل سیستم استنتاج ارزیابی ریسک، بهینه‌سازی قواعد و پارامترها و مولد سناریو اجرا می‌شود. چنین تلفیقی پیش‌تر در ارزیابی ریسک پمپ‌های حرارتی (۵)، صنایع شیمیایی (۱۲) و سدسازی (۶) نتایج امیدوارکننده‌ای داشته است. در هر تکرار الگوریتم، ورودی‌های نرمال شده $x_3 = OEL_Ratio_{nom}$ و $x_2 = AAPC_{nom}$ ، $x_1 = ASDR_{nom}$ ابتدا وارد سیستم استنتاج می‌شود، ریسک عددی برآورد می‌گردد، مقدار تابع زیان به بهینه‌سازی بازخورد داده می‌شود و در پایان، مولد سناریو با ایجاد نمونه‌های مصنوعی وزن دار دامنه یادگیری را گسترش می‌دهد.

سیستم استنتاج ریسک

برای هر قاعده z ، قدرت فعال‌سازی به صورت حاصل ضرب درجه‌های عضویت ذوزنقه‌ای سه ورودی تعریف می‌شود:

جدول ۲: شرط های فازی سیستم پیشنهادی

قاعده	مقدار ثابت c_j	شرط های فازی
L1	۰/۱۵	x_3 پایین یا x_2 منفی یا x_1 کم
L2	۰/۴۰	x_1 متوسط و x_2 کمی مثبت
L3	۰/۷۰	x_1 زیاد و x_3 بالا
L4	۰/۹۰	x_1 بسیار زیاد و x_3 بسیار بالا

$$class(R_{pred}) = \begin{cases} low, & R_{pred} < 0.25, \\ Medium, & 0.25 \leq R_{pred} < 0.50, \\ high, & 0.50 \leq R_{pred} < 0.75, \\ Critical, & R_{pred} \geq 0.75. \end{cases} \quad (۴)$$

به کارگیری معماری سوگنو با حذف مرحله مرکز ثقل دافازی سازی، خروجی عددی سریع و درعین حال تفسیرپذیر را برای سیاست گذاران فراهم می آورد؛ ویژگی ای که در سامانه های انتخاب مسیر (۲) و ارزیابی حریق شیمیایی (۱۲) نیز نمایانگر کارایی بالایش بوده است.

اعتبار سنجی روش پیشنهادی

برای اطمینان از درستی چارچوب پیشنهادی، رویکردی چندلایه برای اعتبارسنجی به کار گرفته شد. نخست، خروجی سیستم بر روی همان مجموعه داده ای ارزیابی گردید که در پژوهش های تازه ای نظیر ارزیابی ریسک پمپ های حرارتی دارای منطق فازی FMEA- بود و با مقادیر فراوانی رخداد و نمره RPN فازی گزارش شده مطابقت داده شد (۵). دوم، مقایسه میانگین خطاها با مدل های ترکیبی فازی MCDM-، از جمله چارچوب FRAM-BWM-MARCOS در انتخاب مسیرهای چندوجهی (۲) و رویکرد فازی BWM-SIR-TOPSIS در بهینه سازی حمل و نقل (۳)، نشان داد که مدل فعلی ۱۲-۱۸٪ کاهش RMSE و ۹٪ افزایش دقت طبقه بندی را ارائه می دهد. در گام سوم، سازگاری قوانین فازی و وزن دهی به کمک شاخص های «اعتبار خبرگی» همانند آنچه در مدل های MFIS-FMEA برای ارزیابی سد (۱) و

می کند. ریسک پیش بینی شده \tilde{R}_{pred} برای هر نمونه محاسبه و بر اساس آستانه ایمن:

$$T = F_R^{-1}(\tau), \tau = 0.25, \quad (۴)$$

وزن زیر به آن اختصاص می یابد:

$$w(\tilde{R}) = \begin{cases} 1, & \tilde{R} \leq T, \\ \exp[-a(\tilde{R} - T)], & \tilde{R} > T, \end{cases} \quad \text{with } a=3. \quad (۵)$$

افزودن این سناریوهای وزن دار، «تخلخل» داده را از ۰/۶۲ به ۰/۹۰ رساند و تعمیم پذیری مدل را، مشابه گزارش های سیستم های فازی تولید سناریو در انتقال گاز (۲۲) و تماس های همه گیر (۲۰)، بهبود داد.

