



Developing a Fuzzy Integrated Value Engineering and Risk Assessment Framework (VENRA) for Zero Emission Oriented Decision Making

Nima Hamta ^{a*}, Pedram Zarrin ^b, Abbas Biglar ^c

^a Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran. n.hamta@arakut.ac.ir

^b Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Arak Branch, Arak, Iran. pedramab2000@yahoo.com

^c Department of Industrial Engineering, Islamic Azad University, Dorud, Iran. a.biglar@yahoo.com

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Hamta N, Zarrin P, Biglar A. Developing a Fuzzy Integrated Value Engineering and Risk Assessment Framework (VENRA) for Zero Emission Oriented Decision Making. *Industrial Innovations*. 2026; 4(1):66-95.

 <https://doi.org/10.66224/jii.4.1.66>

KEYWORDS

Value Engineering;
Risk Assessment;
Zero Emission;
Fuzzy Approach.

ABSTRACT

The global transition toward net-zero emissions and environmental sustainability has placed increasing pressure on heavy industries to optimize processes and reduce their ecological footprint. Addressing these challenges requires the integration of innovative managerial approaches capable of supporting ambitious emission-reduction targets. In response, this study develops an integrated and novel framework entitled “Value Engineering and Risk Assessment with a Fuzzy Approach” (VENRA). The framework simultaneously focuses on two critical dimensions of industrial performance: value engineering as a tool for cost optimization and efficiency enhancement, and risk assessment as a mechanism for identifying, analyzing, and managing potential environmental and operational threats.

To achieve this purpose, a comprehensive review of the literature was conducted to extract key performance indicators (KPIs) related to net-zero emissions, value engineering, and risk management. Subsequently, the fuzzy AHP–DEMATEL hybrid method was employed to prioritize these indicators and reveal the complex causal relationships among them. The fuzzy logic component enables modeling of the uncertainty inherent in expert judgment.

Findings derived from the assessment of 20 experts in heavy industries indicate that risk management is the most influential criterion in achieving net-zero objectives. This is followed by HSE (Health, Safety and Environment), waste management, accident prevention, and energy management. The causal analysis using fuzzy DEMATEL further demonstrates that “risk management” and “energy management” act as cause factors, exerting direct influence on the other criteria, whereas HSE, waste management, and accident prevention fall into the effect factors category.

The primary contribution of this study lies in the unique integration of value engineering, comprehensive risk management, and fuzzy logic into a unified decision-making model. The VENRA framework offers a robust and practical tool capable of supporting heavy industries in enhancing environmental performance and advancing toward sustainable development.

* Corresponding author

E-mail address: n.hamta@arakut.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.66224/jii.4.1.66>

Received: April 6, 2026; Received in revised form: May 11, 2026; Accepted: May 14, 2026.

Article type: Research Paper



Extended Abstract

1. Introduction

Increasing pressure to achieve zero-emission and low-carbon transition goals, together with growing requirements for safety, health, and regulatory compliance, has made decision-making in industrial systems increasingly complex. In such conditions, relying on a single perspective is no longer sufficient. Environmental, operational, and managerial factors must be considered simultaneously, including risk management, HSE requirements, waste management, and energy efficiency. In response to this need, the present study proposes an integrated framework to support decision-making in the transition toward zero-emission operations. The main idea is to combine Value Engineering and Risk Assessment within a unified analytical structure so that both the causal relationships among criteria and their relative importance can be identified. This integrated approach allows decision-makers to better understand which factors have the greatest influence on sustainable performance and how they interact with one another.

Accordingly, this research develops the VENRA framework as a multi-criteria decision-support model. By applying a fuzzy hybrid analysis approach, the study helps identify the most critical factors affecting sustainability, risk reduction, and operational improvement, providing a systematic basis for more informed strategic planning.

2. Methodology

This research adopts an applied, descriptive-survey design. The analytical framework is based on a fuzzy AHP–DEMATEL hybrid approach. First, relevant criteria and sub-criteria were identified through literature review and expert input. Then, DEMATEL was used to determine causal relationships among criteria, while AHP was used to rank their relative importance.

Data were collected through questionnaires completed by 20 experts with backgrounds in value engineering, risk management, and environmental fields. The main criteria considered in the model include:

- HSE
- Waste management
- Risk management
- Energy management
- Accident prevention

This combined approach enabled the researchers to evaluate both the interdependence among criteria and their final priority in the decision-making process.

3. Results and Discussion

The findings show that risk management is the most important criterion in the proposed framework. It has the greatest influence on the overall structure of zero-emission decision-making in shipbuilding. After risk management, HSE and waste management were identified as the next most important factors.

These results indicate that sustainable shipbuilding cannot be achieved through environmental measures alone; it requires a broader strategy that integrates safety, operational control, and waste reduction. The causal analysis provided by DEMATEL helps clarify how different criteria affect one another, while the fuzzy AHP ranking highlights the priorities that should guide strategic planning.

Overall, the results support the idea that zero-emission transition in shipbuilding depends on coordinated attention to risk control, health and safety, energy efficiency and environmental compliance.

4. Conclusion

The study concludes that the VENRA framework is a useful and practical decision-support model for shipbuilding organizations pursuing zero-emission and sustainable development goals. By integrating value engineering with risk assessment through a fuzzy multi-criteria approach, the framework helps decision-makers identify the most critical areas for action.

The research shows that risk management, HSE, and waste management are key priorities for improving sustainability and reducing environmental impact. Therefore, VENRA offers a systematic basis for supporting safer, cleaner, and more efficient shipbuilding operations.



توسعه یک چارچوب یکپارچه مهندسی ارزش و ارزیابی ریسک (VENRA) با رویکرد فازی برای تصمیم‌گیری مبتنی بر آلاینده‌گی صفر

نیما همتا الف*، پدram زرین ب، عباس بیگلر ج

الف گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران. n.hamta@arakut.ac.ir
 ب گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اراک، اراک، ایران. pedramab2000@yahoo.com
 ج گروه مهندسی صنایع، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دورود، دورود، ایران. a.biglar@yahoo.com

چکیده	واژگان کلیدی
<p>حرکت جهانی به سوی آلاینده‌گی صفر و توسعه پایدار، صنایع مادر را در برابر چالش‌های فزاینده‌ای در زمینه بهینه‌سازی فرآیندها و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی قرار داده است. در پاسخ به این نیاز، پژوهش حاضر چارچوبی یکپارچه تحت عنوان «مهندسی ارزش و ارزیابی ریسک با رویکرد فازی» (VENRA) را توسعه داده که با تلفیق دو رویکرد کلیدی مهندسی ارزش برای بهینه‌سازی هزینه و کارایی، و ارزیابی ریسک برای مدیریت تهدیدات بالقوه زیست‌محیطی و عملیاتی به دنبال ارتقای عملکرد صنایع در مسیر دستیابی به پایداری است. در این چارچوب ابتدا شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) مرتبط با آلاینده‌گی صفر، مهندسی ارزش و مدیریت ریسک از طریق مرور جامع منابع شناسایی شد. سپس برای اولویت‌بندی و تحلیل روابط اثرگذاری میان این شاخص‌ها، از روش ترکیبی AHP-DEMATEL فازی استفاده شد که امکان مدلسازی عدم قطعیت موجود در قضاوت‌های انسانی را فراهم می‌سازد. نتایج تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده از ۲۰ خبره صنعتی نشان داد که «مدیریت ریسک» مهم‌ترین عامل اثرگذار بر دستیابی به اهداف آلاینده‌گی صفر است. پس از آن معیارهای HSE (بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست)، مدیریت پسماند، پیشگیری از حوادث و مدیریت انرژی قرار دارند. یافته‌های روش دیمتل فازی نیز بیانگر آن است که «مدیریت ریسک» و «مدیریت انرژی» در گروه عوامل علی قرار داشته و تأثیر مستقیم بر سایر معیارها دارند. نوآوری اصلی این پژوهش در ادغام همزمان مهندسی ارزش، مدیریت ریسک جامع و منطق فازی در قالب یک مدل تصمیم‌گیری واحد نهفته است که می‌تواند مسیر مؤثری برای صنایع مادر در جهت کاهش آلاینده‌گی و دستیابی به توسعه پایدار فراهم آورد.</p>	<p>مهندسی ارزش؛ ارزیابی ریسک؛ آلاینده‌گی صفر؛ رویکرد فازی.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴</p>

۱- مقدمه

افزایش نگرانی‌های اقلیمی، صنایع را به سوی پایداری و هدف «آلاینده‌گی صفر» سوق داده است. تحقق این هدف نیازمند چارچوب‌های جامع و سازگار با عدم قطعیت‌هاست [۱]. ترکیب مهندسی ارزش و ارزیابی ریسک در چارچوب VENRA با بهبود تصمیم‌گیری، کاهش هزینه و ارتقای عملکرد، به کاهش آلاینده‌گی کمک می‌کند. همچنین منطق فازی به دلیل ماهیت کیفی

متغیرهای زیست‌محیطی، دقت تحلیل را افزایش می‌دهد [۲].

در این راستا، پژوهش حاضر چارچوب VENRA (Value Engineering and Risk Assessment with a Fuzzy Approach) را معرفی می‌کند؛ رویکردی نوین که مهندسی ارزش (VE) را با ارزیابی جامع ریسک، تحت یک مدل تصمیم‌گیری یکپارچه با استفاده از منطق فازی، ادغام می‌سازد. یکی از نوآوری‌های کلیدی چارچوب VENRA، بسط مفهوم «کارکرد» در مهندسی ارزش است. فراتر از بهینه‌سازی سنتی نسبت عملکرد به هزینه، VENRA «کارکرد» را به‌گونه‌ای جامع‌تر تعریف می‌کند که شامل معیارهای زیست‌محیطی و پایداری، از جمله کاهش انتشار آلاینده‌ها، بهینه‌سازی مصرف انرژی و مدیریت پسماند، نیز باشد. این رویکرد، مهندسی ارزش را از یک ابزار صرفاً اقتصادی به یک استراتژی فعال در جهت تحقق اهداف آلاینده‌گی صفر تبدیل می‌کند. تغییرات پیشنهادی در کارکرد، نه تنها از منظر هزینه‌ها و کارایی فنی، بلکه به‌طور اساسی از منظر تأثیرات زیست‌محیطی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

مهندسی ارزش به‌عنوان رویکردی سیستماتیک برای افزایش ارزش، ارتقای کیفیت و حذف هزینه‌های غیرضروری بدون کاهش عملکرد شناخته می‌شود [۳]. این رویکرد در صنایع بزرگ، به‌ویژه صنایعی با چرخه عمر طولانی و الزامات فنی پیچیده، اهمیت ویژه‌ای دارد و قابلیت ادغام با ابزارهایی همچون QFD، مدیریت ریسک و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را داراست. نمونه‌هایی از این ادغام، مانند ترکیب FAST و FMEA در صنعت خودرو، نشان داده‌اند که تلفیق این ابزارها می‌تواند به کاهش ریسک و بهبود عملکرد منجر شود [۴]. از سوی دیگر، مدیریت ریسک نیز به‌عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت صنعتی، با شناسایی، ارزیابی و کنترل ریسک‌ها، نقش مهمی در پیشگیری از مشکلات، تخصیص بهینه منابع و افزایش کارایی عملیاتی ایفا می‌کند [۵].

اگرچه ادغام مهندسی ارزش و ارزیابی ریسک در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته، اما در صنعت دریایی عمدتاً به‌صورت نظری بررسی شده و چارچوب‌های عملیاتی مشخصی برای آن ارائه نشده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که چارچوب VENRA می‌تواند معیارهای فنی، ایمنی و زیست‌محیطی را به‌صورت یکپارچه ارزیابی کند [۶]، اما همچنان نیاز به توسعه مدل‌هایی جامع و سازگار با ویژگی‌های خاص این صنعت وجود دارد. صنعت کشتی‌سازی به‌دلیل پیچیدگی فنی، چرخه عمر طولانی دارایی‌ها، هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا و الزامات سخت‌گیرانه زیست‌محیطی، نیازمند رویکردهای تحلیلی ویژه و مدل‌های تصمیم‌گیری دقیق‌تر است [۷].

افزون بر این، تشدید استانداردهای زیست‌محیطی و الزامات بین‌المللی، صنایع را ملزم به کاهش آلاینده‌گی و حرکت به‌سوی تولید پاک کرده است؛ موضوعی که علاوه بر مزایای محیط‌زیستی، موجب کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و ارتقای اعتبار اجتماعی سازمان‌ها نیز می‌شود [۸]. با وجود این اهمیت، در کشتی‌سازی ایران تاکنون چارچوب مشخصی برای ادغام مهندسی ارزش و مدیریت ریسک با رویکرد آلاینده‌گی صفر ارائه نشده و استفاده از مدل‌های سایر صنایع نیز به‌دلیل تفاوت‌های ساختاری و فنی امکان‌پذیر نیست.

در چنین شرایطی، ضرورت توسعه یک مدل جامع که بتواند معیارهای عملکردی مرتبط با مهندسی ارزش و مدیریت ریسک را در صنایع مادر نظیر صنعت کشتی‌سازی شناسایی، اولویت‌بندی و تحلیل کند، بیش‌ازپیش احساس می‌شود. مدل یکپارچه VENRA با بهره‌گیری از منطق فازی، ظرفیت ارائه راهکارهای عملی، اقتصادی و سازگار با عدم قطعیت‌های محیط صنعتی را دارد و می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری و بهینه‌سازی عملکرد زیست‌محیطی پروژه‌ها فراهم سازد [۹].

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارائه یک چارچوب جامع برای سنجش عملکرد مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک در صنایع مادر با رویکرد حرکت به‌سوی آلاینده‌گی صفر انجام شده است. این پژوهش با شناسایی معیارهای کلیدی، اولویت‌بندی آن‌ها و تحلیل روابط درونی میان این معیارها، تلاش می‌کند شکاف موجود در ادبیات را برطرف کرده و الگویی علمی و کاربردی برای تصمیم‌گیری پایدار در صنایع مادر نظیر صنعت کشتی‌سازی ارائه دهد.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

افزایش پیچیدگی پروژه‌های صنعتی، نیاز به رویکردهای جامع برای مدیریت منابع، کاهش ریسک و ارتقای پایداری بیش از گذشته احساس می‌شود. مهندسی ارزش به‌عنوان رویکردی کارکردمحور، بر کاهش هزینه بدون افت کیفیت تمرکز دارد [۱۰] و اما اثربخشی آن زمانی کامل است که همراه با مؤلفه‌هایی مانند: HSE، مدیریت ریسک، انرژی، پسماند و پیشگیری از حوادث به‌کار گرفته شود؛ زیرا نادیده‌گرفتن این ابعاد می‌تواند پیامدهای جدی ایجاد کند [۱۱].

این فصل به تبیین مبانی نظری مرتبط با HSE، مدیریت ریسک، انرژی، پسماند و پیشگیری از حوادث می‌پردازد و نقش آن‌ها را در تقویت کارکردهای مهندسی ارزش بررسی می‌کند. این رویکرد تلفیقی چارچوبی علمی برای انتخاب راهکارهای بهینه در پروژه‌های صنعتی فراهم می‌سازد.

مفهوم «آلاینده‌گی صفر» با هدف حذف یا حداقل‌سازی آلودگی در چرخه عمر محصول، تلاش می‌کند تعارض میان رشد صنعتی و حفاظت محیط‌زیست را برطرف کند [۱]. تحقق این هدف نیازمند فناوری‌های پیشرفته مانند انرژی‌های تجدیدپذیر، طراحی سبز، تصفیه پیشرفته، CCS و هوش مصنوعی است. همچنین توسعه کارخانه‌های زیست‌محور و همکاری صنعت و دانشگاه نقش مهمی در دستیابی به این هدف دارد [۳].

حرکت صنایع به‌سوی آلاینده‌گی صفر نیازمند سیاست‌های الزام‌آور و حمایتی مانند مقررات سخت‌گیرانه، مشوق‌های مالیاتی، حمایت پژوهشی، عوارض کربن و بازارهای مبادله کربن است. توافق‌های بین‌المللی مانند توافق پاریس نیز در هم‌راستا کردن اهداف جهانی نقش کلیدی دارند. تجربه کشورهایمانند آلمان، سوئد و ژاپن نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری محیط‌زیستی پیشرو، صنایع را به سمت فناوری‌های پاک هدایت می‌کند [۱۰].

