

ارائه یک چارچوب یکپارچه با استفاده از روش‌های F-PIPRECIA و Z-WASPAS جهت ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند

علی معمارپور غیائی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

ali.memarpour@mut.ac.ir

محمدرضا زاهدی

دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

zahedi@mut.ac.ir

مرتضی عباسی^۱

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

mabbasi@mut.ac.ir

چکیده

لجستیک یکی از محرک‌های رقابت پذیری کشورها و شرکت‌ها است و نقشی حیاتی در رشد اقتصادی ایفا می‌کند. با این حال، صنعت لجستیک فعلی هنوز با هزینه‌های بالا و راندمان پایین مواجه است. توسعه لجستیک هوشمند فرصت‌هایی را برای حل این مشکلات به ارمغان می‌آورد. با وجود مزایای بسیار، وجود برخی موانع اجرای این سیستم‌ها را محدود می‌کند. هدف این تحقیق ارائه یک چارچوب یکپارچه جهت ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند است. در این پژوهش، برای اولین بار جهت تجزیه و تحلیل موانع از رویکرد FMEA^۲ مبتنی بر PIPRECIA^۳ فازی و WASPAS^۴ توسعه‌یافته بر اساس تئوری اعداد Z استفاده شده است. رویکرد پیشنهادی این تحقیق در ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند در یک کارخانه فعال در زمینه مونتاژ لوازم خانگی واقع در منطقه آزاد ارس در کشور ایران پیاده‌سازی گردید. بر اساس نتایج، کمبود منابع مالی کافی و کمبود کارکنان واجد شرایط به عنوان موانع بحرانی شناسایی شده‌اند. نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی نشانگر قابلیت و برتری آن در مقایسه با سایر

^۱ نویسنده مسئول

^۲ Failure mode and effect analysis

^۳ Pivot pairwise relative criteria importance assessment

^۴ Weighted aggregated sum product assessment

کلمات کلیدی: لجستیک هوشمند، انقلاب صنعتی چهارم، تصمیم‌گیری چندمعیاره، WASPAS، PIPRECIA.

An integrated framework using F-PIPRECIA and Z-WASPAS methods to evaluate the barriers to the implementation of smart logistics

Ali Memarpour Ghiaci, ali.memarpour@mut.ac.ir

Ph.D Candidate, Industrial Engineering Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵, Iran

Mohammadreza Zahedi, zahedi@mut.ac.ir

Associate Professor, Industrial Engineering Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵, Iran

Morteza Abbasi, (corresponding author), mabbasi@mut.ac.ir

Assistant Professor, Industrial Engineering Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵, □□□□

Abstract

Logistics is one of the drivers of countries' and companies' aggressiveness and plays a vital role in economic growth. However, the current logistics industry is still high-cost and low-efficiency. The development of smart logistics brings opportunities to solve these problems. Despite many possibilities, the existence of some barriers limits the implementation of these systems. The purpose of this research is to evaluate the problem of the implementation of smart logistics. Failure mode and effect analysis (FMEA) method based on the fuzzy pivot pair-wise relative criteria importance assessment (F-PIPRECIA) and the weighted aggregated sum product assessment method based on Z number theory (Z-WASPAS) developed in three phases. In the first phase of this smart technology based on the literature, ۱۶ smart logistics implementation barriers are identified using the FMEA method. In the second phase, using the fuzzy PIPRECIA method and experts' opinions, the weights of the factors are calculated. An adjusted PIPRECIA is proposed. In the third phase and according to the outputs of the previous phases, the barriers are prioritized using the Z-WASPAS method. The FPIPRECIA-ZWASPAS approach produced to cover some disadvantages of FMEA method include inability to consider the different significance of risk factors in an uncertain environment. In addition to assigning different weights to factors and considering uncertainty, reliability is also considered in experts' opinions through the theory of Z numbers. The proposed approach of this research was implemented in the evaluation of the barriers to smart logistics implementation in a factory active in the field of home appliances assembly located in the Aras Free Zone in Iran. Based on the results, This study has identified that "Lack of sufficient resources" has the highest priority among barriers. Also, "Lack of qualified staff" and "Administrative bureaucracy" are in the second and third priority, respectively. The results show the capability and efficiency of the proposed approach compared to other traditional methods such as FMEA and fuzzy WASPAS.

Keywords: Smart logistics, Industry 4.0, Multi-criteria decision-making, PIPRECIA, WASPAS.

Introduction

In recent years, the rapid advancement of digital technologies, artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and blockchain has transformed traditional logistics into smart logistics, enabling real-time tracking, predictive analytics, and enhanced supply chain efficiency. Smart logistics leverages data-driven decision-making and automation to optimize resource utilization, reduce operational costs, and improve sustainability. Despite these advantages, the implementation of smart logistics faces several barriers. This paper examines the barriers to the implementation of smart logistics, identifying critical technological, organizational, and regulatory challenges.

The main objective of this research is to identify and prioritize the barriers to the implementation of smart logistics by introducing a novel approach to address some of the limitations of the traditional FMEA method. For the first time, this approach is based on the developed FMEA method using the F-PIPRECIA technique for weighting criteria and the Z-WASPAS method for prioritizing barriers. By employing Z-number theory, this approach aims to account for uncertainty and reliability in the determining factors of the risk priority number (RPN). Additionally, the proposed approach considers time as an important managerial criterion alongside the severity, occurrence, and detection criteria in the FMEA method. It is noteworthy that the prioritization of barriers is based on the score obtained from the proposed approach, where barriers with higher scores are given higher priority for investigation. To evaluate the feasibility of the proposed approach, the prioritization of smart logistics implementation barriers has been conducted using the combined FPIPRECIA-ZWASPAS approach, and the results have been compared with some traditional methods.

Methodology

In this research, for the first time, in order to evaluate the barriers to the implementation of smart logistics, the integrated approach of the FMEA method based on the F-PIPRECIA and Z-WASPAS methods developed in three phases has been used. In the first phase of this approach and based on the literature, the barriers are identified using the FMEA method and the factors determining the RPN are quantified. In the second phase, using the F-PIPRECIA method, the weights of the criteria are calculated. Finally, in the third phase and according to the outputs of the previous phases, the barriers are prioritized using the Z-WASPAS method. In addition to assigning different weights to criteria and considering uncertainty, reliability is also considered in this approach through the theory of Z numbers.

Results

This study presents a novel methodology for evaluating the barriers to the implementation of smart logistics, utilizing the F-PIPRECIA and Z-WASPAS methods to evaluate and prioritize 16 identified barriers. The findings indicate that lack of sufficient resources, lack of qualified staff and administrative bureaucracy are the main barriers to the implementation of smart logistics. To validate the proposed methodology, its results were compared with conventional methods, including FMEA, and Fuzzy WASPAS (F-WASPAS). The FMEA method exhibited significant shortcomings, notably, its failure to account for quality grades and conditions of uncertainty, which resulted in incomplete prioritization of failure causes. This limitation led to confusion among decision-makers regarding failure-related decisions. In contrast, while F-WASPAS addressed uncertainty, overcame these limitations by providing complete prioritization. On the other hand, Z-WASPAS method effectively overcame these limitations by leveraging the advantages of Z-number theory, also incorporates both reliability and uncertainty. The implementation of the proposed approach

demonstrated a strong correlation of ۰.۹۷۶ with the results of the F-WASPAS method, underscoring its effectiveness in delivering comprehensive rankings of barriers.

Conclusion

This research is applied in nature and employs a mixed quantitative-qualitative approach. Three experts in logistics and supply chain management participated as an FMEA team to provide insights for this study. It is essential to highlight that the implementation of smart logistics has evolved with the transition to Industry ۴.۰. Smart logistics encompasses various systems designed to enhance the efficiency of logistics processes. Despite its numerous benefits, several barriers hinder its implementation. Therefore, identifying and ranking these barriers has become increasingly important. This study introduces an enhanced FMEA approach by integrating the F-PIPRECIA method for criteria weighting and the Z-WASPAS method for barrier prioritization. The proposed approach overcomes some of the shortcomings of the conventional FMEA method, such as the inability to provide a comprehensive ranking of alternatives and the lack of weight assignment for criteria. Additionally, the proposed approach incorporates time as a key managerial criterion alongside severity, occurrence, and detection probability in the FMEA method. Future research will focus on addressing these limitations and further developing the FMEA method using multi-criteria decision-making techniques in uncertain environments, such as pythagorean fuzzy sets, q-rung orthopair fuzzy sets, and spherical fuzzy sets. Beyond the specific application explored in this study, the proposed approach can be applied in various risk identification and failure mode analysis scenarios.

۱. مقدمه

انتظار می‌رود ظهور چهارمین انقلاب صنعتی در چندین جنبه از صنعت تولید عمیقاً تغییر ایجاد کند. فعالیت‌های لجستیک و زنجیره تامین هم در سطح عملیاتی و هم در سطح مدیریتی تحت تاثیر این تغییرات قرار می‌گیرند [۱]. لجستیک هوشمند مبتنی بر فناوری اطلاعات و ارتباطات پیشرفته مدرن است. این می‌تواند سیستم لجستیک یکپارچه مدرن را با پردازش بلادرنگ (real-time) و تجزیه و تحلیل جامع اطلاعات لجستیک به روشی هوشمندانه تحقق بخشد. لجستیک هوشمند می‌تواند دید سرتاسری را به ارمغان بیاورد، روش حمل و نقل لجستیک، انبارداری، فرآیند توزیع، توزیع، خدمات اطلاعاتی و غیره را بهبود بخشد و به صرفه‌جویی در زمان و هزینه کمک کند [۲ و ۳]. علاوه بر این، در کاهش آلودگی زیست محیطی ناشی از لجستیک تاثیرگذار باشد. با این حال، بسیاری از مسائل چالش‌برانگیز و موانع باید در فرآیند پیاده‌سازی لجستیک هوشمند مورد توجه قرار گیرند.

روش FMEA یکی از روش‌های کاربردی جهت شناسایی و ارزیابی موانع و ریسک‌ها است. روش FMEA یک رویکرد سیستماتیک بر پایه تیمی از خبرگان و پیشگیری قبل از وقوع است [۴]. در اغلب تحقیقاتی که از روش FMEA استفاده شده است، شناسایی ریسک‌ها و موانع بر اساس شاخص سنتی RPN^۵ انجام شده است. این در حالی است که این شاخص دارای کاستی‌هایی است. به عنوان مثال، به دلیل کنشی بودن و تیمی بودن روش FMEA، میزان عوامل تعیین کننده RPN را اغلب نمی‌توان به صورت قطعی در نظر گرفت [۵ و ۶]. بنابراین، جهت دستیابی به نتایج قابل اطمینان در برابر نظرات خبرگان، نیاز است تا اولویت‌بندی گزینه‌ها با توجه به عدم قطعیت موجود در معیارها انجام شود.

هدف اصلی این پژوهش شناسایی و اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند با ارائه یک رویکرد جدید جهت پوشش برخی از کاستی‌های روش FMEA سنتی می‌باشد. این رویکرد برای اولین بار بر اساس روش توسعه‌یافته FMEA مبتنی بر روش F-

^۵ Risk priority number

PIPRECIA جهت وزن‌دهی به معیارها و روش Z-WASPAS جهت اولویت‌بندی موانع ارائه می‌گردد. در رویکرد پیشنهادی پژوهش، با به کار گیری تئوری اعداد Z، سعی بر آن است عدم قطعیت و قابلیت اطمینان در عوامل تعیین کننده RPN در نظر گرفته شود. همچنین در این رویکرد، معیار زمان نیز به عنوان یک شاخص مهم مدیریتی در کنار معیارهای شدت، وقوع و احتمال کشف در روش FMEA در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است اولویت‌بندی موانع بر اساس امتیاز حاصل از رویکرد پیشنهادی به صورتی است که مانع با امتیاز بالاتر، در اولویت اول رسیدگی قرار خواهد گرفت. جهت ارزیابی قابلیت رویکرد پیشنهادی، اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند توسط شاخص حاصل از رویکرد ترکیبی FPIPRECIA-ZWASPAS انجام شده و نتایج آن در مقایسه با برخی از روش‌های سنتی ارائه شده است. مهمترین سوالاتی که پژوهش حاضر سعی در ارائه پاسخ به آنها دارد عبارتند از؛

- مهمترین موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند کدامند؟
- درجه اهمیت معیارهای ارزیابی موانع در مسئله ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند چگونه است؟
- اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند چگونه انجام می‌شود و موانع بحرانی کدامند؟

۲. ادبیات پیشین

۲.۱. لجستیک هوشمند

از زمانی که "لجستیک هوشمند" پیشنهاد شده است، هیچ اتفاق نظری در مورد مفهوم آن در میان پژوهشگران وجود ندارد. فلیش، کریست و دیرکس^۶ [۷] در ابتدا مفهوم محصولات هوشمند و خدمات هوشمند را پیشنهاد کردند، به این معنی که انسان‌ها می‌توانند برخی از فعالیت‌های کنترلی خود را به محصولات هوشمند و خدمات هوشمند محول کنند. لجستیک هوشمند توسط اوکلن^۷ [۸] بر اساس مفهوم محصولات هوشمند و خدمات هوشمند تعریف شده است. بارتو، آمارال و پریرا^۸ [۹] لجستیک هوشمند را به عنوان یک لجستیک تعریف کرد، سیستمی که می‌تواند انعطاف پذیری را افزایش دهد و شرکت را به نیازهای مشتری نزدیک‌تر می‌کند. کولیتی^۹ [۱۰] ارائه کرد که درک لجستیک به عنوان برنامه ریزی، کنترل، تحقق و نظارت یکپارچه بر تمام جریان‌های داخلی و شبکه گسترده، مواد، قطعات و محصول در امتداد زنجیره ارزش افزوده کامل است. برخی از تعاریف منتخب مربوط به لجستیک هوشمند در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. تعاریف منتخب از "لجستیک هوشمند"