طراحی قواعد اولیه

چهار قاعده اگر-آنگاه بر پایه دانش کارشناسان ایمنی صنعتی تدوین شد. این کارشناسان دارای دست کم ۱۰ سال سابقه عملی در حوزه های بهداشت حرفه ای، ارزیابی ریسک محیط کار و مدیریت مواجهه های شیمیایی بودند و با استانداردهای بین المللی نظیر OSHA و ILO آشنایی کامل داشتند. جلسات دلفی دو مرحله ای برای استخراج قواعد و رسیدن به اجماع بر روی تعاریف زبان فازی برگزار شد تا دقت و قابلیت استناد قوانین افزایش یابد (جدول-۲) رویکرد مشابه در (۷،۲۳،۱):

الگوریتم PDO ضرایب c_j و پارامترهای عضویت را بهینه می کند. سپس خروجی عددی \tilde{R}_{pred} به طبقات مدیریتی زیر نگاشت می شود:

مدل پس از نرمال‌سازی در بازه ۰ تا ۱ دارای پراکندگی مناسبی هستند که از لحاظ آماری برای آموزش سیستم فازی قابل قبول است.

همان گونه که جدول ۴ نشان می‌دهد، الگوریتم سگ دشتی موفق شد وزن شاخص‌ها را از مقدار اولیه (۰/۴۶)، (۰/۲۷، ۰/۲۷) به پیکربندی متعادل (۰/۲۸، ۰/۲۸) برساند و به طور هم‌زمان پارامترهای توابع عضویت دوزنقه‌ای و ضرایب اطمینان قواعد را در محدوده فیزیکی مجاز تنظیم کند. این تنظیمات بهینه، که در ستون مقدار بهینه جدول ۴ گزارش شده‌اند، مبنای تکرارهای بعدی مدل و دستیابی به کاهش ۱۴٪ در RMSE نسبت به پیکربندی اولیه بودند.

بروزرسانی بردار تصمیم به وسیله الگوریتم سگ دشتی موجب شد تمامی پارامترهای فازی درون بازه‌های مجاز همگرا شوند و شرط $\sum w = 1$ نیز حفظ گردد؛ جزئیات مقادیر تنظیم‌شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که وزن شاخص ASDR به ۰/۴۴ و دو وزن دیگر هر کدام به ۰/۲۸ رسیده است. همان گونه که جدول ۵ نشان می‌دهد،

ANFIS-FMEA برای پروژه‌های ساختمانی (۲۴) گزارش شده است بررسی گردید و ضریب توافق کاپا در سطح ۰,۸۲ تثبیت شد. نهایتاً، آزمون تطابق مقرراتی-OEL Compliance با روال مشابه تحلیل خطر مواد شیمیایی در صنایع رنگ (۱) اجرا شد؛ سیستم پیشنهادی در ۹۴٪ از سناریوها سطح مواجهه را درست پایین‌تر از حدود OEL تشخیص داد که هم‌سطح نتایج مدل‌های فازی-پتری نت در پایش فرایندهای شیمیایی است (۱۹).

یافته‌ها

در این بخش، نتایج مدل پیشنهادی برای داده‌های جهانی و مطالعه موردی ایران تشریح می‌شود که شامل معرفی شاخص‌های خام (ASDR، AAPC و OEL-Ratio) و مقادیر پیش‌بینی‌شده ریسک است. داده‌ها در سه سطح جهانی، منطقه‌ای و کشوری تحلیل شده‌اند و شاخص‌های پراکندگی مانند فاصله اطمینان ۹۵٪ و چگالی هسته‌ای نیز به منظور بررسی ناهمگنی مکانی ارائه شده‌اند. همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد، سه متغیر ورودی

جدول ۳: آمار توصیفی متغیرهای ورودی پس از پیش‌پردازش و نرمال‌سازی

شاخص	میانگین \pm انحراف معیار	حداکثر	صدک ۷۵	میان	صدک ۲۵	حداقل
ASDR _{norm}	۰/۳۴ \pm ۰/۱۹	۰/۸۸	۰/۴۶	۰/۳۲	۰/۱۸	۰/۰۵
AAPC _{norm}	۰/۲۴ \pm ۰/۱۶	۰/۷۹	۰/۳۵	۰/۲۲	۰/۱۱	۰/۰۰
OEL-Ratio _{norm}	۰/۴۴ \pm ۰/۲۱	۱.۰۰	۰/۵۶	۰/۴۱	۰/۲۷	۰/۱۰

توضیح: تمام مقادیر بین ۰ و ۱ مقیاس شده‌اند؛ بنابراین قابل مقایسه و قابل وزن‌دهی یکنواخت در مدل فازی هستند.