با این حال، گذار به آلاینده‌گی صفر با چالش‌های فنی، اقتصادی و سازمانی همراه است؛ از جمله هزینه بالای نوسازی فناوری، محدودیت انرژی‌های تجدیدپذیر، کمبود آموزش زیست‌محیطی و ضعف قوانین الزام‌آور. غلبه بر این موانع نیازمند رویکردی چندبعدی شامل ارتقای توان علمی، اصلاح ساختارهای اقتصادی و تقویت سیاست‌گذاری محیط‌زیستی است. نمونه‌های موفق جهانی نشان می‌دهند که دستیابی به آلاینده‌گی صفر امکان‌پذیر است؛ شرکت‌هایی مانند یونی‌لور و تسلا با انرژی‌های تجدیدپذیر و فناوری‌های پاک و شهرک‌های صنعتی اسکاندیناوی با تبادل مواد و انرژی، الگوهای مؤثری ارائه کرده‌اند [۱۲]. پیشرفت فناوری‌هایی مانند هیدروژن سبز، هوش مصنوعی، نانوفناوری و بلاک‌چین نیز این گذار را تسریع می‌کند و سرمایه‌گذاری زود هنگام در فناوری‌های سبز مزیت رقابتی ایجاد می‌کند [۶].

با وجود این پیشرفت‌ها، فاصله قابل‌توجهی تا تحقق اهداف توافق پاریس باقی است؛ سهم انرژی‌های تجدیدپذیر از ۸٪ در ۲۰۱۰ به ۱۲٪ در ۲۰۲۱ رسیده و ادامه روند فعلی مانع دستیابی به خالص صفر خواهد بود. گذار موفق به خالص صفر نیازمند تحقق هم‌زمان چهار مؤلفه کاهش انتشار، مقرون‌به‌صرفه بودن، قابلیت اطمینان و حفظ رقابت‌پذیری است؛ در غیر این صورت هزینه انرژی افزایش یافته و پایداری عرضه مختل می‌شود. راهبردهایی مانند استفاده از راه‌حل‌های کم‌هزینه، کاهش هزینه فناوری‌های گران، مدیریت هم‌زمان سیستم‌های انرژی و بهره‌گیری از مزیت‌های نسبی کشورها می‌تواند این گذار را تقویت کند [۱۳].

مهندسی ارزش یک فرآیند ساختاریافته شامل پنج فاز اطلاعات، تحلیل عملکرد، خلاقیت، ارزیابی و اجراست که با ابزارهایی مانند FAST و روش‌های خلاقیت گروهی، راهکارهای کم‌هزینه و کارآمد را شناسایی و عملیاتی می‌کند. این رویکرد امروز فراتر از کاهش هزینه‌ها بوده و در مدیریت پروژه، مهندسی صنایع و طراحی محصول برای بهینه‌سازی منابع، ارتقای کیفیت، کاهش زمان اجرا و افزایش مزیت رقابتی به‌کار می‌رود. تجربه کشورهایمانند آمریکا، ژاپن، آلمان و کره جنوبی نشان می‌دهد که اجرای مهندسی ارزش در پروژه‌های ملی موجب صرفه‌جویی مالی و بهبود عملکرد شده است [۱۴]. مهندسی ارزش که نخستین بار توسط مایلز در دهه ۱۹۴۰ مطرح شد، بر تحلیل کارکردها و حذف هزینه‌های غیرضروری تأکید دارد و امروزه در استانداردهای PMI و ISO به‌عنوان ابزار کلیدی بهینه‌سازی شناخته می‌شود [۱۵].

مهندسی ارزش رویکردی پیشگیرانه و تدریجی برای بهینه‌سازی طراحی و هزینه است، در حالی که مهندسی مجدد ماهیتی

انقلابی داشته و زمانی به کار می‌رود که فرآیندهای موجود ناکارآمد شده‌اند [۱۶]. مدیریت کیفیت جامع نیز رویکردی فرهنگ‌محور و بلندمدت است، درحالی‌که مهندسی ارزش ابزاری پروژه‌محور و تحلیلی برای بهبود نسبت عملکرد به هزینه محسوب می‌شود [۱]. شش سیگما بر تحلیل آماری و کاهش خطا تمرکز دارد، اما مهندسی ارزش بر تحلیل کارکردی و خلاقیت گروهی تکیه می‌کند؛ هرچند ترکیب این دو می‌تواند نتایج مؤثری ایجاد کند.

مهندسی ارزش با شناسایی کارکردهای اصلی و حذف هزینه‌های غیرضروری، به بهینه‌سازی طراحی کمک می‌کند [۸] و با ابزارهایی مانند FAST و تحلیل هزینه-عملکرد، هزینه‌های پنهان و طراحی‌های ناکارآمد را آشکار می‌سازد [۱]. این رویکرد موجب افزایش بهره‌وری، کیفیت، کاهش زمان اجرا و ارتقای رضایت ذی‌نفعان می‌شود و با تقویت خلاقیت و کار تیمی، تاب‌آوری سازمانی را افزایش می‌دهد. همچنین مهندسی ارزش با کاهش مصرف انرژی، ضایعات و استفاده بهینه از مصالح، به توسعه پایدار کمک می‌کند.

موانع اصلی اجرای مهندسی ارزش شامل مقاومت کارکنان، محدودیت زمانی، کمبود نیروی متخصص و برداشتهای نادرست از این رویکرد است [۴]. نبود داده‌های دقیق نیز تحلیل‌ها را با ابهام مواجه می‌کند. ارکان اصلی مهندسی ارزش شامل تحلیل عملکرد با ابزار FAST، تحلیل هزینه، خلاقیت با تکنیک‌هایی مانند اسکمپر و طوفان فکری، و تحلیل سیستماتیک با ابزارهایی مانند ماتریس تصمیم‌گیری و روش‌های چندمعیاره است [۱۷].

مدیریت ریسک در صنایع به شناسایی و کنترل رویدادهای ناخواسته‌ای می‌پردازد که می‌توانند عملکرد، سودآوری و پایداری سازمان را تهدید کنند؛ این ریسک‌ها از عوامل اقتصادی، فنی، عملیاتی، محیط‌زیستی، اجتماعی یا تهدیدات نوظهوری مانند حملات سایبری ناشی می‌شوند. مدیریت ریسک با فرایندی ساختاریافته، خطرات را شناسایی کرده، اثرات آن‌ها را می‌سنجد و راهبردهای کنترلی ارائه می‌دهد و از طریق ابزارهای نظارتی و آموزش کارکنان به کاهش آسیب‌ها کمک می‌کند [۱۸].

اهمیت مدیریت ریسک در محیط صنعتی امروز ناشی از پیچیدگی فناوری‌ها و زنجیره‌های تأمین است؛ ناتوانی در مدیریت ریسک می‌تواند به کاهش اعتبار، ازدست‌رفتن منابع یا توقف کسب‌وکار منجر شود، درحالی‌که مدیریت مؤثر ریسک موجب افزایش اعتماد ذی‌نفعان و ثبات سازمانی می‌شود [۱۹].

مدیریت ریسک علاوه بر کاهش تهدیدها، فرصتی برای شناسایی مسیرهای نوآوری و رشد پایدار فراهم می‌کند. این رویکرد با تقویت توان سازگاری سازمان در محیط‌های رقابتی و متغیر، به خلق مزیت رقابتی و تضمین جایگاه بلندمدت سازمان کمک می‌کند و به همین دلیل یکی از عناصر بنیادین استراتژی‌های موفق صنعتی محسوب می‌شود [۲۰].

مدیریت ریسک شامل چهار بعد شناسایی، ارزیابی، پاسخ و نظارت است که یک چرخه پویا برای کنترل خطرات سازمانی ایجاد می‌کنند. در مرحله شناسایی، ریسک‌های اقتصادی، محیطی، فناورانه و عملیاتی با ابزارهایی مانند طوفان فکری، تحلیل سوابق و مصاحبه شناسایی می‌شوند [۲۱]. در مرحله ارزیابی، این ریسک‌ها با روش‌هایی مانند ماتریس ریسک، FMEA و مدل‌های شبیه‌سازی از نظر احتمال و شدت اثر تحلیل و اولویت‌بندی می‌شوند تا منابع سازمان به مهم‌ترین تهدیدها اختصاص یابد [۲۲].

مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک رویکردی جامع برای بهینه‌سازی منابع، کاهش هزینه و کنترل مخاطرات است و توازن میان ارزش اقتصادی و سطح ریسک را تضمین می‌کند [۲۳]. این رویکرد با تحلیل هم‌زمان ارزش و ریسک، انتخاب مصالح و روش‌های ساخت را بر اساس ایمنی، دوام و ارزش بهبود می‌دهد [۲۴] و با ابزارهایی مانند شبیه‌سازی و تحلیل چندمعیاره، نوآوری و رقابت‌پذیری را تقویت می‌کند.

در مدیریت ریسک، راهبردهای پاسخ شامل کاهش، حذف، انتقال یا پذیرش ریسک است [۲۵] و نظارت مستمر با سیستم‌های اطلاعاتی، اثربخشی اقدامات را تضمین می‌کند [۲۶].

ابعاد کلیدی این رویکرد شامل مدیریت انرژی، مدیریت پسماند و اصول HSE است. مدیریت انرژی با بهینه‌سازی مصرف، کاهش آلاینده‌ها و توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر به کاهش هزینه و افزایش تاب‌آوری کمک می‌کند. اصول HSE نیز با تمرکز بر سلامت کارکنان، ایمنی فرآیندها و حفاظت محیط‌زیست، موجب کاهش حوادث، افزایش بهره‌وری و حرکت به سوی توسعه پایدار

می‌شود [۲۷-۳۰].

۱-۲- پیشینه پژوهش

پیشینه پژوهش در حوزه مهندسی ارزش، مدیریت ریسک و تلفیق این دو رویکرد نشان می‌دهد که طی سال‌های اخیر توجه پژوهشگران به سمت توسعه مدل‌های یکپارچه، تحلیل‌های چندمعیاره و کاربرد روش‌های نوین تصمیم‌گیری در پروژه‌های عمرانی و صنایع سنگین افزایش یافته است. مطالعات اولیه بیشتر بر ارزیابی روش‌های تلفیقی و انتخاب گزینه‌های بهینه متمرکز بوده‌اند، در حالی که پژوهش‌های جدیدتر به سمت توسعه چارچوب‌های جامع، تحلیل‌های فازی، مدل‌سازی شبکه‌ای و کاربرد این رویکردها در صنایع پیچیده‌ای مانند کشتی‌سازی حرکت کرده‌اند. همانطور که در جدول ۱ (خلاصه پیشینه تحقیق) نشان داده شده است، بررسی روند زمانی این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ادبیات علمی به تدریج از تحلیل‌های پایه‌ای به سمت مدل‌های پیشرفته، داده‌محور و مبتنی بر پایداری سوق یافته است.

جدول ۱ خلاصه‌ای از مطالعات پیشین در زمینه مهندسی ارزش و مدیریت ریسک

جنبه مورد بررسی	مطالعات قبلی (مثال‌ها و روند کلی)	شکاف تحقیقاتی شناسایی شده	چگونگی پر کردن شکاف توسط پژوهش (VENRA چارچوب) حاضر
ادغام VENRA Risk و Management	ادغام VENRA با ابزارهایی مانند QFD, Risk Management و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره [۴]. ترکیب FAST و FMEA در صنعت خودرو [۴].	در صنعت دریایی و کشتی‌سازی، عمدتاً به صورت نظری باقی‌مانده و چارچوب عملیاتی مشخصی ارائه نشده است. نیاز به مدل‌های جامع که معیارهای فنی، ایمنی و زیست‌محیطی را یکپارچه کنند، احساس می‌شود [۴]. عدم وجود چارچوب مشخص برای کشتی‌سازی ایران با رویکرد آلاینده‌گی صفر.	ارائه چارچوب VENRA به عنوان مدلی یکپارچه برای ادغام VENRA و Risk Management با استفاده از منطق فازی. توسعه یک مدل عملیاتی و جامع که به طور خاص برای صنایع مادر مانند کشتی‌سازی طراحی شده است.
معیارهای زیست‌محیطی در VENRA	تمرکز اصلی VENRA بر بهینه‌سازی نسبت عملکرد به هزینه بوده است.	عدم لحاظ شدن معیارهای زیست‌محیطی و پایداری (مانند کاهش آلاینده‌گی، مصرف انرژی، مدیریت پسماند) به صورت رسمی و ساختار یافته در چارچوب‌های سنتی VENRA.	بسط مفهوم "کارکرد" در VE برای گنجاندن معیارهای زیست‌محیطی و پایداری در کنار معیارهای اقتصادی و فنی. تبدیل VE از ابزار صرفاً اقتصادی به استراتژی فعال در راستای اهداف زیست‌محیطی.
رویکرد آلاینده‌گی صفر	تمرکز بر فناوری‌های پاک، سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی و تجربیات موفق بین‌المللی (۱، ۳، ۱۰، ۳۶). اشاره به چالش‌های فنی، اقتصادی و سازمانی گذار به آلاینده‌گی صفر [۲۸].	فقدان چارچوب‌های یکپارچه مدیریتی و تصمیم‌گیری که به طور خاص VENRA و Risk Management را با هدف گذار به سمت آلاینده‌گی صفر در صنایع مادر ادغام کنند. نیاز به مدلی که هم جنبه‌های فنی و ریسک را پوشش دهد و هم مستقیماً به اهداف آلاینده‌گی صفر مرتبط باشد.	چارچوب VENRA به طور صریح مهندسی ارزش را در خدمت اهداف آلاینده‌گی صفر قرار می‌دهد. ارائه یک رویکرد تصمیم‌گیری مبتنی بر آلاینده‌گی صفر که معیارهای VENRA و Risk Management را به صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد.
تصمیم‌گیری فازی	استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و فازی در برخی مطالعات (مانند [۴] که به طور ضمنی به تصمیم‌گیری اشاره دارد، هر چند مستقیماً فازی نیست).	عدم وجود یک مدل تصمیم‌گیری یکپارچه و منسجم که بتواند ابهامات و عدم قطعیت‌های ذاتی در ارزیابی معیارهای متعدد (فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی، ریسک) را به شیوه‌ای کارآمد مدیریت کند.	استفاده از منطق فازی در چارچوب VENRA برای مدیریت ابهامات و عدم قطعیت‌ها در ارزیابی و اولویت‌بندی معیارها و ریسک‌ها، که منجر به تصمیم‌گیری دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر می‌شود.
کاربرد در صنعت کشتی‌سازی ایران	فقدان مطالعات بومی و چارچوب‌های عملیاتی متناسب با شرایط خاص صنعت کشتی‌سازی ایران.	عدم وجود مدلی که بتواند به طور خاص برای چالش‌ها و الزامات صنعت کشتی‌سازی ایران، با در نظر گرفتن رویکرد آلاینده‌گی صفر، بهینه‌سازی ارزش و مدیریت ریسک را ارائه دهد.	تمرکز و هدف‌گذاری چارچوب VENRA بر ارائه یک الگوی علمی و کاربردی برای تصمیم‌گیری پایدار در صنعت کشتی‌سازی ایران.

جدول ۱ خلاصه‌ای از مطالعات کلیدی انجام شده در زمینه مهندسی ارزش (VE) و مدیریت ریسک (RM) را ارائه می‌دهد. این جدول، رویکردهای اصلی، روش‌شناسی‌های به‌کاررفته، حوزه‌های کاربردی و یافته‌های کلیدی پژوهش‌های مرتبط را به تفکیک نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ادبیات پژوهشی به تدریج به سمت مدل‌های یکپارچه و پیچیده‌تر، به‌ویژه در صنایع سنگین و پروژه‌های عمرانی، سوق یافته است. در ادامه، به بررسی برخی از این مطالعات برجسته به‌طور جزئی‌تر پرداخته می‌شود:

نوروزی و همکاران [۳۴] با ترکیب تکنیک AHP و رویکرد تلفیقی مدیریت ریسک-مهندسی ارزش، روش بهینه اجرای بدنه سد کوجان را بررسی کردند. نتایج سه سناریوی مختلف نشان داد روش تلفیقی عملکردی مشابه مدل‌های چندمعیاره دارد، اما تأثیر ریسک و هزینه در رتبه‌بندی گزینه‌ها متفاوت است.

نوحه‌خوان و همکاران [۱۶] نقش مهندسی ارزش و مدیریت ریسک را در موفقیت پروژه‌های پل‌سازی تحلیل کردند. یافته‌ها نشان داد ریسک‌های داخلی و خارجی در فرآیند مهندسی ارزش تشدید می‌شوند، اما با تلفیق این دو رویکرد قابل کنترل هستند. ریسک‌های خارجی شامل عوامل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی، حقوقی، طبیعی و قراردادی بودند.

