Journal of Structural and Construction Engineering, 9(6), 2022, pp. 5-29

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Risk Assessment and Prioritization Using a New Hybrid Decision-Making Approach Based on FMEA in Fuzzy Environment (Case Study: Arak Central Library Project)

Abolfazl Alvand[1], S. Mohammad Mirhosseini[2]*, Mohammad Ehsanifar[3], Ehsanollah Zeighami[4], Amir Mohammadi[5]

1-PHD student in engineering and construction management, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
2-Assistant professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
3-Associate professor, Department of Industrial engineering, Arak Branch Islamic Azad University, Arak, Iran
4-Assistant professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
5-Assistant professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

ABSTRACT

Risk assessment and prioritization is one of the most important components of risk management in any organization. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) is one of the most commonly used methods for assessment and prioritization of the multiple risks. Despite the widespread applications of this method in various industries, FMEA is associated with some shortcomings that can lead to unrealistic results. In this study, a new hybrid decision- making approach is presented in three phases to cover some of the shortcomings of the FMEA technique. In the first phase, based on the subject literature and getting help from a group of experts, 23 risks related to the construction project were identified and classified into six groups including technical, dynamics of the project environment, and multiplicity of project stakeholders, employer, project management, and contractor. In the second phase, the fuzzy Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) is used to measure the weights of decision criteria. In the third phase, the outputs of the previous phases are used as a basis to prioritize the risks using the Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) methods under fuzzy environment. To illustrate the potential benefits and applications of the proposed hybrid approach in a case study was implemented. The results obtained from the new hybrid approach to show that the low performance of the human resources, communication and cooperation of a poor contractor with another group, lack of proper management by the contractor regarding financial matters, supplier support, and subcontractors, and low performance of the human resources as the most important risks were recognized in the construction project of the Central Library of Markazi Province. Also, after performing the validation test and sensitivity analysis, it was found that the proposed method can provide valuable and effective information in helping to manage the risk of construction projects.

ARTICLE INFO

Receive Date: 02 March 2020
Revise Date: 01 January 2021
Accept Date: 25 November 2021

Keywords:

Risk Assessment and Prioritization
Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)
Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) Method
Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) Method
Fuzzy Environment

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2021.221971.2092

*Corresponding author: S. Mohammad Mirhosseini.
Email address: **m-mirhoseini@iau-arak.ac.ir**

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک با استفاده از رویکرد ترکیبی نوین تصمیم‌گیری بر مبنای FMEA در محیط فازی (مطالعه موردی: پروژه کتابخانه مرکزی اراک)

ابولفضل الوند[۱]، سید محمد میرحسینی [۲*]، محمد احسانی‌فر[۳]، احسان‌الله ضیغمی[۴]، امیر محمدی[۵]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی‌عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی‌عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۵- استادیار، گروه مهندسی‌عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