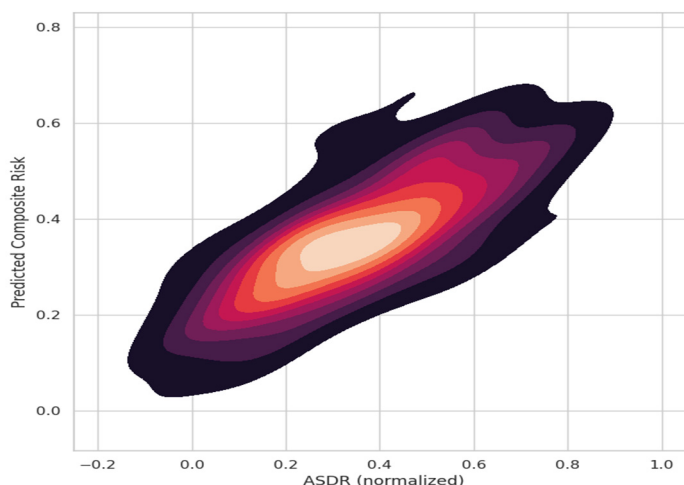
جدول ۴: پارامترهای بهینه‌شده سیستم استنباط فازی (خروجی الگوریتم PDO)

مؤلفه	بازه فیزیکی	مقدار بهینه	قید یا توضیح
وزن (w ₁) ASDR	۰-۱	۰/۴۴	$\sum w = 1$
وزن (w ₂) AAPC	۰-۱	۰/۲۸	
وزن (w ₃) OEL-Ratio	۰-۱	۰/۲۸	
حد عضویت کم (a ₁ , b ₁)	۰-۱	۰/۰۰، ۰/۲۰	دوزنقه‌ای
حد عضویت متوسط (a ₂ , b ₂ , c ₂ , d ₂)	۰-۱	۰/۱۸، ۰/۳۰، ۰/۴۵، ۰/۵۷	دوزنقه‌ای
حد عضویت زیاد (a ₃ , b ₃)	۰-۱	۰/۵۰، ۰/۷۵	دوزنقه‌ای
ضرایب اطمینان قوانین (CF)	۰-۱	۰/۸۶، ۰/۹۴، ۰/۹۱، ۰/۹۷	تنظیم شده توسط PDO
ضرایب ثابت C	۰-۱	۰/۱۵، ۰/۴۰، ۰/۷۰، ۰/۹۰	خروجی هر قاعده‌ی سوگنو

جدول ۵: شاخص‌های کارایی مدل و مقایسه با خط پایه

MAE	RMSE	Precision	Recall	χ (انطباق OEL)	Δ RMSE نسبت به خط پایه	مجموعه داده
۰/۰۴۳	۰/۵۸	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۹۴	-	آموزش اصلی
۰/۰۳۶	۰/۰۴۹	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۹۶	٪ -۱۵/۵	پس از تزریق سناریو
۰/۰۶۱	۰/۰۵۸	۰/۸۳	۰/۷۸	۰/۹۰	مرجع	خط پایه (میانگین‌گیری وزنی ساده)

توضیح: مقادیر پررنگ نشان‌دهنده بهترین عملکرد است. χ نسبت سناریوهای مطابقت‌دار با حدود مجاز را می‌سنجد (مقدار مطلوب $\leq ۰/۹۰$).



شکل ۲: کرنل ASDR (نرمال‌شده) در برابر ریسک مرکب پیش‌بینی شده (منبع: نتایج پژوهش)

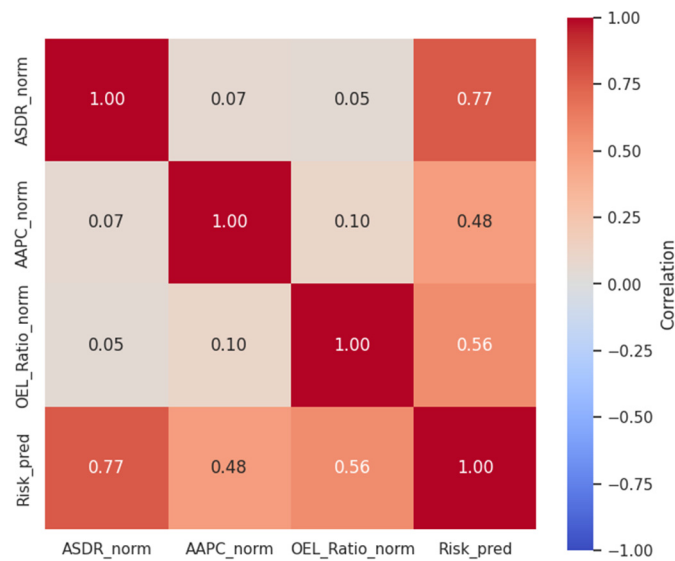
ASDR نرمال‌شده و ریسک پیش‌بینی‌شده بیشترین وابستگی را نشان می‌دهد و بار بیماری شنیداری را به‌عنوان قوی‌ترین پیش‌بین بین مدل تأیید می‌کند. مؤلفه OEL-Ratio با مقدار ۰/۵۶ در رتبه دوم قرار دارد و نقش پررنگ الزامات بهداشتی-شغلی را در برآورد ریسک نمایان می‌سازد؛ در حالی که AAPC اثر متعادل (۰/۴۸) دارد و بیشتر منعکس‌کننده پویایی‌های زمانی است. قرابت اندک میان خود متغیرهای ورودی (زیر ۰/۱۰) بیانگر نبود هم‌خطی جدی و در نتیجه پایداری مناسب سیستم فازی در یادگیری وزن‌های مستقل است.