واحدی و همکاران [۲۱] تلفیق مهندسی ارزش و مدیریت ریسک را در پروژه‌های عمرانی بررسی کردند. نتایج نشان داد کاهش هزینه‌ها در مهندسی ارزش می‌تواند ریسک‌ها را افزایش دهد و به‌کارگیری هم‌زمان و سیستماتیک این دو رویکرد برای موفقیت پروژه ضروری است. همچنین یک نمونه عملی از تلفیق این دو روش ارائه شد.

سلطانی و همکاران [۲۲] با رویکرد ترکیبی کیفی-کمی، مدل روابط سیستمی ارتقای ارزش در پروژه‌های ساخت‌وساز را از منظر توسعه پایدار توسعه دادند. نتایج حاصل از فراترکیب، دلفی فازی و تحلیل عاملی تأییدی نشان داد کیفیت راهبری ارزش، ارتباطات مؤثر، مدیریت دانش و هماهنگی زنجیره تأمین از عوامل کلیدی بهبود عملکرد پروژه‌ها هستند.

نژاد حیدری و همکاران [۳۵] با رویکرد کتابخانه‌ای و تحلیل محتوا، ضرورت استفاده از مهندسی ارزش در پروژه‌های بزرگ صنعتی و عمرانی را بررسی کردند. نتایج نشان داد مهندسی ارزش به‌عنوان یک متدولوژی کارکردگرا موجب صرفه‌جویی مالی، ارتقای کیفیت و افزایش ارزش سرمایه‌گذاری می‌شود.

آسدی و همکاران [۸] با استفاده از شبکه بیزی و مدل Noisy-OR، ریسک تأخیر در پروژه‌های کشتی‌سازی را تحلیل کردند. نتایج نشان داد احتمال تأخیر پروژه ۰.۶۷۷۶ است و اقدامات کاهش پیچیده بیشترین تأثیر را در کاهش این احتمال دارند. این مدل امکان ارزیابی دقیق ریسک‌های مرتبط با طراحی، تهیه مواد و فرآیندهای تولید را فراهم کرد.

بیهاکی و همکاران [۷] چارچوب مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک (VENRA) را با ترکیب DEMATEL فازی و AHP برای صنعت کشتی‌سازی ارائه کردند. نتایج نشان داد مدیریت پسماند اثرگذارترین معیار و HSE حیاتی‌ترین عامل است، درحالی‌که انرژی سبز هنوز نقش محدودی دارد.

فیتزریادی و همکاران [۳] با هدف ارتقای پایداری در کشتی‌سازی سنتی، ادغام نقشه‌برداری جریان ارزش (VSM) و شاخص‌های پایداری را بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد این رویکرد یکپارچه با مشارکت ذی‌نفعان و مشاهدات میدانی، می‌تواند به بهبود مستمر فرآیند تولید و کاهش ضایعات در کارخانه‌های کشتی‌سازی سنتی کمک کند.

مهندسی ارزش یکپارچه رویکردی سیستماتیک برای بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌ها بدون افت کیفیت است که با مشارکت ذی‌نفعان و تحلیل دقیق عملکرد اجرا می‌شود. ارزیابی ریسک نیز با شناسایی، تحلیل و اولویت‌بندی خطرات، امکان پیشگیری از خسارات و افزایش اطمینان در تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند. تلفیق این دو رویکرد موجب بهینه‌سازی منابع، ارتقای ایمنی و افزایش کارایی پروژه‌ها می‌شود [۱۳].

نقش HSE در این چارچوب حیاتی است، زیرا اطلاعات دقیق سلامت، ایمنی و محیط‌زیست به شناسایی خطرات پنهان، تحلیل هزینه‌های ناشی از حوادث و انتخاب گزینه‌های مهندسی ایمن و پایدار کمک می‌کند. مشارکت فعال واحد HSE موجب افزایش پایداری، انطباق با مقررات و کاهش ریسک‌های ناگهانی در مراحل طراحی و اجرا می‌شود. وجود دستورالعمل‌های مدیریت

پسماند نیز در مهندسی ارزش اهمیت دارد، زیرا با کاهش هزینه‌های پنهان ناشی از آلودگی و حوادث، بهره‌وری پروژه را افزایش داده و انتخاب گزینه‌های اقتصادی و پایدار را تسهیل می‌کند. این دستورات عمل‌ها موجب ارتقای ایمنی، کاهش اتلاف منابع و افزایش انطباق با استانداردهای زیست‌محیطی می‌شوند.

مدیریت ریسک در این چارچوب به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا گزینه‌هایی را انتخاب کنند که علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، ریسک‌های فنی، ایمنی و زیست‌محیطی را نیز کاهش دهند. این تلفیق موجب افزایش پیش‌بینی‌پذیری و ایجاد تعادل میان ارزش‌آفرینی و ریسک‌پذیری آگاهانه می‌شود [۹].

مدیریت انرژی نیز با تحلیل و بهینه‌سازی مصرف انرژی، به کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و بهبود عملکرد زیست‌محیطی پروژه کمک می‌کند. مهندسی ارزش با در نظر گرفتن شاخص‌های انرژی، تصمیم‌گیری‌ها را هوشمندانه‌تر و پایدارتر می‌سازد [۳۶].

در نهایت، پیشگیری از حوادث در چارچوب مهندسی ارزش با شناسایی خطرات بالقوه و انتخاب راهکارهای ایمن و اقتصادی، موجب افزایش ایمنی و کاهش خسارات می‌شود. این رویکرد تصمیم‌گیری را از تمرکز صرف بر هزینه به سمت توجه هم‌زمان به ملاحظات انسانی و محیطی هدایت می‌کند [۳۷].

مدیریت ریسک به سمت مدل‌های یکپارچه، داده‌محور و مبتنی بر پایداری حرکت کرده است. مطالعات اولیه بیشتر بر انتخاب گزینه‌های بهینه و تحلیل‌های چندمعیاره تمرکز داشتند، اما پژوهش‌های جدیدتر به توسعه چارچوب‌های ترکیبی مانند VENRA، مدل‌های فازی، شبکه‌های بیزی و روش‌های MCDM پرداخته‌اند.

همچنین، روند پژوهش‌ها نشان می‌دهد که نقش HSE، مدیریت انرژی، مدیریت پسماند و تحلیل‌های زیست‌محیطی به تدریج در چارچوب مهندسی ارزش پررنگ‌تر شده و پژوهشگران به اهمیت ابعاد پایداری، ایمنی و محیط‌زیست در تصمیم‌گیری‌های مهندسی پی برده‌اند.

به‌طور کلی، شکاف پژوهشی موجود در این حوزه به نیاز برای مدل‌های جامع‌تر، قابل‌پیاده‌سازی در صنایع مختلف و مبتنی بر داده‌های واقعی اشاره دارد؛ مدل‌هایی که بتوانند ارزش، ریسک، انرژی، HSE و پایداری را به‌صورت هم‌زمان و یکپارچه تحلیل کنند. این شکاف، ضرورت انجام پژوهش‌های جدید در زمینه توسعه چارچوب‌های کاربردی و قابل‌استفاده در پروژه‌های صنعتی را برجسته می‌سازد.

۳- روش پژوهش

در این پژوهش از رویکرد ترکیبی AHP-DEMATEL فازی برای تحلیل معیارهای چارچوب VENRA در مسیر حرکت به سمت آلاینده‌گی صفر استفاده شده است. DEMATEL روابط اثرگذاری و شدت تأثیر معیارها را مشخص می‌کند و با روش AHP وزن و اولویت نسبی آن‌ها را تعیین می‌نماید؛ ترکیب این دو روش تصویری جامع از اهمیت و تعامل معیارها ارائه می‌دهد.

این تحقیق کاربردی و از نظر روش توصیفی-پیمایشی است و داده‌ها از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و پرسشنامه گردآوری شده‌اند. معیارهای اصلی شامل HSE، مدیریت پسماند، مدیریت ریسک، مدیریت انرژی و پیشگیری از حوادث هستند که روابط آن‌ها با DEMATEL و اولویت آن‌ها با AHP تعیین شده است.



شکل ۱ الگوریتم اجرایی پژوهش

گام نخست) شناسایی مهم‌ترین معیارها و زیرمعیارهای تحقیق (جدول ۲)

جدول ۲ معیارهای اصلی و فرعی چارچوب VENRA

منابع	شاخص‌ها	مفهوم
بایهون و همکاران (۲۰۲۴)، بیهاکی و همکاران (۲۰۲۴)؛ بنسون و همکاران (۲۰۲۴)	رعایت استانداردهای ایمنی در محیط کار استفاده از تجهیزات حفاظت فردی در محل‌های کاری تعداد دوره‌های آموزشی HSE برگزار شده برای کارکنان	HSE اصول
رانگ و همکاران (۲۰۲۴)، بیهاکی و همکاران (۲۰۲۳)	تفکیک پسماند در مبدأ میزان بازیافت پسماندهای تولیدی در سازمان درصد پسماندهای دفن شده به روش‌های استاندارد و بهداشتی استفاده از فناوری‌های پاک برای کاهش حجم پسماندها	مدیریت پسماند
بیهاکی و همکاران (۲۰۲۳)؛ لو و همکاران (۲۰۲۵)، کورای (۲۰۲۳)	ارزیابی‌های ریسک انجام شده برای پروژه‌ها و فرآیندها درصد ریسک‌های شناسایی شده که اقدامات کنترلی برای آن‌ها انجام شده است تعداد برنامه‌های کاهش ریسک و موفقیت آن‌ها در پیشگیری از حوادث	مدیریت ریسک
پان و همکاران (۲۰۲۵)، فیتربادی و همکاران (۲۰۲۵)، بیهاکی و همکاران (۲۰۲۴)	کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و عملیاتی استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در سازمان سیستم‌های نظارت و کنترل انرژی میزان بهره‌وری انرژی در تجهیزات و فرآیندهای مختلف سازمان	مدیریت انرژی
بیهاکی و همکاران (۲۰۲۴)، وانگ و همکاران (۲۰۲۵)	آموزش ایمنی و پیشگیری از حوادث برای کارکنان میزان ارزیابی‌های ریسک شغلی انجام شده در محل‌های کاری تعداد گزارش‌های حوادث و اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه پس از وقوع حوادث	پیشگیری از حوادث

این پژوهش با رویکرد ترکیبی AHP-DEMATEL طراحی شده است. ابتدا DEMATEL برای شناسایی روابط اثرگذاری و میزان تأثیرگذاری معیارهای اصلی به کاررفته و سپس AHP برای اولویت‌بندی و تعیین وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها استفاده شده است. این ترکیب امکان تحلیل هم‌زمان اهمیت نسبی و روابط متقابل معیارها را فراهم می‌کند.

جامعه آماری شامل ۲۰ نفر از خبرگان مهندسی ارزش، مدیریت ریسک و حوزه‌های زیست‌محیطی است که با نمونه‌گیری هدفمند و گلوله‌برفی انتخاب شده‌اند. داده‌ها از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و پرسشنامه‌های میدانی گردآوری شده‌اند. پرسشنامه مقایسه زوجی با مقیاس ۹ درجه ساعتی برای اجرای مدل AHP استفاده شده است.

جدول ۳ ارزش‌گذاری شاخص‌ها نسبت به هم، مقیاس نه درجه ساعتی (۱۹۸۰)

ارزش	معادل فازی	مقایسه نسبت به z
۱	(۱, ۱, ۱)	ترجیح یکسان
۳	(۱, ۲, ۳)	کمی مرجح
۵	(۲, ۳, ۴)	خیلی مرجح
۷	(۳, ۴, ۵)	خیلی زیاد مرجح
۹	(۴, ۵, ۶)	کاملاً مرجح
۶-۸-۴-۲	(۵, ۶, ۷)	بینابین

پرسشنامه شماره ۲ مورد استفاده، پرسشنامه DEMATEL بوده است که برای تعیین روابط عناصر مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۴ طیف ارزش‌گذاری تکنیک دیمتل

متغیر زبانی	معادل کمی	مقادیر فازی
بدون تأثیر	۰	(۰, ۰, ۰/۲۵)
تأثیر کم	۱	(۰, ۰/۲۵, ۰/۵)
تأثیر گذار	۲	(۰/۲۵, ۰/۵, ۰/۷۵)
تأثیر زیاد	۳	(۰/۵, ۰/۷۵, ۱)
تأثیر خیلی زیاد	۴	(۰/۷۵, ۱, ۱)

برای ارزیابی روایی پرسشنامه‌های خبرگان نظیر پرسشنامه مقایسات زوجی (AHP) و پرسشنامه دیمتل (DEMATEL)، معمولاً از روایی محتوا^۱ استفاده می‌شود. در این روش، پرسشنامه در اختیار گروهی از خبرگان موضوعی قرار می‌گیرد تا درباره وضوح، تناسب و پوشش سؤالات نسبت به هدف پژوهش اظهار نظر کنند. همچنین، برای تأیید ساختار منطقی و انطباق پرسش‌ها با مفاهیم نظری مدل، از بازخوردهای کیفی خبرگان بهره گرفته می‌شود. در مواردی نیز می‌توان از شاخص CVR (نسبت روایی محتوا) و CVI (شاخص روایی محتوا) برای سنجش کمی روایی استفاده کرد، هرچند در تحقیقات تصمیم‌گیری چندمعیاره، تأکید بیشتر بر قضاوت تخصصی و اعتبار نظری پرسشنامه است.

برای سنجش پایایی این نوع پرسشنامه‌ها، از شاخص‌هایی چون نرخ ناسازگاری (Consistency Ratio) در روش AHP استفاده می‌شود. اگر مقدار این شاخص کمتر از ۰.۱ باشد، پاسخ‌ها از پایایی مناسبی برخوردارند و قابل اعتماد هستند. در مورد پرسشنامه دیمتل نیز برای بررسی پایایی، معمولاً از آزمون ثبات درونی نظرات خبرگان یا بررسی ثبات ماتریس تأثیرات مستقیم بین چند خبره استفاده می‌شود. در صورت استفاده از میانگین نظرات چند خبره، محاسبه ضریب توافق بین خبرگان (مانند ضریب کندال) نیز می‌تواند به عنوان معیاری برای بررسی پایایی و همگرایی نظرات مطرح باشد. استفاده از این روش‌ها موجب اطمینان از انسجام و قابلیت اعتماد به داده‌های به دست آمده از خبرگان می‌شود.

آزمون سازگاری: در تکنیک مقایسه زوجی، تصمیم‌گیرندگان و خبرگانی که دیدگاه خود را اعلام داشته‌اند باید آزمون سازگاری بر روی آن‌ها انجام گیرد. این آزمون بر اساس نسبت‌های سازگاری^۲ (C.R.) ماتریس مقایسه‌ای انجام می‌گیرد.

- محاسبه بردار مجموع وزنی: ماتریس مقایسات زوجی را در بردار ستونی «وزن نسبی» ضرب می‌کنیم. بردار جدیدی را که به این طریق به دست می‌آید، بردار مجموع وزنی^۳ نامیده می‌شود.

- محاسبه بردار سازگاری: عناصر بردار مجموع وزنی را بر بردار اولویت نسبی تقسیم کرده، بردار حاصل بردار سازگاری نامیده می‌شود.

¹ Content Validity

² Consistency ratios, CR

³ Weighted sum Vector=WSV

- بدست آوردن λ_{max} : میانگین عناصر بردار سازگاری λ_{max} را به دست می‌دهد.
- محاسبه شاخص سازگاری^۱ (CI): شاخص سازگاری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

n عبارتست از تعداد گزینه‌های موجود در مساله

بیشتر مواقع به جای محاسبه λ_{max} از روش تقریبی میانگین هندسی استفاده می‌شود.

$$L = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n (AW_i / W_i) \right]$$

- پارامتر L مقدار تقریبی λ_{max} است.
 - بردار AW_i برابر است با حاصل ضرب ماتریس مقایسه زوجی معیارها ضربدر بردار ویژه (اولویت‌ها)
 - بردار W_i نیز همان بردار ویژه یا بردار اولویت معیارها است.
- بنابراین کفایت تا پس از محاسبه AW_i هر یک از درایه‌های این بردار را بر درایه متناظر بردار W_i تقسیم نموده و سپس مقادیر به دست آمده را جمع نمود. با تقسیم عدد حاصل بر تعداد معیارها (n) مقدار L به دست خواهد آمد.
- محاسبه شاخص تصادفی^۲: شاخص تصادفی بودن از جدولی مانند ۵ استخراج می‌شود.