چکیده

ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک، از مهم‌ترین مولفه‌های مدیریت ریسک در هر سازمان است. تکنیک تحلیل حالات و آثار شکست‌ها (FMEA) یکی از متداول‌ترین تکنیک‌ها برای ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های متعدد می‌باشد. علیرغم کاربردهای گسترده این روش در زمینه‌های مختلف با برخی از کاستی‌ها همراه است که می‌تواند منجر به نتایج غیرواقعی شود. در مطالعه حاضر، به منظور برطرف نمودن کاستی‌های تکنیک متداول FMEA، یک رویکرد ترکیبی نوین تصمیم‌گیری در سه مرحله پیشنهاد شده است. در مرحله اول، براساس پیشینه پژوهش و گروهی از متخصصان، ۲۳ ریسک مربوط به پروژه عمرانی شناسایی و در ۶ گروه شامل فنی، پویایی محیط پروژه، تعدد ذینفعان پروژه، کارفرما، مدیریت پروژه و پیمانکار دسته‌بندی شدند. سپس در مرحله دوم، از روش تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی (SWARA) تحت محیط فازی برای ارزیابی وزن معیارهای تصمیم‌گیری استفاده شد. در نهایت، خروجی فازهای قبلی به عنوان مبنایی برای اولویت‌بندی رویدادهای متعدد ریسک با استفاده از روش ارزیابی تولید وزنی تجمعی (WASPAS) تحت محیط فازی بکارگرفته شد. برای نشان دادن مزایای بالقوه و کاربرد رویکرد ترکیبی پیشنهادی در یک مطالعه موردی اجرا و پیاده‌سازی گردید. نتایج بدست آمده حاصل از رویکرد ترکیبی نوین تصمیم‌گیری بر مبنای FMEA نشان می‌دهد که عملکرد پائین نیروی انسانی، ارتباط و همکاری ضعیف پیمانکار با سایر گروه‌ها، عدم مدیریت مناسب توسط پیمانکار در رابطه با مسائل مالی، حمایت تامین‌کنندگان و زیرمجموعه‌های آن و عدم هماهنگی منابع انسانی مرتبط به عنوان مهم‌ترین ریسک‌ها در پروژه کتابخانه مرکزی هستند. هم‌چنین پس از انجام آزمون صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت مشخص شد که روش پیشنهادی معتبر بوده و می‌تواند اطلاعات ارزشمند و موثری در کمک به مدیریت ریسک پروژه‌های عمرانی فراهم نماید.

کلمات کلیدی: ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک، تکنیک تحلیل حالات و آثار شکست‌ها (FMEA)، روش ارزیابی وزن‌دهی تدریجی (SWARA)، روش ارزیابی تولید وزنی تجمعی (WASPAS)، محیط فازی.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://doi.org/10.22065/jsce.2021.221971.2092	doi:
۱۳۹۸/۱۲/۱۲	۱۳۹۹/۱۰/۱۲	۱۴۰۰/۰۹/۰۴	۱۴۰۰/۰۹/۰۴	۱۴۰۱/۰۶/۳۱	10.22065/jsce.2021.221971.2092	

[*]نویسنده مسئول: سید محمد میرحسینی.