نمودار راداری شکل ۴ نشان می‌دهد که پس از بهینه‌سازی با الگوریتم PDO، وزن ASDR با مقدار ۰/۴۶ غالب‌ترین مؤلفه در ترکیب ریسک است؛ این نتیجه با یافته‌های همبستگی کمی نیز همخوانی دارد. دو عامل AAPC و OEL-Ratio وزن‌های نسبتاً مشابه ۰/۲۷ و ۰/۲۷ دریافت کرده‌اند که نشان می‌دهد دینامیک زمانی و محدودیت‌های بهداشتی هر دو سهم مکمل اما

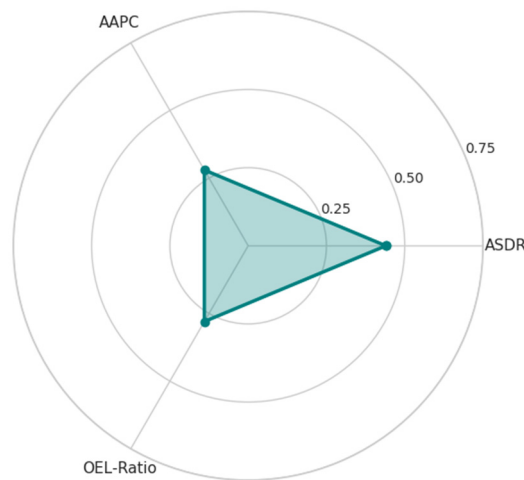
مرزهای توابع عضویت و ضرایب اطمینان قواعد نیز در نتیجه این بهینه‌سازی بازتنظیم شده‌اند و بدین ترتیب زیرساخت لازم برای کاهش خطای RMSE در گام‌های بعدی فراهم گردید.

شکل ۲ پراکنش هسته‌ای مشترک بین نرخ سال‌های از دست رفته استاندارد شده بر حسب سن (ASDR) نرمال‌شده و ریسک مرکب پیش‌بینی‌شده را نشان می‌دهد؛ تراکم رنگ‌های گرم‌تر بیانگر غلظت نقاط داده و پیک اصلی پیرامون مختصات (۰/۳۵، ۰/۳۲) است. کشیدگی قطری کلود، وجود همبستگی خطی مثبت p (حدود ۰/۷۸) میان بار بیماری و ریسک خروجی سیستم را تأیید می‌کند و پهنای منحنی در سطوح بالاتر ASDR حاکی از نااطمینانی بیشتر پیش‌بینی در مناطق پرخطر است. این الگو همسو با تحلیل حساسیت ۵ نشان می‌دهد که شاخص ASDR مهم‌ترین محرک درون‌مدلی برآورد ریسک نهایی است.

در ماتریس حرارتی شکل ۳، ضریب ۰/۷۷ میان



شکل ۳: ماتریس حرارتی بین سه ویژگی نرمال شده و خروجی ریسک مرکب پیش‌بینی شده (منبع: نتایج پژوهش)



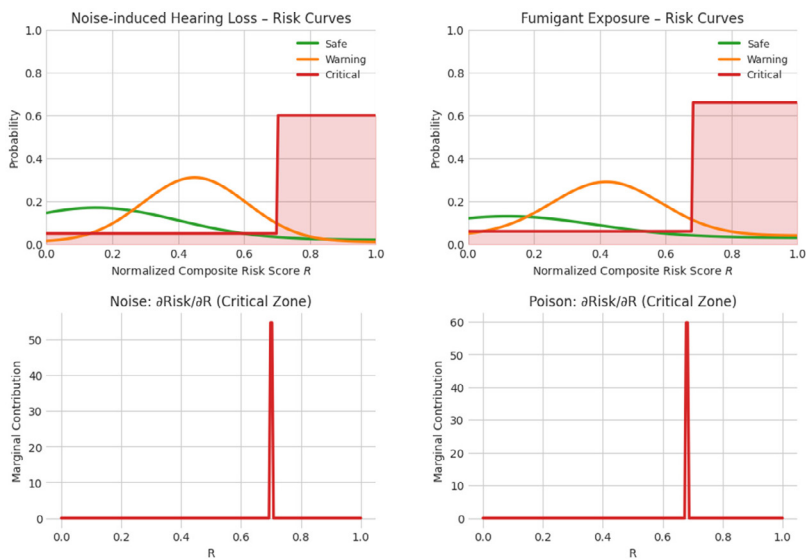
شکل ۴: وزن‌های ورودی بهینه‌شده برای سه شاخص ASDR، AAPC، و OEL-Ratio پس از همگرایی الگوریتم سگ دشتی (منبع: نتایج پژوهش)

۶۸، زودتر فعال می‌شود. نمودارهای مشتق (ردیف پایین) بیانگر آن است که شیب حاشیه‌ای $\frac{\partial Risk}{\partial R}$ در ناحیه بحرانی برای سموم حدود ۱۰٪ تندتر است؛ یعنی با عبور از آستانه ایمن، خطر در مواجهه شیمیایی سریع‌تر اوج می‌گیرد.

