



Sharif University of Technology

<https://sjie.journals.sharif.edu/>



Research Article

An Integrated Framework Using F-PIPRECIA and Z-WASPAS Methods to Evaluate the Barriers to the Implementation of Smart Logistics

Ali Memarpour Ghiaci, Mohammadreza Zahedi and Morteza Abbasi *

Industrial Engineering Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran

* corresponding author: (mabbasi@mut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 2 May 2024

Revised: 23 July 2025

Accepted: 26 August 2025

Keywords:

Smart logistics,
industry 4.0,
multi-criteria decision-
making,
PIPRECIA,
WASPAS.

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. A failure mode and effect analysis (FMEA) method based on the fuzzy pivot pairwise relative criteria importance assessment (F-PIPRECIA) and the weighted aggregated sum product assessment method based on Z number theory (Z-WASPAS) was developed in three phases. In the first phase of this smart technology, based on the literature, 16 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 was proposed to cover some disadvantages of the FMEA method, including the 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.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:

Memarpour Ghiaci, A., Zahedi, M.R. and Abbasi, M. 2026. An integrated framework using f-piprecia and z-waspas methods to evaluate the barriers to the implementation of smart logistics, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, 41(2), pp.3-18. <https://doi.org/10.24200/j65.2025.66418.2431>



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

علی معمارپور غیائی، محمدرضا زاهدی و مرتضی عباسی*

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (mabbasi@mut.ac.ir)

چکیده

لجستیک، یکی از محرک‌های رقابت‌پذیری کشورها و شرکت‌هاست و نقشی حیاتی در رشد اقتصادی ایفا می‌کند. با این حال، صنعت لجستیک فعلی هنوز با هزینه‌های بالا و راندمان پایین مواجه است. توسعه‌ی لجستیک هوشمند، فرصت‌هایی را برای حل مشکلات ذکرشده به ارمغان می‌آورد. با وجود مزایای بسیار، وجود برخی موانع، اجرای سیستم‌های مذکور را محدود می‌کند. هدف پژوهش حاضر، ارائه‌ی یک چارچوب یکپارچه جهت ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند بوده و برای اولین بار جهت تجزیه و تحلیل موانع از رویکرد FMEA مبتنی بر PIPRECIA فازی و WASPAS توسعه یافته براساس تئوری اعداد Z استفاده شده است. رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر، در ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند در یک کارخانه‌ی فعال در زمینه‌ی مونتاژ لوازم خانگی واقع در منطقه‌ی آزاد ارس در کشور ایران پیاده‌سازی شده است. براساس نتایج، کمبود منابع مالی کافی و کمبود کارکنان واجد شرایط به‌عنوان موانع بحرانی شناسایی شده‌اند. نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی، نشانگر قابلیت و برتری آن در مقایسه با سایر روش‌های موجود در ادبیات بوده است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۳

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

واژگان کلیدی:

لجستیک هوشمند،

انقلاب صنعتی چهارم،

تصمیم‌گیری چندمعیاره،

PIPRECIA

WASPAS

۱. مقدمه

انتظار می‌رود ظهور چهارمین انقلاب صنعتی در چندین جنبه از صنعت تولید، عمیقاً تغییر ایجاد کند. فعالیت‌های لجستیک و زنجیره‌ی تأمین هم در سطح عملیاتی و هم در سطح مدیریتی تحت تأثیر تغییرات اخیر قرار می‌گیرند.^[۱] لجستیک هوشمند مبتنی بر فناوری اطلاعات و ارتباطات پیشرفته‌ی مدرن است، که می‌تواند سیستم لجستیک یکپارچه‌ی مدرن را با پردازش بلادرنگ (real-time) و تجزیه و تحلیل جامع اطلاعات لجستیک به روشی هوشمندانه تحقق بخشد. لجستیک هوشمند می‌تواند دید سراسری 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 زیست‌محیطی ناشی از لجستیک تأثیرگذار باشد. با این حال، باید به بسیاری از مسائل چالش‌برانگیز و موانع در فرآیند پیاده‌سازی لجستیک هوشمند توجه شود.

روش FMEA^۱، یکی از روش‌های کاربردی جهت شناسایی و ارزیابی موانع و ریسک‌هاست؛ که رویکردی هدفمند بر پایه‌ی تیمی از خبرگان و پیشگیری

قبل از وقوع است.^[۴] در اغلب مطالعاتی که از روش FMEA استفاده شده است، شناسایی ریسک‌ها و موانع براساس شاخص سنتی RPN^۲ انجام شده است. این در حالی است که شاخص RPN، کاستی‌هایی دارد. به‌عنوان مثال، به دلیل کنشی بودن و تیمی بودن روش FMEA، میزان عوامل تعیین‌کننده‌ی RPN را اغلب نمی‌توان به‌صورت قطعی در نظر گرفت.^[۵ و ۶] بنابراین، جهت دستیابی به نتایج قابل اطمینان در برابر نظرهای خبرگان لازم است تا اولویت‌بندی گزینه‌ها با توجه به عدم قطعیت موجود در معیارها انجام شود.

هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی و اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند با ارائه‌ی یک رویکرد جدید جهت پوشش برخی از کاستی‌های روش FMEA سنتی است. رویکرد حاضر، برای اولین بار براساس روش توسعه یافته‌ی FMEA مبتنی بر روش F-PIPRECIA^۳ جهت وزن‌دهی به معیارها و روش Z-WASPAS^۴ جهت اولویت‌بندی موانع ارائه شده است. در رویکرد پیشنهادی پژوهش، با به‌کارگیری تئوری اعداد Z، سعی بر آن بوده است که عدم قطعیت و قابلیت اطمینان در عوامل تعیین‌کننده‌ی RPN در نظر گرفته شود. همچنین در رویکرد موردنظر، معیار زمان نیز

^۳ Pivot Pairwise Relative Criteria Importance Assessment

^۴ Weighted Aggregated Sum Product Assessment

^۱ Failure Mode and Effect Analysis

^۲ Risk Priority Number

جدول ۱. تعاریف منتخب از "لجستیک هوشمند".

Author(s)	Definition	Keywords
Song, Yu, Zhou, Yang, and He (2020), ^[2]	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
Lin and Yang (2018), ^[11]	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 (2013), ^[12]	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 (2018), ^[13]	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 (2005), ^[14]	Smart logistics is defined by intelligence, integration, and flexibility.	Process integration, artificial intelligence
McFarlane, Giannikas, and Lu (2016), ^[15]	Smart logistics means planning and controlling processes using intelligent tools and methods.	Process control and planning using intelligent methods, Automation

لجستیک هوشمند توسط اوکلن^۲ (۲۰۰۸)،^[۸] براساس مفهوم محصول‌های هوشمند و خدمات هوشمند تعریف شده است. بار تو^۳ و همکاران (۲۰۱۷)،^[۹] لجستیک هوشمند را به‌عنوان یک سیستم لجستیکی تعریف کرد، که می‌تواند انعطاف‌پذیری را افزایش دهد و شرکت را به نیازهای مشتری نزدیک‌تر کند. کولیتی^۴ (۱۹۷۲)،^[۱۰] درک لجستیک به‌عنوان برنامه‌ریزی، کنترل، تحقق، و نظارت یکپارچه را بر تمام جریان‌های داخلی و شبکه‌ی گسترده، مواد، قطعات، و محصول در امتداد زنجیره‌ی ارزش افزوده‌ی کامل ارائه کرده است. برخی از تعاریف منتخب مربوط به لجستیک هوشمند در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۲. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و FMEA

به‌عنوان یک حوزه‌ی شناخته‌شده از مطالعات، روش‌های MCDM به‌طور گسترده توسط پژوهشگران برای بهبود عملکرد FMEA استفاده و به‌عنوان ابزاری ارزشمند در بهبود کاستی‌های مربوط به روش RPN مرسوم در نظر گرفته شده‌اند.^[۱۶ و ۱۷] سامریت و کراتیب‌هوبردی^۵ (۲۰۲۵)،^[۱۷] جهت توسعه‌ی روش FMEA، از روش ترکیبی AHP و LOPCOW جهت وزن‌دهی به معیارها و روش ARAS برای اولویت‌بندی چالش‌های مدیریت پسماند پلاستیکی و نیز جهت مدیریت عدم قطعیت از مجموعه‌های فازی دوزنقه‌ای استفاده کرده‌اند. فوکی^۶ و همکاران (۲۰۲۵)،^[۱۸] جهت ارزیابی ریسک‌های طراحی ابزار جراحی، از روش توسعه‌یافته‌ی FMEA مبتنی بر روش‌های GRA و EDAS استفاده کرده‌اند. کوماری^۷ و همکاران (۲۰۲۵)،^[۱۹] جهت ارزیابی حالت‌های خرابی تصفیه‌خانه، از روش ترکیب روش FMEA با روش‌های AHP و VIKOR فازی استفاده کرده‌اند. دیپک^۸ و