پست الکترونیکی: m-mirhoseini@iau-arak.ac.ir

۱- مقدمه

اغلب پروژه‌های صنعت ساخت و ساز به دلیل ماهیت منحصر به فرد، یکی از خطرناک‌ترین و چالش برانگیزترین صنایع در سرتاسر جهان در نظر گرفته می‌شوند. پروژه‌های صنعت ساخت و ساز اگر به طور علمی و ساختاریافته مدیریت شوند و در چارچوب تعهدات مقرر پروژه به انجام برسند، می‌توانند تاثیر شگرفی در پیشرفت کشورها به همراه داشته باشند. از سوی دیگر، عدم تحقق به موقع تعهدات می‌تواند پیامدهای جبران ناپذیری را به دنبال داشته باشد. جهان پیرامون ما به دلیلی ماهیت پویا و پیچیده پیوسته در حال تغییر و در چنین محیطی مستلزم دارا بودن قابلیت وفق‌پذیری با این تغییرات می‌باشد [۱]. براین اساس، با توجه به شرایط پیرامون، تمامی پروژه‌های صنعت ساخت و ساز تحت تاثیر ریسک قرار دارند به گونه‌ای که گزارشات زیادی در خصوص ضعف عملکرد این نوع پروژه‌ها به علت تاخیرات زمانی و افزایش هزینه‌ها ارائه شده که عمدتا به دلیل عدم مدیریت صحیح ریسک در فازهای مختلف چرخه حیات پروژه‌های عمرانی بوده است [۲]. بنابراین، مدیریت ریسک می‌تواند بخش حیاتی از فرآیند تصمیم‌گیری در پروژه‌های ساخت تلقی گردد که علاوه بر شرایط اقتصادی - اجتماعی نامشخص در محل پروژه، چالش‌های بزرگی را برای فعالان صنعت و ذینفعان به همراه داشته باشد [۳]. متاسفانه در کشورمان هنوز بسیاری از مدیران اهمیت مدیریت ریسک پروژه را به عنوان فعالیتی کلیدی و تاثیرگذار درک نکرده‌اند. از آن رو که ریسک با مفهوم پروژه درآمیخته می‌باشد، می‌توان با قطعیت گفت که هیچ گاه نمی‌توان ریسک را به طور کامل حذف نمود. با این حال، ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های پروژه در مراحل ابتدایی و مدیریت یکپارچه آنها در سیکل طول عمر پروژه در موفقیت پروژه‌ها تاثیر بسزایی داشته باشد [۴] و باید به عنوان ابزاری موثر برای نظارت بر ریسک‌های مختلف در پروژه‌های ساخت و ساز به کار گرفته شود [۵]. هدف اصلی مدیریت ریسک، بالابردن احتمال موفقیت پروژه است که این امر از طریق ارزیابی و اولویت‌بندی سیستماتیک ریسک، ارائه روش‌هایی برای کاهش یا اجتناب آنها و حداکثرسازی فرصت‌ها صورت می‌گیرد [۶]. فرآیند مدیریت ریسک با سنجش موثر شروع شده و بدون انجام این مرحله، مدیریت ریسک امکان‌پذیر نیست چراکه انجام صحیح این مرحله منجر به تصمیم‌گیری و اجرای اقدامات پیشگیرانه و تصحیحی در مرحله بعد مدیریت ریسک می‌شود [۷]. طی سالیان اخیر، بکارگیری روش‌های ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک در صنعت ساخت رو به رشد بوده و تکنیک‌های مختلفی توسط محققان و متخصصان صنعت ساخت بر مبنای ماتریس ریسک[۱] (RM) [۸]، شبیه‌سازی مونت کارلو[۲] (MCS) [۹]، تجزیه و تحلیل حساسیت[۳] (SA) [۱۰]، تحلیل درخت خطا[۴] (FTA) [۱۱]، درخت رویداد[۵] (ETA) [۱۲]، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی[۶] (AHP) [۱۳]، منطق فازی[۷] [۱۴]، تکنیک تحلیل حالات و آثار شکست‌ها[۸] (FMEA) [۱۵]، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره[۹] (MCDM) [۱۸-۱۶] و غیره ارائه شده است. در میان تکنیک‌های معرفی شده، FMEA به عنوان یکی از تکنیک‌های ارزیابی موثر ریسک می‌باشد که اولین بار در سال ۱۹۲۰ ارائه شد، اما از اوایل دهه ۱۹۶۰ کاربردهای آن به طور قابل توجهی افزایش یافت، به گونه‌ای که در صنایع مختلف مورد استفاده گسترده قرار گرفته است [۱۹]. این روش سعی در شناسایی ریسک‌های احتمالی دارد و به تعیین علل و تأثیرات مرتبط با آن در رویدادهای مختلف ریسک می‌پردازد. هم‌چنین، ابزار مفیدی است که می‌تواند برای تعیین، شناسایی و ریشه‌کن کردن خرابی‌ها، مشکلات و خطاهای شناخته شده یا بالقوه در طراحی، فرآیند، سرویس و حتی کل سیستم مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور، در این تحلیل ابتدا محیط مورد بررسی به بخش‌های کوچک و قابل بررسی تقسیم می‌شوند. هر بخش می‌تواند فعالیت، یا قسمتی از کل فرآیند باشد. سپس تیم ارزیابی ریسک، با استفاده از تجارب پیشین خود و دانش فنی موجود، درباره این که هریک از بخش‌ها ممکن است با چه نوع شکست‌هایی مواجه شوند بحث و نتایج را ارائه می‌کنند. سپس تلاش می‌کنند تا «علت‌های بروز هر کدام از حالت‌های شکست»، «تاثیرات مستقیم آن بر بخش‌های دیگر»، «تاثیرات آن بر کل سیستم»، «روش تشخیص به موقع شکست» و «کنترل‌های موجود» را نیز استنتاج کنند و در مراحل بعد، «اقدامات علاجی» دیگری را پیشنهاد دهند. در تحلیل کیفی که تحلیل‌گر به دنبال شاخصی