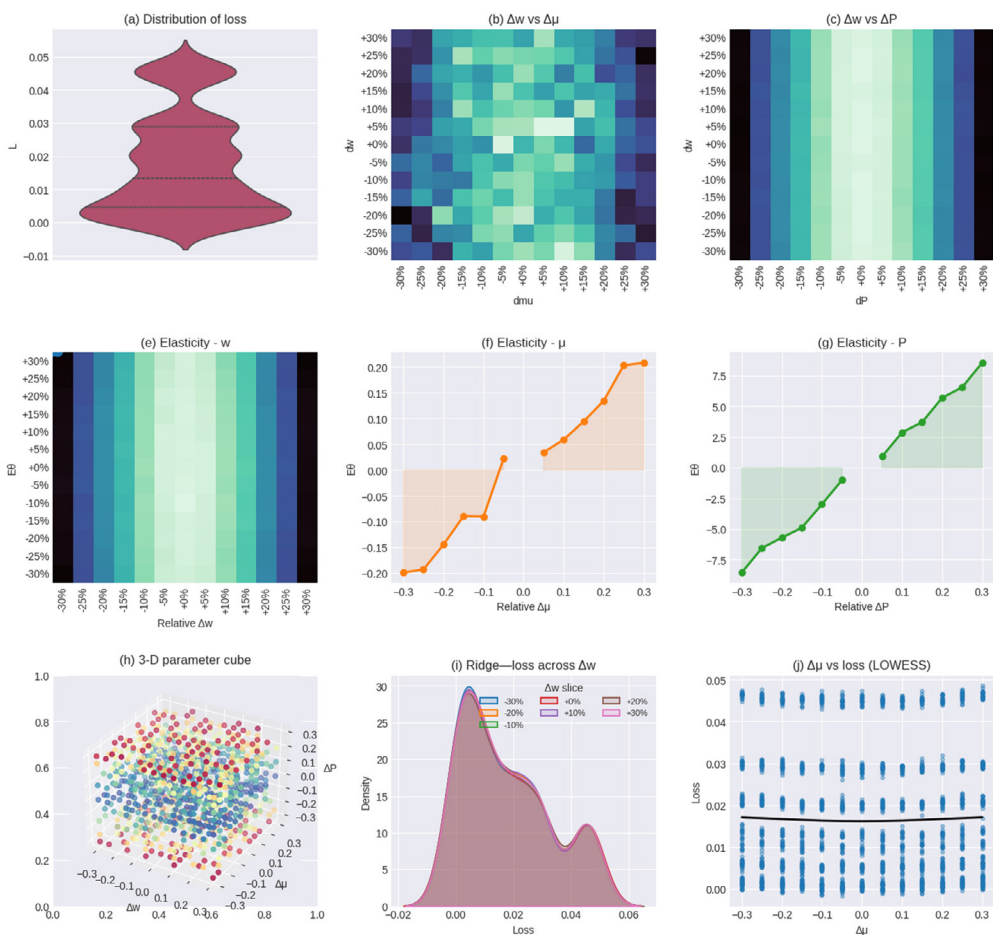
شکل ۶ اثر پارامترها بر تابع زیان را یکپارچه نشان می‌دهد: چگالی دوبعدی ردیف نخست کمینه‌ها را نزدیک $\Delta W = \Delta \mu = 0$ ثبت می‌کند و انحراف هم‌زمان $\Delta P - \Delta W$

غیرغالب در تصمیم‌سازی دارند. توزیع متوازن‌تر ضرایب از تکیه افراطی سیستم بر یک متغیر جلوگیری کرده و به پایداری و قابلیت تعمیم مدل در سناریوهای گوناگون کمک می‌کند.