به‌عنوان یک شاخص مهم مدیریتی در کنار معیارهای شدت، وقوع، و احتمال کشف در روش FMEA در نظر گرفته شده است. این تذکر لازم است که اولویت‌بندی موانع براساس امتیاز حاصل از رویکرد پیشنهادی به‌صورتی 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 صورت گرفته و نتایج آن در مقایسه با برخی از روش‌های سنتی ارائه شده است. مهم‌ترین سؤال‌هایی که پژوهش حاضر سعی در ارائه‌ی پاسخ به آن‌ها دارد، عبارت‌اند از:

- مهم‌ترین موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند کدام‌اند؟
- درجه‌ی اهمیت معیارهای ارزیابی موانع در مسئله‌ی ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند چگونه است؟
- اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند چگونه انجام می‌شود و موانع بحرانی کدام‌اند؟

۲. ادبیات پیشین

۱.۲. لجستیک هوشمند

از زمانی که "لجستیک هوشمند" پیشنهاد شده است، هیچ اتفاق‌نظری در مورد مفهوم آن در میان پژوهشگران وجود ندارد. فلیش^۱ و همکاران (۲۰۰۵)،^[۷] در ابتدا مفهوم محصول‌های هوشمند و خدمات هوشمند را پیشنهاد کرده‌اند، به این معنی که انسان‌ها می‌توانند برخی از فعالیت‌های کنترلی خود را به محصول‌های هوشمند و خدمات هوشمند محول کنند.

⁵ Sumrit & Keeratibhubordee

⁶ Phokee

⁷ Kumari

⁸ Deepak

¹ Fleisch

² Uckelmann

³ Barreto

⁴ Cullity

جدول ۲. برخی از رویکردهای جایگزین و ترکیب شده با روش FMEA برای اولویت بندی موانع و ریسک ها بر اساس روش های MCDM.

Author(s)	Methods	Case Study	Attributes	
			Uncertainty	Reliability
Sumrit & Keeratibhubordee (2025), ^[17]	AHP, LOPCOW, ARAS Fuzzy	Plastic-recycling industry	✓	✗
Phokee, et al (2025), ^[18]	GRA, EDAS	Surgical instrument design	✗	✗
Kumari, et al (2025), ^[19]	Fuzzy AHP, Fuzzy VIKOR	Water treatment plant	✓	✗
Deepak, et al (2025), ^[20]	VIKOR, PROMETHEE, Modified TOPSIS	Pump maintenance in the construction sector	✗	✗
Rashidian, et al (2024), ^[21]	DANP, CoCoSo	Cement-transport network	✗	✗
Altubaishe & Desai (2023), ^[22]	AHP, PROMETHEE	Supplier evaluation	✗	✗
Jin, et al (2022), ^[23]	Fuzzy AHP	Logistics system	✓	✗
Oturakçı & Konyalıoğlu (2022), ^[24]	AHP, Fuzzy TOPSIS	Occupational health & safety	✓	✗
Bathrinath, et al (2022), ^[25]	AHP, Fuzzy WASPAS	Construction site	✓	✗
Pourmehdi, et al (2021), ^[26]	ANP, Fuzzy TOPSIS	Steel industry	✓	✗
Alvand, et al (2021), ^[27]	SWARA, Fuzzy WASPAS	Construction project	✓	✗
Proposed approach	Fuzzy PIPRECIA, Z-WASPAS	Home-appliances industry	✓	✓

اولویت بندی موانع و ریسک ها بر اساس روش های تصمیم گیری چندمعیاره ای موجود در ادبیات، در جدول ۲ ارائه شده اند.

۳.۲. شکاف تحقیقاتی

در بخش اول مرور ادبیات، برخی از نوشتارهای مرتبط با لجستیک هوشمند و در بخش دوم، توسعه ای روش FMEA بر اساس روش های تصمیم گیری چندمعیاره بررسی شده اند. اگرچه نوشتارهایی در حوزه ای لجستیک هوشمند منتشر شده است، اما تعداد کمی از آن ها بر روی بررسی موانع پیاده سازی لجستیک هوشمند متمرکز شده اند. لذا، فقدان پژوهش برای ارائه ای راهکارهایی جهت شناسایی و اولویت بندی موانع مذکور احساس می شود. همچنین، با بررسی نوشتارهای موجود مبتنی بر روش FMEA، کمبود روش توسعه یافته ای FMEA مبتنی بر روش های تصمیم گیری چندمعیاره، که علاوه بر عدم قطعیت، قابلیت اطمینان را نیز بررسی کند، احساس می شود. در نتیجه، مطالعه ای حاضر برای اولین بار به ارائه ای یک رویکرد توسعه یافته ای FMEA بر اساس روش های تصمیم گیری چندمعیاره ای PIPRECIA فازای و Z-WASPAS جهت شناسایی و اولویت بندی موانع پیاده سازی لجستیک هوشمند پرداخته است. روش PIPRECIA توسط استانیوکیچ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۷)،^[۲۸] به عنوان توسعه ای روش SWARA، که توسط کرشولین^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۰)،^[۲۹] ارائه شده بود، پیشنهاد شده است. اگرچه روش SWARA این مزیت را دارد که مقایسه های کمتری نسبت به روش AHP ارائه می کند، اما در مدیریت مسائل واقعی در تصمیم گیری های گروهی، نقاط ضعفی دارد. علاوه بر این، روش SWARA ممکن است تصمیم گیرندگان را در ارزیابی هایشان محدود کند، زیرا نیازمند مرتب سازی معیارها با در نظر گرفتن اهمیت مورد انتظار آن هاست.^[۳۰] روش PIPRECIA با حذف

همکاران (۲۰۲۵)،^[۳۰] پس از شناسایی علل خرابی پمپ در صنعت ساخت و ساز، از روش های VIKOR، PROMETHEE و تاپسیس اصلاح شده برای رتبه بندی راهبردهای مقابله با علل خرابی پمپ ها و نگهداری آن ها استفاده کرده اند. رشیدیان و همکاران (۲۰۲۴)،^[۳۱] از روش های DANP و CoCoCo جهت ارزیابی اختلال های شبکه ای حمل و نقل سیمان در ایران استفاده کرده اند. آلتوبایشه و دیسای^۹ (۲۰۲۳)،^[۳۲] به منظور ارزیابی تأمین کنندگان و انتخاب تأمین کنندگان کلیدی، از رویکرد ترکیبی AHP و PROMETHEE جهت غلبه بر کاستی های روش FMEA استفاده کرده اند. جین^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۲)،^[۳۳] از روش AHP فازای بر اساس روش FMEA برای تجزیه و تحلیل حالت های شکست سیستم لجستیک در همه گیری COVID-۱۹ استفاده و ۱۲ حالت خرابی را شناسایی کرده اند. همچنین، ایشان اقدام های پیشگیرانه و اصلاحی مرتبط جهت کاهش تأثیر خرابی ها را توصیه کرده اند. اتوراکچی و کنیالیوگلو^{۱۱} (۲۰۲۲)،^[۳۴] از رویکرد یکپارچه ای FAHP-TOPSIS جهت ارزیابی خطرهایی که ممکن است در تأسیسات تولیدی یک شرکت به وجود آید، استفاده کرده اند. باتریناث^{۱۲} و همکاران (۲۰۲۲)،^[۳۵] با استفاده از روش AHP فازای، مشکلات عمده ای محیط و منطقه ای کار را در محل ساخت و ساز شناسایی و با استفاده از روش WASPAS اولویت بندی کرده اند. پورمهدی و همکاران (۲۰۲۱)،^[۳۶] از روش های ANP فازای و TOPSIS جهت ارزیابی حالت های شکست در یک شرکت تولیدکننده فولاد در شمال ایران استفاده کرده و به منظور شناسایی و ارزیابی ریسک های تأثیرگذار در پروژه های ساختمانی و پوشش برخی کاستی های روش FMEA، یک مدل یکپارچه ای مبتنی بر روش های FMEA، SWARA و WASPAS در محیط فازای پیشنهاد داده اند.^[۳۷] برخی از رویکردهای جایگزین و ترکیب شده با روش FMEA برای

¹² Bathrinath

¹³ Stanujkic

¹⁴ Keršulienė

⁹Altubaishe & Desai

¹⁰ Jin

¹¹ Oturakçı & Konyalıoğlu

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 آن‌ها، مطابق با رابطه‌های ۳ الی ۷ انجام می‌شود.