Table ۱. Selected definitions of "smart logistics"

Author(s)	Definition	Keywords
Song, Yu, Zhou, Yang, and He (۲۰۲۰)	Smart logistics has three fundamental tasks: ensuring proper information flow to reduce costs and improve efficiency; implementing intelligent systems to automate processes; and deepening collaboration and integration across various dimensions.	Internet of Things (IoT), smart logistics, wireless communication

^۶ Fleisch, Christ and Dierkes

^۷ Uckelmann

^۸ Barreto, Amaral and Pereira

^۹ Cullity

Lin and Yang (۲۰۱۸)	It relates to a logistics distribution system. It is a combination of computers, intelligence using the Internet of Things (IoT), and information technology. To achieve high efficiency, it employs advanced technological management methods.	Computerization, artificial intelligence, new technologies, IoT
Zhang and Peng (۲۰۱۳)	Smart logistics emphasizes technological changes. Its focus is on using systems such as big data, IoT, sensors, and other technologies to improve logistics and distribution services and reduce their costs.	Technological changes, Big Data, Internet of Things
Zhang, Liu, Liu, Yang, Li, Huisingh, and Wang (۲۰۱۸)	Smart logistics covers the entire process of moving goods—including transportation, storage, distribution, packaging, loading and unloading, and information processing. With real-time monitoring, it enhances logistics resource-management efficiency.	The entire process of goods transfer, management efficiency
Zhao (۲۰۰۵)	Smart logistics is defined by intelligence, integration, and flexibility.	Process integration, artificial intelligence
McFarlane, Giannikas, and Lu (۲۰۱۶)	Smart logistics means planning and controlling processes using intelligent tools and methods.	Process control and planning using intelligent methods, Automation

۲.۲. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و FMEA

به عنوان یک حوزه شناخته شده از تحقیقات، روش‌های MCDM به طور گسترده توسط محققان برای بهبود عملکرد FMEA مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به عنوان ابزاری ارزشمند در بهبود کاستی‌های مربوط به روش RPN مرسوم در نظر گرفته شده‌اند [۵ و ۱۶]. سامریت و کراتیبهوردی^{۱۰} [۱۷] جهت توسعه روش FMEA، از روش ترکیبی AHP و LOPCOW جهت وزن دهی به معیارها و روش ARAS برای اولویت بندی چالش‌های مدیریت پسماند پلاستیکی استفاده کرده است. در این پژوهش جهت مدیریت عدم قطعیت از مجموعه‌های فازی دوزنقه‌ای استفاده شده است. فوکی، چاپکلینگ، بریوان، فوکا، وانویربیک و چپتون^{۱۱} [۱۸] جهت ارزیابی ریسک‌های طراحی ابزار جراحی، از روش توسعه یافته FMEA مبتنی بر روش‌های GRA و EDAS استفاده کردند. کوماری، احمد، خان و احمد^{۱۲} [۱۹] جهت ارزیابی حالات خرابی تصفیه‌خانه، از روش ترکیب روش FMEA با روش‌های AHP و VIKOR فازی استفاده کردند. دیپک، برر، ویودی، فرواها، رنجان، الخلیل و پندی^{۱۳} [۲۰] پس از شناسایی علل خرابی پمپ در صنعت ساخت و ساز، از روش‌های VIKOR، PROMETHEE و تاپسیس اصلاح شده برای رتبه‌بندی استراتژی‌های مقابله با علل خرابی پمپ‌ها و نگهداری آن‌ها استفاده کردند. رشیدیان، عیدی و روغنیان [۲۱]. از روش‌های DANP و CoCoCo

^{۱۰} Sumrit and Keeratibhubordee

^{۱۱} Phokee, Chaiklieng, Boriwan, Phoka, Vanoirbeek, and Chatpun

^{۱۲} Kumari, Ahmad, Khan, and Ahmad

^{۱۳} Deepak, Brar, Dwivedi, Farwaha, Ranjan, Alkhaleel, and Pandey

جهت ارزیابی اختلالات شبکه حمل و نقل سیمان در ایران استفاده کرده است. به منظور ارزیابی تامین کنندگان و انتخاب تامین کنندگان کلیدی، از رویکرد ترکیبی AHP و PROMETHEE جهت غلبه بر کاستی‌های روش FMEA استفاده شد [۲۲]. جین، منگ و فنگ^{۱۴} [۲۳] از روش AHP فازی بر اساس روش FMEA برای تجزیه و تحلیل حالات شکست سیستم لجستیک در همه‌گیری COVID-۱۹ استفاده کرد. در این مقاله دوازده حالت خرابی شناسایی شده است و اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی مربوطه جهت کاهش تاثیر خرابی‌ها توصیه شده است. اتوراکچی و کنیالیوğlu^{۱۵} [۲۴] از رویکرد یکپارچه FAHP-TOPSIS جهت ارزیابی خطراتی که ممکن است در تاسیسات تولیدی یک شرکت به وجود آید، استفاده کرده است. با استفاده از روش AHP فازی، مشکلات عمده محیط و منطقه کار در محل ساخت و ساز شناسایی و با استفاده از روش WASPAS اولویت‌بندی شد [۲۵]. پورمهدی، پایدار و اسدی [۲۶] از روش‌های ANP فازی و TOPSIS جهت ارزیابی حالات شکست در یک شرکت تولیدکننده فولاد در شمال ایران استفاده کردند. به منظور شناسایی و ارزیابی ریسک‌های تأثیرگذار بر پروژه‌های ساختمانی و پوشش برخی کاستی‌های تکنیک FMEA، یک مدل یکپارچه مبتنی بر روش‌های FMEA، SWARA و WASPAS در محیط فازی پیشنهاد شد [۲۷]. برخی از رویکردهای جایگزین و ترکیب‌شده با روش FMEA برای اولویت‌بندی موانع و ریسک‌ها بر اساس روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره موجود در ادبیات در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- برخی از رویکردهای جایگزین و ترکیب‌شده با روش FMEA برای اولویت‌بندی موانع و ریسک‌ها بر اساس روش‌های MCDM
Table ۲. Some combined approaches to the FMEA method for prioritizing barriers and risks based on MCDM methods

Author(s)	Methods	Case Study	Attributes	
			Uncertainty	Reliability
Sumrit and Keeratibhubordee (۲۰۲۰)	AHP, LOPCOW, ARAS Fuzzy	Plastic-recycling industry	✓	×
Phokee, Chaiklieng, Boriwan, Phoka, Vanoirbeek, and Chatpun (۲۰۲۰)	GRA, EDAS	Surgical instrument design	×	×
Kumari, Ahmad, Khan, and Ahmad (۲۰۲۰)	Fuzzy AHP, Fuzzy VIKOR	Water treatment plant	✓	×
Deepak, Brar, Dwivedi, Farwaha, Ranjan, Alkhaleel, and Pandey (۲۰۲۰)	VIKOR, PROMETHEE, Modified TOPSIS	Pump maintenance in the construction sector	×	×
Rashidian, Eydi, and Roghianian (۲۰۲۴)	DANP, CoCoSo	Cement-transport network	×	×

^{۱۴} Jin, Meng, and Feng

^{۱۵} Oturakçı and Konyalıoğlu

Altubaishe and Desai (۲۰۲۳)	AHP, PROMETHEE	Supplier evaluation	×	×
Jin, Meng, and Feng (۲۰۲۲)	Fuzzy AHP	Logistics system	✓	×
Oturakçı and Konyalıoğlu (۲۰۲۲)	AHP, Fuzzy TOPSIS	Occupational health & safety	✓	×
Bathrinath, Mohan, Koppiahraj, Bhalaji, and Santhi (۲۰۲۲)	AHP, Fuzzy WASPAS	Construction site	✓	×
Pourmehdi, Paydar, and Asadi-Gangraj (۲۰۲۱)	ANP, Fuzzy TOPSIS	Steel industry	✓	×
Alvand, Mirhosseini, Ehsanifar, Zeighami, and Mohammadi (۲۰۲۱)	SWARA, Fuzzy WASPAS	Construction project	✓	×
Proposed approach	Fuzzy PIPRECIA, Z-WASPAS	Home-appliances industry	✓	✓

۲.۳. شکاف تحقیقاتی

در بخش اول مرور ادبیات، برخی از مقالات مرتبط با لجستیک هوشمند و در بخش دوم، توسعه روش FMEA بر اساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه مقالاتی در حوزه لجستیک هوشمند منتشر شده است، اما تعداد کمی از آن‌ها بر روی بررسی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند متمرکز است. از این رو، فقدان تحقیق برای ارائه راهکارهایی جهت شناسایی و اولویت‌بندی این موانع احساس می‌شود. همچنین، با بررسی مقالات موجود مبتنی بر روش FMEA، کمبود روش توسعه‌یافته FMEA مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره که علاوه بر عدم قطعیت، قابلیت اطمینان را نیز مورد بررسی قرار دهد، احساس می‌شود. در نتیجه، مطالعه حاضر برای اولین بار به ارائه یک رویکرد توسعه‌یافته FMEA بر اساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره PIPRECIA فاز ۱ و Z-WASPAS جهت شناسایی و اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند می‌پردازد. روش PIPRECIA توسط استانیوکیچ، زاوادسکاس، کاراباسویچ، ماراندیچ و تورسکیس^{۱۶} [۲۸]، به عنوان یک توسعه از روش SWARA که توسط کرشولین، زاوادسکاس و تورسکیس^{۱۷} [۲۹] ارائه شده بود، پیشنهاد شده است. اگرچه روش SWARA دارای این مزیت است که مقایسه‌های کمتری نسبت به روش AHP ارائه می‌کند، اما این روش نیز در مدیریت مسائل واقعی در تصمیم‌گیری‌های گروهی دارای نقاط ضعف است. علاوه بر این، روش SWARA ممکن است تصمیم‌گیرندگان را در ارزیابی‌هایشان محدود کند، زیرا نیازمند مرتب‌سازی معیارها با در نظر گرفتن اهمیت مورد انتظار آن‌ها است [۳۰]. روش PIPRECIA با حذف این معایب به ادبیات موضوع معرفی شده است. بر اساس این روش، نیازی به رتبه‌بندی قبلی معیارها بر اساس درجه اهمیت مورد انتظار نیست؛ در عوض، اجازه می‌دهد که اهمیت نسبی کمتر از، برابر با، یا بیشتر از اهمیت معیار قبلی باشد [۳۱]. در ادامه، روش

^{۱۶} Stanujkic, Zavadskas, Karabasevic, Smarandache, and Turskis

^{۱۷} Keršulienė, Zavadskas, and Turskis

WASPAS با اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از دو روش مدل مجموع وزنی^{۱۸} (WSM) و مدل ضرب وزنی^{۱۹} (WPM) دارای کارایی و اثربخشی بالایی در فرآیند تصمیم‌گیری است [۳۲]. مزایای اصلی این روش شامل سادگی محاسباتی، سازگاری نتایج و مقاومت قوی در برابر معکوس شدن رتبه گزینه‌ها است [۳۳]. در رویکرد پیشنهادی پژوهش، با به کارگیری تئوری اعداد Z ، سعی بر آن است عدم قطعیت و قابلیت اطمینان در عوامل تعیین کننده RPN در نظر گرفته شود. برخی از نوآوری‌های مطالعه حاضر عبارتند از:

- ارائه یک چارچوب یکپارچه F-PIPRECIA-Z-WASPAS بر اساس رویکرد FMEA
- در نظر گرفتن زمان به عنوان یک شاخص مهم مدیریتی در کنار معیارهای روش FMEA (شدت، وقوع و احتمال کشف)
- استفاده از رویکرد PIPRECIA فازی جهت ارزیابی وزن معیارها بر اساس روش FMEA
- پیاده‌سازی رویکرد توسعه‌یافته در یک مطالعه موردی واقعی جهت نشان دادن کارایی و قابلیت مدل
- مقایسه رویکرد پیشنهادی با برخی رویکردهای موجود در ادبیات جهت اعتبارسنجی مدل

۳. مواد و روش‌ها

۳.۱. تئوری مجموعه‌های فازی

اولین بار مفهوم مجموعه‌های فازی توسط زاده معرفی شد [۳۴]. یک مجموعه فازی به صورت یک تابع عضویت تعریف می‌شود که عناصر را به درجه عضویت در یک بازه معین که معمولاً به صورت بازه $[0, 1]$ است نشان می‌دهد. در ادامه تعاریف پایه ای برای مجموعه اعداد فازی مورد استفاده در این مطالعه ارائه شده است.

تعریف ۱: یک مجموعه فازی A که در مرجع X تعریف شده است بصورت رابطه (۱) نمایش داده می‌شود.

$$A = \{(x, \mu_A) \mid x \in X\} \quad (1)$$

در اینجا $\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1]$ تابع عضویت از مجموعه A است. مقدار عضویت $\mu_A(x)$ درجه وابستگی $x \in X$ را در A نشان می‌دهد.

تعریف ۲: عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ به صورت سه‌تایی (l, m, u) تعریف می‌شود و تابع عضویت مطابق رابطه (۲) می‌باشد.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x \in (-\infty, l) \\ \frac{x-l}{m-l} & x \in [l, m] \\ \frac{u-x}{u-m} & x \in [m, u] \\ 0 & x \in (u, \infty) \end{cases} \quad (2)$$

تعریف ۳: فرض کنید $\tilde{A} = (l_1, m_1, u_1)$ و $\tilde{B} = (l_2, m_2, u_2)$ دو عدد فازی مثلثی باشند و γ عددی ثابت و بزرگتر از صفر است، در این حالت، اعمال حسابی روی این اعداد فازی مطابق با روابط (۳) الی (۷) انجام می‌شود.