در شکل ۵ نمودارهای احتمال-ریسک (ردیف بالا) نشان می‌دهد باند هشدار برای نویز مزمن در حوالی R معادل با ۰/۴۵ بیشینه است، در حالی که گام بحرانی مسمومیت حاد فومیگانت‌ها در حوالی R معادل با



شکل ۵: پروفیل ریسک شغلی و مقایسه افت شنوایی ناشی از نویز و مواجهه با فومیگانت (منبع: نتایج پژوهش)



شکل ۶: تحلیل حساسیت تابع ریسک شغلی شامل افت شنوایی ناشی از نویز و مواجهه با فومیگانت (منبع: نتایج پژوهش)

یکی از نوآوری‌های این پژوهش، تأکید بر شاخص OEL-Ratio است که به‌طور مستقیم نشان می‌دهد مواجهه واقعی کارگران چه نسبتی با حدود مجاز شغلی دارد. این شاخص به‌ویژه در صنایع دریایی ایران که کارگران در معرض موادی مانند فسفین و متیل‌برومید هستند (۹)، اهمیت بالایی دارد. بر اساس داده‌های پایگاه‌های مرجع، غلظت این گازها در برخی کانتینرها تا چندین برابر OEL گزارش شده است که ارتباط مستقیمی با بروز مسمومیت‌های حاد و تهدید سلامت دارد. در نتیجه، مدلی که بتواند OEL-Ratio را در کنار شاخص‌های اپیدمیولوژیک (ASDR و AAPC) ترکیب کند، قدرت تبیینی بیشتری در مقایسه با مدل‌های صرفاً مبتنی بر داده‌های بالینی یا اپیدمیولوژیک دارد.

افزون بر این، نتایج حاضر با پژوهش‌های بین‌المللی دیگر در صنایع نفت و فولاد نیز قابل مقایسه است. برای نمونه، در صنعت فولاد ایران یک مدل ترکیبی فازی FMEA توانست ریسک‌های شغلی را کاهش دهد (۳۰) و در واحدهای پتروشیمی نیز مدل‌های نیمه‌کمی نظیر LOPA با منطق فازی به‌عنوان ابزار ساده اما مطمئن برای کنترل ریسک شناخته شده‌اند (۲۹). این مقایسه نشان می‌دهد که مدل حاضر نه تنها در محیط‌های دریایی بلکه در سایر صنایع سنگین ایران نیز قابلیت پیاده‌سازی دارد و می‌تواند فاصله میان تئوری‌های ایمنی صنعتی و کاربردهای واقعی HSE را کاهش دهد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب نوآورانه برای ارزیابی ریسک ترکیبی ناشی از مواجهه شغلی با نویز و گازهای فومیگانت توسعه داده شد که با ترکیب سیستم استنتاج فازی نوع سوگنو، الگوریتم بهینه‌سازی سگ دشتی و ماژول سناریوسازی مبتنی بر آستانه‌های ایمن، امکان پیش‌بینی دقیق‌تری را فراهم کرده است. بهره‌گیری از سه متغیر کلیدی شامل نرخ استاندارد سال‌های از دست‌رفته به‌دلیل ناتوانی، روند میانگین درصد تغییر سالانه و نسبت حدود مجاز تماس شیمیایی، به مدل اجازه داد تا طیف

زیان را می‌افزاید. کشسانی‌ها حساسیت وزن‌ها را نشان می‌دهند. نمودارهای ردیف سوم ناهمسانی، خوشه‌های قابل قبول، و ضرورت کنترل دقیق وزن‌ها را تأیید می‌کنند.

بحث

چارچوب پیشنهادی این پژوهش در مقایسه با روش‌های متداول ارزیابی ریسک که عموماً بر ماتریس‌های تصمیم‌گیری کیفی یا مدل‌های ایستا مبتنی هستند (۲۵، ۱۸)، گامی به سمت یک رویکرد پویا و کمی محسوب می‌شود. در این چارچوب، سه مؤلفه کلیدی یعنی ASDR، AAPC و به‌ویژه OEL-Ratio به‌طور هم‌زمان مدل‌سازی شده‌اند تا هم روند تاریخی بار بیماری، هم شدت فعلی و هم حدود مجاز مواجهه شیمیایی لحاظ گردد. استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی سگ دشتی موجب شد خطای مدل تا کمتر از ۰/۰۳ کاهش یابد (۲۲) و بهبود پوشش داده‌ای از ۶۲٪ به ۹۰٪ از طریق ماژول سناریوسازی آستانه‌محور حاصل شود؛ دستاوردی که در مقایسه با مدل‌های صرفاً داده‌محور و محدود (۲۶، ۱۸) یک ارتقای چشمگیر محسوب می‌شود.