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

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

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

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

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

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، فاصله‌ی بین $\tilde{A}$ و $\tilde{B}$ به صورت رابطه‌ی ۸ 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 $\mu(\tilde{X}_i, \tilde{X})$ درجه‌ی ترجیح $\tilde{X}_i$ بر $\tilde{X}$ در S را نشان می‌دهد و با استفاده از رابطه‌ی 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؛

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

$$\text{if } t_l^+ \geq t_u^-$$

$$\text{if } t_l^+ < t_u^-$$

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

۲.۳. تئوری اعداد Z

اولین بار مفهوم اعداد Z توسط زاده (۲۰۱۱)، [۳۶] به‌عنوان یک نسخه‌ی عمومی از نظریه‌ی عدم قطعیت پیشنهاد شده است، که برای محاسبه‌ی اعدادی که قابل اعتماد نیستند، در نظر گرفته شده است. اعداد Z به‌صورت یک جفت عدد فازی به‌صورت $Z = (A, B)$ هستند، که مؤلفه‌ی اول A، یک زیرمجموعه‌ی فازی از دامنه‌ی X و مؤلفه‌ی دوم B، یک زیرمجموعه‌ی فازی از بازه‌ی واحد و نشانگر قابلیت اطمینان مؤلفه‌ی A است (مطابق رابطه‌ی ۱۰).

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

این محدودیت عمومی به‌عنوان یک محدودیت احتمالی شناخته می‌شود، که بیانگر یک تابع توزیع احتمالی $R(x)$ است. به‌طور خاص می‌توان آن را به شرح رابطه‌ی ۱۱ عنوان کرد.

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

معایب ذکرشده در ادبیات موضوع معرفی شده است. براساس روش PIPRECIA، نیازی به رتبه‌بندی قبلی معیارها براساس درجه‌ی اهمیت موردانتظار نیست؛ در عوض، اجازه می‌دهد که اهمیت نسبی کمتر از، برابر با، یا بیشتر از اهمیت معیار قبلی باشد. [۳۱] در ادامه، روش مذکور با اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از دو روش مدل مجموع وزنی (WSM) [۱۵] و مدل ضرب وزنی (WPM) [۱۶]، کارایی و اثربخشی بالایی در فرآیند تصمیم‌گیری دارد؛ [۳۲] و مزایای اصلی آن شامل سادگی محاسباتی، سازگاری نتایج، و مقاومت قوی در برابر معکوس شدن رتبه‌ی گزینه‌هاست. [۳۳] در رویکرد پیشنهادی پژوهش، با به‌کارگیری تئوری اعداد Z، سعی بر آن است عدم قطعیت و قابلیت اطمینان در عوامل تعیین‌کننده‌ی RPN در نظر گرفته شود. برخی از نوآوری‌های مطالعه‌ی حاضر عبارت‌اند از:

- ارائه‌ی یک چارچوب یکپارچه‌ی F-PIPRECIA-Z-WASPAS براساس رویکرد FMEA؛

- در نظر گرفتن زمان به‌عنوان یک شاخص مهم مدیریتی در کنار معیارهای روش FMEA (شدت، وقوع، و احتمال کشف)؛

- استفاده از رویکرد PIPRECIA فازی جهت ارزیابی وزن معیارها براساس روش FMEA؛

- پیاده‌سازی رویکرد توسعه‌یافته در یک مطالعه‌ی موردی واقعی جهت نشان دادن کارایی و قابلیت مدل؛

- مقایسه‌ی 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 لطفی (۱۹۶۵)، [۳۴] معرفی شده است. یک مجموعه‌ی فازی به‌صورت یک تابع عضویت تعریف می‌شود، که عناصر را به درجه‌ی عضویت در یک بازه‌ی معین، که معمولاً به‌صورت بازه‌ی [۰، ۱] است، نشان می‌دهد. در ادامه، تعاریف پایه‌ای برای مجموعه‌ی اعداد فازی استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر ارائه شده است.

تعریف ۱: یک مجموعه‌ی فازی A که در مرجع X تعریف شده است، به‌صورت رابطه‌ی 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 مجموعه‌ی A است. مقدار عضویت $\mu_A(x)$ درجه‌ی وابستگی $x \in X$ را در A نشان می‌دهد.

تعریف ۲: عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ به‌صورت سه‌تایی (l, m, u) تعریف می‌شود و تابع عضویت مطابق رابطه‌ی ۲ است.

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

جدول ۳. ارزیابی معیارها براساس مقیاس ۲-۱.

Linguistic scale		Fuzzy number			DFV
		l	m	u	
Almost equal value	Scale 1-2	1	1.000	1.000	1.008
Slightly more significant		2	1.100	1.150	1.150
Moderately more significant		3	1.200	1.300	1.292
More significant		4	1.300	1.450	1.433
Much more significant		5	1.400	1.600	1.575
Dominantly more significant		6	1.500	1.750	1.717
Absolutely more significant		7	1.600	1.900	1.858

جدول ۴. ارزیابی معیارها براساس مقیاس ۱-۰.

	Fuzzy number			DFV	Linguistic scale
	l	m	u		
Scale 0-1	0.667	1.000	1.000	0.944	Weakly less significant
	0.500	0.667	1.000	0.694	Moderately less significant
	0.400	0.500	0.667	0.511	Less significant
	0.333	0.400	0.500	0.406	Really less significant
	0.286	0.333	0.400	0.337	Much less significant
	0.250	0.286	0.333	0.288	Dominantly less significant
	0.222	0.250	0.286	0.251	Absolutely less significant

برای به‌دست‌آوردن یک ماتریس $\bar{r}_j$ ، لازم است میانگین‌گیری انجام شود. ماتریس $\bar{s}_j^r$ با استفاده از میانگین هندسی به یک ماتریس تبدیل می‌شود. تصمیم‌گیرندگان با اعمال مقیاس‌های تعریف‌شده در جدول‌های ۳ و ۴ معیارها را ارزیابی می‌کنند.

گام ۳) تعیین ضریب $\bar{k}_j$ (مطابق رابطه‌ی ۱۵).

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

گام ۴) تعیین وزن فازی (مطابق رابطه‌ی ۱۶).

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

گام ۵) تعیین وزن نسبی معیار (مطابق رابطه‌ی ۱۷).

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

در این مراحل، معکوس روش PIPRECIA فازی پیاده‌سازی می‌شود:

گام ۶) برای تعیین اهمیت نسبی معیارها، هر تصمیم‌گیرنده به‌طور جداگانه معیارهای از پیش مرتب‌شده را با شروع از معیار ماقبل آخر ارزیابی می‌کند؛ و مجدداً، ماتریس $\bar{s}_j^r$ با استفاده از میانگین هندسی (مطابق رابطه‌ی ۱۸) به‌دست می‌آید.

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

که در آن، μ_A یک تابع عضویت از A و u یک مقدار کلی از X هستند. μ_A می‌تواند به‌عنوان یک محدودیت مرتبط با $R(x)$ در نظر گرفته شود؛ بدین معنا که $\mu_A(u)$ چه درجه‌ای از رضایتمندی u را پوشش می‌دهد. بنابراین، X یک متغیر تصادفی با توزیع 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 هستند:

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

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

که در معادله‌ی ۱۲، du نشانگر مشتق جزئی u است.

۳.۳. روش Fuzzy PIPRECIA

روش PIPRECIA برای اولین بار توسط استانیوکیچ و همکاران (۲۰۱۷)، [۲۸] ارائه شده است. در ادامه، گام‌های مربوط به روش توسعه‌یافته‌ی PIPRECIA در محیط فازی ارائه شده‌اند.

گام ۱) تشکیل مجموعه‌ی معیارها جهت ارزیابی و تشکیل یک تیم تصمیم‌گیری.

گام ۲) برای تعیین اهمیت نسبی معیارها، هر تصمیم‌گیرنده به‌طور جداگانه، معیارهای از پیش مرتب‌شده را با شروع از معیار دوم ارزیابی می‌کند (مانند رابطه‌ی ۱۴).

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

که در آن، $\bar{s}_j^r$ نشان‌دهنده‌ی ارزیابی انجام‌شده توسط تصمیم‌گیرنده‌ی r است.

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

Linguistic term	Fuzzy number			Linguistic term	Fuzzy number		
	l	m	u		l	m	u
VH,VH	8.54	9.49	9.49	VH,H	7.53	8.37	8.37
VH,M	6.36	7.07	7.07	VH,L	4.93	5.48	5.48
VH,VL	2.85	3.16	3.16	H,VH	6.64	8.54	9.49
H,H	5.86	7.53	8.37	H,M	4.95	6.36	7.07
H,L	3.84	4.93	5.48	H,VL	2.21	2.85	3.16
MH,VH	4.74	6.64	8.54	MH,H	4.18	5.86	7.53
MH,M	3.54	4.95	6.36	MH,L	2.74	3.84	4.93
MH,VL	1.58	2.21	2.85	M,VH	2.85	4.74	6.64
M,H	2.51	4.28	5.86	M,M	2.12	3.54	4.95
M,L	1.64	2.74	3.83	M,VL	0.95	1.58	2.21
ML,VH	0.95	2.85	4.74	ML,H	0.84	2.51	4.18
ML,M	0.71	2.12	3.54	ML,L	0.55	1.64	2.74
ML,VL	0.32	0.95	1.58	L,VH	0	0.95	2.85
L,H	0	0.84	2.51	L,M	0	0.71	2.12
L,L	0	0.55	1.64	L,VL	0	0.32	0.95
VL,VH	0	0	0.95	VL,H	0	0	0.84
VL,M	0	0	0.71	VL,L	0	0	0.55
VL,VL	0	0	0.32				

به معیارهای بررسی‌شده، مقداردهی می‌شوند.