جدول ۵ شاخص تصادفی بودن (RI)

N	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
RI	۰	۰	۰/۵۲	۰/۸۸	۱/۱۰	۱/۲۴	۱/۳۴	۱/۴	۱/۴۴	۱/۴۸	۱/۵۱	۱/۵۳	۱/۵۵	۱/۵۷	۱/۵۸

- محاسبه نسبت سازگاری: نسبت سازگاری از تقسیم شاخص سازگاری بر شاخص تصادفی بدست می‌آید. نسبت سازگاری ۰/۱ یا کمتر سازگاری در مقایسات را بیان می‌کند.

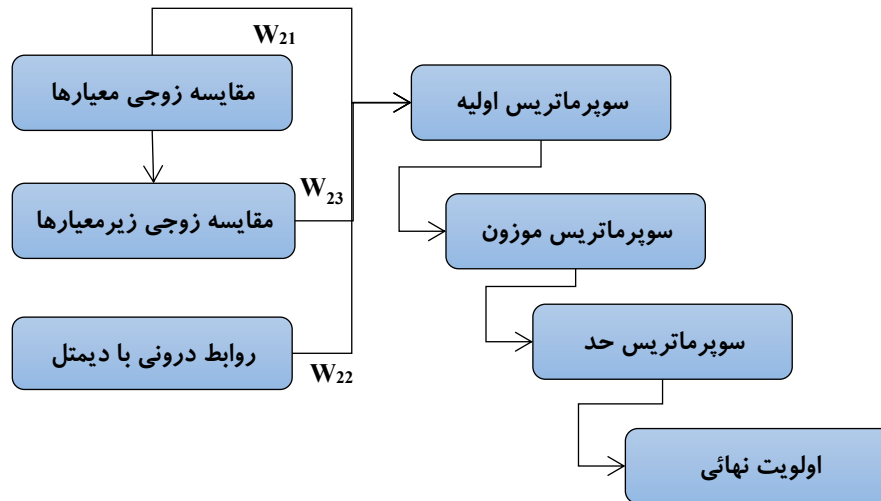
$$CR = CI / RI$$

۴- روش تجزیه و تحلیل اطلاعات

در این پژوهش، جهت تحلیل شاخص‌های مدل از رویکرد ترکیبی DEMATEL-AHP استفاده شده است. در گام نخست، روش DEMATEL به منظور شناسایی روابط اثرگذاری بین معیارها و تعیین میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری هر یک از آن‌ها به کار گرفته شد. سپس، با استفاده از ماتریس مقایسات زوجی که بر اساس روابط و تأثیرگذاری‌های حاصل از DEMATEL شکل گرفته است، وزن نسبی معیارها با بهره‌گیری از چارچوب فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) محاسبه و اولویت‌بندی شد. این رویکرد ترکیبی، امکان تحلیل جامع و هم‌زمان اهمیت نسبی معیارها و همچنین درک روابط متقابل پیچیده میان آن‌ها را فراهم می‌آورد.

¹ Consistency Index = CI

² Random Index = RI



شکل ۲ الگوریتم اجرایی تکنیک DAHP

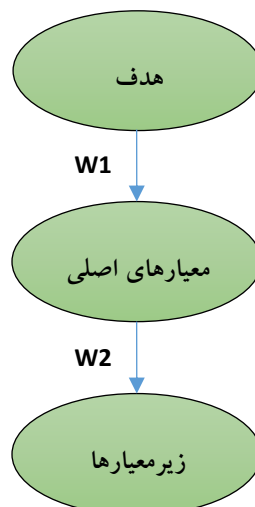
۴-۱- تکنیک دیمتل (DEMATEL)

تکنیک دیمتل روشی چندمعیاره برای شناسایی و تحلیل روابط اثرگذاری و معلولی میان عوامل یک سیستم پیچیده است. این روش با استفاده از نظر خبرگان، شدت تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم معیارها را محاسبه کرده و مقادیر تأثیرگذاری (D) و تأثیرپذیری (R) هر عامل را ارائه می‌دهد. مراحل اصلی آن شامل طراحی پرسشنامه، تشکیل ماتریس روابط مستقیم، نرمال‌سازی و محاسبه ماتریس کل روابط است. دیمتل با نمایش ساختار علی سیستم، عوامل کلیدی و اثرگذار را مشخص می‌کند و در شرایط پیچیده - به‌ویژه در نسخه فازی - دقت تحلیل را افزایش می‌دهد.

۴-۲- فرایند تحلیل سلسله مراتبی

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) نیز برای اولویت‌بندی معیارها و زیرمعیارها استفاده شده است. این روش بر مقایسه‌های زوجی و قضاوت خبرگان استوار است و با محاسبه وزن نسبی عناصر، امکان رتبه‌بندی ساختاریافته معیارها را فراهم می‌سازد (ساعتی، ۲۰۰۴). ترکیب AHP و DEMATEL به پژوهش اجازه می‌دهد هم روابط اثرگذاری میان عوامل شناسایی شود و هم اهمیت نسبی آن‌ها به‌طور دقیق تعیین گردد.

روش انجام فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی براساس الگوی کلی شکل ۲ قابل تشریح است.



شکل ۳ مدل مفهومی تحقیق با رویکرد AHP

در این مدل بردار W_1 نشان‌دهنده وزن معیارهای اصلی بر اساس هدف پژوهش است. به همین ترتیب بردار W_2 نشان‌دهنده وزن هر یک از زیرمعیارها بر اساس معیار اصلی (وزن عناصر هر خوشه) است. بنابراین مدل تحقیق از یک ارتباط سلسله مراتبی برخوردار می‌باشد. اگر روابط درونی معیارها در نظر گرفته نشود از مدل تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده می‌شود.

در هر تحقیق که با تکنیک AHP و فرایند تحلیل سلسله مراتبی صورت می‌گیرد نخست باید معیارهای اصلی مطالعه شناسایی شود. معیارهای اصلی بر اساس ادبیات پژوهش، مطالعات کتابخانه‌ای یا مصاحبه‌های ساخت‌یافته و نیم‌ساخت‌یافته شناسایی می‌گردد. پس از آنکه معیارهای اصلی شناسایی شد در گام نخست از تکنیک AHP بر اساس هدف اصلی تحقیق هر یک از این معیارها به صورت زوجی مقایسه و با محاسبه بردار ویژه تعیین اولویت می‌گردد. وزن معیارهای اصلی بر اساس هدف را با بردار W_1 نمایش می‌دهند. معمولاً معیارهای اصلی خیلی کلی هستند و برای درک بهتر هر معیار تعدادی شاخص یا زیرمعیار توسعه داده می‌شود. در مدل کلاسیک AHP عناصر سطح دوم را زیرمعیارهای مربوط به هر معیار تشکیل می‌دهند. در گام دوم زیرمعیارهای مربوط به هر معیار در خوشه مربوط تعیین اولویت می‌شوند. این مجموعه از زیرمعیارها بر اساس معیارهای اصلی مطالعه مورد بررسی و مقایسه قرار خواهند گرفت. در نهایت مقایسه زوجی زیرمعیارها بر اساس معیارهای اصلی، ماتریس W_2 محاسبه خواهد شد.

جهت محاسبه وزن عناصر هر خوشه از تکنیک میانگین هندسی و روش بردار ویژه استفاده می‌شود. بردار ویژه معادل واژه eigenvalue است و همان اولویت نهائی یک معیار است که وزن نرمال هم گفته می‌شود. وقتی یک ماتریس مقایسه زوجی می‌سازیم میانگین هندسی هر سطر وزن نهائی عنصر آن سطر است. میانگین هندسی هر سطر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_g = \left(\prod_{i=1}^n a_i \right)^{1/n} = \sqrt[n]{a_1 \cdot a_2 \dots a_n}$$

این وزن نرمال نیست برای نرمال‌سازی از تکنیک بردار ویژه (نرمال‌سازی خطی) استفاده می‌شود. وزن هر سطر تقسیم بر کل اوزان می‌شود تا نرمال شود یعنی جمع کل اوزان تمامی معیارها یک شود. اگر میانگین هندسی مقادیر مربوط به مقایسه زوجی هر عنصر با π_i نشان داده شود وزن نرمال هر عنصر با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W_i = \frac{\pi_i}{\sum_{i=1}^n \pi_i}$$

برای تعیین اولویت‌های کلی کافی است تا وزن هر زیرمعیار در وزن معیار اصلی مربوط ضرب شود.

۵- تجزیه و تحلیل داده‌های پژوهش

این بخش به تحلیل داده‌های مربوط به چارچوب سنجش عملکرد مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک (VENRA) با رویکرد دستیابی به آلاینده‌گی صفر اختصاص دارد. در مرحله نخست، داده‌های گردآوری‌شده با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) تحلیل شده‌اند تا وزن نسبی معیارها و زیرمعیارها مشخص شود. این روش امکان درک ساختار سلسله‌مراتبی و شناسایی شاخص‌های کلیدی مؤثر بر دستیابی به آلاینده‌گی صفر را فراهم می‌کند. در ادامه، برای تحلیل روابط اثرگذاری میان عوامل و تعیین میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری آن‌ها، از تکنیک DEMATEL استفاده شده است. این رویکرد ساختار ارتباطات میان معیارها را شفاف کرده و جایگاه هر عامل را در شبکه ارزیابی عملکرد و مدیریت ریسک مشخص می‌سازد.

در این پژوهش، جهت حصول اطمینان از اعتبار و جامعیت یافته‌های حاصل از تحلیل‌های کیفی و کمی، فرایند انتخاب خبرگان با دقت و وسواس ویژه‌ای صورت پذیرفته است. جامعه مورد مطالعه شامل ۲۰ نفر از متخصصان برجسته در حوزه‌های کلیدی مهندسی ارزش، مدیریت ریسک و مباحث زیست‌محیطی گرد هم آمده‌اند. این تعداد خبره، با توجه به پیچیدگی مدل تحلیلی و لزوم پوشش ابعاد مختلف مسئله، به‌عنوان حداقل استاندارد مورد نیاز برای دستیابی به نتایج قابل اتکا در نظر گرفته شده است. کیفیت و اعتبار نتایج تحقیقات مبتنی بر نظرات خبرگان، به‌شدت تحت تأثیر کیفیت، تنوع تخصص‌ها و دیدگاه‌ها و همچنین میزان عاری بودن نظرات از سوگیری‌های احتمالی قرار دارد. بدین منظور، در انتخاب و گردآوری نظرات خبرگان، ملاحظات زیر مدنظر قرار گرفته است:

- تخصص: خبرگان از سه حوزه اصلی مهندسی ارزش، مدیریت ریسک و مباحث زیست‌محیطی انتخاب‌شده‌اند تا طیف جامعی از دانش تخصصی موردنیاز برای تحلیل مدل پوشش داده شود. این تنوع تخصصی تضمین می‌کند که جنبه‌های مختلف مسئله از زوایای گوناگون موردبررسی قرار گیرد.
 - جنسیت: ترکیب جنسیتی شامل ۶۵ درصد مرد و ۳۵ درصد زن، نشان‌دهنده تلاش برای پوشش دیدگاه‌های متنوع جنسیتی در فرآیند ارزیابی است.
 - سطح تجربه (سن و سابقه کاری):
 - سن: ۶۰ درصد خبرگان بالای ۴۵ سال، ۳۰ درصد بین ۳۵ تا ۴۵ سال و ۱۰ درصد کمتر از ۳۵ سال سن دارند. این ترکیب، تلفیقی از تجربه عمیق سال‌ها تخصص عملی و دیدگاه‌های نوآورانه نیروهای جوان‌تر را تضمین می‌کند.
 - سابقه کاری: ۵۵ درصد از مشارکت‌کنندگان بیش از ۲۰ سال سابقه کاری مرتبط و ۴۵ درصد بین ۱۰ تا ۲۰ سال سابقه دارند. این سطح بالای سابقه کاری، اعتبار و عمق قضاوت‌های تخصصی ارائه‌شده در مراحل AHP و DEMATEL را به‌طور قابل توجهی تقویت می‌نماید.
 - سطح تحصیلات: ۶۵ درصد دارای مدرک کارشناسی ارشد و ۳۵ درصد دارای مدرک دکتری هستند، که بیانگر سطح بالای دانش آکادمیک و تخصصی جامعه خبرگان است.
- برای حصول اطمینان از عدم سوگیری و افزایش عینیت قضاوت‌ها، رویکردهای زیر در فرآیند جمع‌آوری نظرات اتخاذ گردیده است:
۱. تعریف شفاف و جامع معیارها: پیش از شروع فرآیند مقایسه، تمامی معیارها و زیرمعیارهای مدل به همراه تعاریف عملیاتی آن‌ها به‌صورت دقیق و شفاف برای تمامی خبرگان تشریح گردید تا درک مشترکی از موضوع حاصل شود.
 ۲. استفاده از روش‌های مقایسه‌ای ساختاریافته: بهره‌گیری از ابزارهای استاندارد مقایسات زوجی در چارچوب فرایندهای AHP و DEMATEL، که ماهیت آن نیازمند ارزیابی عینی روابط بین معیارهاست، به‌طور مؤثری به کاهش سوگیری‌های شخصی و ارتقاء ثبات در قضاوت‌ها کمک می‌کند.
 ۳. ارائه دستورالعمل‌های مدون: دستورالعمل‌های مشخص و مدونی برای نحوه ارزیابی، امتیازدهی و قضاوت به خبرگان ارائه شد تا از اتکا به برداشت‌های سلیقه‌ای جلوگیری و فرآیند ارزیابی استانداردسازی گردد.
- در مجموع، ترکیب خبرگان منتخب، که منعکس‌کننده دانش تخصصی عمیق، تجربه گسترده و دیدگاه‌های متنوع است، همراه با رویکردهای نظام‌مند اتخاذشده در فرآیند جمع‌آوری و تحلیل نظرات ایشان، اطمینان می‌دهد که قضاوت‌ها و ارزیابی‌های ارائه‌شده، از اعتبار بالایی برخوردار بوده و یافته‌های پژوهش را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تقویت می‌نماید.

۱-۵- شناسایی شاخص‌های مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک

برای شناسایی شاخص‌های مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک از روایی محتوایی (CVR) استفاده شده است. این شاخص توسط لاوشه^۱ طراحی شده است. جهت محاسبه این شاخص از نظرات کارشناسان متخصص در زمینه محتوای آزمون مورد نظر استفاده می‌شود و با توضیح اهداف آزمون برای آن‌ها و ارائه تعاریف عملیاتی مربوط به محتوای سؤالات به آن‌ها، از آن‌ها خواسته می‌شود تا هریک از سؤالات را بر اساس طیف سه‌بخشی لیکرت «گویه ضروری است»، «گویه مفید است ولی ضروری نیست» و «گویه ضرورتی ندارد» طبقه‌بندی کنند. سپس بر اساس فرمول زیر، نسبت روایی محتوایی محاسبه می‌شود:

$$CVR = \frac{n_e - N/2}{N/2} \quad (1)$$

¹ Lawshe

در این فرمول داریم:

N: تعداد کل متخصصین

Ne: تعداد متخصصینی که گزینه ضروری را انتخاب کرده‌اند.

در این مطالعه جهت اطمینان از درستی شاخص‌های انتخاب‌شده از دیدگاه ۲۰ نفر از خبرگان استفاده‌شده است. بر اساس تعداد متخصصینی که سؤالات را مورد ارزیابی قرار داده‌اند (۲۰ نفر)، حداقل مقدار CVR قابل قبول ۰/۴۲ می‌باشد. سؤالاتی که مقدار CVR محاسبه‌شده برای آن‌ها کمتر از میزان موردنظر با توجه به تعداد متخصصین ارزیابی‌کننده سؤال باشد، باید از آزمون کنار گذاشته شوند به علت اینکه بر اساس شاخص روایی محتوایی، روایی محتوایی قابل قبولی ندارند. نتایج روایی محتوایی شاخص‌ها با استفاده از فرمول لاوشه در جدول زیر ارائه‌شده است. جدول شناسایی شاخص‌های مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک در بخش ضمایم ارائه‌شده است. از آنجاکه مقدار شاخص CVR برای همه شاخص‌ها از ۰/۴۲ بزرگ‌تر به‌دست‌آمده است بنابراین تمامی شاخص‌ها برای رتبه‌بندی نهایی استفاده خواهند شد.