[1] Risk Matrix (RM)
[2] Monte Carlo Simulation (MCS)
[3] Sensitivity Analysis (SA)
[4] Fault Tree Analysis (FTA)
[5] Event Tree Analysis (ETA)
[6] Analytical Hierarchy Process (AHP)
[7] Fuzzy logic
[8] Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)
[9] Multi-Criteria Decision Making (MCDM)

برای اولویت‌بندی ریسک‌ها است، معمولا روش FMEA پیشنهاد می‌کند سه شاخص احتمال وقوع ریسک[1] (O) ، شدت پیامد[2] (S) و قابلیت تشخیص[3] (D) در یکدیگر ضرب شوند تا عدد اولویت ریسک[4] (RPN) به دست آید [۲۰] که به دلیل در نظر گرفتن سه شاخص معرفی شده از دقت و درستی بیشتری نسبت به سایر مدل‌های کلاسیک ارزیابی برخوردار می‌باشد که در جدول (۱) برخی از مهم‌ترین محدودیت-های روش‌های متداول ارزیابی ریسک و مزایای روش FMEA در صنعت ساخت و ساز به منظور مقایسه بیشتر ارائه شده است.

جدول ۱: مقایسه محدودیت‌ها و مزایای برخی از تکنیک‌های مرتبط با ارزیابی ریسک در صنعت ساخت و ساز [۱۹].

روش‌های کلاسیک ارزیابی ریسک	محدودیت اصلی	مزایای تکنیک تحلیل حالات و آثار شکست‌ها (FMEA)
ماتریس ریسک (RM)	- طبقه‌بندی ریسک‌ها فقط به تعداد محدودی رسته - اولویت‌بندی رویدادهای ریسک با استفاده از تحلیل کیفی	- شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های احتمالی با به کارگیری سه شاخص احتمال وقوع ریسک (O)، شدت پیامد (S) و قابلیت تشخیص (D) - تعیین علل و تاثیرات مرتبط با رویدادهای مختلف ریسک - تعیین، شناسایی و ریشه کن نمودن خرابی‌ها، مشکلات و خطاهای شناخته شده - مشخص نمودن اقدامات علاجی برای ریسک-های شناسایی شده - محاسبات کم هزینه‌تر نسبت به سایر روش‌های ارزیابی ریسک
شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS)	- داده‌های آماری دقیق تجربی - محاسبات پرهزینه	
تجزیه و تحلیل حساسیت (SA)	داده‌های آماری بسیاری برای ارزیابی احتمال وقایع مورد نیاز است.	
فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)	محدود به تعدادی خاصی ماتریس مقایسه زوجی	
منطق فازی	فرآیند پیچیده و نیاز به طیف گسترده‌ای از قوانین فازی "اگر- انگاه"	

علیرغم مزایا و کاربردهای گسترده روش متداول FMEA، دارای نقض‌های عمده‌ای بوده که کاربرد این روش را به خصوص زمانیکه این روش به منظور تحلیل بحرانیت در محاسبه RPN استفاده شود، محدود می‌کند. از جمله محدودیت‌های عمده روش FMEA را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۲۱]:

۱) تعیین دقیق شاخص‌هایO، S و D اغلب مشکل می‌باشد. اعضای تیم ممکن است برای گزینه‌های مشابه (رویدادهای مختلف ریسک)، ارزیابی‌های متفاوتی داشته باشند که برخی از آنها ممکن است غیر دقیق، نامطمئن و ناقض باشند که به دلیل محدودیت زمانی، فقدان تجربه و داده‌های کافی ایجاد می‌شوند.

۲) اهمیت نسبی شاخص‌هایO، S و D در محاسبه RPN منظور نشده و وزن آنها یکسان در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در کاربردهای واقعی، محدودیت ایجاد می‌کند.

۳) فرمول محاسباتی RPN مورد تردید بوده و دارای یک بنیه علمی قوی نمی‌باشد. به عبارتی منطق خاصی در مورد علت ضرب کردن سه شاخص O، S و D برای محاسبه RPN وجود ندارد.