گام ۲) تشکیل ماتریس تصمیم

متغیرهای زبانی ارائه‌شده در گام قبل با استفاده از جدول ۵ به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند. ماتریس تصمیم مجموع β به صورت رابطه‌ی ۲۳ نمایش داده می‌شود.

$\beta =$

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

که در آن، m تعداد گزینه‌ها، n تعداد معیارها، و x_{mn} نشان‌دهنده‌ی ترجیح گزینه‌ی i ام در معیار j ام هستند.

گام ۳) بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم (نرمال سازی ماتریس تصمیم).

جهت بی‌مقیاس سازی ماتریس تصمیم از روابط ۲۴ و ۲۵ استفاده می‌شود. برای معیارهای از جنس مثبت:

$$\bar{x}_{ij} = (x_{ij}^{-l}, x_{ij}^{-m}, x_{ij}^{-u}) \quad (24)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}$$

برای معیارهای از جنس هزینه (منفی):

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \quad (25)$$

گام ۴) تشکیل ماتریس تصمیم موزون

در مرحله‌ی کنونی، اولویت‌ها و وزن (w_i) هر یک از معیارها بر روی ماتریس

گام ۷) تعیین ضریب $\bar{k}_j'$ (مطابق رابطه‌ی ۱۹).

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

که در آن، n تعداد کل معیارهاست.

گام ۸) تعیین وزن فازی $\bar{q}_j'$ (مطابق رابطه‌ی ۲۰).

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

گام ۹) تعیین وزن نسبی معیار (مطابق رابطه‌ی ۲۱).

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

گام ۱۰) تعیین وزن نهایی (مطابق رابطه‌ی ۲۲).

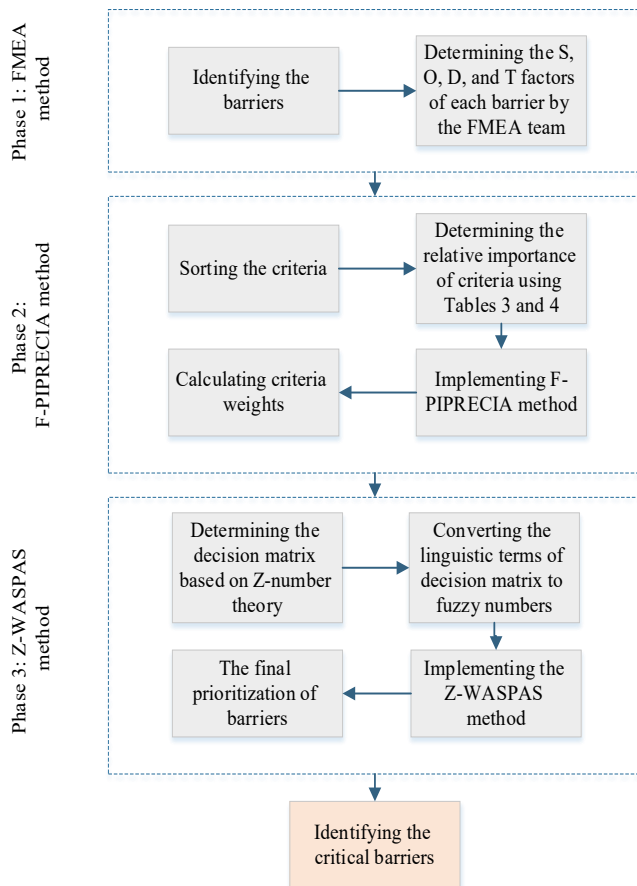
$$\bar{w}_j'' = \frac{1}{2} (\bar{w}_j' + \bar{w}_j') \quad (22)$$

۴.۳. روش Z-number WASPAS

روش WASPAS در سال ۲۰۱۲ ارائه شده است.^[۳۷] در ادامه، گام‌های مربوط به روش توسعه‌یافته‌ی WASPAS براساس تئوری اعداد Z ارائه شده است.

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

با توجه به متغیرهای زبانی ارائه‌شده در جدول ۵، هر یک از گزینه‌ها با توجه



شکل ۱. رویکرد پیشنهادی.

– در فاز سوم، براساس خروجی‌های فازهای اول و دوم سعی شده است اولویت‌بندی موانع شناسایی‌شده با توجه به اهمیت‌های متفاوت معیارها، با استفاده از روش Z-WASPAS انجام شود. روش اخیر برخلاف روش WASPAS مرسوم، علاوه بر در نظر گرفتن مقادیر فازی، قابلیت در نظر گرفتن قابلیت اطمینان برای هر معیار به ازاء گزینه را دارد. در روش اخیر، پس از تعیین ماتریس تصمیم، که درایه‌های آن متشکل از اعداد فازی و مقادیر قابلیت اطمینان (اعداد-Z) هستند، مقادیر مذکور با استفاده از جدول ۵ به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند. سپس بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب با استفاده از روابط ۲۴ و ۲۵ انجام می‌شود. در ادامه و با استفاده از وزن‌های به‌دست‌آمده 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 انتها، 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 مشاهده می‌شود.

۵. مطالعه موردی و تحلیل نتایج

۵.۱. یافته‌ها و تحلیل مقایسه‌ای

در راستای بررسی قابلیت رویکرد پیشنهادی در پژوهش حاضر، سعی بر آن است که اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند در یک کارخانه فعال در صنعت لوازم خانگی با استفاده از رویکرد پیشنهادی 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 کرده

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 می‌شوند.

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \bar{x}_{ij} (w_j^l, w_j^m, w_j^u) \quad (26)$$

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

گام ۵) محاسبه مقدار K_i

در گام کنونی، مقدار تابع بهینگی گزینه‌ی i ام با استفاده از رابطه ۲۸ محاسبه می‌شود. بالاترین مقدار K_i ، به‌عنوان بهترین گزینه و کمترین مقدار K_i به‌عنوان بدترین گزینه انتخاب می‌شوند.

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

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

که در آن، λ مطابق رابطه ۲۹ محاسبه می‌شود:

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

۴. رویکرد پیشنهادی

در بخش کنونی، رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر با بهره‌گیری از روش‌های FMEA، PIPRECIA فازی و Z-WASPAS برای ارزیابی و اولویت‌بندی موانع در سه فاز ارائه شده است.

– در فاز اول، رویکرد حاضر ضمن شناسایی موانع توسط تیم FMEA، مقادیر معیارهای چهارگانه نیز امتیازدهی می‌شوند و قابلیت اطمینان هر کدام از موانع مذکور، توسط تیم خبره‌ی مرتبط تعیین می‌شود. با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند، تیم FMEA از سه خبره‌ی دارای تجربه و تخصص در زمینه‌های لجستیک و زنجیره‌ی تأمین، مدیریت تولید، و عملیات و فناوری‌های اینترنت اشیا تشکیل شده است. اطلاعات مربوط به تیم خبره نشان می‌دهد اعضا بین ۸ تا ۱۴ سال سابقه‌ی فعالیت دارند.

– در فاز دوم، در راستای در نظر گرفتن اهمیت متفاوت به‌ازاء معیارها از روش PIPRECIA فازی استفاده می‌شود؛ به نحوی که پس از مرتب‌کردن معیارها با استفاده از متغیرهای کلامی، متغیرهای مذکور با استفاده از جدول‌های ۳ و ۴ به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند. در ادامه و براساس گام سوم از روش PIPRECIA، $\bar{K}_j$ 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؛ به‌طوری که برای تعیین اهمیت نسبی معیارها، هر تصمیم‌گیرنده معیارهای از پیش مرتب‌شده را با شروع از معیار ماقبل آخر ارزیابی می‌کند. سپس با محاسبه‌ی ضرب $\bar{K}_j'$ با استفاده از رابطه ۱۸، وزن فازی و وزن نسبی معیارها به ترتیب با استفاده از روابط ۲۰ و ۲۱ محاسبه می‌شود. در انتها، وزن نهایی معیارها با استفاده از رابطه ۲۲ تعیین می‌شود.

جدول ۶. موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند.

Symbol	Barrier
B1	Lack of sufficient financial resources
B2	Lack of a development strategy
B3	Low risk-taking (low risk appetite)
B4	Shortage of qualified personnel
B5	Insufficient number of staff
B6	No dedicated unit for implementing smart systems in logistics
B7	Lack of customer demand
B8	Poor linkage with the external environment
B9	Lack of trust among partners
B10	Deficiencies in regulations
B11	Unfavourable macroeconomic conditions
B12	Lack of government support
B13	High implementation costs
B14	System instability
B15	Divergent objectives among partners
B16	Administrative bureaucracy

جدول ۷. مقادیر شاخص‌ها به ازاء موانع در قالب متغیرهای زبانی Z.