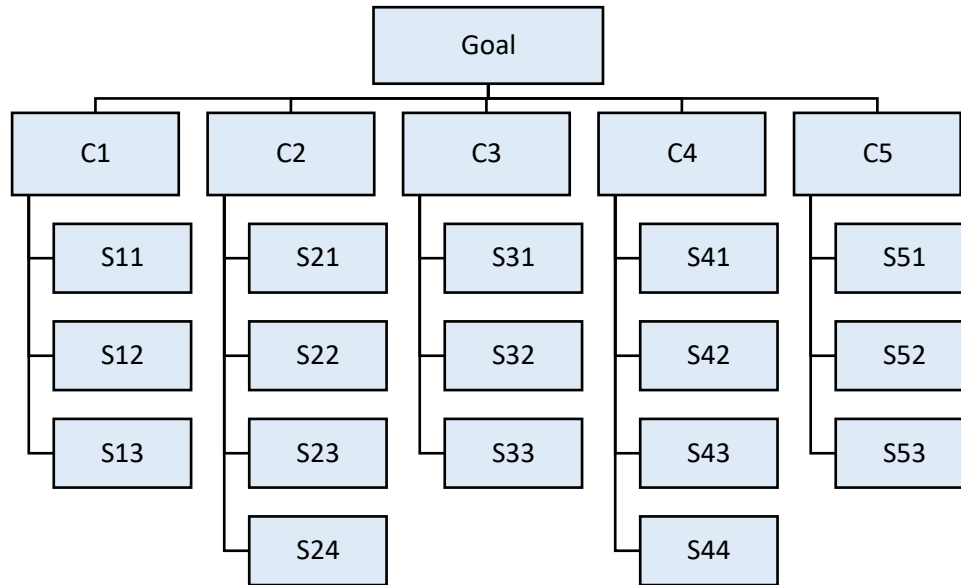
۲-۵- اولویت‌بندی معیارهای مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک

عوامل اصلی مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک عبارتند از: مدیریت ریسک، مدیریت پسماند، اصول اچ.اس.ای، مدیریت انرژی و پیشگیری از حوادث. برای هر یک از این معیارهای اصلی تعدادی زیرمعیار انتخاب شده است. معیارها و زیرمعیارهای شناسایی شده جهت تصمیم‌گیری پیرامون مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک در جدول آمده است. همچنین معیارهای پژوهش با نماد C_i و زیرمعیارهای پژوهش با نماد S_{ij} نامگذاری شده‌اند تا در جریان تحقیق به‌سادگی قابل‌ردیابی و مطالعه باشد.

جدول ۶ شاخص‌های مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک

نماد	معیارها	زیرمعیارها	نماد
S11	مدیریت ریسک	ارزیابی‌های ریسک انجام‌شده برای پروژه‌ها و فرآیندها	C1
S12		ریسک‌های شناسایی‌شده دارای اقدامات کنترلی	
S13		تعداد برنامه‌های کاهش ریسک	
S21	مدیریت پسماند	تفکیک پسماند در مبدأ	C2
S22		میزان بازیافت پسماند تولیدی	
S23		دفن پسماند به روش‌های استاندارد و بهداشتی	
S24		استفاده از فناوری‌های پاک برای کاهش حجم پسماندها	
S31	اصول اچ.اس.ای	رعایت استانداردها ایمنی در محیط کار	C3
S32		استفاده از تجهیزات حفاظت فردی در محیط‌های کاری	
S33		تعداد دوره‌های آموزشی HSE برگزارشده برای کارکنان	
S41	مدیریت انرژی	کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و عملیاتی	C4
S42		استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در سازمان	
S43		سیستم‌های نظارت و کنترل انرژی	
S44		میزان بهره‌وری انرژی در تجهیزات و فرایندهای مختلف سازمان	
S51	پیشگیری از حوادث	آموزش ایمنی و پیشگیری از حوادث برای کارکنان	C5
S52		میزان ارزیابی‌های ریسک شغلی	
S53		گزارش‌های حوادث و اقدامات اصلاحی	

برای تعیین وزن معیارها و زیرمعیارهای مدل از تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شده است. الگوی سلسله‌مراتبی مدل با استفاده از تکنیک AHP در شکل ۴ ترسیم شده است.



شکل ۴ الگوی سلسله‌مراتبی مدل تحقیق

۳-۵- تعیین اولویت معیارهای اصلی براساس هدف

برای انجام تحلیل سلسله‌مراتبی نخست معیارهای اصلی بر اساس هدف به صورت زوجی مقایسه شده‌اند. تکنیک AHP یک تکنیک رتبه‌بندی است و رتبه‌بندی در این تکنیک بر اساس مقایسه‌های زوجی صورت می‌گیرد. مقایسه زوجی بسیار ساده است و تمامی عناصر هر خوشه باید به صورت دوجه‌دو مقایسه شوند. بنابراین اگر در یک خوشه n عنصر وجود داشته باشد $\frac{n(n-1)}{2}$ مقایسه صورت خواهد گرفت. چون پنج معیار وجود دارد بنابراین تعداد مقایسه‌های انجام‌شده برابر است با:

$$\frac{n(n-1)}{2} = \frac{5(5-1)}{2} = 10$$

بنابراین ۱۰ مقایسه زوجی از دیدگاه گروهی از خبرگان انجام شده است و با استفاده از تکنیک میانگین هندسی دیدگاه خبرگان تجمیع گردیده است. ماتریس مقایسه زوجی حاصل از تجمیع دیدگاه خبرگان در جدول ارائه شده است.

جدول ۶ ماتریس مقایسه زوجی معیارهای اصلی

مدیریت ریسک	مدیریت پسماند	اصول HSE	مدیریت انرژی	پیشگیری از حوادث
(۱, ۱, ۱)	(۱/۲۵, ۱/۵, ۱/۷۵)	(۱/۲, ۱/۴۵, ۱/۷)	(۲/۷۵, ۳, ۳/۲۵)	(۳, ۳/۲, ۳/۴)
(۰/۵۷, ۰/۶۷, ۰/۸)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۷, ۰/۸, ۰/۹)	(۲, ۲/۲۵, ۲/۵)	(۱/۴, ۱/۵۵, ۱/۷)
(۰/۵۹, ۰/۶۹, ۰/۸۳)	(۱/۱, ۱/۲, ۱/۳)	(۱, ۱, ۱)	(۲, ۲/۲۵, ۲/۵)	(۱/۲۵, ۱/۴, ۱/۵۵)
(۰/۳۱, ۰/۳۳, ۰/۳۶)	(۰/۳۹, ۰/۴۴, ۰/۵)	(۰/۳۸, ۰/۴۴, ۰/۵)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۶, ۰/۶۸, ۰/۷۵)
(۰/۲۹, ۰/۳۱, ۰/۳۴)	(۰/۵۷, ۰/۶۴, ۰/۷۱)	(۰/۶۲, ۰/۷۲, ۰/۸۲)	(۱/۳۵, ۱/۴۶, ۱/۶)	(۱, ۱, ۱)

در این مرحله، برای هر سطر از جدول مقایسات، میانگین هندسی مقادیر محاسبه شده است تا وزن هر معیار مشخص شود. برای مثال، مقدار میانگین هندسی مربوط به مدیریت ریسک برابر ۱/۸۵۵ به دست آمده و برای سایر معیارها به ترتیب ۱/۱۳۳، ۱/۲۱۴، ۰/۵۳۳ و ۰/۷۳۵ است. مجموع این میانگین‌ها ۵/۴۷۰ می‌باشد. با تقسیم هر مقدار میانگین هندسی بر این عدد، وزن نهایی یا همان بردار ویژه هر معیار به دست آمده که در جدول ۷ خلاصه شده است.

جدول ۷ تعیین اولویت معیارهای اصلی

معیار	مدیریت ریسک	مدیریت پسماند	اصول HSE	مدیریت انرژی	پیشگیری از حوادث	میانگین هندسی فازی	بردار ویژه فازی
مدیریت ریسک	(۱, ۱, ۱)	(۱/۲۵, ۱/۵, ۱/۷۵)	(۱/۲, ۱/۴۵, ۱/۷)	(۲/۷۵, ۳/۳/۲۵)	(۳, ۳/۲, ۳/۴)	(۱/۸۵, ۲/۰, ۲/۱۸)	(۰/۳۱, ۰/۳۹, ۰/۴۱)
مدیریت پسماند	(۰/۵۷, ۰/۶۷, ۰/۸۰)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۷, ۰/۸, ۰/۹)	(۲, ۲/۲۵, ۲/۵)	(۱/۴, ۱/۵۵, ۱/۷)	(۱/۱۰, ۱/۱۳, ۱/۱۷)	(۰/۱۸, ۰/۲۰, ۰/۲۲)
اصول HSE	(۰/۵۹, ۰/۶۹, ۰/۸۳)	(۱/۱, ۱/۲, ۱/۳)	(۱, ۱, ۱)	(۲, ۲/۲۵, ۲/۵)	(۱/۲۵, ۱/۴, ۱/۵۵)	(۱/۱۸, ۱/۲۱, ۱/۲۵)	(۰/۲۰, ۰/۲۲, ۰/۲۴)
مدیریت انرژی	(۰/۳۱, ۰/۳۳, ۰/۳۶)	(۰/۳۹, ۰/۴۴, ۰/۵)	(۰/۳۸, ۰/۴۴, ۰/۵)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۶, ۰/۶۸, ۰/۷۵)	(۰/۵۱, ۰/۵۳, ۰/۵۶)	(۰/۰۹, ۰/۰۹, ۰/۱۰)
پیشگیری از حوادث	(۰/۲۹, ۰/۳۱, ۰/۳۴)	(۰/۵۷, ۰/۶۴, ۰/۷۱)	(۰/۶۲, ۰/۷۲, ۰/۸۲)	(۱/۳۵, ۱/۴۶, ۱/۶)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۷۲, ۰/۷۴, ۰/۷۷)	(۰/۱۳, ۰/۱۳, ۰/۱۴)

گام نهایی، فازی زدایی مقادیر است؛ رایج‌ترین روش فازی زدایی معادله $l+m+u/3$ است که بر این اساس خواهیم داشت:

جدول ۸ تعیین اولویت نهایی معیارهای اصلی

معیار	بردار ویژه فازی (l, m, u)	وزن قطعی (فازی زدایی شده)
مدیریت ریسک	(۰/۳۱, ۰/۳۶, ۰/۴۱)	۰/۳۶
اصول HSE	(۰/۲۰, ۰/۲۲, ۰/۲۴)	۰/۲۲
مدیریت پسماند	(۰/۱۸, ۰/۲۰, ۰/۲۲)	۰/۲۰
پیشگیری از حوادث	(۰/۱۳, ۰/۱۳, ۰/۱۴)	۰/۱۳۳
مدیریت انرژی	(۰/۰۹, ۰/۰۹, ۰/۱۰)	۰/۰۹۳

بر اساس بردار ویژه به‌دست‌آمده:

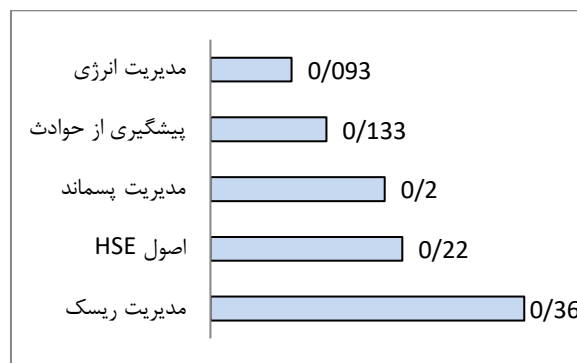
معیار مدیریت ریسک با وزن نرمال شده ۰/۳۶ از بیشترین اولویت برخوردار است.

معیار اصول اچ.اس.ای با وزن ۰/۲۲ در اولویت دوم قرار دارد.

معیار مدیریت پسماند با وزن نرمال ۰/۲۰ در اولویت سوم قرار دارد.

معیار پیشگیری از حوادث با وزن نرمال ۰/۱۳ در اولویت چهارم قرار دارد.

معیار مدیریت انرژی با وزن نرمال ۰/۰۹۳ از کمترین اولویت برخوردار است.



شکل ۵ نمایش گرافیکی اولویت معیارهای اصلی

نرخ ناسازگاری مقایسه‌های انجام شده ۰/۰۰۶ به‌دست‌آمده است که کوچکتر از ۰/۱ می‌باشد و بنابراین می‌توان به مقایسه‌های انجام‌شده اعتماد کرد.

۴-۵- مقایسه و تعیین اولویت زیرمعیارها

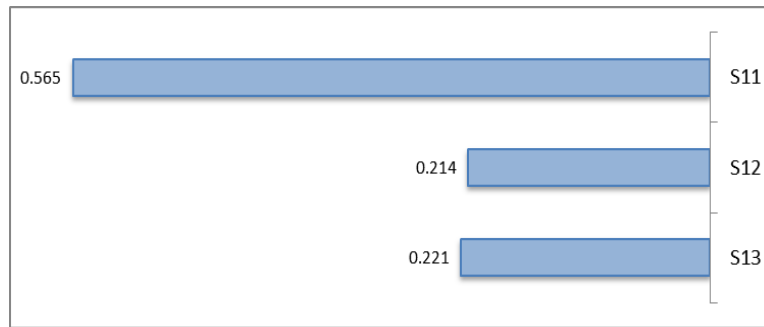
در گام دوم از تکنیک AHP زیرمعیارهای هر معیار به صورت زوجی مقایسه شده‌اند.

۵-۵- تعیین اولویت زیرمعیارهای مدیریت ریسک

زیرمعیارهای مدیریت ریسک عبارتند از: ارزیابی‌های ریسک انجام شده برای پروژه‌ها و فرآیندها، ریسک‌های شناسایی شده دارای اقدامات کنترلی، تعداد برنامه‌های کاهش ریسک. ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارهای مدیریت ریسک در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹ ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارهای مدیریت ریسک

وزن قطعی (فازی زدایی شده)	بردار ویژه فازی	میانگین هندسی فازی	S13	S12	S11	زیر معیارها
۰/۵۶۵	(۰/۵۲, ۰/۵۷, ۰/۶۱)	(۱/۷۵, ۱/۸۹, ۲/۰۵)	(۲, ۲/۲۵, ۲/۵)	(۲/۷۵, ۳, ۳/۲۵)	(۱, ۱, ۱)	S11
۰/۲۱۴	(۰/۱۹, ۰/۲۱, ۰/۲۳)	(۰/۶۶, ۰/۷۲, ۰/۷۸)	(۱, ۱/۱, ۱/۲)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۳۰, ۰/۳۳, ۰/۳۶)	S12
۰/۲۲۱	(۰/۲۰, ۰/۲۲, ۰/۲۴)	(۰/۶۹, ۰/۷۴, ۰/۷۹)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۸۵, ۰/۹, ۰/۹۵)	(۰/۴۰, ۰/۴۵, ۰/۵۰)	S13



شکل ۶ اولویت زیرمعیارهای مدیریت ریسک

بر اساس بردار ویژه به دست آمده:

شاخص ارزیابی‌های ریسک انجام شده برای پروژه‌ها و فرآیندها با وزن ۰/۵۶۵ در اولویت نخست قرار دارد.

شاخص تعداد برنامه‌های کاهش ریسک با وزن ۰/۲۲۱ در اولویت دوم قرار دارد.

شاخص ریسک‌های شناسایی شده دارای اقدامات کنترلی با وزن ۰/۲۱۴ در اولویت سوم قرار دارد.

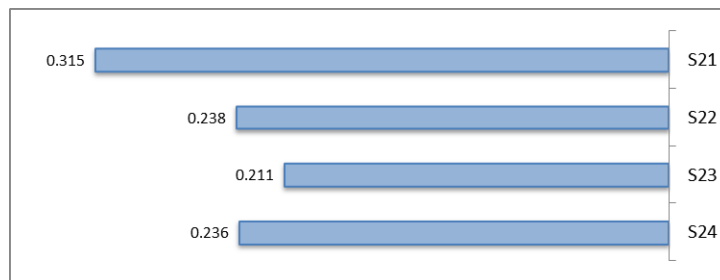
همچنین نرخ ناسازگاری مقایسه‌های انجام شده نیز برابر ۰/۰۱۱ به دست آمده است که چون کوچکتر از ۰/۱ می‌باشد بنابراین می‌توان به مقایسه‌های انجام شده اطمینان کرد.