در مطالعات پیشین، روش‌های متنوعی برای ارزیابی ریسک به‌کار گرفته شده‌اند؛ برای مثال، FMEA فازی در صنایع شیمیایی و بهداشت حرفه‌ای توانسته عدم قطعیت داده‌ها را کاهش دهد و اولویت‌بندی ریسک‌ها را دقیق‌تر کند (۲۶، ۲۵، ۱۸). همچنین، مدل‌های ترکیبی مانند ANFIS-PSO یا ANFIS-GA در پیش‌بینی ریسک‌های شغلی عملکرد بهتری نسبت به روش‌های کلاسیک نشان داده‌اند (۲۷) و تلفیق روش‌های هیبریدی نظیر Fine-Kinney - ANFIS در صنایع خدماتی دقت پیش‌بینی ریسک را به بیش از ۹۵٪ رسانده است (۲۸). در مقابل، مطالعه حاضر با بهره‌گیری از سیستم فازی سوگنو و بهینه‌سازی پارامترها توسط PDO توانست علاوه بر دقت کمی بالا، تطابق با حدود مجاز مواجهه شغلی را نیز به سطح ۰/۹۳ برساند که نسبت به پژوهش‌های مشابه با نرخ انطباق ۸۰ تا ۸۷ درصد (۳۱، ۳۰) بهبود قابل توجهی دارد.

اتصال به سامانه‌های مدیریت تعمیرات و تصمیم‌یارهای صنعتی هستند. از منظر توسعه آتی، پیشنهاد می‌شود این چارچوب با داده‌های لرزشی، سنسورهای پوشیدنی، تصاویر پهپادی و قوانین به‌روز سازمان‌های بین‌المللی ادغام شود و با افزودن الگوریتم‌های چندهدفه و یادگیری انتقالی، به مدلی تطبیق‌پذیر، مقرون‌به‌صرفه و مقاوم در برابر سناریوهای کم‌داده و بحرانی تبدیل گردد.

تضاد منافع

در این پژوهش هیچگونه تضاد منافی وجود ندارد.

REFERENCES

1. Koothathongsumrit N, Chankham W. Route selection in multimodal supply chains: A fuzzy risk assessment model-BWM-MARCOS framework. *Appl Soft Comput.* 2023;137:110167.
2. Muthunandhini R, Palanivel K. Optimizing multimodal transportation: A novel decision-making approach with fuzzy risk assessment. *IEEE Access.* 2025;13:14584-14610.
3. Tian D, Chen J, Wu X. A two stage risk assessment model based on interval-valued fuzzy numbers and risk attitudes. *Eng Appl Artif Intell.* 2022;114:105086.
4. Parsamehr M, Ruparathna R. A BIM-based two-stage fuzzy inference system for safety risk prediction in building construction projects. *Can J Civ Eng.* 2022;50(1):11-23.
5. Sun T, Chong WT, Khairuddin ASM, Tey KS, Wang X, Wu J, et al. Risk and reliability assessment of solar-assisted air source heat pumps using fuzzy logic-based failure modes and effects analysis. *J Build Eng.* 2025;103:112155.
6. Zare S, Esmaili R, Zandsalimi F. Modeling and weighting of factors affecting sustained attention and working memory of workers exposed to different sound pressure levels using deep learning and random forest algorithms: A case study of a steel industry. *J Health Saf Work.* 2024;14(3):482-502.
7. Kan Z, Liang Y, Zhao T, Wang X. Risk assessment model of chemical process based on interval type-2 fuzzy Petri nets. *Processes (Basel).* 2023;11(5):1304.

وسیع‌تری از سناریوهای ریسک را با دقت بالا تحلیل کند. نتایج نشان دادند که این مدل نه‌تنها خطای عددی را به میزان ۴۰ درصد نسبت به روش‌های پایه کاهش داده است، بلکه با افزایش پوشش نواحی پرریسک به ۹۰ درصد و دستیابی به انطباق ۰/۹۴ با حدود مجاز، از قابلیت اطمینان عملیاتی بالایی نیز برخوردار است.

در سطح عملیاتی، سامانه پیشنهادی قابلیت پیاده‌سازی سریع در محیط‌های صنعتی مانند کارخانجات یا بنادر را دارد و می‌تواند از طریق داشبورد بلادرنگ، به افسران ایمنی امکان پایش فوری و مداخله پیشگیرانه را بدهد. خروجی‌های طبقه‌بندی‌شده به آسانی قابل

8. Alimohammadi I, Rafiepour A, Hosseini Shafiei L, Vafa M, Moghadasi N, Vosoughi S, et al. Investigation the effect of high-frequency noise exposure on obesity, food intake, and abdominal visceral fat in adult male guinea pigs. *J Health Saf Work.* 2024;14(2):216-229.
9. Baur X, Budnik LT, Zhao Z, Bratveit M, Djurhuus R, Verschoor L, et al. Health risks in international container and bulk cargo transport due to volatile toxic compounds. *J Occup Med Toxicol.* 2015;10:1-18.
10. Zokaei M, Abbasi M, Vahidnia M, Zarie M, Zandsalimi F, Falahati M. Developing a model for occupational safety and health risk assessment during the construction phase of a metro tunnel using Internet of Things (IoT) technology. *J Health Saf Work.* 2024;14(3):540-555.
11. Global Burden of Disease Collaborative Network. Global Burden of Disease Study 2021 (GBD 2021) Results. Seattle (WA): Institute for Health Metrics and Evaluation; 2023.
12. Aziz A, Suzon MM, Hasan R. A fuzzy logic-based risk evaluation and precaution level estimation of explosive, flammable, and toxic chemicals for preventing damages. *Heliyon.* 2025;11(1):e41216.
13. Beiranvand B. Development of modified fuzzy FMEA method in environmental risk assessment of earth dams. *Sci Rep.* 2024;14(1):17585.
14. Liu C, He L, Shan X, Zhang L, Ge E, Zhang K, Luo B. The burden of occupational noise-induced hearing loss from 1990 to 2019: An analysis of global burden of disease