	S			O			D			T		
	DM1	DM2	DM3	DM1	DM2	DM3	DM1	DM2	DM3	DM1	DM2	DM3
B1	VH,M	VH,H	VH,H	VH,VH	VH,VH	H,VH	VL,VL	VL,VL	M,M	MH,VL	MH,VH	MH,VL
B2	MH,H	VH,H	MH,L	VH,H	VH,VL	M,M	ML,H	H,L	MH,L	VH,H	L,VL	L,VL
B3	VH,M	VH,VL	ML,H	L,M	ML,VL	MH,H	L,H	VL,VL	MH,VL	MH,VL	M,H	MH,H
B4	MH,VH	VH,VL	L,H	VH,VL	H,L	MH,VL	ML,VL	ML,VL	L,VL	H,H	VL,M	VH,H
B5	ML,VL	MH,L	H,H	H,M	H,M	MH,H	MH,H	H,M	L,VL	L,VL	ML,M	ML,VH
B6	VH,H	VH,H	ML,VL	MH,H	H,M	M,M	VL,VH	L,VL	H,L	MH,H	H,H	ML,VL
B7	ML,H	ML,VL	VL,VH	VH,H	VL,M	ML,VL	VH,H	VL,VL	MH,VL	MH,L	MH,VL	M,M
B8	VL,VH	MH,VL	H,L	H,H	H,L	ML,VL	ML,VL	ML,VL	H,M	VH,H	M,M	ML,M
B9	VL,M	ML,VL	MH,H	ML,M	MH,VL	VH,M	L,H	VL,VL	MH,H	MH,VL	VH,H	ML,M
B10	VL,VL	VL,VL	MH,H	H,H	MH,H	M,H	VH,VL	VH,H	H,L	ML,VL	MH,L	VH,H
B11	VH,H	VH,H	ML,VL	ML,H	VH,M	M,M	VH,VH	L,VH	H,L	MH,L	H,H	ML,VL
B12	M,VH	L,VL	M,H	VH,VL	M,VH	H,L	MH,VL	MH,L	VH,H	VH,VL	ML,VL	MH,H
B13	MH,VH	VH,VL	L,H	VH,VL	H,L	MH,VL	MH,VL	ML,VL	L,VL	H,H	ML,VL	VH,H
B14	VH,VL	M,H	MH,H	ML,VL	VH,H	MH,VL	VH,M	ML,H	ML,VL	M,H	MH,H	MH,L
B15	VH,VL	M,H	MH,H	ML,VL	VH,H	MH,VL	L,VL	ML,H	ML,VL	M,H	MH,H	MH,L
B16	VH,M	VH,VH	VH,M	H,VH	H,VH	H,VH	M,M	VL,VH	M,M	MH,VL	VH,VH	MH,VL

(O)، احتمال کشف (D)، و زمان (T) به ازاء هر مانع توسط تیم FMEA تعیین شده است (مطابق جدول ۷). سپس، با توجه به عدم قطعیت و همچنین عدم اطمینان در عوامل مذکور از تئوری اعداد Z استفاده شده است. 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 ازاء موانع با توجه به نظرهای تیم FMEA در جدول ۷ ارائه

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

در بخش حاضر، نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی در ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند بررسی شده است. ابتدا موانع موجود توسط تیم FMEA شناسایی و مقادیر عوامل چهارگانه ((شدت (S)، وقوع

جدول ۸. نگرش تیم خبرگان با استفاده از مقیاس زبانی برای PIPRECIA فازی.

PIPR.	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
DM1				0.400	0.500	0.667	0.500	0.667	1.000	0.333	0.400	0.500
DM2				0.500	0.667	1.000	0.400	0.500	0.667	0.286	0.333	0.400
DM3				0.400	0.500	0.667	0.667	1.000	1.000	0.667	1.000	1.000

جدول ۹. نگرش تیم خبرگان با استفاده از مقیاس زبانی برای PIPRECIA فازی معکوس.

PIPR-I	T			D			O			S		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
DM1				1.300	1.450	1.500	0.667	1.000	1.000	1.100	1.150	1.200
DM2				1.500	1.750	1.800	0.500	0.667	1.000	1.300	1.450	1.500
DM3				1.400	1.600	1.650	0.667	1.000	1.000	1.300	1.450	1.500

جدول ۱۰. جزئیات محاسبات روش PIPRECIA فازی.

PIPRECIA	s_j			k_j			q_j			w_j			DF
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
S				1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.323	0.382	0.426	0.380
O	0.433	0.556	0.778	1.222	1.444	1.567	0.638	0.692	0.818	0.206	0.265	0.349	0.269
D	0.522	0.722	0.889	1.111	1.278	1.478	0.432	0.542	0.737	0.140	0.207	0.314	0.214
T	0.429	0.578	0.633	1.367	1.422	1.571	0.275	0.381	0.539	0.089	0.146	0.230	0.150
Σ							2.345	2.615	3.094				

جدول ۱۱. جزئیات محاسبات روش PIPRECIA فازی معکوس.

PIPRECIA-I	s'_j			k'_j			q'_j			w'_j			DF
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
S	1.233	1.350	1.400	0.600	0.650	0.767	1.565	3.462	4.762	0.136	0.376	0.877	0.419
O	0.611	0.889	1.000	1.000	1.111	1.389	1.200	2.250	2.857	0.105	0.244	0.526	0.268
D	1.400	1.600	1.650	0.350	0.400	0.600	1.667	2.500	2.857	0.145	0.271	0.526	0.293
T				1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.087	0.109	0.184	0.118
Σ							5.432	9.212	11.476				

در فاز سوم رویکرد پیشنهادی و براساس نتایج فازهای اول و دوم، اولویت‌بندی موانع با استفاده از روش توسعه‌یافته‌ی Z-WASPAS انجام پذیرفته است. در ابتدا، ماتریس تصمیم‌گیری روش Z-WASPAS در قالب درایه‌های اعداد Z تشکیل شده است؛ به نحوی که سطرها نشانگر گزینه‌های مورد‌ارزیابی یا همان موانع و ستون‌های ماتریس مذکور، نشانگر معیارهای ارزیابی یا همان عوامل چهارگانه هستند. در ادامه، ماتریس تصمیم‌گیری تجمیع‌یافته از نظر خبرگان و نرمال‌شده در قالب اعداد فازی مثلثی ارائه شده است (جدول ۱۲).

حال، پس از تجمیع و نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری، وزن عوامل در ماتریس مذکور لحاظ شده است. براساس روش WASPAS، ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از دو روش مدل مجموع وزنی (WSM) و مدل ضرب وزنی (WPM) موزون شده است. ماتریس وزن‌دارشده نیز با استفاده از روش WSM در جدول ۱۳ ارائه شده است.

سپس ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از روش WPM موزون شده است (مطابق جدول ۱۴).

شده است. سپس مقادیر مذکور با استفاده از جدول ۵ به مقادیر فازی مثلثی تبدیل شده‌اند.

در ادامه و براساس فاز دوم رویکرد پیشنهادی، وزن عوامل با استفاده از روش F-PIPRECIA تعیین شده است. سپس براساس روش اخیر، ماتریس‌های متشکل از نگرش تیم خبرگان با استفاده از مقیاس زبانی برای PIPRECIA فازی و برای PIPRECIA فازی معکوس به ترتیب در جدول‌های ۸ و ۹ ارائه شده‌اند.

محاسبات روش PIPRECIA فازی در جدول ۱۰ ارائه شده است.

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

با توجه به جدول‌های 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 به‌دست آمده است.

جدول ۱۲. ماتریس تجمیع و نرمال‌شده‌ی فازی.

	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
B1	0.900	1.000	1.112	0.833	1.000	1.200	0.114	0.627	1.939	0.431	0.656	1.039
B2	0.607	0.759	0.972	0.439	0.548	0.695	0.044	0.197	0.554	0.411	0.535	0.749
B3	0.422	0.535	0.673	0.158	0.273	0.473	0.113	0.728	2.601	0.451	0.733	1.185
B4	0.319	0.447	0.663	0.290	0.374	0.484	0.156	1.000	6.422	0.731	0.944	1.273
B5	0.375	0.517	0.695	0.495	0.675	0.914	0.041	0.177	0.450	0.091	0.314	0.673
B6	0.646	0.743	0.855	0.395	0.573	0.824	0.087	0.423	1.070	0.566	0.851	1.275
B7	0.049	0.145	0.313	0.276	0.339	0.449	0.055	0.210	0.451	0.352	0.569	0.929
B8	0.228	0.300	0.433	0.352	0.487	0.651	0.063	0.269	0.735	0.566	0.833	1.230
B9	0.189	0.286	0.458	0.304	0.414	0.567	0.062	0.331	0.983	0.536	0.754	1.077
B10	0.176	0.246	0.381	0.441	0.642	0.917	0.038	0.135	0.289	0.578	0.781	1.085
B11	0.646	0.743	0.855	0.327	0.477	0.683	0.036	0.144	0.332	0.487	0.731	1.085
B12	0.225	0.392	0.628	0.335	0.466	0.644	0.040	0.154	0.347	0.401	0.592	0.895
B13	0.319	0.447	0.663	0.290	0.374	0.484	0.119	0.638	2.163	0.748	1.000	1.336
B14	0.401	0.559	0.773	0.331	0.419	0.540	0.050	0.211	0.547	0.515	0.830	1.336
B15	0.401	0.559	0.773	0.331	0.419	0.540	0.095	0.587	3.543	0.515	0.830	1.336
B16	0.893	0.992	1.103	0.700	0.931	1.200	0.059	0.314	0.969	0.639	0.826	1.108

جدول ۱۳. ماتریس وزن‌دارشده‌ی فازی با استفاده از روش WSM.