^{۱۸} Weighted sum model

^{۱۹} Weighted product model

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad (3)$$

$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \quad (4)$$

$$\tilde{A} \ominus \tilde{B} = (l_1 - u_2, m_1 - m_2, u_1 - l_2) \quad (5)$$

$$\tilde{A} \oslash \tilde{B} = (l_1 / u_2, m_1 / m_2, u_1 / l_2) \quad (6)$$

$$\gamma \tilde{A} = \gamma(l_1, m_1, u_1) = (\gamma l_1, \gamma m_1, \gamma u_1) \quad (7)$$

تعریف ۴: فرض کنید $\tilde{A} = (l_1, m_1, u_1)$ و $\tilde{B} = (l_2, m_2, u_2)$ دو عدد فازی مثلثی باشند، فاصله بین $\tilde{A}$ و $\tilde{B}$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$d(A, B) = \sqrt{1/3((l_1 - l_2)^2 + (m_1 - m_2)^2 + (u_1 - u_2)^2)} \quad (8)$$

تعریف ۵: اگر $S = \{\tilde{X}_1, \dots, \tilde{X}_n\}$ مجموعه‌ای از n عدد فازی مثلثی را نشان دهد، که در آن $\tilde{X}_i = (l_i, m_i, u_i)$ و اگر $i = 1, \dots, n$ ، $\tilde{X} = (\bar{l}, \bar{m}, \bar{u})$ میانگین n عدد فازی مثلثی باشد، تابع عضویت رابطه ترجیح نسبی $\mu(\tilde{X}_i, \tilde{X})$ درجه ترجیح $\tilde{X}_i$ بر $\tilde{X}$ در S را نشان می‌دهد و با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود. همچنین، اگر $\mu(\tilde{X}_i, \tilde{X}) > \mu(\tilde{X}_j, \tilde{X})$ ، آنگاه $\tilde{X}_i > \tilde{X}_j$. [۳۵]

$$\mu(X_i, \bar{X}) = \frac{1}{2} \left(\frac{(l_i - \bar{u}) + 2(m_i - \bar{m}) + (u_i - \bar{l})}{2 \|T\|} + 1 \right) \quad (9)$$

که در آن؛

$$\|T\| = \begin{cases} \frac{(t_l^+ - t_u^-) + 2(t_m^+ - t_m^-) + (t_u^+ - t_l^-)}{2} & \text{if } t_l^+ \geq t_u^- \\ \frac{(t_l^+ - t_u^-) + 2(t_m^+ - t_m^-) + (t_u^+ - t_l^-)}{2} + (t_u^- - t_l^+) & \text{if } t_l^+ < t_u^- \end{cases}$$

$$t_l^+ = \max_i \{l_i\}, t_m^+ = \max_i \{m_i\}, t_u^+ = \max_i \{u_i\}, t_l^- = \min_i \{l_i\}, t_m^- = \min_i \{m_i\}, t_u^- = \min_i \{u_i\}$$

۳.۲. تئوری اعداد Z

اولین بار مفهوم اعداد Z توسط زاده [۳۶] به عنوان یک نسخه عمومی از نظریه عدم قطعیت پیشنهاد شد که برای محاسبه اعدادی که قابل اعتماد نیستند در نظر گرفته شده است. اعداد Z به صورت یک جفت عدد فازی بصورت $Z = (A, B)$ می‌باشد که مولفه اول A یک زیر مجموعه فازی از دامنه X و مولفه دوم B یک زیر مجموعه فازی از بازه واحد و نشانگر قابلیت اطمینان مولفه A می‌باشد.

$$\text{Prob}(X \text{ is } A) \text{ is } B \quad (10)$$

این محدودیت عمومی به عنوان یک محدودیت احتمالی شناخته می شود که بیانگر یک تابع توزیع احتمالی $R(x)$ می باشد. به طور خاص می توان آنرا به شرح رابطه (۱۱) عنوان کرد.

$$R(x): X \text{ is } A \rightarrow \text{poss}(X=u) = \mu_A(u) \quad (11)$$

در معادله فوق μ_A یک تابع عضویت از A می باشد و u یک مقدار کلی کلی از X است. μ_A می تواند به عنوان یک محدودیت مرتبط با $R(x)$ در نظر گرفته شود. این به این معنی است که $\mu_A(u)$ چه درجه ای از رضایتمندی u را پوشش می دهد. بنابراین، X یک متغیر تصادفی با توضیح احتمالی $R(x)$ است که نقش یک محدودیت احتمالی بر روی X دارد. محدودیت احتمالی و تابع چگالی احتمال X به شرح روابط (۱۲) و (۱۳) می باشند:

$$R(x): X \text{ is } p \quad (12)$$

$$R(x): X \text{ is } p \rightarrow (u \leq X \leq u + du) = p(u)du \quad (13)$$

در معادله (۱۲)، du نشانگر مشتق جزئی u می باشد.

۳.۳. روش Fuzzy PIPRECIA

روش PIPRECIA برای اولین بار در سال ۲۰۱۷ ارائه شده است [۲۸]. در ادامه، گام های مربوط به روش توسعه یافته PIPRECIA در محیط فازی ارائه شده است.

گام ۱) تشکیل مجموعه معیارها جهت ارزیابی و تشکیل یک تیم تصمیم گیری
گام ۲) برای تعیین اهمیت نسبی معیارها، هر تصمیم گیرنده به طور جداگانه معیارهای از پیش مرتب شده را با شروع از معیار دوم ارزیابی می کند، مانند رابطه (۱۴).

$$\bar{s}_j' = \begin{cases} > \bar{1} & \text{if } C_j > C_{j-1} \\ = \bar{1} & \text{if } C_j = C_{j-1} \\ < \bar{1} & \text{if } C_j < C_{j-1} \end{cases} \quad (14)$$

که در اینجا $\bar{s}_j'$ نشان دهنده ارزیابی انجام شده توسط تصمیم گیرنده j است.
برای به دست آوردن یک ماتریس $\bar{R}_j$ ، لازم است میانگین گیری انجام شود.
ماتریس $\bar{S}_j'$ با استفاده از میانگین هندسی به یک ماتریس تبدیل می شود. تصمیم گیرندگان با اعمال مقیاس های تعریف شده در جداول ۳ و ۴ معیارها را ارزیابی می کنند.

جدول ۳- ارزیابی معیارها بر اساس مقیاس ۱-۲

Table ۳. Scale ۱-۲ for the assessment of criteria

Linguistic scale			Fuzzy number			DFV
			1	m	u	
Almost equal value	Scale ۱-۲	۱	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۵۰	۱.۰۰۸
Slightly more significant		۲	۱.۱۰۰	۱.۱۵۰	۱.۲۰۰	۱.۱۵۰
Moderately more significant		۳	۱.۲۰۰	۱.۳۰۰	۱.۳۵۰	۱.۲۹۲
More significant		۴	۱.۳۰۰	۱.۴۵۰	۱.۵۰۰	۱.۴۳۳

Much more significant	۵	۱.۴۰۰	۱.۶۰۰	۱.۶۵۰	۱.۵۷۵
Dominantly more significant	۶	۱.۵۰۰	۱.۷۵۰	۱.۸۰۰	۱.۷۱۷
Absolutely more significant	۷	۱.۶۰۰	۱.۹۰۰	۱.۹۵۰	۱.۸۵۸

جدول ۴- ارزیابی معیارها بر اساس مقیاس ۱-۰

Table ۴. Scale ۰-۱ for the assessment of criteria

	Fuzzy number			DFV	Linguistic scale
	l	m	u		
Scale ۰-۱	۰.۶۶۷	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۰.۹۴۴	Weakly less significant
	۰.۵۰۰	۰.۶۶۷	۱.۰۰۰	۰.۶۹۴	Moderately less significant
	۰.۴۰۰	۰.۵۰۰	۰.۶۶۷	۰.۵۱۱	Less significant
	۰.۳۳۳	۰.۴۰۰	۰.۵۰۰	۰.۴۰۶	Really less significant
	۰.۲۸۶	۰.۳۳۳	۰.۴۰۰	۰.۳۳۷	Much less significant
	۰.۲۵۰	۰.۲۸۶	۰.۳۳۳	۰.۲۸۸	Dominantly less significant
	۰.۲۲۲	۰.۲۵۰	۰.۲۸۶	۰.۲۵۱	Absolutely less significant

گام ۳) تعیین ضریب $\bar{k}_j$

$$\bar{k}_j = \begin{cases} = \bar{1} & \text{if } j=1 \\ 2 - \bar{s}_j & \text{if } j > 1 \end{cases} \quad (15)$$

گام ۴) تعیین وزن فازی

$$\bar{k}_j = \begin{cases} = \bar{1} & \text{if } j=1 \\ 2 - \bar{s}_j & \text{if } j > 1 \end{cases} \quad (16)$$

گام ۵) تعیین وزن نسبی معیار

$$\bar{w}_j = \frac{\bar{q}_j}{\sum_{j=1}^n \bar{q}_j} \quad (17)$$

در مراحل زیر معکوس روش PIPRECIA فازی پیاده‌سازی می‌شود:

گام ۶) برای تعیین اهمیت نسبی معیارها، هر تصمیم گیرنده به طور جداگانه معیارهای از پیش مرتب شده را با شروع از معیار ماقبل آخر ارزیابی می‌کند.

$$\overline{s'_j} = \begin{cases} > \overline{1} & \text{if } C_j > C_{j+1} \\ = \overline{1} & \text{if } C_j = C_{j+1} \\ < \overline{1} & \text{if } C_j < C_{j+1} \end{cases} \quad (18)$$

مجدداً ماتریس $\overline{s'_j}$ با استفاده از میانگین هندسی بدست می‌آید.

گام ۷) تعیین ضریب $\overline{k'_j}$

$$\overline{k'_j} = \begin{cases} = \overline{1} & \text{if } j = n \\ 2 - \overline{s'_j} & \text{if } j > n \end{cases} \quad (19)$$

که در اینجا n تعداد کل معیارها می‌باشد.

گام ۸) تعیین وزن فازی $\overline{q'_j}$

$$\overline{q'_j} = \begin{cases} = \overline{1} & \text{if } j = n \\ \frac{\overline{q'_{j-1}}}{\overline{k'_j}} & \text{if } j > n \end{cases} \quad (20)$$

گام ۹) تعیین وزن نسبی معیار

$$\overline{w'_j} = \frac{\overline{q'_j}}{\sum_{j=1}^n \overline{q'_j}} \quad (21)$$

گام ۱۰) تعیین وزن نهایی

$$\overline{w''_j} = \frac{1}{2}(\overline{w'_j} + \overline{w'_j}) \quad (22)$$

۳.۴. روش Z-number WASPAS

روش WASPAS در سال ۲۰۱۲ ارائه شده است [۳۷]. در ادامه، گام‌های مربوط به روش توسعه‌یافته WASPAS بر اساس تئوری اعداد Z ارائه شده است.

گام ۱) تشکیل ماتریس تصمیم با استفاده از متغیرهای زبانی Z

با توجه به متغیرهای زبانی ارائه شده در جدول ۵، هریک از گزینه‌ها با توجه به معیارهای مورد بررسی مقاداردهی می‌شوند.

جدول ۵- تبدیل متغیرهای زبانی مربوط به اعداد Z به اعداد فازی مثلثی

Table ۵. Linguistic terms based on Z-number theory and their corresponding fuzzy numbers

Linguistic term	Fuzzy number			Linguistic term	Fuzzy number		
	l	m	u		l	m	u
VH,VH	۸.۵۴	۹.۴۹	۹.۴۹	VH,H	۷.۵۳	۸.۳۷	۸.۳۷
VH,M	۶.۳۶	۷.۰۷	۷.۰۷	VH,L	۴.۹۳	۵.۴۸	۵.۴۸

VH,VL	۲.۸۵	۳.۱۶	۳.۱۶	H,VH	۶.۶۴	۸.۵۴	۹.۴۹
H,H	۵.۸۶	۷.۵۳	۸.۳۷	H,M	۴.۹۵	۶.۳۶	۷.۰۷
H,L	۳.۸۴	۴.۹۳	۵.۴۸	H,VL	۲.۲۱	۲.۸۵	۳.۱۶
MH,VH	۴.۷۴	۶.۶۴	۸.۵۴	MH,H	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳
MH,M	۳.۵۴	۴.۹۵	۶.۳۶	MH,L	۲.۷۴	۳.۸۴	۴.۹۳
MH,VL	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	M,VH	۲.۸۵	۴.۷۴	۶.۶۴
M,H	۲.۵۱	۴.۲۸	۵.۸۶	M,M	۲.۱۲	۳.۵۴	۴.۹۵
M,L	۱.۶۴	۲.۷۴	۳.۸۳	M,VL	۰.۹۵	۱.۵۸	۲.۲۱
ML,VH	۰.۹۵	۲.۸۵	۴.۷۴	ML,H	۰.۸۴	۲.۵۱	۴.۱۸
ML,M	۰.۷۱	۲.۱۲	۳.۵۴	ML,L	۰.۵۵	۱.۶۴	۲.۷۴
ML,VL	۰.۳۲	۰.۹۵	۱.۵۸	L,VH	۰	۰.۹۵	۲.۸۵
L,H	۰	۰.۸۴	۲.۵۱	L,M	۰	۰.۷۱	۲.۱۲
L,L	۰	۰.۵۵	۱.۶۴	L,VL	۰	۰.۳۲	۰.۹۵
VL,VH	۰	۰	۰.۹۵	VL,H	۰	۰	۰.۸۴
VL,M	۰	۰	۰.۷۱	VL,L	۰	۰	۰.۵۵
VL,VL	۰	۰	۰.۳۲				

گام ۲) تشکیل ماتریس تصمیم
متغیرهای زبانی ارائه شده در گام قبل با استفاده از جدول ۵ به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند. ماتریس تصمیم مجموع β به صورت رابطه (۲۳) نمایش داده می‌شود.

$$\beta = \begin{bmatrix} (x_{11}^l, x_{11}^m, x_{11}^u) & (x_{12}^l, x_{12}^m, x_{12}^u) & K & (x_{1n}^l, x_{1n}^m, x_{1n}^u) \\ (x_{21}^l, x_{21}^m, x_{21}^u) & K & K & K \\ K & K & K & K \\ (x_{m1}^l, x_{m1}^m, x_{m1}^u) & (x_{m2}^l, x_{m2}^m, x_{m2}^u) & K & (x_{mn}^l, x_{mn}^m, x_{mn}^u) \end{bmatrix} \quad (23)$$

که در آن m تعداد گزینه‌ها، n تعداد معیارها، و x_{mn} نشان دهنده ترجیح گزینه i ام در معیار j ام است.