۶-۵- تعیین اولویت زیرمعیارهای مدیریت پسماند

زیرمعیارهای مدیریت پسماند عبارتند از تفکیک پسماند در مبدأ، میزان بازیافت پسماند تولیدی، دفن پسماند به روش‌های استاندارد و بهداشتی، استفاده از فناوری‌های پاک برای کاهش حجم پسماندها. ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارهای مدیریت پسماند در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۱۰ ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارهای مدیریت پسماند

وزن قطعی (فازی زدایی شده)	بردار ویژه فازی	میانگین هندسی فازی	S24	S23	S22	S21	زیر معیارها
۰/۳۱۵	(۰/۲۶, ۰/۳۲, ۰/۳۵)	(۱/۱۸, ۱/۲۸, ۱/۳۹)	(۱/۲۵, ۱/۳۸, ۱/۵۲)	(۱/۲, ۱/۳۵, ۱/۵)	(۱/۲۵, ۱/۴, ۱/۶)	(۱, ۱, ۱)	S21
۰/۲۳۸	(۰/۲۲, ۰/۲۴, ۰/۲۶)	(۰/۹۰, ۰/۹۶, ۱/۰۳)	(۰/۶۶, ۰/۷۵, ۰/۸۵)	(۱/۴۵, ۱/۶, ۱/۷۵)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۶۲, ۰/۷۱, ۰/۸)	S22
۰/۲۱۱	(۰/۱۹, ۰/۲۱, ۰/۲۳)	(۰/۸۰, ۰/۸۶, ۰/۹۱)	(۱/۰۵, ۱/۱۵, ۱/۲۵)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۵۶, ۰/۶۲, ۰/۶۹)	(۰/۶۴, ۰/۷۴, ۰/۸۵)	S23
۰/۲۳۶	(۰/۲۱, ۰/۲۳, ۰/۲۵)	(۰/۸۹, ۰/۹۵, ۱/۰۱)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۷۸, ۰/۸۶, ۰/۹۵)	(۱/۲, ۱/۳۳, ۱/۴۵)	(۰/۶۶, ۰/۷۲, ۰/۷۹)	S24



شکل ۷ اولویت زیرمعیارهای مدیریت پسماند

بر اساس بردار ویژه به دست آمده:

شاخص تفکیک پسماند در مبدأ با وزن ۰/۳۱۵ در اولویت نخست قرار دارد.

شاخص میزان بازیافت پسماند تولیدی با وزن ۰/۲۳۸ در اولویت دوم قرار دارد.

شاخص استفاده از فناوری‌های پاک برای کاهش حجم پسماندها با وزن ۰/۲۳۶ در اولویت سوم قرار دارد.

شاخص دفن پسماند به روش‌های استاندارد و بهداشتی با وزن ۰/۲۱۱ در اولویت چهارم قرار دارد.

همچنین نرخ ناسازگاری مقایسه‌های انجام شده نیز برابر ۰/۰۲۸ به دست آمده است که چون کوچکتر از ۰/۱ می‌باشد بنابراین

می‌توان به مقایسه‌های انجام شده اطمینان کرد.

۵-۷- تعیین اولویت زیرمعیارهای اصول اچ.اس.ای

زیرمعیارهای اصول اچ.اس.ای عبارتند از: رعایت استانداردها ایمنی در محیط کار، استفاده از تجهیزات حفاظت فردی در

محیط‌های کاری، تعداد دوره‌های آموزشی HSE برگزار شده برای کارکنان. ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارهای مدیریت پسماند

در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱ ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارهای اصول اچ.اس.ای

وزن قطعی	بردار ویژه فازی	میانگین هندسی فازی	S33	S32	S31	زیر معیارها
۰/۳۳۹	(۰/۳۱, ۰/۳۴, ۰/۳)	(۰/۹۸, ۱/۰۳, ۱/۰۹)	(۰/۹, ۰/۹۸, ۱/۰۵)	(۱, ۱/۱, ۱/۲)	(۱, ۱, ۱)	S31
۰/۳۷۷	(۰/۳۵, ۰/۳۸, ۰/۴۱)	(۱/۰۷, ۱/۱۴, ۱/۲۱)	(۱/۴۵, ۱/۶۳, ۱/۸)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۸۳, ۰/۹۱, ۱)	S32
۰/۲۸۳	(۰/۲۶, ۰/۲۸, ۰/۳۰)	(۰/۷۹, ۰/۸۶, ۰/۹۲)	(۱, ۱, ۱)	(۰/۵۵, ۰/۶۱, ۰/۶۸)	(۰/۹۴, ۱/۰۲, ۱/۱۱)	S33



شکل ۸ اولویت زیرمعیارهای اصول HSE

بر اساس بردار ویژه به‌دست‌آمده:

شاخص استفاده از تجهیزات حفاظت فردی در محیط‌های کاری با وزن ۰/۳۷۷ در اولویت نخست قرار دارد.

شاخص رعایت استانداردها ایمنی در محیط کار با وزن ۰/۳۳۹ در اولویت دوم قرار دارد.

شاخص تعداد دوره‌های آموزشی HSE برگزار شده برای کارکنان با وزن ۰/۲۸۳ در اولویت سوم قرار دارد.

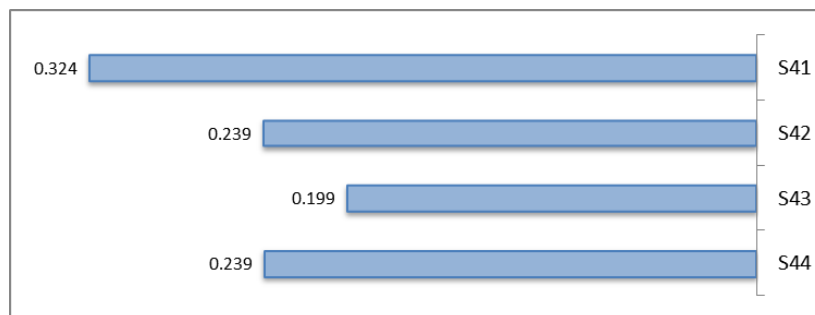
همچنین نرخ ناسازگاری مقایسه‌های انجام‌شده نیز برابر ۰/۰۳۹ به‌دست‌آمده است که چون کوچکتر از ۰/۱ می‌باشد بنابراین می‌توان به مقایسه‌های انجام شده اطمینان کرد.

۵-۸- تعیین اولویت گزینه‌ها بر اساس مدیریت انرژی

زیرمعیارهای مدیریت پسماند عبارتند از: کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و عملیاتی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در سازمان، سیستم‌های نظارت و کنترل انرژی، میزان بهره‌وری انرژی در تجهیزات و فرایندهای مختلف سازمان. ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارهای مدیریت انرژی در جدول ۱۲ ارائه شده است.

جدول ۱۲ ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارهای مدیریت انرژی

وزن قطعی	بردار ویژه فازی	میانگین هندسی فازی	S44	S43	S42	S41	زیر معیارها
۰/۳۲۴	(۰/۳۰، ۰/۳۳، ۰/۳۵)	(۱/۲۰، ۱/۳۲، ۱/۴۲)	(۱/۴۵، ۱/۶، ۱/۷۵)	(۱/۲۵، ۱/۳۸، ۱/۵۲)	(۱/۲، ۱/۳۵، ۱/۵)	(۱، ۱، ۱)	S41
۰/۲۳۹	(۰/۲۲، ۰/۲۴، ۰/۲۶)	(۰/۹۱، ۰/۹۷، ۱/۰۵)	(۰/۶۶، ۰/۷۵، ۰/۸۵)	(۱/۴۵، ۱/۶، ۱/۷۵)	(۱، ۱، ۱)	(۰/۶۶، ۰/۷۴، ۰/۸۳)	S42
۰/۱۹۹	(۰/۱۸، ۰/۲۰، ۰/۲۱)	(۰/۷۵، ۰/۸۱، ۰/۸۷)	(۰/۸۵، ۰/۹۳، ۱/۰۲)	(۱، ۱، ۱)	(۰/۵۵، ۰/۶۲، ۰/۶۹)	(۰/۶۶، ۰/۷۳، ۰/۸۰)	S43
۰/۲۳۹	(۰/۲۲، ۰/۲۴، ۰/۲۶)	(۰/۸۹، ۰/۹۷، ۱/۰۵)	(۱، ۱، ۱)	(۰/۹۵، ۱/۰۷، ۱/۲)	(۱/۲، ۱/۳۳، ۱/۴۵)	(۰/۵۵، ۰/۶۲، ۰/۶۹)	S44



شکل ۹ اولویت زیرمعیارهای مدیریت انرژی

بر اساس بردار ویژه به دست آمده:

شاخص کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و عملیاتی با وزن $0/324$ در اولویت نخست قرار دارد.

شاخص استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در سازمان با وزن $0/239$ در اولویت دوم قرار دارد.

شاخص میزان بهره‌وری انرژی در تجهیزات و فرایندهای مختلف سازمان با وزن $0/239$ در اولویت سوم قرار دارد.

شاخص سیستم‌های نظارت و کنترل انرژی با وزن $0/199$ در اولویت چهارم قرار دارد.

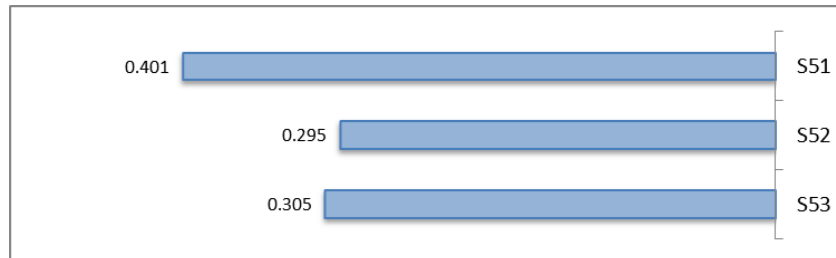
همچنین نرخ ناسازگاری مقایسه‌های انجام شده نیز برابر $0/022$ به دست آمده است که چون کوچکتر از $0/1$ می‌باشد بنابراین می‌توان به مقایسه‌های انجام شده اطمینان کرد.

۹-۵- تعیین اولویت زیرمعیارهای پیشگیری از حوادث

زیرمعیارهای پیشگیری از حوادث عبارتند از: آموزش ایمنی و پیشگیری از حوادث برای کارکنان، میزان ارزیابی‌های ریسک شغلی، گزارش‌های حوادث و اقدامات اصلاحی. ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارهای پیشگیری از حوادث در جدول ۱۳ ارائه شده است.

جدول ۱۳ ماتریس مقایسه زوجی زیرمعیارهای پیشگیری از حوادث

وزن قطعی	بردار ویژه فاز	میانگین هندسی فاز	S53	S52	S51	زیر معیارها
$0/401$	$(0/37, 0/40, 0/43)$	$(1/12, 1/21, 1/30)$	$(1/05, 1/17, 1/3)$	$(1/4, 1/53, 1/65)$	$(1, 1, 1)$	S51
$0/295$	$(0/27, 0/29, 0/31)$	$(0/83, 0/89, 0/95)$	$(0/98, 1/09, 1/2)$	$(1, 1, 1)$	$(0/60, 0/65, 0/71)$	S52
$0/305$	$(0/28, 0/31, 0/33)$	$(0/87, 0/92, 0/98)$	$(1, 1, 1)$	$(0/84, 0/92, 1/01)$	$(0/77, 0/86, 0/94)$	S53



شکل ۱۰ اولویت زیرمعیارهای پیشگیری از حوادث

بر اساس بردار ویژه به دست آمده:

شاخص آموزش ایمنی و پیشگیری از حوادث برای کارکنان با وزن $0/401$ در اولویت نخست قرار دارد.

شاخص گزارش‌های حوادث و اقدامات اصلاحی با وزن $0/305$ در اولویت دوم قرار دارد.

شاخص میزان ارزیابی‌های ریسک شغلی با وزن $0/295$ در اولویت سوم قرار دارد.

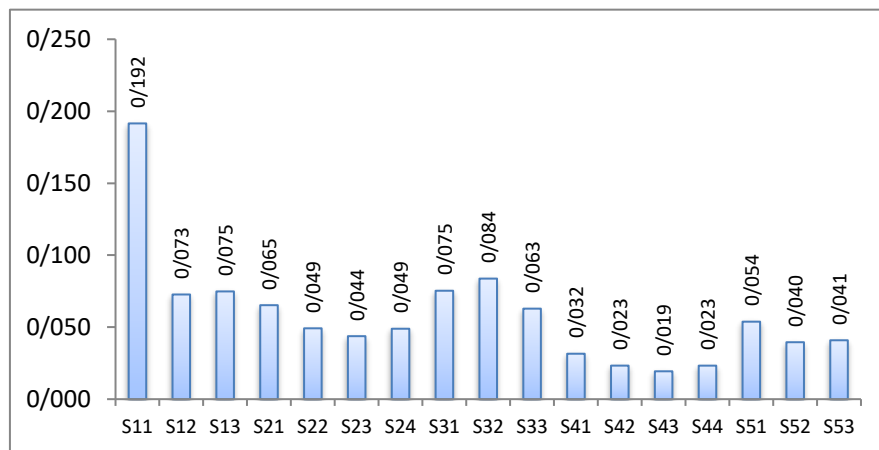
همچنین نرخ ناسازگاری مقایسه‌های انجام شده نیز برابر $0/014$ به دست آمده است که چون کوچکتر از $0/1$ می‌باشد بنابراین می‌توان به مقایسه‌های انجام شده اطمینان کرد.

۱۰-۵- اولویت نهایی شاخص‌ها با تکنیک AHP

برای تعیین اولویت نهایی شاخص‌های با تکنیک AHP کافیست وزن شاخص‌ها بر اساس هر معیار (W_2) در وزن معیارهای اصلی (W_1) ضرب شود. با در دست داشتن وزن هر یک از معیارهای اصلی (W_1) و زیرمعیارها (W_2) وزن هر یک از شاخص‌ها محاسبه می‌شود. نتایج محاسبه انجام شده و اوزان مربوط به شاخص‌های در جدول زیر آمده است:

جدول ۱۴ تعیین اولویت نهایی شاخص‌ها با تکنیک AHP

رتبه	وزن نهایی	وزن اولیه	زیر معیارها	زیرمعیارها	وزن	معیارها
۱	۰.۱۹۲	۰.۵۶۵	S11	ارزیابی‌های ریسک انجام‌شده برای پروژه‌ها و فرآیندها	۰.۳۳۹	مدیریت ریسک
۵	۰.۰۷۳	۰.۲۱۴	S12	ریسک‌های شناسایی‌شده دارای اقدامات کنترلی		
۴	۰.۰۷۵	۰.۲۲۱	S13	تعداد برنامه‌های کاهش ریسک		
۶	۰.۰۶۵	۰.۳۱۵	S21	تفکیک پسماند در مبدأ	۰.۲۰۷	مدیریت پسماند
۹	۰.۰۴۹	۰.۲۳۸	S22	میزان بازیافت پسماند تولیدی		
۱۱	۰.۰۴۴	۰.۲۱۱	S23	دفن پسماند به روش‌های استاندارد و بهداشتی		
۱۰	۰.۰۴۹	۰.۲۳۶	S24	استفاده از فناوری‌های پاک برای کاهش حجم پسماندها		
۳	۰.۰۷۵	۰.۳۳۹	S31	رعایت استانداردها ایمنی در محیط کار	۰.۲۲۲	اصول اچ.اس.ای
۲	۰.۰۸۴	۰.۳۷۷	S32	استفاده از تجهیزات حفاظت فردی در محیط‌های کاری		
۷	۰.۰۶۳	۰.۲۸۳	S33	تعداد دوره‌های آموزشی HSE برگزار شده برای کارکنان		
۱۴	۰.۰۳۲	۰.۳۲۴	S41	کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و عملیاتی		
۱۵	۰.۰۲۳	۰.۲۳۹	S42	استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در سازمان	۰.۰۹۷	مدیریت انرژی
۱۷	۰.۰۱۹	۰.۱۹۹	S43	سیستم‌های نظارت و کنترل انرژی		
۱۶	۰.۰۲۳	۰.۲۳۹	S44	بهره‌وری انرژی در تجهیزات و فرایندهای مختلف سازمان		
۸	۰.۰۵۴	۰.۴۰۱	S51	آموزش ایمنی و پیشگیری از حوادث برای کارکنان	۰.۱۳۴	پیشگیری از حوادث
۱۳	۰.۰۴۰	۰.۲۹۵	S52	میزان ارزیابی‌های ریسک شغلی		
۱۲	۰.۰۴۱	۰.۳۰۵	S53	گزارش‌های حوادث و اقدامات اصلاحی		



شکل ۱۱ تعیین اولویت نهایی شاخص‌ها با تکنیک AHP

بر اساس نتایج مشخص است که شاخص ارزیابی‌های ریسک انجام‌شده برای پروژه‌ها و فرآیندها با وزن ۰/۱۹۲ در اولویت نخست قرار دارد. شاخص استفاده از تجهیزات حفاظت فردی در محیط‌های کاری با وزن ۰/۰۸۴ در اولویت دوم قرار دارد. شاخص رعایت استانداردها ایمنی در محیط کار با وزن ۰/۰۷۵ در اولویت سوم قرار دارد. شاخص تعداد برنامه‌های کاهش ریسک با وزن ۰/۰۷۳ در اولویت چهارم قرار دارد. شاخص ریسک‌های شناسایی‌شده دارای اقدامات کنترلی با وزن ۰/۰۷۳ در اولویت پنجم قرار دارد. شاخص تفکیک پسماند در مبدأ با وزن ۰/۰۶۵ در اولویت ششم قرار دارد. شاخص تعداد دوره‌های آموزشی HSE برگزارشده برای کارکنان با وزن ۰/۰۶۳ در اولویت هفتم قرار دارد. شاخص آموزش ایمنی و پیشگیری از حوادث برای کارکنان با وزن ۰/۰۵۴ در اولویت هشتم قرار دارد. شاخص میزان بازیافت پسماند تولیدی با وزن ۰/۰۴۹ در اولویت نهم قرار دارد. شاخص استفاده از فناوری‌های پاک برای کاهش حجم پسماندها با وزن ۰/۰۴۹ در اولویت دهم قرار دارد.