	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
B1	0.359	0.400	0.444	0.224	0.268	0.322	0.029	0.159	0.491	0.058	0.088	0.139
B2	0.243	0.303	0.389	0.118	0.147	0.187	0.011	0.050	0.140	0.055	0.072	0.100
B3	0.169	0.214	0.269	0.042	0.073	0.127	0.029	0.184	0.659	0.060	0.098	0.159
B4	0.127	0.179	0.265	0.078	0.100	0.130	0.039	0.253	1.626	0.098	0.126	0.170
B5	0.150	0.207	0.278	0.133	0.181	0.245	0.010	0.045	0.114	0.012	0.042	0.090
B6	0.258	0.297	0.342	0.106	0.154	0.221	0.022	0.107	0.271	0.076	0.114	0.171
B7	0.019	0.058	0.125	0.074	0.091	0.121	0.014	0.053	0.114	0.047	0.076	0.124
B8	0.091	0.120	0.173	0.094	0.131	0.175	0.016	0.068	0.186	0.076	0.111	0.165
B9	0.076	0.114	0.183	0.082	0.111	0.152	0.016	0.084	0.249	0.072	0.101	0.144
B10	0.070	0.098	0.152	0.118	0.172	0.246	0.010	0.034	0.073	0.077	0.105	0.145
B11	0.258	0.297	0.342	0.088	0.128	0.183	0.009	0.037	0.084	0.065	0.098	0.145
B12	0.090	0.157	0.251	0.090	0.125	0.173	0.010	0.039	0.088	0.054	0.079	0.120
B13	0.127	0.179	0.265	0.078	0.100	0.130	0.030	0.162	0.548	0.100	0.134	0.179
B14	0.160	0.223	0.309	0.089	0.112	0.145	0.013	0.053	0.138	0.069	0.111	0.179
B15	0.160	0.223	0.309	0.089	0.112	0.145	0.024	0.149	0.897	0.069	0.111	0.179
B16	0.357	0.397	0.441	0.188	0.250	0.322	0.015	0.079	0.246	0.086	0.111	0.148

جدول ۱۴. ماتریس وزن‌دارشده‌ی فازی با استفاده از روش WPM.

	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
B1	0.96	1.00	1.04	0.67	0.70	0.74	0.41	0.63	0.84	0.68	0.72	0.77
B2	0.82	0.90	0.99	0.56	0.60	0.64	0.32	0.47	0.61	0.68	0.70	0.73
B3	0.71	0.78	0.85	0.43	0.50	0.57	0.41	0.65	0.90	0.69	0.73	0.78
B4	0.63	0.72	0.85	0.50	0.54	0.58	0.44	0.71	1.13	0.73	0.76	0.79
B5	0.68	0.77	0.86	0.58	0.63	0.69	0.31	0.46	0.58	0.55	0.65	0.72
B6	0.84	0.89	0.94	0.55	0.60	0.67	0.38	0.57	0.72	0.71	0.75	0.79
B7	0.30	0.46	0.63	0.50	0.53	0.57	0.34	0.48	0.58	0.66	0.71	0.76
B8	0.55	0.62	0.72	0.53	0.58	0.63	0.35	0.51	0.65	0.71	0.75	0.79
B9	0.51	0.61	0.73	0.51	0.55	0.60	0.35	0.53	0.70	0.70	0.74	0.77
B10	0.50	0.57	0.68	0.56	0.62	0.69	0.31	0.43	0.52	0.71	0.74	0.77
B11	0.84	0.89	0.94	0.52	0.58	0.63	0.30	0.43	0.53	0.69	0.73	0.77
B12	0.55	0.69	0.83	0.52	0.57	0.62	0.31	0.44	0.54	0.68	0.71	0.75
B13	0.63	0.72	0.85	0.50	0.54	0.58	0.41	0.63	0.86	0.73	0.76	0.79
B14	0.69	0.79	0.90	0.52	0.56	0.60	0.33	0.48	0.61	0.70	0.75	0.79
B15	0.69	0.79	0.90	0.52	0.56	0.60	0.39	0.62	0.97	0.70	0.75	0.79
B16	0.96	1.00	1.04	0.64	0.69	0.74	0.34	0.53	0.70	0.72	0.74	0.77

هستند. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده می توان نتیجه گرفت مانع B۷ در اولویت آخر قرار گرفته و در حال حاضر نیازی به اقدام های اصلاحی نیست و همچنین در جدول ۱۶ مشاهده می شود که براساس روش امتیازدهی RPN سنتی، مانع B۱۶ در اولویت رسیدگی قرار گرفته است. علاوه بر این، موانع B۱۱ و B۱۵ به طور مشترک در جایگاه چهارم و B۵ و B۹ به طور مشترک در جایگاه یازدهم قرار گرفته اند. بنابراین، رویکرد FMEA سنتی موانع را در ۱۴ دسته به جای ۱۶ دسته رتبه بندی کرده است. این ضعف در رویکرد WASPAS فازی به جهت در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت و وزن دهی به عوامل بر طرف شده است. چرا که براساس اولویت بندی حاصل از روش اخیر،

سپس در این مرحله، مقادیر P_i و Q_i به ترتیب با استفاده از روابط ۲۶ و ۲۷ به دست آمده اند. همچنین مقدار λ با استفاده از رابطه ۲۹، (۰/۶۶۹، ۰/۲۴۲، ۰/۰۷۱) به دست آمده است. سپس امتیاز (K_i) با استفاده از رابطه ۲۸ برای هر گزینه محاسبه شده است. در آخر، با استفاده از رابطه ترجیح نسبی برای تعیین اولویت اعداد فازی (رابطه ۹)، اولویت بندی موانع انجام شده است. با توجه به جدول ۱۵ مشاهده می شود که براساس رویکرد پیشنهادی (FPIPRECIA-ZWASPAS)، موانع B۱ و B۴ به ترتیب در اولویت های اول و دوم قرار گرفته اند. به بیانی دیگر، موانع مذکور به عنوان موانع بحرانی در نظر گرفته شده اند و نیازمند برنامه ریزی جهت اقدام های اصلاحی/ پیشگیرانه

جدول ۱۵. محاسبات و نتایج روش Z-WASPAS

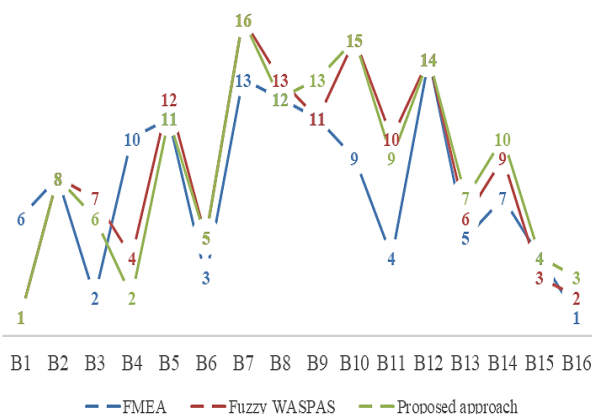
	Barrier	Q_i			P_i			K_i			$\mu(K_i, \bar{K})$	Rank
		l	m	u	l	m	u	l	m	u		
B1	Lack of sufficient financial resources	0.670	0.915	1.397	0.179	0.318	0.494	0.339	0.514	0.789	0.742	1
B2	Lack of a development strategy	0.427	0.572	0.816	0.100	0.176	0.282	0.207	0.306	0.457	0.490	8
B3	Low risk-taking (low risk appetite)	0.300	0.570	1.213	0.085	0.184	0.345	0.155	0.311	0.629	0.528	6
B4	Shortage of qualified personnel	0.343	0.659	2.192	0.103	0.209	0.438	0.182	0.357	1.013	0.671	2
B5	Insufficient number of staff	0.305	0.475	0.727	0.068	0.145	0.248	0.146	0.253	0.405	0.428	11
B6	No dedicated unit for implementing smart systems in logistics	0.462	0.672	1.005	0.124	0.228	0.355	0.234	0.373	0.568	0.569	5
B7	Lack of customer demand	0.155	0.278	0.484	0.034	0.082	0.156	0.073	0.146	0.263	0.306	16
B8	Poor linkage with the external environment	0.277	0.430	0.699	0.073	0.135	0.230	0.140	0.232	0.383	0.408	12
B9	Lack of trust among partners	0.245	0.410	0.729	0.064	0.132	0.240	0.123	0.223	0.400	0.403	13
B10	Deficiencies in regulations	0.275	0.409	0.617	0.061	0.112	0.186	0.132	0.209	0.327	0.377	15
B11	Unfavourable macroeconomic conditions	0.420	0.559	0.755	0.092	0.162	0.246	0.200	0.292	0.412	0.468	9
B12	Lack of government support	0.244	0.400	0.632	0.061	0.123	0.211	0.121	0.214	0.349	0.383	14
B13	High implementation costs	0.336	0.575	1.122	0.097	0.188	0.335	0.175	0.315	0.593	0.525	7
B14	System instability	0.331	0.500	0.771	0.084	0.156	0.258	0.165	0.269	0.426	0.449	10
B15	Divergent objectives among partners	0.342	0.596	1.530	0.099	0.203	0.415	0.178	0.331	0.780	0.589	4
B16	Administrative bureaucracy	0.645	0.836	1.157	0.151	0.269	0.416	0.313	0.455	0.659	0.664	3

جدول ۱۶. مقایسه‌ی اولویت‌بندی حاصل از رویکرد پیشنهادی و روش‌های مرسوم.