گام ۳) بی مقیاس کردن ماتریس تصمیم (نرمال سازی ماتریس تصمیم)
جهت بی مقیاس سازی ماتریس تصمیم از روابط (۲۴) و (۲۵) استفاده می شود.

$$\frac{o}{x_{ij}} = (\frac{-l}{x_{ij}}, \frac{-m}{x_{ij}}, \frac{-u}{x_{ij}})$$

برای معیارهای از جنس مثبت:

$$\frac{o}{x_{ij}} = \frac{\frac{o}{x_{ij}}}{\max_i \frac{o}{x_{ij}}} \quad (24)$$

برای معیارهای از جنس هزینه (منفی):

$$\frac{o}{x_{ij}} = \frac{\min_i \frac{o}{x_{ij}}}{\frac{o}{x_{ij}}} \quad (25)$$

گام ۴) تشکیل ماتریس تصمیم موزون

در این مرحله ترجیحات و وزن (w_i) هر یک از معیارها بر روی ماتریس تصمیم اعمال و ماتریس موزون با استفاده از دو روش مدل مجموع وزنی (WSM) و مدل ضرب وزنی (WPM) به ترتیب با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷) محاسبه می شود.

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{o}{x_{ij}} (w_j^l, w_j^m, w_j^u) \quad (26)$$

$$P_i = \prod_{j=1}^n \frac{o}{x_{ij}} (w_j^l, w_j^m, w_j^u) \quad (27)$$

گام ۵) محاسبه مقدار K_i

در این گام، مقدار تابع بهیمنگی گزینه i ام با استفاده از رابطه (۲۸) محاسبه می گردد. بالاترین مقدار K_i ، به عنوان بهترین گزینه و کمترین مقدار K_i به عنوان بدترین گزینه انتخاب می شوند.

$$K_i = \lambda \sum_{j=1}^n Q_i + (1-\lambda) \sum_{j=1}^n P_i \quad (28)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1, 0 \leq K_i \leq 1$$

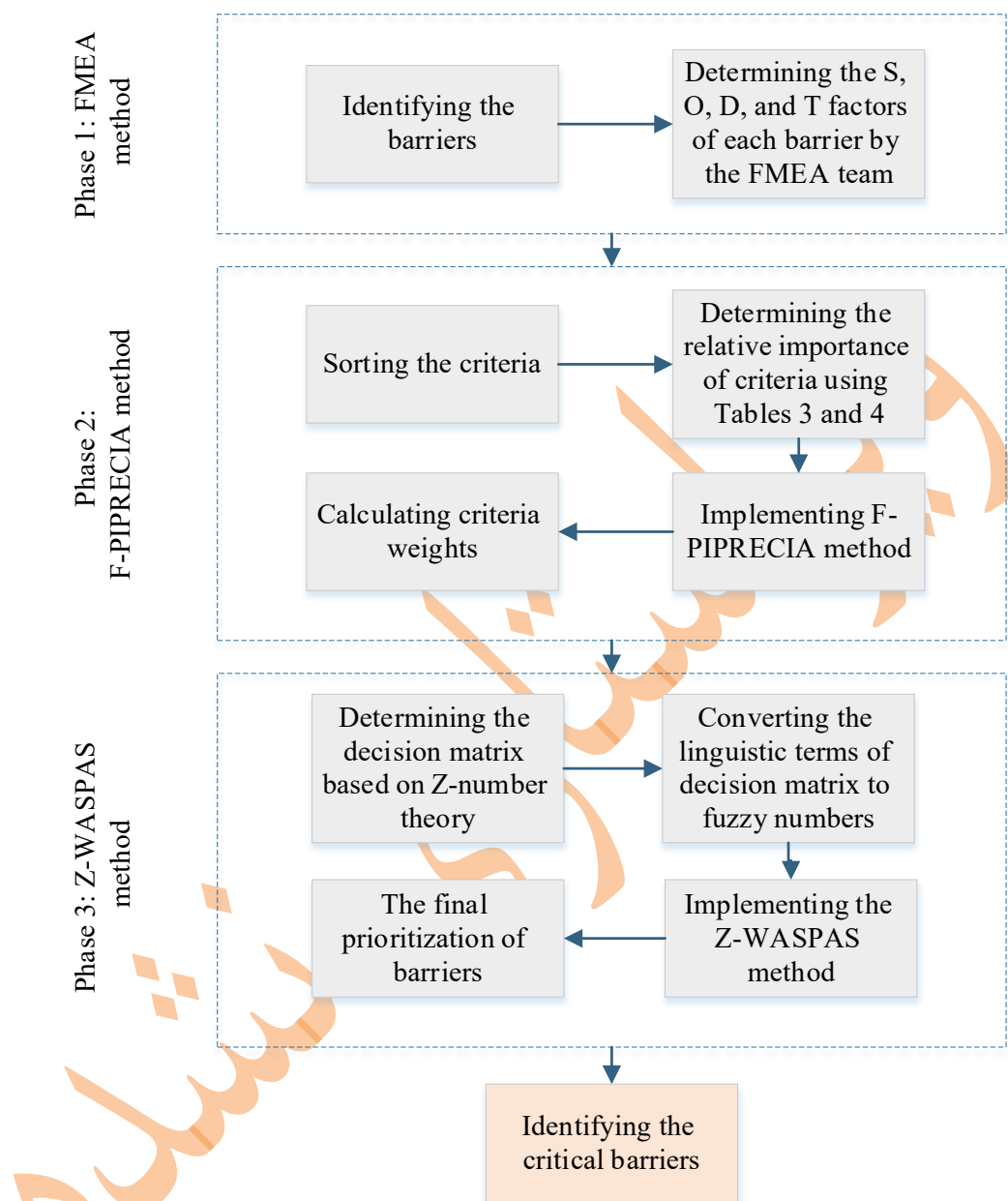
که در آن؛

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^m P_i}{\sum_{i=1}^m Q_i + \sum_{i=1}^m P_i} \quad (29)$$

۴. رویکرد پیشنهادی

در این بخش، رویکرد پیشنهادی این تحقیق با بهره گیری از روش های FMEA، PIPRECIA فازی و Z-WASPAS برای ارزیابی و اولویت بندی موانع ارائه می گردد. رویکرد پیشنهادی در سه فاز ارائه می گردد. در فاز اول این رویکرد ضمن شناسایی موانع توسط تیم FMEA، مقادیر معیارهای چهارگانه نیز امتیاز دهی می شوند. در این فاز قابلیت اطمینان هر کدام موانع شناسایی شده، توسط تیم خبره مربوطه تعیین می گردد. با استفاده از روش نمونه گیری هدفمند، تیم FMEA از سه خبره دارای تجربه و تخصص در زمینه های لجستیک و زنجیره تامین، مدیریت تولید و عملیات و فناوری های اینترنت اشیا تشکیل شده است. اطلاعات مربوط به تیم خبره نشان می دهد اعضا بین ۸ تا ۱۴ سال سابقه فعالیت دارند. در فاز دوم، در راستای در نظر گرفتن اهمیت متفاوت

به ازای معیارها از روش PIPRECIA فازی استفاده می‌گردد به نحوی که پس از مرتب کردن معیارها با استفاده از متغیرهای کلامی، این متغیرها با استفاده از جداول ۳ و ۴ به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌گردد. در ادامه و بر اساس گام سوم از این روش، $\bar{K}_j$ با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود. سپس، وزن فازی معیارها با استفاده از رابطه (۱۶) تعیین می‌شود. در گام پنجم، وزن نسبی هر معیار با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود. در ادامه، معکوس روش PIPRECIA فازی پیاده‌سازی می‌شود به طوری که برای تعیین اهمیت نسبی معیارها، هر تصمیم‌گیرنده معیارهای از پیش مرتب شده را با شروع از معیار ماقبل آخر ارزیابی می‌کند. سپس با محاسبه ضریب $\bar{K}_j'$ با استفاده از رابطه (۱۸)، وزن فازی و وزن نسبی معیارها به ترتیب با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱) محاسبه می‌شود. در آخر، وزن نهایی معیارها با استفاده از رابطه (۲۲) تعیین می‌گردد. در فاز سوم بر اساس خروجی‌های فاز اول و دوم سعی شده است اولویت‌بندی موانع شناسایی شده با توجه به اهمیت‌های متفاوت معیارها، با استفاده از روش Z-WASPAS انجام گیرد. این روش بر خلاف روش WASPAS مرسوم، علاوه بر در نظر گرفتن مقادیر فازی، قابلیت در نظر گرفتن قابلیت اطمینان برای هر معیار به ازای گزینه را دارد. در این روش پس از تعیین ماتریس تصمیم که درایه‌های آن متشکل از اعداد فازی و مقادیر قابلیت اطمینان (اعداد-Z) هستند، این مقادیر با استفاده از جدول ۵ به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند. سپس بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم برای معیارها مثبت و منفی به ترتیب با استفاده از روابط (۲۴) و (۲۵) انجام می‌شود. در ادامه و با استفاده از وزن‌های بدست آمده برای هر معیار با استفاده از روش PIPRECIA فازی در فاز قبل، ماتریس موزون با استفاده از دو روش مدل مجموع وزنی و مدل ضرب وزنی به ترتیب با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷) محاسبه می‌شود. در آخر مقدار تابع بهینگی با استفاده از رابطه (۲۸) برای هر گزینه محاسبه و اولویت‌بندی گزینه‌ها انجام می‌شود. روند اجرایی رویکرد پیشنهادی در شکل ۱ نیز نمایش داده شده است.



شکل ۱؛ رویکرد پیشنهادی

Fig. ۱. Proposed approach

۵. مطالعه موردی و تحلیل نتایج

۵.۱. یافته‌ها و تحلیل مقایسه‌ای

در راستای بررسی قابلیت رویکرد پیشنهادی در این تحقیق، سعی بر آن است که اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند در یک کارخانه فعال در صنعت لوازم خانگی با استفاده از این رویکرد صورت پذیرد. کارخانه مذکور فعالیت خود را از سال ۱۳۹۴ در منطقه آزاد ارس (شهر جلفا) واقع در شمال غربی کشور ایران با هدف مونتاژ لوازم خانگی آغاز کرد.

فهرست ۱۶ مانع شناسایی شده ناشی از روش FMEA جهت پیاده‌سازی لجستیک هوشمند در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- مانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند

Table ۶. Barriers to implementing smart logistics

Symbol	Barrier
B ^۱	Lack of sufficient financial resources
B ^۲	Lack of a development strategy
B ^۳	Low risk-taking (low risk appetite)
B ^۴	Shortage of qualified personnel
B ^۵	Insufficient number of staff
B ^۶	No dedicated unit for implementing smart systems in logistics
B ^۷	Lack of customer demand
B ^۸	Poor linkage with the external environment
B ^۹	Lack of trust among partners
B ^{۱۰}	Deficiencies in regulations
B ^{۱۱}	Unfavourable macroeconomic conditions
B ^{۱۲}	Lack of government support
B ^{۱۳}	High implementation costs
B ^{۱۴}	System instability
B ^{۱۵}	Divergent objectives among partners
B ^{۱۶}	Administrative bureaucracy

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی در ارزیابی مانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند بررسی می‌شود. ابتدا مانع موجود توسط تیم FMEA شناسایی گردیده و مقادیر فاکتورهای چهارگانه گانه (شدت (S)، وقوع (O)، احتمال کشف (D) و زمان (T) به ازای هر مانع توسط این تیم تعیین می‌گردد (جدول ۷ مشاهده شود). سپس، با توجه به عدم قطعیت و همچنین عدم اطمینان در این فاکتورها از تئوری اعداد Z بهره گرفته می‌شود. تئوری اعداد Z علاوه بر در نظر گرفتن عدم قطعیت در معیارها، عدم قطعیت نظرات خبرگان را نیز مورد توجه قرار می‌دهد. مقادیر متغیرهای زبانی معیارهای چهارگانه به ازای مانع با توجه به نظرات تیم FMEA در جدول ۷ ارائه شده است. سپس این مقادیر با استفاده از جدول ۵ به مقادیر فازی مثلثی تبدیل می‌شوند.