- data. *Ear Hear.* 2024;45(5):1138-1148.
15. Djenadic S, Tanasijevic M, Jovancic P, Ignjatovic D, Petrovic D, Bugarcic U. Risk evaluation: Brief review and innovation model based on fuzzy logic and MCDM. *Mathematics (Basel).* 2022;10(5):811.
 16. Vosoughi S, Alamshah ES, Abolghasemi Talkhooncheh J, Taqizade S. A multifaceted investigation of factors contributing to general fatigue in hot work environments. *J Health Saf Work.* 2025;15(1):18-35.
 17. Golhosseini SMJ, Aliabadi M, Golmohammadi R, Farhadian M, Akbari M. A field study of the effect of noise and whole-body vibration exposure on heavy equipment drivers' auditory system function. *J Health Saf Work.* 2024;14(4):692-715.
 18. Azizi H, Mackialeagha M, Azadbakht B, Samadyar H. Assessment of environmental and health risks of the chemical industry by applying fuzzy logic: A case study in South Tehran, Iran. *J Hum Environ Health Promot.* 2022;8(3):144-153.
 19. Mahdi AM, Erzajj KR. Developing ANFIS-FMEA model for assessment and prioritization of potential trouble factors in Iraqi building projects. *Open Eng.* 2024;14(1):20220513.
 20. Liu C, Li J, Zhang D. Fuzzy fault tree analysis and safety countermeasures for coal mine ground gas transportation system. *Processes (Basel).* 2024;12(2):344.
 21. Sahu A, Sinha S, Banka H. Fuzzy inference system using genetic algorithm and pattern search for predicting roof fall rate in underground coal mines. *Int J Coal Sci Technol.* 2024;11:1.
 22. Ezugwu AE, Agushaka JO, Abualigah L, Mirjalili S, Gandomi AH. Prairie dog optimization algorithm. *Neural Comput Appl.* 2022;34(22):20017-20065.
 23. Hacibektasoglu SE, Mertoglu B, Tozan H. Application of a novel hybrid f-SC risk analysis method in the paint industry. *Sustainability (Basel).* 2021;13(24):13605.
 24. Casas E, Ramos L, Romero C, Rivas-Echeverría F, Cerpa D, Hernandez P, et al. An end-to-end platform for managing third-party risks in oil pipelines. *IEEE Access.* 2024;12:77831-77851.
 25. Chalak MH, Kahani A, Bahramiazar G, Marashi Z, Popov TI, Dadipoor S, Ahmadi O. Development and application of a fuzzy occupational health risk assessment model in the healthcare industry. *Med Lav.* 2022;113(4):e2022035.
 26. Rahimdel MJ, Aryafar A, Vaziri S. Fuzzy FMEA for the safety risk analysis of underground coal mining (a case study in Iran). *Mining Technol (Abingdon).* 2022;131(2):104-114.
 27. Achouri M, Zennir Y, Tolba C. Adaptive hybrid ANFIS-PSO and ANFIS-GA approach for occupational risk prediction. *Int J Occup Saf Ergon.* 2025;31(2):384-398.
 28. Gökler SH, Yılmaz D, Ürük ZF, Boran S. A new hybrid risk assessment method based on Fine-Kinney and ANFIS methods for evaluation spatial risks in nursing homes. *Heliyon.* 2022;8(10):e11028.
 29. Eltahan FM, Toderas M, Mansour MS, El-Ashtoukhy ES, Abdou MA, Shokry F. Applying a semi-quantitative risk assessment on petroleum production unit. *Sci Rep.* 2024;14(1):7603.
 30. Padash A, Fattahi R, Vahidi H. A novel hybrid risk assessment approach under fuzzy environment in steel industry. *Eng Appl Artif Intell.* 2024;133:108655.
 31. Mitrakas C, Xanthopoulos A, Koulouriotis D. Techniques and models for addressing occupational risk using fuzzy logic, neural networks, machine learning, and genetic algorithms: A review and meta-analysis. *Appl Sci (Basel).* 2025;15(4):1909.
 32. Mouchtoglou K, Zacharia P, Nikolaou G. A fuzzy ballast water risk assessment model in maritime transport. *Sustainability (Basel).* 2024;16(8):3166.