	FMEA		Fuzzy WASPAS		Proposed approach	
	RPN	Rank	Score	Rank	Score	Rank
B1	1072	6	0.576	1	0.742	1
B2	1012	8	0.421	8	0.490	8
B3	1320	2	0.434	7	0.528	6
B4	741.3333	10	0.463	4	0.671	2
B5	728	11	0.391	12	0.428	11
B6	1250.667	3	0.461	5	0.569	5
B7	538.6667	13	0.308	16	0.306	16
B8	690.6667	12	0.390	13	0.408	12
B9	728	11	0.394	11	0.403	13
B10	938.6667	9	0.312	15	0.377	15
B11	1146.667	4	0.410	10	0.468	9
B12	514.6667	14	0.359	14	0.383	14
B13	1114.667	5	0.448	6	0.525	7
B14	1034.667	7	0.419	9	0.449	10
B15	1146.667	4	0.463	3	0.589	4
B16	1418.667	1	0.525	2	0.664	3

باید بودجه را به‌طور راهبردی تأمین و تخصیص دهد. انجام تحلیل‌های دقیق نرخ بازگشت سرمایه (ROI) و تدوین برنامه‌های سرمایه‌گذاری پله‌ای و یا جذب سرمایه‌ی خارجی می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد 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 به‌طور مناسب انجام می‌دهند و تحول دیجیتال را دنبال می‌کنند، فشارهای مالی را با بهبود بهره‌وری تسهیل می‌کنند. به‌طور خلاصه، مدیران ارشد شرکت مذکور باید پروژه‌ی لجستیک هوشمند را به‌عنوان اولوی‌تی راهبردی 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، توسعه‌ی نیروی انسانی واجد شرایط ضروری است. کمبود نیروی ماهر، یکی از گلوگاه‌های شناخته‌شده است؛ که برای رفع مشکل اخیر، شرکت اخیر باید یک برنامه‌ی توسعه‌ی شایستگی نیروی کار، شامل آموزش‌های درون‌سازمانی، حمایت از اخذ گواهینامه‌های تخصصی، همکاری با آموزشگاه‌های فنی، و ارائه‌ی تسهیلات برای ارتقاء فرهنگ یادگیری سازمانی را به اجرا در آورد. ادغام آموزش در اهداف عملکردی و نظام جبران خدمات کارکنان تضمین می‌کند ارتقاء 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 موردانتظار را به‌دست می‌آورد.

در آخر، همسوسازی راهبردی و مدیریت تغییر در فرآیند پیاده‌سازی لجستیک هوشمند ضروری است. مدیران باید اطمینان حاصل کنند که پروژه‌ی لجستیک هوشمند، مورد حمایت صریح و قابل‌مشاهده‌ی مدیران ارشد است و چشم‌انداز روشنی دارد. اقدام‌های کلیدی مدیریتی، شامل: تأمین سرمایه‌ی کافی، آموزش یا استخدام متمرکز نیروی انسانی ماهر، و مدیریت پروژه در یک چارچوب راهبردی از بالا به پایین است. با پرداختن مستقیم به موانع حیاتی اخیر، شرکت مذکور می‌تواند اجرای موفق لجستیک هوشمند را تضمین کند.



شکل ۲. مقایسه‌ی اولویت‌بندی موانع براساس رویکردهای

F-PIPRECIA-ZWASPAS، WASPAS فازی و امتیاز RPN.

B1 در اولویت اول، B16 در اولویت دوم، و B15 در اولویت سوم قرار گرفته و به‌عنوان مانع بحرانی شناسایی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی، با روش WASPAS فازی به‌عنوان یک روش قابل‌اطمینان،^[۳۸] در شناسایی موانع بحرانی تقریباً مشابه عمل کرده و نتایج ضریب همبستگی ۰/۹۷۶ را نشان داده و فقط در چند مورد اولویت‌بندی موانع متفاوت بوده است؛ که تفاوت مذکور، به علت در نظر گرفتن قابلیت‌اطمینان در کنار عدم قطعیت در مقادیر عوامل بوده است، که برتری رویکرد پیشنهادی نسبت به روش‌های موجود در ادبیات را نشان می‌دهد.

در شکل ۲، نتایج روش‌های مرسوم WASPAS فازی و امتیاز RPN سنتی در ارائه‌ی رتبه‌بندی کامل در مقایسه با رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر مشاهده می‌شود.

۲.۵. بینش‌های مدیریتی

تحلیل FMEA به‌وضوح نشان می‌دهد که محدودیت‌های مالی و کمبود نیروی ماهر، دو مانع اصلی در پیاده‌سازی لجستیک هوشمند هستند. مدیریت

۶. نتیجه‌گیری

اولویت آخر انتخاب شده و در حال حاضر نیازمند اقدام‌های اصلاحی نبوده است. استفاده از روش توسعه‌یافته، منجر به رفع برخی نواقص روش FMEA مرسوم، مانند عدم ارائه‌ی رتبه‌بندی کامل گزینه‌ها و در نظر نگرفتن وزن برای معیارها شده است. همچنین در رویکرد پیشنهادی، معیار زمان نیز به‌عنوان یک شاخص مهم مدیریتی در کنار معیارهای شدت، وقوع، و احتمال کشف در روش FMEA در نظر گرفته شده است. تعداد محدود خبرگان در حوزه‌ی لجستیک هوشمند و همچنین عدم تخصیص وزن به هر یک از خبرگان براساس دانش و میزان تجربه‌ی آن‌ها، از جمله محدودیت‌های پژوهش حاضر است. در آینده، پژوهشگران نوشتار حاضر در صدد هستند که مطالعات خود را در راستای رفع محدودیت‌های پژوهش حاضر و توسعه‌ی روش FMEA با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط‌های عدم قطعیت، نظیر فازی فیثاغورثی، q-rung و فازی کروی گسترش دهند. فارغ از مسئله‌ی استفاده‌شده برای پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر، این رویکرد در سناریوهای مختلف شناسایی و تحلیل ریسک و حالت‌های خرابی قابل اجرا خواهد بود.

سپاسگزاری

نوشتار حاضر حاصل بخشی از پژوهشی در کارخانه‌ی هادی کوش ارس است. لذا، بدین وسیله از ریاست هیئت مدیره‌ی کارخانه و همچنین از اعضاء هیئت علمی دانشکده‌های مهندسی صنایع و مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر، که در پژوهش حاضر همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

پژوهش حاضر با هدف ارائه‌ی یک چارچوب یکپارچه با استفاده از روش‌های F-PIPRECIA و Z-WASPAS جهت ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند صورت پذیرفته است؛ که از نظر هدف کاربردی و از منظر روش، کمی- کیفی بوده است. همچنین، از نگرش سه خبره در حوزه‌ی لجستیک و مدیریت زنجیره‌ی تأمین در قالب تیم FMEA استفاده شده است. در ادامه، باید بیان کرد که پیاده‌سازی لجستیک هوشمند با گذار به صنعت ۴.۰ توسعه‌یافته است. لجستیک هوشمند، شامل سیستم‌های بسیاری است، که وظیفه‌ی آن‌ها بهبود کارایی فرآیندهای لجستیک است. با وجود مزایای بسیار، موانعی جهت پیاده‌سازی لجستیک هوشمند وجود دارد. لذا، شناسایی و رتبه‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند، اهمیت روزافزونی دارد. یکی از رویکردهای شناسایی و رتبه‌بندی موانع، روش FMEA است؛ که به‌دلیل تحلیل‌پذیری مناسب، جزء پرکاربردترین روش‌هاست. با وجود گستردگی کاربرد روش FMEA، نقاط ضعف و کاستی‌های آن باعث شده است که برخی از پژوهشگران به دنبال بهبود روش مرسوم FMEA باشند. بنابراین در پژوهش حاضر، برای اولین بار یک رویکرد توسعه‌یافته‌ی FMEA با استفاده از روش F-PIPRECIA جهت وزن‌دهی به معیارها و Z-WASPAS جهت اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، به ترتیب، "کمبود منابع مالی کافی" و "کمبود کارکنان واجد شرایط" به عنوان موانع بحرانی انتخاب شده‌اند و در اولویت رسیدگی هستند. از طرفی، "نبود تقاضا از سوی مشتریان" به عنوان