جدول ۷- مقادیر شاخص‌ها به ازای مانع در قالب متغیرهای زبانی Z

Table ۷. Evaluation of barriers based on linguistic variables based on Z-number theory

S	O	D	T
---	---	---	---

	DM ^۱	DM ^۲	DM ^۳	DM ^۱	DM ^۲	DM ^۳	DM ^۱	DM ^۲	DM ^۳	DM ^۱	DM ^۲	DM ^۳
B ^۱	VH,M	VH,H	VH,H	VH,VH	VH,VH	H,VH	VL,VL	VL,VL	M,M	MH,VL	MH,VH	MH,VL
B ^۲	MH,H	VH,H	MH,L	VH,H	VH,VL	M,M	ML,H	H,L	MH,L	VH,H	L,VL	L,VL
B ^۳	VH,M	VH,VL	ML,H	L,M	ML,VL	MH,H	L,H	VL,VL	MH,VL	MH,VL	M,H	MH,H
B ^۴	MH,VH	VH,VL	L,H	VH,VL	H,L	MH,VL	ML,VL	ML,VL	L,VL	H,H	VL,M	VH,H
B ^۵	ML,VL	MH,L	H,H	H,M	H,M	MH,H	MH,H	H,M	L,VL	L,VL	ML,M	ML,VH
B ^۶	VH,H	VH,H	ML,VL	MH,H	H,M	M,M	VL,VH	L,VL	H,L	MH,H	H,H	ML,VL
B ^۷	ML,H	ML,VL	VL,VH	VH,H	VL,M	ML,VL	VH,H	VL,VL	MH,VL	MH,L	MH,VL	M,M
B ^۸	VL,VH	MH,VL	H,L	H,H	H,L	ML,VL	ML,VL	ML,VL	H,M	VH,H	M,M	ML,M
B ^۹	VL,M	ML,VL	MH,H	ML,M	MH,VL	VH,M	L,H	VL,VL	MH,H	MH,VL	VH,H	ML,M
B ^{۱۰}	VL,VL	VL,VL	MH,H	H,H	MH,H	M,H	VH,VL	VH,H	H,L	ML,VL	MH,L	VH,H
B ^{۱۱}	VH,H	VH,H	ML,VL	ML,H	VH,M	M,M	VH,VH	L,VH	H,L	MH,L	H,H	ML,VL
B ^{۱۲}	M,VH	L,VL	M,H	VH,VL	M,VH	H,L	MH,VL	MH,L	VH,H	VH,VL	ML,VL	MH,H
B ^{۱۳}	MH,VH	VH,VL	L,H	VH,VL	H,L	MH,VL	MH,VL	ML,VL	L,VL	H,H	ML,VL	VH,H
B ^{۱۴}	VH,VL	M,H	MH,H	ML,VL	VH,H	MH,VL	VH,M	ML,H	ML,VL	M,H	MH,H	MH,L
B ^{۱۵}	VH,VL	M,H	MH,H	ML,VL	VH,H	MH,VL	L,VL	ML,H	ML,VL	M,H	MH,H	MH,L
B ^{۱۶}	VH,M	VH,VH	VH,M	H,VH	H,VH	H,VH	M,M	VL,VH	M,M	MH,VL	VH,VH	MH,VL

در ادامه و بر اساس فاز دوم رویکرد پیشنهادی، وزن فاکتورها با استفاده از روش F-PIPRECIA تعیین می‌گردد. بر اساس این روش، ماتریس‌های متشکل از نگرش تیم خبرگان با استفاده از مقیاس زبانی برای PIPRECIA فاز ۱ و برای PIPRECIA فاز ۲ معکوس به ترتیب در جداول ۸ و ۹ آمده است.

جدول ۸- نگرش تیم خبرگان با استفاده از مقیاس زبانی برای PIPRECIA فاز ۱

Table ۸. Respondents' attitudes using a linguistic scale for fuzzy PIPRECIA

PIPR.	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
DM ^۱				۰.۴۰۰	۰.۵۰۰	۰.۶۶۷	۰.۵۰۰	۰.۶۶۷	۱.۰۰۰	۰.۳۳۳	۰.۴۰۰	۰.۵۰۰
DM ^۲				۰.۵۰۰	۰.۶۶۷	۱.۰۰۰	۰.۴۰۰	۰.۵۰۰	۰.۶۶۷	۰.۲۸۶	۰.۳۳۳	۰.۴۰۰
DM ^۳				۰.۴۰۰	۰.۵۰۰	۰.۶۶۷	۰.۶۶۷	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۰.۶۶۷	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰

جدول ۹- نگرش تیم خبرگان با استفاده از مقیاس زبانی برای PIPRECIA فاز ۲ معکوس

Table ۹. Respondents' attitudes using a linguistic scale for inverse fuzzy PIPRECIA

PIPR-I	T			D			O			S		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
DM ^۱				۱.۳۰۰	۱.۴۵۰	۱.۵۰۰	۰.۶۶۷	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۱۰۰	۱.۱۵۰	۱.۲۰۰
DM ^۲				۱.۵۰۰	۱.۷۵۰	۱.۸۰۰	۰.۵۰۰	۰.۶۶۷	۱.۰۰۰	۱.۳۰۰	۱.۴۵۰	۱.۵۰۰
DM ^۳				۱.۴۰۰	۱.۶۰۰	۱.۶۵۰	۰.۶۶۷	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۳۰۰	۱.۴۵۰	۱.۵۰۰

محاسبات روش PIPRECIA فاز ۲ در جدول ۱۰ آمده است.

جدول ۱۰- جزئیات محاسبات روش PIPRECIA فاز ۲

Table ۱۰. Details of the calculation carried out using fuzzy PIPRECIA

PIPRECIA	s_j			k_j			q_j			w_j			DF
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
S				۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۰.۳۲۳	۰.۳۸۲	۰.۴۲۶	۰.۳۸۰
O	۰.۴۳۳	۰.۵۵۶	۰.۷۷۸	۱.۲۲۲	۱.۴۴۴	۱.۵۶۷	۰.۶۳۸	۰.۶۹۲	۰.۸۱۸	۰.۲۰۶	۰.۲۶۵	۰.۳۴۹	۰.۲۶۹
D	۰.۵۲۲	۰.۷۲۲	۰.۸۸۹	۱.۱۱۱	۱.۲۷۸	۱.۴۷۸	۰.۴۳۲	۰.۵۴۲	۰.۷۳۷	۰.۱۴۰	۰.۲۰۷	۰.۳۱۴	۰.۲۱۴
T	۰.۴۲۹	۰.۵۷۸	۰.۶۳۳	۱.۳۶۷	۱.۴۲۲	۱.۵۷۱	۰.۲۷۵	۰.۳۸۱	۰.۵۳۹	۰.۰۸۹	۰.۱۴۶	۰.۲۳۰	۰.۱۵۰
Σ							۲.۳۴۵	۲.۶۱۵	۳.۰۹۴				

نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش PIPRECIA فازی معکوس در جدول ۱۱ آمده است.

جدول ۱۱- جزئیات محاسبات روش PIPRECIA فازی معکوس

Table ۱۱. Details of the calculation carried out using inverse fuzzy PIPRECIA

PIPRECIA-I	s'_j			k'_j			q'_j			w'_j			DF
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
S	۱.۲۳۳	۱.۳۵۰	۱.۴۰۰	۰.۶۰۰	۰.۶۵۰	۰.۷۶۷	۱.۵۶۵	۳.۴۶۲	۴.۷۶۲	۰.۱۳۶	۰.۳۷۶	۰.۸۷۷	۰.۴۱۹
O	۰.۶۱۱	۰.۸۸۹	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۱۱۱	۱.۳۸۹	۱.۲۰۰	۲.۲۵۰	۲.۸۵۷	۰.۱۰۵	۰.۲۴۴	۰.۵۲۶	۰.۲۶۸
D	۱.۴۰۰	۱.۶۰۰	۱.۶۵۰	۰.۳۵۰	۰.۴۰۰	۰.۶۰۰	۱.۶۶۷	۲.۵۰۰	۲.۸۵۷	۰.۱۴۵	۰.۲۷۱	۰.۵۲۶	۰.۲۹۳
T				۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۱.۰۰۰	۰.۰۸۷	۰.۱۰۹	۰.۱۸۴	۰.۱۱۸
Σ							۵.۴۳۲	۹.۲۱۲	۱۱.۴۷۶				

با توجه به جداول ۱۰ و ۱۱، وزن معیارهای شدت (S)، وقوع (O)، احتمال کشف (D) و زمان (T) به ترتیب ۰.۳۹۹، ۰.۲۶۸، ۰.۲۵۳ و ۰.۱۳۴ بدست آمده است.

در فاز سوم رویکرد پیشنهادی و بر اساس نتایج فازهای اول و دوم، اولویت‌بندی موانع با استفاده از روش توسعه‌یافته Z-WASPAS انجام می‌پذیرد. در ابتدا، ماتریس تصمیم‌گیری روش Z-WASPAS در قالب درایه‌های اعداد Z تشکیل می‌شود به نحوی که سطرها نشانگر گزینه‌های مورد ارزیابی یا همان موانع و ستون‌های این ماتریس نشانگر معیارهای ارزیابی یا همان فاکتورهای چهارگانه می‌باشد. در ادامه ماتریس تصمیم‌گیری تجمیع یافته از نظر خبرگان و نرمال شده در قالب اعداد فازی مثلثی ارائه شده است (جدول ۱۲).

جدول ۱۲- ماتریس تجمیع و نرمال شده فازی

Table ۱۲. Aggregated and normalized fuzzy decision matrix

	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
B _۱	۰.۹۰۰	۱.۰۰۰	۱.۱۱۲	۰.۸۳۳	۱.۰۰۰	۱.۲۰۰	۰.۱۱۴	۰.۶۲۷	۱.۹۳۹	۰.۴۳۱	۰.۶۵۶	۱.۰۳۹
B _۲	۰.۶۰۷	۰.۷۵۹	۰.۹۷۲	۰.۴۳۹	۰.۵۴۸	۰.۶۹۵	۰.۰۴۴	۰.۱۹۷	۰.۵۵۴	۰.۴۱۱	۰.۵۳۵	۰.۷۴۹
B _۳	۰.۴۲۲	۰.۵۳۵	۰.۶۷۳	۰.۱۵۸	۰.۲۷۳	۰.۴۷۳	۰.۱۱۳	۰.۷۲۸	۲.۶۰۱	۰.۴۵۱	۰.۷۳۳	۱.۱۸۵
B _۴	۰.۳۱۹	۰.۴۴۷	۰.۶۶۳	۰.۲۹۰	۰.۳۷۴	۰.۴۸۴	۰.۱۵۶	۱.۰۰۰	۶.۴۲۲	۰.۷۳۱	۰.۹۴۴	۱.۲۷۳

B ₅	۰.۳۷۵	۰.۵۱۷	۰.۶۹۵	۰.۴۹۵	۰.۶۷۵	۰.۹۱۴	۰.۰۴۱	۰.۱۷۷	۰.۴۵۰	۰.۰۹۱	۰.۳۱۴	۰.۶۷۳
B ₆	۰.۶۴۶	۰.۷۴۳	۰.۸۵۵	۰.۳۹۵	۰.۵۷۳	۰.۸۲۴	۰.۰۸۷	۰.۴۲۳	۱.۰۷۰	۰.۵۶۶	۰.۸۵۱	۱.۲۷۵
B _۷	۰.۰۴۹	۰.۱۴۵	۰.۳۱۳	۰.۲۷۶	۰.۳۳۹	۰.۴۴۹	۰.۰۵۵	۰.۲۱۰	۰.۴۵۱	۰.۳۵۲	۰.۵۶۹	۰.۹۲۹
B _۸	۰.۲۲۸	۰.۳۰۰	۰.۴۳۳	۰.۳۵۲	۰.۴۸۷	۰.۶۵۱	۰.۰۶۳	۰.۲۶۹	۰.۷۳۵	۰.۵۶۶	۰.۸۳۳	۱.۲۳۰
B _۹	۰.۱۸۹	۰.۲۸۶	۰.۴۵۸	۰.۳۰۴	۰.۴۱۴	۰.۵۶۷	۰.۰۶۲	۰.۳۳۱	۰.۹۸۳	۰.۵۳۶	۰.۷۵۴	۱.۰۷۷
B _{۱۰}	۰.۱۷۶	۰.۲۴۶	۰.۳۸۱	۰.۴۴۱	۰.۶۴۲	۰.۹۱۷	۰.۰۳۸	۰.۱۳۵	۰.۲۸۹	۰.۵۷۸	۰.۷۸۱	۱.۰۸۵
B _{۱۱}	۰.۶۴۶	۰.۷۴۳	۰.۸۵۵	۰.۳۲۷	۰.۴۷۷	۰.۶۸۳	۰.۰۳۶	۰.۱۴۴	۰.۳۳۲	۰.۴۸۷	۰.۷۳۱	۱.۰۸۵
B _{۱۲}	۰.۲۲۵	۰.۳۹۲	۰.۶۲۸	۰.۳۳۵	۰.۴۶۶	۰.۶۴۴	۰.۰۴۰	۰.۱۵۴	۰.۳۴۷	۰.۴۰۱	۰.۵۹۲	۰.۸۹۵
B _{۱۳}	۰.۳۱۹	۰.۴۴۷	۰.۶۶۳	۰.۲۹۰	۰.۳۷۴	۰.۴۸۴	۰.۱۱۹	۰.۶۳۸	۲.۱۶۳	۰.۷۴۸	۱.۰۰۰	۱.۳۳۶
B _{۱۴}	۰.۴۰۱	۰.۵۵۹	۰.۷۷۳	۰.۳۳۱	۰.۴۱۹	۰.۵۴۰	۰.۰۵۰	۰.۲۱۱	۰.۵۴۷	۰.۵۱۵	۰.۸۳۰	۱.۳۳۶
B _{۱۵}	۰.۴۰۱	۰.۵۵۹	۰.۷۷۳	۰.۳۳۱	۰.۴۱۹	۰.۵۴۰	۰.۰۹۵	۰.۵۸۷	۳.۵۴۳	۰.۵۱۵	۰.۸۳۰	۱.۳۳۶
B _{۱۶}	۰.۸۹۳	۰.۹۹۲	۱.۱۰۳	۰.۷۰۰	۰.۹۳۱	۱.۲۰۰	۰.۰۵۹	۰.۳۱۴	۰.۹۶۹	۰.۶۳۹	۰.۸۲۶	۱.۱۰۸

حال، پس از تجمیع و نرمال سازی ماتری تصمیم گیری، وزن فاکتورها بر ماتریس مذکور لحاظ می گردد. بر اساس روش WASPAS، ماتریس تصمیم گیری با استفاده از دو روش مدل مجموع وزنی (WSM) و مدل ضرب وزنی (WPM) موزون می گردد. ماتریس وزن دار شده یا استفاده از روش WSM در جدول ۱۳ آمده است.