۱۱-۵- شناسایی روابط معیارهای اصلی

در گام ابتدایی از فرآیند تحلیل DEMATEL، به منظور شناسایی شدت تأثیر معیارها بر یکدیگر، از یک پرسشنامه مبتنی بر مقایسه‌های زوجی استفاده شد. خبرگان با استفاده از مقیاس عددی ۰ تا ۴، میزان تأثیر هر معیار بر سایر معیارها را ارزیابی نمودند؛ به طوری که مقدار ۰ نشان‌دهنده «عدم تأثیر» و مقدار ۴ بیانگر «تأثیر بسیار زیاد» است.

۱۲-۵- محاسبه ماتریس ارتباط مستقیم

در گام نخست از فرآیند تحلیل DEMATEL با رویکرد فازی، به منظور شناسایی شدت تأثیر معیارها بر یکدیگر، از پرسشنامه مقایسه زوجی میان معیارهای اصلی استفاده شد. خبرگان (۲۰ نفر از متخصصان حوزه‌های مرتبط) میزان تأثیر هر معیار بر سایر معیارها را بر اساس طیف لیکرت ۵ سطحی و با استفاده از عبارات زبانی مانند «بدون تأثیر»، «تأثیر کم»، «تأثیر متوسط»، «تأثیر زیاد» و «تأثیر بسیار زیاد» ارزیابی کردند. این ارزیابی‌های زبانی سپس به اعداد فازی مثلثی متناظر تبدیل شده و با میانگین‌گیری فازی، ماتریس ارتباط مستقیم فازی نهایی به دست آمد. این ماتریس مبنای گام‌های بعدی در تحلیل روابط اثرگذاری بین معیارها قرار گرفت. با تجمیع نظرات خبرگان (از طریق میانگین‌گیری)، ماتریس ارتباط مستقیم نهایی به شرح زیر به دست آمد:

جدول ۱۵ ماتریس ارتباط مستقیم تجمیعی بین معیارها (مقادیر فازی)

	C5	C4	C3	C2	C1	
C1	(۲/۵, ۲/۷۵, ۳/۰)	(۱/۲, ۱/۳۵, ۱/۵)	(۱/۹, ۲/۱۰, ۲/۳)	(۲/۶, ۲/۸۵, ۳/۱)	(۰, ۰, ۰)	
C2	(۲/۷, ۲/۹۵, ۳/۲)	(۲/۰, ۲/۲۰, ۲/۴)	(۱/۴, ۱/۶۰, ۱/۸)	(۰, ۰, ۰)	(۱/۷, ۱/۹۵, ۲/۲)	
C3	(۱/۹, ۲/۱۰, ۲/۳)	(۱/۸, ۱/۹۵, ۲/۱)	(۰, ۰, ۰)	(۱/۱, ۱/۲۵, ۱/۴)	(۱/۱, ۱/۳۰, ۱/۵)	
C4	(۲/۸, ۳/۱۰, ۳/۲)	(۰, ۰, ۰)	(۱/۹, ۲/۱۵, ۲/۴)	(۲/۵, ۲/۸۰, ۳/۱)	(۱/۸, ۲/۱۰۵, ۲/۳)	
C5	(۰, ۰, ۰)	(۲/۲, ۲/۴۰, ۲/۶)	(۱/۷, ۱/۹۵, ۲/۱)	(۲/۴, ۲/۶۵, ۲/۹)	(۲/۷, ۲/۹۰, ۳/۱)	

۱۳-۵- محاسبه ماتریس ارتباط مستقیم نرمال

برای نرمال‌سازی ماتریس، ابتدا مجموع‌های ردیفی و ستونی محاسبه شد تا بزرگ‌ترین مقدار مشخص شود. سپس این مقدار برای تبدیل تمامی اعداد به مقیاس نرمال فازی مورداستفاده قرار گرفت. حاصل، ماتریسی نرمال شده بود که شدت ارتباطات مستقیم میان معیارها را در قالب اعداد فازی بیان می‌کرد.

مجموع ردیفی:

$$\sum C1=(1.8+1.3+2.5+2.8,2.0+1.5+2.7+3.0,2.2+1.7+2.9+3.2)=(8.4,9.2,10.0)$$

$$\sum C2=(1.3+1.0+1.7+2.3,1.5+1.2+1.9+2.5,1.7+1.4+2.1+2.7)=(6.3,7.1,7.9)$$

$$\sum C3=(0.9+0.8+1.6+1.9,1.1+1.0+1.8+2.1,1.3+1.2+2.0+2.3)=(5.2,6.0,6.8)$$

$$\sum C4=(2.0+2.3+1.9+2.8,2.2+2.5+2.1+3.0,2.4+2.7+2.3+3.2)=(9.0,9.8,10.6)$$

$$\sum C5=(2.6+2.3+1.6+2.1,2.8+2.5+1.8+2.3,3.0+2.7+2.0+2.5)=(8.6,9.4,10.2)$$

مجموع ستونی:

$$\sum C1=(1.3+0.9+2.0+2.6,1.5+1.1+2.2+2.8,1.7+1.3+2.4+3.0)=(6.8,7.6,8.4)$$

$$\sum C2=(1.8+0.8+2.3+2.3,2.0+1.0+2.5+2.5,2.2+1.2+2.7+2.7)=(7.2,8.0,9.0)$$

$$\sum C3=(1.3+1.0+1.9+1.6,1.5+1.2+2.1+1.8,1.7+1.4+2.3+2.0)=(5.8,6.6,7.4)$$

$$\sum C4=(2.5+1.7+1.6+2.1,2.7+1.9+1.8+2.3,2.9+2.1+2.0+2.5)=(7.9,8.7,9.5)$$

$$\sum C5=(2.8+2.3+1.9+2.8,3.0+2.5+2.1+3.0,3.2+2.7+2.3+3.2)=(9.8,10.6,11.4)$$

بیشینه مجموع ردیفی یا ستونی:

$$\text{Max } (10.0,7.9,6.8,10.6,10.2)=10.6 \text{ مجموع ردیفی}$$

$$\text{Max } (8.4,9.0,7.4,9.5,11.4)=11.4 \text{ مجموع ستونی}$$

بنابراین مقدار نرمال‌سازی برابر است با:

$$\lambda = \frac{1}{11.4} = 0.0877$$

جدول ۱۶ ماتریس نرمال شده (N) معیارهای اصلی

C5	C4	C3	C2	C1	
۰/۲۵۴۷	۰/۱۲۵۰	۰/۱۹۴۵	۰/۲۶۴۹	۰/۰۰۰۰	C1
۰/۲۷۳۵	۰/۲۰۳۷	۰/۱۴۸۲	۰/۰۰۰۰	۰/۱۸۰۰	C2
۰/۱۹۴۵	۰/۱۸۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۱۱۵۸	۰/۱۲۰۴	C3
۰/۳۷۷۸	۰/۰۰۰۰	۰/۱۹۹۱	۰/۳۵۹۲	۰/۱۸۹۸	C4
۰/۰۰۰۰	۰/۲۲۲۲	۰/۱۸۰۰	۰/۳۴۵۸	۰/۲۶۸۱	C5

۱۴-۵- محاسبه ماتریس ارتباط کامل

برای محاسبه ماتریس ارتباط کامل ابتدا ماتریس همانی (I) تشکیل می‌شود. سپس ماتریس همانی را منهای ماتریس نرمال کرده و ماتریس حاصل را معکوس می‌کنیم. در نهایت ماتریس نرمال را در ماتریس معکوس ضرب می‌کنیم:

$$T = N \times (I - N)^{-1}$$

جدول ۱۷ ماتریس ارتباط کامل (T) معیارهای اصلی

C5	C4	C3	C2	C1	
۰/۹۲۵۱	۰/۶۸۴۳	۰/۷۱۶۴	۰/۸۷۵۶	۰/۶۴۹۲	C1
۰/۸۳۹۷	۰/۶۱۷۰	۰/۵۷۰۵	۰/۶۶۰۷	۰/۵۶۱۲	C2
۰/۶۷۹۵	۰/۵۰۵۱	۰/۴۰۳۸	۰/۵۴۱۰	۰/۴۳۳۴	C3
۱/۰۰۲۸	۰/۶۰۹۸	۰/۷۳۱۷	۰/۸۹۱۰	۰/۶۸۵۹	C4
۰/۹۲۸۰	۰/۷۵۴۸	۰/۷۴۵۴	۰/۹۳۵۰	۰/۷۵۷۳	C5

۱۵-۵- تحلیل روابط شبکه

برای تعیین نقشه

در این مرحله، با استفاده از ماتریس روابط کل TT، دو بردار کلیدی محاسبه می‌شوند:

بردار D^۱: مجموع سطری ماتریس TT، نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری یک معیار بر سایر معیارها.

بردار R^۲: مجموع ستونی ماتریس TT، نشان‌دهنده میزان تأثیرپذیری یک معیار از سایر معیارها.

سپس از جمع و تفاضل این دو بردار، تحلیل علیت و شدت روابط صورت می‌گیرد:

D+R: شاخص اهمیت کل هر معیار در سیستم.

R-D: شاخص علیت. اگر مقدار آن مثبت باشد، معیار در دسته علی (تأثیرگذار) قرار می‌گیرد و اگر منفی باشد، در دسته

معلولی (تأثیرپذیر) قرار دارد.

جدول ۱۸ ماتریس علیت در بین معیارهای اصلی

معیار	D (اثرگذاری)	R (تأثیرپذیری)	D+R (اهمیت کل)
C1	۳/۸۵۰۶	۳/۰۸۷۰	۶/۹۳۷۶
C2	۳/۲۴۹۱	۳/۹۰۳۳	۷/۱۵۲۴
C3	۲/۵۶۲۸	۳/۱۶۷۸	۵/۷۳۰۶
C4	۳/۹۲۱۲	۳/۱۷۱۰	۷/۰۹۲۲
C5	۴/۱۲۰۵	۴/۳۷۵۱	۸/۴۹۵۶

¹ Degree of Dispatching

² Degree of Receiving

با توجه به مقادیر فوق، می‌توان معیارها را در دودسته زیر طبقه‌بندی کرد:

معیارهای علی (تأثیرگذار):

C1 (مدیریت ریسک): با بیشترین مقدار مثبت، نقش کلیدی در تأثیرگذاری بر سایر معیارها دارد.

C4 (مدیریت انرژی): دومین معیار علی، با اثرگذاری قوی بر دیگر ابعاد سیستم.

معیارهای معلولی (تأثیرپذیر):

C2 (مدیریت پسماند)، C3 (اصول HSE)، C5 (پیشگیری از حوادث): این معیارها بیش از آنکه تأثیر بگذارند، از دیگر عوامل

تأثیر می‌پذیرند.

معیار C1 (مدیریت ریسک) و C4 (مدیریت انرژی) به‌عنوان عوامل کلیدی علی شناسایی شدند؛ این معیارها نقش هدایتگر

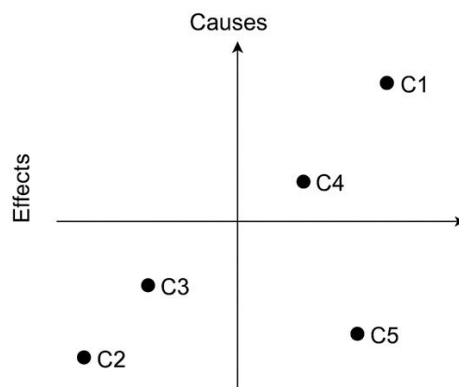
در ساختار علی-معلولی دارند.

معیار C5 (پیشگیری از حوادث) با بالاترین امتیاز D+R، مهم‌ترین معیار از منظر مشارکت کلی در سیستم است، اگرچه بیشتر

در نقش تأثیرپذیر ظاهر می‌شود.

اصول HSE (C3) و مدیریت پسماند (C2) نیازمند سیاست‌گذاری‌های دقیق‌تر هستند چراکه بیشتر از سایر معیارها تأثیر

می‌پذیرند.



شکل ۱۲ نمایش روابط علیت بین متغیرها

۶- بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با هدف ارائه یک چارچوب یکپارچه و بومی‌سازی شده برای سنجش عملکرد مهندسی ارزش و ارزیابی ریسک (VENRA) با رویکرد فازی و تمرکز بر حرکت به سمت آلایندگی صفر در صنعت کشتی‌سازی انجام شد. در گام نخست، معیارها و زیرمعیارهای مؤثر از طریق مرور ادبیات تخصصی و نظرات خبرگان صنعت شناسایی گردیدند. سپس با بهره‌گیری از روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای تعیین اهمیت نسبی معیارها و تحلیل دیمتل (DEMATEL) برای روشن‌سازی روابط اثرگذاری میان آن‌ها، مدلی جامع ارائه شد.

یافته‌های کلیدی این پژوهش، هم‌راستا با تئوری‌های مدرن مدیریت ریسک و پایداری زیست‌محیطی است. اولویت‌بخشی به مدیریت ریسک به‌عنوان مهم‌ترین معیار در چارچوب VENRA، بازتاب‌دهنده رویکردهای پیشگیرانه در مدیریت ریسک است که بر شناسایی و کنترل فعالانه تهدیدات پیش از وقوع تأکید دارند. در صنعت کشتی‌سازی، این امر شامل مدیریت ریسک‌های ناشی از آلایندگی (مانند نشت مواد، انتشار گازهای گلخانه‌ای)، حوادث عملیاتی در فرآیندهای ساخت و تعمیرات، و همچنین ریسک‌های مرتبط با انطباق با مقررات زیست‌محیطی فزاینده جهانی (مانند استانداردهای IMO) می‌شود. وزن بالای این معیار، نشان‌دهنده درک اهمیت حیاتی مدیریت این ریسک‌ها برای دستیابی به اهداف آلایندگی صفر و پایداری بلندمدت است، که با اصول "مدیریت ریسک یکپارچه" (Integrated Risk Management) هم‌خوانی دارد.

معیارهای اصول HSE (بهداشت، ایمنی و محیط‌زیست) و مدیریت پسماند نیز که در رتبه‌های بعدی اهمیت قرار گرفتند، مستقیماً به ابعاد زیست‌محیطی و اجتماعی پایداری اشاره دارند. اهمیت بالای این معیارها در صنعت کشتی‌سازی که با حجم قابل توجهی از پسماندهای صنعتی (فلزی، شیمیایی، خطرناک) و محیط‌های کاری پرخطر مواجه است، قابل توجه است. این یافته‌ها مؤید چارچوب‌های پایداری سه‌بعدی (اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی) هستند، جایی که عملکرد قوی در حوزه زیست‌محیطی (کاهش آلاینده‌گی، مدیریت صحیح پسماند) به‌عنوان پیش‌نیاز اساسی برای پایداری کلی کسب‌وکار تلقی می‌شود. پیشگیری از حوادث نیز به طور طبیعی، نقشی کلیدی در بهبود ایمنی، کاهش خسارات و جلوگیری از اثرات زیست‌محیطی ناخواسته ایفا می‌کند.