References - منابع

1. Tang, X., 2020. Research on smart logistics model based on internet of things technology. *IEEE Access*, 8, 151150-151159. DOI:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016330>.
2. Song, Y., Yu, F. R., Zhou, L., Yang, X., and He, Z., 2020. Applications of the internet of things (IoT) in smart logistics: a comprehensive survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(6), 4250-4274. DOI:<https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3034385>.
3. Lee, S., Kang, Y., and Prabhu, V. V., 2016. Smart logistics: distributed control of green crowdsourced parcel services. *International Journal of Production Research*, 54(23), 6956-6968. DOI:<https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1132856>.
4. Jafarzadeh Ghouschi, S., Memarpour Ghiaci, A., Rahnamay Bonab, S., and Ranjbarzadeh, R., 2022. 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*, 1-19. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11356-022-19018-z>.
5. Ghouschi, S. J., Yousefi, S., and Khazaeili, M., 2019. An extended FMEA approach based on the Z-MOORA and fuzzy BWM for prioritization of failures. *Applied Soft Computing*, 81, 105505. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105505>.
6. Jafarzadeh Ghouschi, S., Shaffiee Haghshenas, S., Memarpour Ghiaci, A., Guido, G., and Vitale, A., 2022. Road safety assessment and risks prioritization using an integrated SWARA and MARCOS approach under spherical fuzzy environment. *Neural Computing and Applications*, 1-19. DOI:<https://doi.org/10.1007/s00521-022-07929-4>.
7. Fleisch, E., Christ, O., and Dierkes, M., 2005. Die betriebswirtschaftliche vision des internets der dinge. In *Das Internet der Dinge* (pp. 3-37): Springer. DOI:https://doi.org/10.1007/3-540-28299-8_1.
8. Uckelmann, D., 2008. A definition approach to smart logistics. *Paper presented at the International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking*. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-540-85500-2_28.
9. Barreto, L., Amaral, A., and Pereira, T., 2017. Industry 4.0 implications in logistics: an overview.

- Procedia Manufacturing*, 13, 1245-1252. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.045>.
10. Cullity, B., 1972. Introduction to magnetic materials (MA, USA. In: Addison-Wesley, Reading.
 11. Lin, C.-C., and Yang, J.-W., 2018. Cost-efficient deployment of fog computing systems at logistics centers in industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(10), 4603-4611. DOI:<https://doi.org/10.1109/TII.2018.2827920>.
 12. Zhang, C., and Peng, D., 2013. Countermeasures on how to develop China's smart logistics. *China Business and Market*, 10(1), 35-39.
 13. Zhang, Y., Liu, S., Liu, Y., Yang, H., Li, M., Huisingh, D., and Wang, L., 2018. The 'internet of things' enabled real-time scheduling for remanufacturing of automobile engines. *Journal of Cleaner Production*, 185, 562-575. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.061>.
 14. Zhao, L., 2005. Intelligent logistics and its supporting technology. *Journal. Intell*, 24(12), 49-50.
 15. McFarlane, D., Giannikas, V., and Lu, W., 2016. Intelligent logistics: Involving the customer. *Computers in Industry*, 81, 105-115. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.10.002>.
 16. Ghouschi, S. J., Jalalat, S. M., Bonab, S. R., Ghiaci, A. M., Haseli, G., and Tomaskova, H., 2022. Evaluation of wind turbine failure modes using the developed SWARA-CoCoSo methods based on the spherical fuzzy environment. *IEEE Access*, 10, 86750-86764. DOI:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199359>.
 17. Sumrit, D., and Keeratibhubordee, J., 2025. 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*, 42-81. DOI:<https://doi.org/10.31181/dmame812025984>.
 18. Phokee, W., Chaiklieng, S., Boriwan, P., Phoka, T., Vanoirbeek, J. and Chatpun, S., 2025. A Cascading Delphi Method-Based FMEA Risk Assessment Framework for Surgical Instrument Design: A Case Study of a Fetoscope. *Applied Sciences*, 15(11), p.6203. DOI:<https://doi.org/10.3390/app15116203>.
 19. Kumari, S., Ahmad, K., Khan, Z.A. and Ahmad, S., 2025. 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.1-16. DOI:<https://doi.org/10.1007/s13369-025-10000-8>.
 20. Deepak, D., Brar, G.S., Dwivedi, S., Farwaha, H.S., Ranjan, N., Alkhaleel, B.A. and Pandey, S., 2025. Optimizing concrete pump maintenance in the construction sector using enhanced MCDM techniques. *Scientific Reports*, 15(1), p.13816. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41598-025-98481-3>.
 21. Rashidian, F., Eydi, A., and Roghanian, E., 2024. 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*, 447, 141250. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141250>.
 22. Altubaishe, B., and Desai, S., 2023. Multicriteria decision making in supply chain management using FMEA and hybrid AHP-PROMETHEE algorithms. *Sensors*, 23(8), 4041. DOI:<https://doi.org/10.3390/s23084041>.
 23. Jin, G., Meng, Q., and Feng, W., 2022. Optimization of Logistics System with Fuzzy FMEA-AHP Methodology. *Processes*, 10(10), 1973. DOI:<https://doi.org/10.3390/pr10101973>.
 24. Oturakçi, M., and Konyalıoğlu, A. K., 2022. 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*. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-031-09173-5_45.
 25. Bathrinath, S., Mohan, S., Koppiahraj, K., Bhalaji, R., and Santhi, B., 2022. Analysis of factors affecting sustainable performance in construction sites using fuzzy AHP-WASPAS methods. *Materials Today: Proceedings*. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.393>.
 26. Pourmehdi, M., Paydar, M. M., and Asadi-Gangraj, E., 2021. Reaching sustainability through collection center selection considering risk: using the integration of Fuzzy ANP-TOPSIS and FMEA. *Soft Computing*, 25(16), 10885-10899. DOI:<https://doi.org/10.1007/s00500-021-05786-2>.
 27. Alvand, A., Mirhosseini, S. M., Ehsanifar, M., Zeighami, E., and Mohammadi, A., 2021. 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*, 1-23. DOI:<https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1877875>.
 28. Stanujkic, D., Zavadskas, E. K., Karabasevic, D., Smarandache, F., and Turskis, Z., 2017. *The use of the pivot pairwise relative criteria importance assessment method for determining the weights of criteria*. Infinite Study.

29. Keršulienė, V., Zavadskas, E.K. and Turskis, Z., 2010. Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of business economics and management*, 11(2), pp.243-258. DOI:<https://doi.org/10.3846/jbem.2010.12>.
30. Popovic, G., Stanujkic, D., Mihic, M., Smarandache, F., Karabasevic, D. and Mircetic, V., 2025. The single-valued Neutrosophic extension of the PIPRECIA method. *Knowledge-Based Systems*, 315, p.113271. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.113271>.
31. Ghiaci, A.M. and Gheidar-Kheljani, J., 2024. A hybrid model of extended FMEA model based on F-PIPRECIA and Z-EDAS methods with Bow Tie to evaluate cybersecurity risks in Industry 4.0. *Engineering Management and Soft, Computing*, 9(2), pp.149-176. DOI:<https://doi.org/10.22091/jemsc.2024.9642.1175>.
32. Ghouschi, S.J., Bonab, S.R., Ghiaci, A.M., Haseli, G., Tomaskova, H. and Hajiaghahi-Keshteli, M., 2021. Landfill site selection for medical waste using an integrated SWARA-WASPAS framework based on spherical fuzzy set. *Sustainability*, 13(24), p.13950. DOI:<https://doi.org/10.3390/su132413950>. [in Persian]
33. Yücenur, G.N. and Maden, A., 2025. Location selection for a photovoltaic agricultural with f-PIPRECIA and WASPAS methods: A case study. *Energy*, 314, p.134179. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134179>.
34. Lotfi, Z., 1965. Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
35. Wang, Y.J., 2015. Ranking triangle and trapezoidal fuzzy numbers based on the relative preference relation. *Applied mathematical modelling*, 39(2), pp.586-599. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.06.011>.
36. Zadeh, L. A., 2011. A note on Z-numbers. *Information Sciences*, 181(14), 2923-2932. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.02.022>.
37. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J., and Zakarevicius, A., 2012. Optimization of weighted aggregated sum product assessment. *Elektronika ir elektrotechnika*, 122(6), 3-6. DOI:<https://doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810>.
38. Chakraborty, S., and Saha, A. K., 2022. A framework of LR fuzzy AHP and fuzzy WASPAS for health care waste recycling technology. *Applied Soft Computing*, 127, 109388. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109388>.