جدول ۱۳- ماتریس وزن دار شده فازی با استفاده از روش WSM
Table ۱۳. Weighted fuzzy decision matrix using WSM

	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
B ₁	۰.۳۵۹	۰.۴۰۰	۰.۴۴۴	۰.۲۲۴	۰.۲۶۸	۰.۳۲۲	۰.۰۲۹	۰.۱۵۹	۰.۴۹۱	۰.۰۵۸	۰.۰۸۸	۰.۱۳۹
B ₂	۰.۲۴۳	۰.۳۰۳	۰.۳۸۹	۰.۱۱۸	۰.۱۴۷	۰.۱۸۷	۰.۰۱۱	۰.۰۵۰	۰.۱۴۰	۰.۰۵۵	۰.۰۷۲	۰.۱۰۰
B ₃	۰.۱۶۹	۰.۲۱۴	۰.۲۶۹	۰.۰۴۲	۰.۰۷۳	۰.۱۲۷	۰.۰۲۹	۰.۱۸۴	۰.۶۵۹	۰.۰۶۰	۰.۰۹۸	۰.۱۵۹
B ₄	۰.۱۲۷	۰.۱۷۹	۰.۲۶۵	۰.۰۷۸	۰.۱۰۰	۰.۱۳۰	۰.۰۳۹	۰.۲۵۳	۱.۶۲۶	۰.۰۹۸	۰.۱۲۶	۰.۱۷۰
B ₅	۰.۱۵۰	۰.۲۰۷	۰.۲۷۸	۰.۱۳۳	۰.۱۸۱	۰.۲۴۵	۰.۰۱۰	۰.۰۴۵	۰.۱۱۴	۰.۰۱۲	۰.۰۴۲	۰.۰۹۰
B ₆	۰.۲۵۸	۰.۲۹۷	۰.۳۴۲	۰.۱۰۶	۰.۱۵۴	۰.۲۲۱	۰.۰۲۲	۰.۱۰۷	۰.۲۷۱	۰.۰۷۶	۰.۱۱۴	۰.۱۷۱
B _۷	۰.۰۱۹	۰.۰۵۸	۰.۱۲۵	۰.۰۷۴	۰.۰۹۱	۰.۱۲۱	۰.۰۱۴	۰.۰۵۳	۰.۱۱۴	۰.۰۴۷	۰.۰۷۶	۰.۱۲۴
B _۸	۰.۰۹۱	۰.۱۲۰	۰.۱۷۳	۰.۰۹۴	۰.۱۳۱	۰.۱۷۵	۰.۰۱۶	۰.۰۶۸	۰.۱۸۶	۰.۰۷۶	۰.۱۱۱	۰.۱۶۵
B _۹	۰.۰۷۶	۰.۱۱۴	۰.۱۸۳	۰.۰۸۲	۰.۱۱۱	۰.۱۵۲	۰.۰۱۶	۰.۰۸۴	۰.۲۴۹	۰.۰۷۲	۰.۱۰۱	۰.۱۴۴
B _{۱۰}	۰.۰۷۰	۰.۰۹۸	۰.۱۵۲	۰.۱۱۸	۰.۱۷۲	۰.۲۴۶	۰.۰۱۰	۰.۰۳۴	۰.۰۷۳	۰.۰۷۷	۰.۱۰۵	۰.۱۴۵
B _{۱۱}	۰.۲۵۸	۰.۲۹۷	۰.۳۴۲	۰.۰۸۸	۰.۱۲۸	۰.۱۸۳	۰.۰۰۹	۰.۰۳۷	۰.۰۸۴	۰.۰۶۵	۰.۰۹۸	۰.۱۴۵
B _{۱۲}	۰.۰۹۰	۰.۱۵۷	۰.۲۵۱	۰.۰۹۰	۰.۱۲۵	۰.۱۷۳	۰.۰۱۰	۰.۰۳۹	۰.۰۸۸	۰.۰۵۴	۰.۰۷۹	۰.۱۲۰
B _{۱۳}	۰.۱۲۷	۰.۱۷۹	۰.۲۶۵	۰.۰۷۸	۰.۱۰۰	۰.۱۳۰	۰.۰۳۰	۰.۱۶۲	۰.۵۴۸	۰.۱۰۰	۰.۱۳۴	۰.۱۷۹
B _{۱۴}	۰.۱۶۰	۰.۲۲۳	۰.۳۰۹	۰.۰۸۹	۰.۱۱۲	۰.۱۴۵	۰.۰۱۳	۰.۰۵۳	۰.۱۳۸	۰.۰۶۹	۰.۱۱۱	۰.۱۷۹
B _{۱۵}	۰.۱۶۰	۰.۲۲۳	۰.۳۰۹	۰.۰۸۹	۰.۱۱۲	۰.۱۴۵	۰.۰۲۴	۰.۱۴۹	۰.۸۹۷	۰.۰۶۹	۰.۱۱۱	۰.۱۷۹

B۱۶	۰.۳۵۷	۰.۳۹۷	۰.۴۴۱	۰.۱۸۸	۰.۲۵۰	۰.۳۲۲	۰.۰۱۵	۰.۰۷۹	۰.۲۴۶	۰.۰۸۶	۰.۱۱۱	۰.۱۴۸
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

سپس ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از روش WPM موزون می‌گردد (جدول ۱۴ مشاهده شود).

جدول ۱۴- ماتریس وزن دار شده فازی با استفاده از روش WPM

Table ۱۴. Weighted fuzzy decision matrix using WPM

	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
B۱	۰.۹۶	۱.۰۰	۱.۰۴	۰.۶۷	۰.۷۰	۰.۷۴	۰.۴۱	۰.۶۳	۰.۸۴	۰.۶۸	۰.۷۲	۰.۷۷
B۲	۰.۸۲	۰.۹۰	۰.۹۹	۰.۵۶	۰.۶۰	۰.۶۴	۰.۳۲	۰.۴۷	۰.۶۱	۰.۶۸	۰.۷۰	۰.۷۳
B۳	۰.۷۱	۰.۷۸	۰.۸۵	۰.۴۳	۰.۵۰	۰.۵۷	۰.۴۱	۰.۶۵	۰.۹۰	۰.۶۹	۰.۷۳	۰.۷۸
B۴	۰.۶۳	۰.۷۲	۰.۸۵	۰.۵۰	۰.۵۴	۰.۵۸	۰.۴۴	۰.۷۱	۱.۱۳	۰.۷۳	۰.۷۶	۰.۷۹
B۵	۰.۶۸	۰.۷۷	۰.۸۶	۰.۵۸	۰.۶۳	۰.۶۹	۰.۳۱	۰.۴۶	۰.۵۸	۰.۵۵	۰.۶۵	۰.۷۲
B۶	۰.۸۴	۰.۸۹	۰.۹۴	۰.۵۵	۰.۶۰	۰.۶۷	۰.۳۸	۰.۵۷	۰.۷۲	۰.۷۱	۰.۷۵	۰.۷۹
B۷	۰.۳۰	۰.۴۶	۰.۶۳	۰.۵۰	۰.۵۳	۰.۵۷	۰.۳۴	۰.۴۸	۰.۵۸	۰.۶۶	۰.۷۱	۰.۷۶
B۸	۰.۵۵	۰.۶۲	۰.۷۲	۰.۵۳	۰.۵۸	۰.۶۳	۰.۳۵	۰.۵۱	۰.۶۵	۰.۷۱	۰.۷۵	۰.۷۹
B۹	۰.۵۱	۰.۶۱	۰.۷۳	۰.۵۱	۰.۵۵	۰.۶۰	۰.۳۵	۰.۵۳	۰.۷۰	۰.۷۰	۰.۷۴	۰.۷۷
B۱۰	۰.۵۰	۰.۵۷	۰.۶۸	۰.۵۶	۰.۶۲	۰.۶۹	۰.۳۱	۰.۴۳	۰.۵۲	۰.۷۱	۰.۷۴	۰.۷۷
B۱۱	۰.۸۴	۰.۸۹	۰.۹۴	۰.۵۲	۰.۵۸	۰.۶۳	۰.۳۰	۰.۴۳	۰.۵۳	۰.۶۹	۰.۷۳	۰.۷۷
B۱۲	۰.۵۵	۰.۶۹	۰.۸۳	۰.۵۲	۰.۵۷	۰.۶۲	۰.۳۱	۰.۴۴	۰.۵۴	۰.۶۸	۰.۷۱	۰.۷۵
B۱۳	۰.۶۳	۰.۷۲	۰.۸۵	۰.۵۰	۰.۵۴	۰.۵۸	۰.۴۱	۰.۶۳	۰.۸۶	۰.۷۳	۰.۷۶	۰.۷۹
B۱۴	۰.۶۹	۰.۷۹	۰.۹۰	۰.۵۲	۰.۵۶	۰.۶۰	۰.۳۳	۰.۴۸	۰.۶۱	۰.۷۰	۰.۷۵	۰.۷۹
B۱۵	۰.۶۹	۰.۷۹	۰.۹۰	۰.۵۲	۰.۵۶	۰.۶۰	۰.۳۹	۰.۶۲	۰.۹۷	۰.۷۰	۰.۷۵	۰.۷۹
B۱۶	۰.۹۶	۱.۰۰	۱.۰۴	۰.۶۴	۰.۶۹	۰.۷۴	۰.۳۴	۰.۵۳	۰.۷۰	۰.۷۲	۰.۷۴	۰.۷۷

سپس در این مرحله مقادیر Q_i و P_i به ترتیب با استفاده از روابط (۲۶) و (۲۷) بدست می‌آیند. همچنین مقدار λ با استفاده از رابطه (۲۹)، (۰.۶۶۹، ۰.۲۴۲، ۰.۰۷۱) بدست آمده است. سپس امتیاز (K_i) با استفاده از رابطه (۲۸) برای هر گزینه محاسبه می‌شود. در آخر، با استفاده از رابطه ترجیح نسبی برای تعیین اولویت اعداد فازی (رابطه ۹)، اولویت‌بندی موانع انجام می‌شود.

جدول ۱۵- محاسبات و نتایج روش Z-WASPAS

Table ۱۵. Calculations and results of the Z-WASPAS method

	Barrier	Q_i			P_i			K_i			$\mu(K_i, \bar{K})$	Rank
		l	m	u	l	m	u	l	m	u		
B۱	Lack of sufficient financial resources	۰.۶۷	۰.۹۱	۱.۳۹	۰.۱۷	۰.۳۱	۰.۴۹	۰.۳۳	۰.۵۱	۰.۷۸	۰.۷۴	۱
		۰	۵	۷	۹	۸	۴	۹	۴	۹	۲	

B۲	Lack of a development strategy	۰.۴۲ ۷	۰.۵۷ ۲	۰.۸۱۶	۰.۱۰ ۰	۰.۱۷ ۶	۰.۲۸ ۲	۰.۲۰ ۷	۰.۳۰ ۶	۰.۴۰ ۷	۰.۴۹ ۰	۸
B۳	Low risk-taking (low risk appetite)	۰.۳۰ ۰	۰.۵۷ ۰	۱.۲۱ ۳	۰.۰۸ ۵	۰.۱۸ ۴	۰.۳۴ ۵	۰.۱۰ ۰	۰.۳۱ ۱	۰.۶۲ ۹	۰.۵۲ ۸	۶
B۴	Shortage of qualified personnel	۰.۳۴ ۳	۰.۶۵ ۹	۲.۱۹ ۲	۰.۱۰ ۳	۰.۲۰ ۹	۰.۴۳ ۸	۰.۱۸ ۲	۰.۳۰ ۷	۱.۰۱ ۳	۰.۶۷ ۱	۲
B۵	Insufficient number of staff	۰.۳۰ ۵	۰.۴۷ ۵	۰.۷۲ ۷	۰.۰۶ ۸	۰.۱۴ ۵	۰.۲۴ ۸	۰.۱۴ ۶	۰.۲۰ ۳	۰.۴۰ ۵	۰.۴۲ ۸	۱۱
B۶	No dedicated unit for implementing smart systems in logistics	۰.۴۶ ۲	۰.۶۷ ۲	۱.۰۰ ۵	۰.۱۲ ۴	۰.۲۲ ۸	۰.۳۵ ۵	۰.۲۳ ۴	۰.۳۷ ۳	۰.۵۶ ۸	۰.۵۶ ۹	۵
B۷	Lack of customer demand	۰.۱۵ ۵	۰.۲۷ ۸	۰.۴۸ ۴	۰.۰۳ ۴	۰.۰۸ ۲	۰.۱۵۶	۰.۰۷ ۳	۰.۱۴ ۶	۰.۲۶ ۳	۰.۳۰ ۶	۱۶
B۸	Poor linkage with the external environment	۰.۲۷ ۷	۰.۴۳ ۰	۰.۶۹۹	۰.۰۷ ۳	۰.۱۳ ۵	۰.۲۳ ۰	۰.۱۴ ۰	۰.۲۳ ۲	۰.۳۸ ۳	۰.۴۰ ۸	۱۲
B۹	Lack of trust among partners	۰.۲۴ ۵	۰.۴۱ ۰	۰.۷۲ ۹	۰.۰۶ ۴	۰.۱۳ ۲	۰.۲۴ ۰	۰.۱۲ ۳	۰.۲۲ ۳	۰.۴۰ ۰	۰.۴۰ ۳	۱۳
B۱۰	Deficiencies in regulations	۰.۲۷ ۵	۰.۴۰ ۹	۰.۶۱۷	۰.۰۶ ۱	۰.۱۱ ۲	۰.۱۸۶	۰.۱۳ ۲	۰.۲۰ ۹	۰.۳۲ ۷	۰.۳۷ ۷	۱۵
B۱۱	Unfavourable macroeconomic	۰.۴۲ ۰	۰.۵۵ ۹	۰.۷۵ ۵	۰.۰۹ ۲	۰.۱۶ ۲	۰.۲۴۶	۰.۲۰ ۰	۰.۲۹ ۲	۰.۴۱ ۲	۰.۴۶ ۸	۹