تحلیل روابط اثرگذاری DEMATEL نشان داد که مدیریت ریسک و مدیریت انرژی معیارهای علی و اثرگذار (causal) هستند، درحالی‌که سایر معیارها (HSE، مدیریت پسماند، پیشگیری از حوادث) بیشتر نقش معلولی و تأثیرپذیر (effect) دارند. این ساختار سیستمی، پیامدهای کاربردی مهمی برای صنعت کشتی‌سازی دارد:

- تمرکز بر حوزه‌های کلیدی: تقویت مدیریت ریسک و مدیریت انرژی می‌تواند به طور سیستماتیک، عملکرد در حوزه‌های HSE، مدیریت پسماند و پیشگیری از حوادث را بهبود بخشد. به‌عنوان مثال، سرمایه‌گذاری در سیستم‌های پیشرفته پایش انرژی نه تنها مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد (مستقیماً به پایداری کمک می‌کند)، بلکه می‌تواند با کاهش نیاز به برخی فرآیندهای پرانرژی، ریسک‌های عملیاتی مرتبط را نیز کم کند.
- تبیین کاربرد مدل در بستر صنعت کشتی‌سازی:
- مدیریت ریسک: در این صنعت، توجه ویژه به ریسک‌های زیست‌محیطی مانند احتمال سوانح دریایی با اثرات زیست‌محیطی گسترده، مدیریت ریسک‌های مرتبط با تخلیه پساب و آلاینده‌ها، و همچنین ریسک‌های ناشی از عدم انطباق با استانداردهای آلاینده‌گی، حیاتی است. مدل VENRA با اولویت دادن به این معیار، راهنمایی عملی برای تمرکز بر این ریسک‌های کلیدی ارائه می‌دهد.
- HSE و مدیریت پسماند: در کارگاه‌ها و سایت‌های کشتی‌سازی، مدیریت بهینه پسماندهای حجیم فلزی، شیمیایی و خطرناک، و همچنین رعایت دقیق اصول ایمنی در محیط‌های پرخطر، برای جلوگیری از حوادث و کاهش اثرات زیست‌محیطی ضروری است.
- مدیریت انرژی: گرچه کمترین وزن مستقیم را داشت، اما تأثیر غیرمستقیم آن بر کاهش هزینه‌ها، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود بهره‌وری کلی، در بلندمدت برای دستیابی به اهداف آلاینده‌گی صفر و کاهش ردپای کربن کشتی‌ها و تأسیسات، بسیار حیاتی است. مدل ما این همبستگی سیستمی را برجسته می‌کند.
- پیشگیری از حوادث: در محیط پرخطر ساخت و تعمیر کشتی‌ها، پیشگیری از حوادث نه تنها از منظر انسانی و ایمنی، بلکه از دیدگاه اقتصادی (کاهش توقف تولید، هزینه‌های جبران خسارت) و زیست‌محیطی (جلوگیری از انتشار مواد خطرناک) نیز اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد.

این پژوهش با ارائه یک مدل بومی‌سازی شده VENRA، مبتنی بر روش‌های چندمعیاره فازی، ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری مدیران صنعت کشتی‌سازی در راستای اهداف توسعه پایدار و الزامات زیست‌محیطی فراهم آورده است. این چارچوب ضمن تلفیق مهندسی ارزش با مدیریت ریسک، به غنای ادبیات علمی در حوزه پایداری زیست‌محیطی کمک کرده و زمینه‌ساز توسعه مدل‌های جامع‌تر و کاربردی‌تر در مطالعات آینده و تدوین سیاست‌های کلان‌تر در صنایع مادر خواهد بود:

پیشنهادهای اجرایی و پژوهشی:

- تقویت سیستم‌های مدیریت ریسک در شرکت‌های کشتی‌سازی با تمرکز ویژه بر ریسک‌های زیست‌محیطی و انطباق با مقررات.
- ارتقای مستمر آموزش‌های HSE و به‌روزرسانی رویه‌ها برای انطباق با بهترین شیوه‌های جهانی.
- بهبود فرآیندهای مدیریت پسماند با هدف کاهش تولید، بازیافت حداکثری و دفع ایمن پسماندهای خطرناک.
- توسعه سامانه‌های پیشرفته گزارش‌دهی و تحلیل حوادث برای شناسایی ریشه‌ای علل و جلوگیری از تکرار آن‌ها.

- استقرار سامانه‌های پایش هوشمند مصرف انرژی و اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی در تمام بخش‌های عملیاتی.
- گسترش مدل VENRA به سایر صنایع مادر و فرآوری با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاص هر صنعت.
- استفاده از روش‌های یادگیری ماشین برای تحلیل داده‌های حجیم مرتبط با ریسک و پایداری در صنعت کشتی‌سازی.
- بررسی اثرات اقتصادی پیاده‌سازی چارچوب VENRA در بلندمدت.
- انجام مطالعات مقایسه‌ای بین‌المللی برای ارزیابی عملکرد مدل در صنایع مشابه در کشورهای دیگر.

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارائه یک چارچوب یکپارچه برای سنجش عملکرد مهندسی ارزش و ارزیابی ریسک (VENRA) با رویکرد فازی در صنعت کشتی‌سازی و با تمرکز بر حرکت به سمت آلاینده‌گی صفر انجام شد. در گام نخست، معیارها و زیرمعیارهای مؤثر از طریق مرور ادبیات و نظر خبرگان شناسایی شدند. سپس با بهره‌گیری از روش‌های AHP و DEMATEL، اهمیت نسبی معیارها و روابط اثرگذاری میان آن‌ها تحلیل گردید.

نتایج نشان داد که مدیریت ریسک مهم‌ترین معیار در چارچوب VENRA است و نقش محوری در کاهش آلاینده‌گی، ارتقای ایمنی و بهبود عملکرد پروژه‌ها دارد. پس‌از آن، اصول HSE و مدیریت پسماند به‌عنوان عوامل کلیدی در کاهش اثرات زیست‌محیطی و ارتقای پایداری شناسایی شدند. پیشگیری از حوادث نیز جایگاه مهمی در بهبود ایمنی و کاهش خسارات دارد. در مقابل، مدیریت انرژی کمترین وزن را کسب کرد، هرچند تحلیل روابط اثرگذاری نشان داد که این معیار تأثیر غیرمستقیم قابل توجهی بر سایر ابعاد دارد.

تحلیل DEMATEL نشان داد که مدیریت ریسک و مدیریت انرژی معیارهای علی و اثرگذار هستند و سایر معیارها بیشتر نقش معلولی و تأثیرپذیر دارند. این ساختار بیانگر آن است که تقویت حوزه‌های ریسک و انرژی می‌تواند به‌طور سیستماتیک عملکرد HSE، مدیریت پسماند و پیشگیری از حوادث را بهبود دهد و مسیر دستیابی به آلاینده‌گی صفر را تسهیل کند. به‌طور کلی، پژوهش حاضر با ارائه یک مدل بومی‌سازی‌شده و مبتنی بر روش‌های چندمعیاره فازی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرد. این چارچوب ضمن تلفیق مهندسی ارزش و مدیریت ریسک، به غنای ادبیات علمی در حوزه پایداری زیست‌محیطی کمک می‌کند و زمینه‌ساز توسعه مدل‌های جامع‌تر در مطالعات آینده خواهد بود.

۷- منابع

- [1] Andersson J, Hellsmark H. Directionality in transformative policy missions: The case of reaching net zero emissions in the Swedish process industry. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 437: 140664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140664>
- [2] Yu M, Wang X, Yang X, Sun L. How do engineering suppliers create project value for buyers? A micro-foundational perspective. *International Journal of Operations & Production Management*. 2025; 45(2): 542–569. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-07-2023-0578>
- [3] Fitriadi F, Ayob AFM. Optimizing Traditional Shipyard Industry: Integrating VSM and Sustainability Indicators for Continuous Improvement. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*. 2025; 46(2): 155–170. <https://doi.org/10.62157/ijjetom.v1i1.15>
- [4] Baihaqi I, Lazakis I, Supomo H. A novel shipyard performance measurement approach through an integrated Value Engineering and Risk Assessment (VENRA) framework using a hybrid MCDM tool. *Proc IMechE Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2024; 14750902231219533. <https://doi.org/10.1177/14750902231219533>
- [5] Fu S, Goerlandt F, Xi Y. Arctic shipping risk management: A bibliometric analysis and a systematic review of risk influencing factors of navigational accidents. *Safety Science*. 2021; 139: 105254. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105254>
- [6] Zhou Y, Yuen KF. A Bayesian network model for container shipping companies' organisational sustainability risk management. *Transportation Research Part D*. 2024; 126: 103999. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103999>
- [7] Baihaqi I, Lazakis I, Supomo H. Integrated Value Engineering and risk assessment performance measurement framework in ship-manufacturing industry towards net zero emissions using fuzzy DEMATEL-AHP. *Machines*. 2023; 11(8): 799. <https://doi.org/10.3390/machines11080799>

- [8] Asdi R, Basuki M. Risk management in shipbuilding using Bayesian network with noisy-or. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021; 1010(1): 012038. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1010/1/012038>
- [9] Lu C, Zhang M, Han Y, Yan R, Wang S. Ship fuel consumption prediction based on transfer learning: Models and applications. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2025; 141: 109769. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109769>
- [10] Govindan K, Dua R, Anwar AM, Bansal P. Enabling net-zero shipping: An expert review-based agenda for emerging techno-economic and policy research. Transportation Research Part E. 2024; 192: 103753. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103753>
- [11] Baihaqi I, Lazakis I, Supomo H. Integrated Value Engineering and risk assessment performance measurement framework in ship-manufacturing industry towards net zero emissions using fuzzy DEMATEL-AHP. Machines. 2023; 11(8): 799. <https://doi.org/10.3390/machines11080799>
- [12] Zhang Q, Zheng S. Causal analysis of accidents during wind power engineering construction using Bayesian networks. International Journal of Safety & Security Engineering. 2024; 14(1). <https://doi.org/10.18280/ijssse.140130>
- [13] Husal HR, Ginting R, Anizar A. Integrated value engineering with QFD and DFA as product design and development techniques: Literature review. Jurnal Sistem Teknik Industri. 2024; 26(1): 22–34. <https://doi.org/10.32734/jsti.v26i1.11901>
- [14] Chen WT, Merrett HC, Liu SS, Fauzia N, Liem FN. A decade of value engineering in construction projects. Advances in Civil Engineering. 2022; 2022: 2324277. <https://doi.org/10.1155/2022/2324277>
- [15] Sindhvani R, Afridi S, Kumar A, Banaitis A, Luthra S, Singh PL. Can industry 5.0 revolutionize the wave of resilience and social value creation? A multi-criteria framework to analyze enablers. Technology in Society. 2022; 68: 101887. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.101887>
- [16] Noheh-Khan M, Rezaei-Bakhti MJ. Review and integration of risk management and value engineering on the success of bridge construction projects. 17th National Conference on Urban Planning, Architecture, Civil Engineering and Environment. 2022.
- [17] Rabati M, Oldfield P, Nezhad AA, Carmichael DG, Kuru A. Carbon value engineering: A framework for integrating embodied carbon and cost reduction strategies in building design. Building and Environment. 2021; 192: 107620. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107620>
- [18] Peeters P, Papp B. Pathway to zero emissions in global tourism: Opportunities, challenges, and implications. Journal of Sustainable Tourism. 2024; 32(9): 1784–1810. <https://doi.org/10.1080/09669582.2024.2367513>
- [19] Girling PX. Operational Risk Management: A Complete Guide for Banking and Fintech. John Wiley & Sons. 2022.
- [20] Joshi S. Review of Gen AI models for financial risk management. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. 2025; 11(1): 709–723. <https://doi.org/10.32628/CSEIT2511114>
- [21] Vahedi Kh, Khosravi F, Pakdel M. Integration of value engineering and risk management: Strategies for optimizing civil projects. Journal of Water and Energy Engineering. 2023; 2(2): 1–15.
- [22] Soltani Sh, Taghizadeh H, Tari Gh. Designing a systemic relationship model for value enhancement from the perspective of sustainable development in construction project management. Dynamic Management and Business Analysis. 2024; 3(1): 86–108.
- [23] Dvorsky J, Belas J, Gavurova B, Brabenec T. Business risk management in SMEs. Economic Research–Ekonomiska Istraživanja. 2021; 34(1): 1690–1708.
- [24] Pimpalkar R, Sahu A, Patil RB, Roy A. A comprehensive review on FMEA of solar photovoltaic systems. Materials Today: Proceedings. 2023; 77: 687–691. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.353>
- [25] Koray M. Prioritizing shipyard conversion requirements regarding green ship and green shipyard concept. Transactions on Maritime Science. 2023; 12(2).
- [26] Pan M, Cao S, Zhang Z, Ye N, Qin H, Li L, Guan W. Recent progress on energy management strategies for hybrid electric vehicles. Journal of Energy Storage. 2025; 116: 115936. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115936>
- [27] Fitriadi F, Ayob AFM. Optimizing Traditional Shipyard Industry: Integrating VSM and Sustainability Indicators for Continuous Improvement. JARASET. 2025; 46(2): 155–170. <https://doi.org/10.62157/ijietom.v1i1.15>
- [28] Wang Z, Mu X, Ma Y, Liao P, Ji Y, Han F. Advanced energy management and optimal scheduling for integrated offshore gas-hydrogen-electricity-heat systems. Energy. 2025; 319: 135091. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135091>
- [29] Ahakwa I. Towards land degradation neutrality: Does green energy and green human capital matter? Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024; 197: 114396. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114396>

- [30] Olawade DB, Fapohunda O, Wada OZ, Usman SO, Ige AO, Ajisafe O, Oladapo BI. Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.05.001>
- [31] Benson C, Obasi IC, Akinwande DV, Ile C. The impact of interventions on health, safety and environment in the process industry. *Heliyon*. 2024; 10(1).
- [32] Chizubem B, Subbiah A, Izuchukwu OC, Musa KS. Real-time monitoring using digital platforms for enhanced safety in hydrogen facilities. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025; 98: 487–499. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.128>
- [33] Tao D, Xie C, Jaffrezic-Renault N, Guo Z. Flexible and wearable electrochemical sensors for health and safety monitoring. *Talanta*. 2025; 127863. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.127863>
- [34] Norouzi M, Sadeghian SHR. A multi-criteria decision-making method based on AHP and integrated risk–value engineering for selecting optimal civil project methods. *International Conference on Industrial Engineering and Sustainable Management*. 2016.
- [35] Nejad-Heidari Z, Raeeszadeh M, Taheri Haghighi HR, Ghayoumi M. A study of value engineering and its necessity in industry and large-scale projects. *Modern Research in Performance Evaluation*. 2024; 3(1): 30–42.
- [36] Gućma, L., Naus, K., Perkovič, M., & Specht, C. Applied Maritime Engineering and Transportation Problems 2022. *Applied Sciences*, 2024, 14(9), 3913.
- [37] Amjad, M. H. H., Shovon, M. S. S., & Hasan, A. M. Analyzing Lean Six Sigma Practices In Engineering Project Management: A Comparative Analysis. *Innovatech Engineering Journal*, 1(01), 2024, 245-255.

۷- ضمایم

جدول شناسایی شاخص‌های مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک

نتیجه	CVR	Ne	شاخص‌های مهندسی ارزش یکپارچه و ارزیابی ریسک
پذیرش	۰/۹۰	۱۹	ارزیابی‌های ریسک انجام‌شده برای پروژه‌ها و فرآیندها
پذیرش	۰/۸۰	۱۸	ریسک‌های شناسایی‌شده دارای اقدامات کنترلی
پذیرش	۱	۲۰	تعداد برنامه‌های کاهش ریسک
پذیرش	۰/۸	۱۸	تفکیک پسماند در مبدأ
پذیرش	۱	۲۰	میزان بازیافت پسماند تولیدی
پذیرش	۰/۷۰	۱۷	دفن پسماند به روش‌های استاندارد و بهداشتی
پذیرش	۰/۹	۱۹	استفاده از فناوری‌های پاک برای کاهش حجم پسماندها
پذیرش	۱	۲۰	رعایت استانداردهای ایمنی در محیط کار
پذیرش	۱	۲۰	استفاده از تجهیزات حفاظت فردی در محیط‌های کاری
پذیرش	۰/۸۰	۱۸	تعداد دوره‌های آموزشی HSE برگزار شده برای کارکنان
پذیرش	۱	۲۰	کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و عملیاتی
پذیرش	۰/۸۰	۱۸	استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در سازمان
پذیرش	۰/۹۰	۱۹	سیستم‌های نظارت و کنترل انرژی
پذیرش	۰/۷۰	۱۷	میزان بهره‌وری انرژی در تجهیزات و فرآیندهای مختلف سازمان
پذیرش	۰/۸۰	۱۸	آموزش ایمنی و پیشگیری از حوادث برای کارکنان
پذیرش	۱	۲۰	میزان ارزیابی‌های ریسک شغلی
پذیرش	۰/۹۰	۱۹	گزارش‌های حوادث و اقدامات اصلاحی