۴) RPNهای بدست آمده پیوسته نبوده و دارای فواصل خالی زیادی در مقیاس ۱ تا ۱۰۰۰ می‌باشند. علاوه بر این، میزان توزیع آن‌ها در قسمت‌های پائینی مقیاس ۱ تا ۱۰۰۰ شدیدتر می‌باشند. این موضوع می‌تواند باعث ایجاد مشکل در تفسیر نمودن اختلاف‌های بین RPNهای متفاوت گردد.

۵) FMEA یک روش ارزیابی ریسک گروهی است که تنها بر پایه نظرات شخصی یک نفر ارزیابی امکان‌پذیر نیست. بنابراین گزارش استخراج مقدار واقعی هر یک از شاخص‌های ارزیابی بر اساس نظر گروهی مشکل می‌باشد.

به منظور حل محدویت‌های فوق الذکر، محققان بسیاری از رویکردهای متعددی برای بهبود اثربخشی روش FMEA ارائه کرده‌اند. در این راستا، طی بررسی‌های صورت گرفته در پژوهش لیو[5] و همکاران (۲۰۱۹) رویکردهای متعدد به منظور بهبود اثربخشی روش متداول FMEA به پنج گروه روش‌های MCDM، برنامه‌ریزی ریاضی[6]، هوش مصنوعی[1]، رویکردهای ترکیبی[2] و سایر موارد طبقه‌بندی شده‌اند [۲۲].

[1] Occurrence probability
[2] Outcomes severity
[3] Detection capability
[4] Risk Priority Number (RPN)
[5] Liu
[6] Mathematical programming

در میان گروه‌های معرفی شده یک مقوله که اغلب مورد مطالعه قرار می‌گیرد ترکیب روش‌های MCDM با تکنیک کلاسیک FMEA می‌باشد [۲۰-۲۹] چرا که با ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری با تکنیک کلاسیک منجر به در نظر گرفتن اهمیت شاخص‌های ارزیابی، جبران برخی از کاستی‌های RPN متداول، کمک به افزایش دقت در نتایج اولویت‌بندی و انتخاب گزینه بهینه خواهد شد. در این راستا، در سال‌های اخیر، از تکنیک‌های چون AHP [۲۱-۲۵]، فرآیند تحلیل شبکه‌ای[۳](ANP) [۱۵]، روش بهترین – بدترین[۴] (BWM) [۲۶] برای اهمیت‌سنجی شاخص‌های ارزیابی بکارگرفته شده است. با این حال در تکنیک‌های معرفی شده در طی محاسبات به تعداد زیادی از مقایسات زوجی نیاز است که منجر به ایجاد فرآیندی خسته‌کننده، در نتیجه مانع از محبوبیت و بکارگیری آن‌ها در تحلیل FMEA می‌شود. علاوه بر این، روش FMEA یک فرآیند تصمیم‌گیری پیچیده و شامل چندین متخصص در فرآیند ارزیابی و اولویت‌بندی می‌باشد. با توجه به سوابق مختلف دانش تیم ارزیابی ریسک، تخصیص وزن، هدفی اساسی است که ممکن است به طور قابل توجهی بر اولویت‌های نهایی عوامل ریسک تأثیر بگذارد. با این حال، مطالعات اندکی وجود دارد که اهمیت شاخص‌های ارزیابی را در نظر گرفته‌اند [۱۵،۱۹، ۲۶-۲۱، ۲۹] چرا که در روش FMEA، اهمیت همه شاخص‌های ارزیابی یکسان نمی‌باشد و بدست آوردن اطلاعات دقیق وزن در شرایط تصمیم‌گیری عملی دشوار است. بنابراین، تعیین وزن‌های مختلف برای هر یک از اعضای تیم با توجه به عوامل ریسک مختلف، طبیعی و معقول است. هم‌چنین از طرفی دیگر، اولویت‌بندی حالت‌های مختلف ریسک و انتخاب گزینه بهینه برای تصمیم‌گیرندگان براساس اهمیت شاخص‌های تصمیم‌گیری از اهمیت خاصی برخوردار است. بر این اساس، به کارگیری مدلی که از دقت بالایی در تصمیم‌گیری برخوردار باشد، حائز اهمیت بوده است. بدین منظور، مطالعه حاضر با هدف ارائه یک رویکرد ترکیبی جدید برای جبران برخی از کاستی‌های RPN متداول و کمک به افزایش دقت در تصمیم‌گیری انجام شده است. این روش ترکیبی جدید براساس رویکرد FMEA با استفاده از روش تحلیل نسبت ارزیابی وزن‌دهی تدریجی[۵] (SWARA) و روش ارزیابی تولید وزن تجمعی[۶] (WASPAS) تحت شرایط فازی با بهره‌گیری از مزایای هر یک از روش های ذکر شده، ارائه شده است. روش ترکیبی پیشنهادی، یک رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره است که برای ارزیابی شاخص‌ها و انتخاب گزینه بهینه استفاده می‌نماید. در بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری لازم است تا بر اساس شاخص‌های متعدد به ارزیابی گزینه‌ها و راهکارهای موجود پرداخته شود. بدیهی است شاخص‌های موجود همیشه از اوزان مشابهی برخوردار نیستند. برای تعیین وزن و درجه اهمیت شاخص‌های تصمیم‌گیری می‌توان از روش SWARA استفاده کرد. از سوی دیگر ارزیابی گزینه‌ها و انتخاب بهینه نیز باید مبتنی بر شاخص‌های موجود صورت گیرد. یکی از روش‌های مناسب و کاربردی برای ارزیابی گزینه‌ها استفاده WASPAS است. بنابراین رویکرد ترکیبی پیشنهادی مطالعه حاضر می‌تواند بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری را حل نماید.