	condition s											
B ^{۱۲}	Lack of governme nt support	۰.۲۴ ۴	۰.۴۰ ۰	۰.۶۳۲	۰.۰۶ ۱	۰.۱۲ ۳	۰.۲۱ ۱	۰.۱۲ ۱	۰.۲۱ ۴	۰.۳۴ ۹	۰.۳۸ ۳	۱۴
B ^{۱۳}	High implemen tation costs	۰.۳۳ ۶	۰.۵۷ ۵	۱.۱۲ ۲	۰.۰۹ ۷	۰.۱۸ ۸	۰.۳۳ ۵	۰.۱۷ ۵	۰.۳۱ ۵	۰.۵۹ ۳	۰.۵۲ ۵	۷
B ^{۱۴}	System instability	۰.۳۳ ۱	۰.۵۰ ۰	۰.۷۷ ۱	۰.۰۸ ۴	۰.۱۵ ۶	۰.۲۵ ۸	۰.۱۶ ۵	۰.۲۶ ۹	۰.۴۲ ۶	۰.۴۴ ۹	۱۰
B ^{۱۵}	Divergent objectives among partners	۰.۳۴ ۲	۰.۵۹ ۶	۱.۵۳ ۰	۰.۰۹ ۹	۰.۲۰ ۳	۰.۴۱ ۵	۰.۱۷ ۸	۰.۳۳ ۱	۰.۷۸ ۰	۰.۵۸ ۹	۴
B ^{۱۶}	Administr ative bureaucra cy	۰.۶۴ ۵	۰.۸۳ ۶	۱.۱۵ ۷	۰.۱۵ ۱	۰.۲۶ ۹	۰.۴۱۶	۰.۳۱ ۳	۰.۴۵ ۵	۰.۶۵ ۹	۰.۶۶ ۴	۳

با توجه به جدول ۱۵ مشاهده می‌شود که بر اساس رویکرد پیشنهادی (FPIPRECIA-ZWASPAS) موانع B^۱ و B^۴ به ترتیب در اولویت‌های اول و دوم قرار گرفته‌اند. به بیانی دیگر این موانع به عنوان موانع بحرانی در نظر گرفته شده و نیازمند برنامه ریزی جهت اقدامات اصلاحی / پیشگیرانه می‌باشند. همچنین باتوجه به نتایج، می‌توان نتیجه گرفت مانع B^۷ در اولویت آخر قرار گرفته و در حال حاضر نیازی به اقدامات اصلاحی نمی‌باشد و همچنین در جدول ۱۶ مشاهده می‌شود که بر اساس روش امتیاز دهی RPN سنتی، مانع B^{۱۶} در اولویت رسیدگی قرار گرفته است. علاوه بر این موانع B^{۱۱} و B^{۱۵} به طور مشترک در جایگاه چهارم و B^۵ و B^۹ به طور مشترک در جایگاه یازدهم قرار گرفته‌اند. بنابراین، رویکرد FMEA سنتی موانع را در ۱۴ دسته به جای ۱۶ دسته رتبه‌بندی کرده است. این ضعف در رویکرد WASPAS فازی به جهت در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت و وزن‌دهی به فاکتورها بر طرف شده است. چرا که بر اساس اولویت‌بندی حاصل از این روش، B^۱ در اولویت اول، B^{۱۶} در اولویت دوم و B^{۱۵} در اولویت سوم قرار گرفته‌اند و به عنوان مانع بحرانی شناسایی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی، با روش WASPAS فازی به عنوان یک روش قابل اطمینان [۳۸] در شناسایی موانع بحرانی تقریباً مشابه عمل کرده و نتایج ضریب همبستگی ۰.۹۷۶ را نشان می‌دهد و فقط در چند مورد اولویت‌بندی موانع متفاوت است که این تفاوت، به علت در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در کنار عدم قطعیت در مقادیر عوامل می‌باشد که این برتری رویکرد پیشنهادی نسبت به روش‌های موجود در ادبیات را نشان می‌دهد.

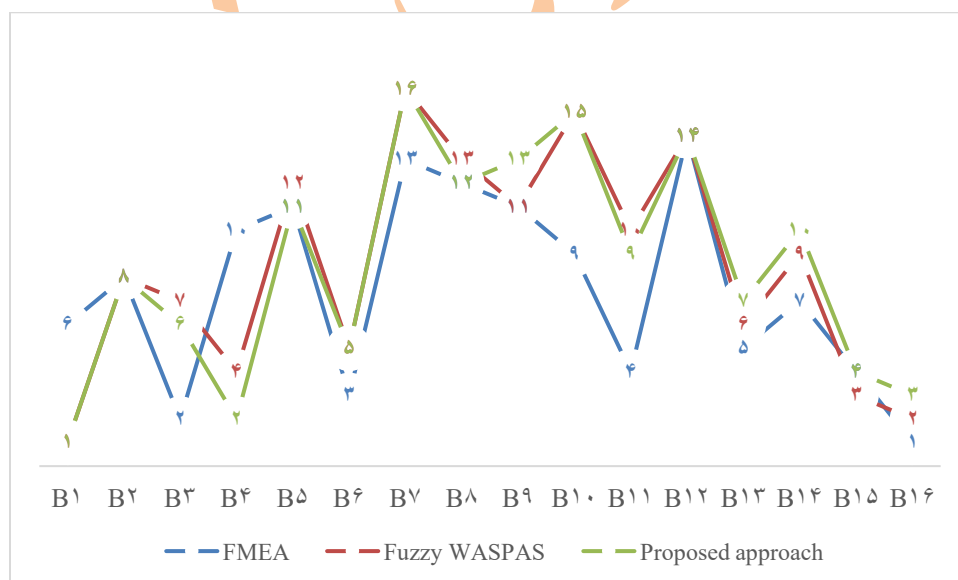
جدول ۱۶- مقایسه اولویت‌بندی حاصل از رویکرد پیشنهادی و روش‌های مرسوم

Table ۱۶. Comparison of ranking by proposed approach and conventional methods

	FMEA		Fuzzy WASPAS		Proposed approach	
	RPN	Rank	Score	Rank	Score	Rank

B ^۱	۱۰۷۲	۶	۰.۵۷۶	۱	۰,۷۴۲	۱
B ^۲	۱۰۱۲	۸	۰.۴۲۱	۸	۰,۴۹۰	۸
B ^۳	۱۳۲۰	۲	۰.۴۳۴	۷	۰,۵۲۸	۶
B ^۴	۷۴۱.۳۳۳۳	۱۰	۰.۴۶۳	۴	۰,۶۷۱	۲
B ^۵	۷۲۸	۱۱	۰.۳۹۱	۱۲	۰,۴۲۸	۱۱
B ^۶	۱۲۵۰.۶۶۷	۳	۰.۴۶۱	۵	۰,۵۶۹	۵
B ^۷	۵۳۸.۶۶۶۷	۱۳	۰.۳۰۸	۱۶	۰,۳۰۶	۱۶
B ^۸	۶۹۰.۶۶۶۷	۱۲	۰.۳۹۰	۱۳	۰,۴۰۸	۱۲
B ^۹	۷۲۸	۱۱	۰.۳۹۴	۱۱	۰,۴۰۳	۱۳
B ^{۱۰}	۹۳۸.۶۶۶۷	۹	۰.۳۱۲	۱۵	۰,۳۷۷	۱۵
B ^{۱۱}	۱۱۴۶.۶۶۷	۴	۰.۴۱۰	۱۰	۰,۴۶۸	۹
B ^{۱۲}	۵۱۴.۶۶۶۷	۱۴	۰.۳۵۹	۱۴	۰,۳۸۳	۱۴
B ^{۱۳}	۱۱۱۴.۶۶۷	۵	۰.۴۴۸	۶	۰,۵۲۵	۷
B ^{۱۴}	۱۰۳۴.۶۶۷	۷	۰.۴۱۹	۹	۰,۴۴۹	۱۰
B ^{۱۵}	۱۱۴۶.۶۶۷	۴	۰.۴۶۳	۳	۰,۵۸۹	۴
B ^{۱۶}	۱۴۱۸.۶۶۷	۱	۰.۵۲۵	۲	۰,۶۶۴	۳

شکل ۲. نتایج روش‌های مرسوم WASPAS فازی و امتیاز RPN سنتی در ارائه رتبه‌بندی کامل در مقایسه با رویکرد پیشنهادی این پژوهش نشان می‌دهد.



شکل ۲؛ مقایسه اولویت‌بندی موانع بر اساس رویکردهای FIPRECIA-ZWASPAS، WASPAS فازی و امتیاز RPN

Fig. ۲. Comparison of barriers prioritization based on FIPRECIA-ZWASPAS, fuzzy WASPAS, and RPN score approaches

۵.۲. بینش‌های مدیریتی

تحلیل FMEA به‌وضوح نشان می‌دهد که محدودیت‌های مالی و کمبود نیروی ماهر دو مانع اصلی در پیاده‌سازی لجستیک هوشمند هستند. مدیریت باید بودجه را به‌طور استراتژیک تأمین و تخصیص دهد. انجام تحلیل‌های دقیق نرخ بازگشت سرمایه (ROI) و تدوین برنامه‌های سرمایه‌گذاری پله‌ای و یا جذب سرمایه خارجی می‌تواند هزینه‌ها را کاهش داده و نیاز بودجه را برطرف کند. پروژه‌های دیجیتال بدون کنترل دقیق هزینه‌ها و منابع، به‌راحتی با کمبود بودجه مواجه و متوقف می‌شوند. از طرفی، شرکت‌هایی که برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری را با به‌طور مناسب انجام داده و تحول دیجیتال را دنبال می‌کنند، فشارهای مالی را با بهبود بهره‌وری تسهیل می‌کنند. به‌طور خلاصه، مدیران ارشد این شرکت باید پروژه لجستیک هوشمند را به‌عنوان اولیوی استراتژیک پیگیری کنند؛ در غیر این صورت، تأمین مالی ناکافی به‌طور قابل‌پیش‌بینی اجرای پروژه را متوقف و یا با شکست مواجه خواهد کرد. به همان اندازه، توسعه نیروی انسانی واجد شرایط ضروری است. کمبود نیروی ماهر یکی از گلوگاه‌های شناخته‌شده است. برای رفع این مشکل، این شرکت باید یک برنامه توسعه شایستگی نیروی کار به اجرا کند. این می‌تواند شامل آموزش‌های درون‌سازمانی، حمایت از اخذ گواهینامه‌های تخصصی، همکاری با آموزشگاه‌های فنی و ارائه تسهیلات برای ارتقای فرهنگ یادگیری سازمانی باشد. ادغام آموزش در اهداف عملکردی و نظام جبران خدمات کارکنان تضمین می‌کند ارتقای مهارت‌ها با سیستم‌های جدید همراه هستند. از طرفی، تیم آموزش‌دیده سریع‌تر با تکنولوژی‌ها و تجهیزات اینترنت اشیاء، پلتفرم‌های تحلیلی و فرایندهای جدید سازگار می‌شود و سودمندی‌های مورد انتظار را به‌دست می‌آورد.

در آخر، همسوسازی استراتژیک و مدیریت تغییر در فرآیند پیاده‌سازی لجستیک هوشمند ضروری است. مدیران باید اطمینان حاصل کنند که پروژه لجستیک هوشمند از حمایت صریح و قابل‌مشاهده مدیران ارشد برخوردار است و چشم‌انداز روشنی دارد. اقدامات کلیدی مدیریتی شامل تأمین سرمایه کافی، آموزش یا استخدام متمرکز نیروی انسانی ماهر، و مدیریت پروژه در یک چارچوب استراتژیک از بالا به پایین است. با پرداختن مستقیم به این موانع حیاتی، این شرکت می‌تواند اجرای موفق لجستیک هوشمند را تضمین نماید.

۶. نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف ارائه یک چارچوب یکپارچه با استفاده از روش‌های F-PIPRECIA و Z-WASPAS جهت ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند صورت پذیرفت، این تحقیق از نظر هدف کاربردی بوده و از منظر روش کمی - کیفی می‌باشد. در این پژوهش از نگرش سه خبره در حوزه لجستیک و مدیریت زنجیره تأمین در قالب تیم FMEA استفاده شد. در ادامه باید بیان داشت پیاده‌سازی لجستیک هوشمند با گذار به صنعت ۴.۰ توسعه‌یافته است. لجستیک هوشمند شامل سیستم‌های بسیاری است که وظیفه آنها بهبود کارایی فرایندهای لجستیک است. با وجود مزایای بسیار، موانعی جهت پیاده‌سازی لجستیک هوشمند وجود دارد. از این رو، شناسایی و رتبه‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند از اهمیت روزافزونی برخوردار است. یکی از رویکردهای شناسایی و رتبه‌بندی موانع، روش FMEA است که به دلیل تحلیل پذیری مناسب، جزء پرکاربردترین روش‌ها است. با وجود گستردگی کاربرد این روش، نقاط ضعف و کاستی‌های این روش منجر شده است که برخی از پژوهشگران به دنبال بهبود این روش مرسوم باشند. بنابراین در این پژوهش، برای اولین بار یک رویکرد توسعه‌یافته FMEA با استفاده از روش F-PIPRECIA جهت وزن‌دهی به معیارها و Z-WASPAS جهت اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، به ترتیب، "کمبود منابع مالی کافی" و "کمبود کارکنان واجد شرایط" به عنوان موانع بحرانی انتخاب شده و در اولویت رسیدگی هستند. از طرفی، "عدم وجود تقاضا از سوی مشتریان" به عنوان اولویت آخر انتخاب شده و در حال حاضر نیازمند اقدامات اصلاحی نمی‌باشد. استفاده از روش توسعه‌یافته منجر به رفع برخی نواقص روش FMEA مرسوم مانند عدم ارائه رتبه‌بندی کامل

گزینه‌ها و عدم در نظر گرفتن وزن برای معیارها شده است. همچنین در رویکرد پیشنهادی، معیار زمان نیز به عنوان یک شاخص مهم مدیریتی در کنار معیارهای شدت، وقوع و احتمال کشف در روش FMEA در نظر گرفته شده است. تعداد محدود خبرگان در حوزه لجستیک هوشمند و همچنین عدم تخصیص وزن به هر یک از خبرگان بر اساس دانش و میزان تجربه آنها، از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌باشد. در آینده ما تحقیقات خود را در راستای رفع محدودیت‌های پژوهش حاضر و توسعه روش FMEA با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط‌های عدم قطعیت نظیر فازی فیثاغورثی، q-rung و فازی کروی گسترش خواهیم داد. فارغ از مسئله استفاده شده برای پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی این پژوهش، این رویکرد در سناریوهای مختلف شناسایی و تحلیل ریسک و حالات خرابی قابل اجرا خواهد بود.

سپاسگزاری

این مقاله حاصل بخشی از پژوهشی در کارخانه هادی کوش ارس است. از ریاست هیئت مدیره این کارخانه و همچنین از اعضای هیئت علمی دانشکده‌های مهندسی صنایع و مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر که در این پژوهش همکاری داشتند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

١. Tang, X., ٢٠٢٠. Research on smart logistics model based on internet of things technology. *IEEE Access*, ٨, ١٥١١٥٠-١٥١١٥٩. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016330>.
٢. Song, Y., Yu, F. R., Zhou, L., Yang, X., and He, Z., ٢٠٢٠. Applications of the internet of things (IoT) in smart logistics: a comprehensive survey. *IEEE Internet of Things Journal*, ٨(٦), ٤٢٥٠-٤٢٧٤. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3034380>.
٣. Lee, S., Kang, Y., and Prabhu, V. V., ٢٠١٦. Smart logistics: distributed control of green crowdsourced parcel services. *International Journal of Production Research*, ٥٤(٢٣), ٦٩٥٦-٦٩٦٨. <https://doi.org/10.1080/00207179.2015.1132806>.
٤. Jafarzadeh Ghouschi, S., Memarpour Ghiaci, A., Rahnamay Bonab, S., and Ranjbarzadeh, R., ٢٠٢٢. Barriers to circular economy implementation in designing of sustainable medical waste management systems using a new extended decision-making and FMEA models. *Environmental Science and Pollution Research*, ١-١٩. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19018-z>.
٥. Ghouschi, S. J., Yousefi, S., and Khazaeili, M., ٢٠١٩. An extended FMEA approach based on the Z-MOORA and fuzzy BWM for prioritization of failures. *Applied Soft Computing*, ٨١, ١٠٥٥٠٥. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105505>.
٦. Jafarzadeh Ghouschi, S., Shaffiee Haghshenas, S., Memarpour Ghiaci, A., Guido, G., and Vitale, A., ٢٠٢٢. Road safety assessment and risks prioritization using an integrated SWARA and MARCOS approach under spherical fuzzy environment. *Neural Computing and Applications*, ١-١٩. <https://doi.org/10.1007/s0021-022-07929-4>.
٧. Fleisch, E., Christ, O., and Dierkes, M., ٢٠٠٥. Die betriebswirtschaftliche vision des internets der dinge. In *Das Internet der Dinge* (pp. ٢-٣٧): Springer. https://doi.org/10.1007/3-040-28299-8_1.
٨. Uckelmann, D., ٢٠٠٨. A definition approach to smart logistics. *Paper presented at the International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking*. https://doi.org/10.1007/978-3-040-88000-2_28.
٩. Barreto, L., Amaral, A., and Pereira, T., ٢٠١٧. Industry ٤.٠ implications in logistics: an overview. *Procedia Manufacturing*, ١٣, ١٢٤٥-١٢٥٢. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.040>.
١٠. Cullity, B., ١٩٧٢. Introduction to magnetic materials (MA, USA. In: Addison-Wesley, Reading.
١١. Lin, C.-C., and Yang, J.-W., ٢٠١٨. Cost-efficient deployment of fog computing systems at logistics centers in industry ٤.٠. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, ١٤(١٠), ٤٦٠٣-٤٦١١. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2827920>.
١٢. Zhang, C., and Peng, D., ٢٠١٣. Countermeasures on how to develop China's smart logistics. *China Business and Market*, ١٠(١), ٣٥-٣٩.
١٣. Zhang, Y., Liu, S., Liu, Y., Yang, H., Li, M., Huisinigh, D., and Wang, L., ٢٠١٨. The 'internet of things' enabled real-time scheduling for remanufacturing of automobile engines. *Journal of Cleaner Production*, ١٨٥, ٥٦٢-٥٧٥. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.061>.
١٤. Zhao, L., ٢٠٠٥. Intelligent logistics and its supporting technology. *Journal. Intell*, ٢٤(١٢), ٤٩-٥٠.

۱۵. McFarlane, D., Giannikas, V., and Lu, W., ۲۰۱۶. Intelligent logistics: Involving the customer. *Computers in Industry*, ۸۱, ۱۰۵-۱۱۵. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.10.002>.
۱۶. Ghoushchi, S. J., Jalalat, S. M., Bonab, S. R., Ghiaci, A. M., Haseli, G., and Tomaskova, H., ۲۰۲۲. Evaluation of wind turbine failure modes using the developed SWARA-CoCoSo methods based on the spherical fuzzy environment. *IEEE Access*, ۱۰, ۸۶۷۵۰-۸۶۷۶۴. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199309>.
۱۷. Sumrit, D., and Keeratibhubordee, J., ۲۰۲۵. Risk assessment framework for reverse logistics in waste plastic recycle industry: A hybrid approach incorporating FMEA decision model with AHP-LOPCOW-ARAS under trapezoidal fuzzy set. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, ۴۲-۸۱. <https://doi.org/10.31181/dmame.2025.42.81>.
۱۸. Phokee, W., Chaiklieng, S., Boriwan, P., Phoka, T., Vanoirbeek, J. and Chatpun, S., ۲۰۲۵. A Cascading Delphi Method-Based FMEA Risk Assessment Framework for Surgical Instrument Design: A Case Study of a Fetoscope. *Applied Sciences*, ۱۵(۱۱), p.۶۲۰۳. <https://doi.org/10.3390/app15116203>.
۱۹. Kumari, S., Ahmad, K., Khan, Z.A. and Ahmad, S., ۲۰۲۵. Analysing the failure modes of water treatment plant using FMEA based on fuzzy AHP and fuzzy VIKOR methods. *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp.۱-۱۶. <https://doi.org/10.1007/s13379-025-10000-8>.
۲۰. Deepak, D., Brar, G.S., Dwivedi, S., Farwaha, H.S., Ranjan, N., Alkhaleel, B.A. and Pandey, S., ۲۰۲۵. Optimizing concrete pump maintenance in the construction sector using enhanced MCDM techniques. *Scientific Reports*, ۱۵(۱), p.۱۳۸۱۶. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98481-3>.
۲۱. Rashidian, F., Eydi, A., and Roghanian, E., ۲۰۲۴. Reliable and green road-rail routing using a hybrid procedure of DANP, COCOSO, and FMEA criticality methods: A case study of cement transportation network in Iran. *Journal of Cleaner Production*, ۴۴۷, ۱۴۱۲۵۰. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141250>.
۲۲. Altubaishe, B., and Desai, S., ۲۰۲۳. Multicriteria decision making in supply chain management using FMEA and hybrid AHP-PROMETHEE algorithms. *Sensors*, ۲۳(۸), ۴۰۴۱. <https://doi.org/10.3390/s23084041>.
۲۳. Jin, G., Meng, Q., and Feng, W., ۲۰۲۲. Optimization of Logistics System with Fuzzy FMEA-AHP Methodology. *Processes*, ۱۰(۱۰), ۱۹۷۳. <https://doi.org/10.3390/pr10101973>.
۲۴. Oturakçı, M., and Konyalıoğlu, A. K., ۲۰۲۲. Action selection based on fuzzy AHP-based TOPSIS method in fuzzy FMEA-based risk assessment: A case study. *Paper presented at the International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-9173-0_40.
۲۵. Bathrinath, S., Mohan, S., Koppiahraj, K., Bhalaji, R., and Santhi, B., ۲۰۲۲. Analysis of factors affecting sustainable performance in construction sites using fuzzy AHP-WASPAS methods. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.393>.
۲۶. Pourmehdi, M., Paydar, M. M., and Asadi-Gangraj, E., ۲۰۲۱. Reaching sustainability through collection center selection considering risk: using the integration of Fuzzy ANP-TOPSIS and FMEA. *Soft Computing*, ۲۵(۱۶), ۱۰۸۸۵-۱۰۸۹۹. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05787-2>.

۲۷. Alvand, A., Mirhosseini, S. M., Ehsanifar, M., Zeighami, E., and Mohammadi, A., ۲۰۲۱. Identification and assessment of risk in construction projects using the integrated FMEA-SWARA-WASPAS model under fuzzy environment: a case study of a construction project in Iran. *International Journal of Construction Management*, ۱-۲۳. <https://doi.org/10.1080/15623509.2021.1877870>.
۲۸. Stanujkic, D., Zavadskas, E. K., Karabasevic, D., Smarandache, F., and Turskis, Z., ۲۰۱۷. *The use of the pivot pairwise relative criteria importance assessment method for determining the weights of criteria*. Infinite Study.
۲۹. Keršulienė, V., Zavadskas, E.K. and Turskis, Z., ۲۰۱۰. Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of business economics and management*, ۱۱(۲), pp.۲۴۳-۲۵۸. <https://doi.org/10.3846/jbem.2010.12>.
۳۰. Popovic, G., Stanujkic, D., Mihic, M., Smarandache, F., Karabasevic, D. and Mircetic, V., ۲۰۲۰. The single-valued Neutrosophic extension of the PIPRECIA method. *Knowledge-Based Systems*, ۳۱۰, p.۱۱۳۲۷۱. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2020.113271>.
۳۱. Ghiaci, A.M. and Gheidari-Kheljani, J., ۲۰۲۴. A hybrid model of extended FMEA model based on F-PIPRECIA and Z-EDAS methods with Bow Tie to evaluate cybersecurity risks in Industry ۴.۰. *Engineering Management and Soft, Computing*, ۹(۲), pp.۱۴۹-۱۷۶. <https://doi.org/10.22091/jemsc.2024.9642.1170>.
۳۲. Ghouschi, S.J., Bonab, S.R., Ghiaci, A.M., Haseli, G., Tomaskova, H. and Hajiaghahi-Keshteli, M., ۲۰۲۱. Landfill site selection for medical waste using an integrated SWARA-WASPAS framework based on spherical fuzzy set. *Sustainability*, ۱۳(۲۴), p.۱۳۹۵۰. <https://doi.org/10.3390/su132413950>. [in Persian]
۳۳. Yücenur, G.N. and Maden, A., ۲۰۲۰. Location selection for a photovoltaic agricultural with f-PIPRECIA and WASPAS methods: A case study. *Energy*, ۳۱۴, p.۱۳۴۱۷۹. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134179>.
۳۴. Lotfi, Z., ۱۹۶۵. Fuzzy sets. *Information and control*, ۸(۳), ۳۳۸-۳۵۳.
۳۵. Wang, Y.J., ۲۰۱۵. Ranking triangle and trapezoidal fuzzy numbers based on the relative preference relation. *Applied mathematical modelling*, ۳۹(۲), pp.۵۸۶-۵۹۹. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.06.011>.
۳۶. Zadeh, L. A., ۲۰۱۱. A note on Z-numbers. *Information Sciences*, ۱۸۱(۱۴), ۲۹۲۳-۲۹۳۲. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.02.022>.
۳۷. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J., and Zakarevicius, A., ۲۰۱۲. Optimization of weighted aggregated sum product assessment. *Elektronika ir elektrotechnika*, ۱۲۲(۶), ۳-۶. <https://doi.org/10.5700/j.1.eee.122.6.1810>.
۳۸. Chakraborty, S., and Saha, A. K., ۲۰۲۲. A framework of LR fuzzy AHP and fuzzy WASPAS for health care waste recycling technology. *Applied Soft Computing*, ۱۲۷, ۱۰۹۳۸۸. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109388>.