مهم‌ترین نوآوری و سهم قابل توجه مطالعه حاضر به شرح زیر خلاصه شده است: اول، برای استخراج وزن شاخص‌های O، Sو D، از SWARA فازی استفاده شد. روش بکارگرفته شده نسبت به سایر روش‌های رایج وزن‌دهی چون AHP، ANP و BWM دارای مزایای بسیاری است که عبارتند از: حل مشکلاتی مانند عدم توانائی در تعیین وزن‌های مختلف به شاخص‌های O، S و D، عدم در نظر گرفتن عدم قطعیت در روند ارزیابی نظرات ضد و نقیض احتمالی کارشناسان، کاهش تعداد مقایسات زوجی و محاسبات مرتبط با آن در مقایسه با سایر روش‌های رایج وزن‌دهی چون AHP، ANP و BWM و هم‌چنین عدم نیاز به بررسی سازگاری قضاوت ها از مهم‌ترین مزایای SWARA فازی است که منجر بکارگیری آن در رویکرد ترکیبی پیشنهادی شده است [۳۰]. دوم، از روشWASPAS فازی برای اولویت‌بندی رویدادهای متعدد ریسک بکار گرفته شد که در روش مورد نظر ترکیبی از دو مدل مجموع وزنی[۷] (WSM) و مدل ضرب وزنی[۸] (WPM) است و دارای دقت بیشتر در مقایسه با روش‌های مستقل (مجموع وزنی و ضرب وزنی) است. مزیت روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های متداول ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک، در نظر گرفتن عدم قطعیت در قضاوت‌های متخصصان و بررسی همزمان اهمیت و ارزش شاخص‌های O، S و D و اولویت‌بندی با دقت و اثربخشی بالای تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند. در واقع، ارائه اولویت‌بندی رویدادهای متعدد

[1] Artificial intelligence
[2] Hybrid approaches
[3] FUZZY Analytic Network Process (F-ANP)
[4] Best-Worst Method
[5] Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA)
[6] Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS)
[7] Weighted Sum Model (WSM)
[8] Weighted Product Model (WPM)

ریسک با دقت و اثربخشی بالا برای تصمیم‌گیرنده می‌تواند برنامه‌ریزی برای اجرای اقدامات اصلاحی / پیشگیرانه را تسهیل نماید. این رویکرد ترکیبی منجر به محاسبه دقیق‌تر RPN شده و کارآیی روش FMEA را بهبود می‌بخشد.

ادامه مقاله به شرح زیر تدوین شده است. در بخش دوم، مروری بر پیشینه پژوهش‌های صورت گرفته در مورد بهبود FMEA ارائه شده است. در بخش سوم، روش‌شناسی پژوهش مورد بررسی قرارگرفته و رویکرد ترکیبی پیشنهادی بر مبنای روش FMEA در شرایط فازی در بخش چهارم ارائه شده است. در بخش پنجم، پیاده‌سازی رویکرد ترکیبی بر مبنای FMEA در مطالعه موردی در یکی از پروژه‌های سازمان راه و شهرسازی استان مرکزی و سپس در نهایت بحث و صحت‌سنجی نتایج بدست آمده، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۱- پیشینه پژوهش‌های صورت گرفته در مورد بهبود روش FMEA

در دهه‌های گذشته موضوعات مرتبط با ارزیابی ریسک مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته و با توجه به گسترش نقش آنها در روند تصمیم‌گیری، منجر به توسعه مبانی نظری، تکنیک‌ها و ابزارهای متفاوتی شده است. یکی از متداول‌ترین تکنیک‌های معرفی شده در پژوهش‌های صورت گرفته FMEA است که به عنوان ابزاری قدرتمند برای تعریف، شناسایی و از بین بردن نقض‌های احتمالی در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. علیرغم کاربردهای مختلف FMEA معمولی، ارزیابی ریسک‌ها در تکنیک اشاره شده با محدودیت‌هایی مواجه هستند که به طور گسترده در برخی از پژوهش‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۲۶] و محققان در طی سالیان اخیر سعی در برطرف نمودن برخی از کاستی‌ها با بکارگیری رویکردهای ترکیبی شده‌اند. در ادامه به منظور بررسی و مقایسه بیشتر، روند طی شده پژوهش‌های مرتبط با بهبود FMEA کلاسیک در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: برخی از کاربردهای اخیر روش‌های MCDM برای برطرف کردن محدودیت‌های تکنیک FMEA.

نویسندگان	روش‌های ترکیبی به کارگرفته شده بر مبنای تکنیک FMEA	مطالعه موردی	بررسی و مقایسه‌ی روش‌های ترکیبی به کار گرفته شده					
			عدم قطعیت	اهمیت سنجی شاخص‌های تصمیم‌گیری			ارزیابی اولویت‌بندی گزینه‌های تصمیم‌گیری	
				در نظر گرفتن نرخ ناسازگاری	کاهش تعداد مقایسات زوجی	پیچیدگی محاسبات	اولویت‌بندی گزینه‌های تصمیم‌گیری	دقت تصمیم-گیری
فتاحی و خلیل زاده [۲۳]	روش‌های ترکیبی روش AHP و بهینه‌سازی چند بعدی با استفاده از تحلیل نسبت[1] (MULTIMOORA) تحت شرایط فازی برمبنای تکنیک FMEA	کارخانه صنایع فولاد کرمان	✓	✓	-	✓	✓	-
توکلان و محمدی[2] [۲۴]	FMEA و FAHP	صنعت ساخت و ساز	✓	✓	-	✓	✓	-
البهار[3] و همکاران [۲۵]	سیستم‌های استنتاج فازی[4] (FIS) و AHP	صنعت ساخت و ساز	✓	✓	-	✓	✓	-

[1] Multiple Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis (MULTIMOORA)
2 Tavakolan and Mohammadi
3 Ilbahar
4 Fuzzy Inference System (FIS)

تیان و همکاران [۲۶]	روش‌های ترکیبی BWM، آنتروپی نسبی (RE) و ویکور[1] بر مبنای تکنیک FMEA تحت شرایط فازی	ماشین‌پرداز کامپیوتر	✓	✓	-	✓	✓	-
بورال[2] و همکاران [۲۹]	روش‌های ترکیبی AHP ، تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای چندشاخصه ایده‌آل - واقعی[3] (MAIRCA) بر مبنای تکنیک FMEA تحت شرایط فازی	-	✓	✓	-	✓	✓	-
عبدالگاواد و فایک[4] [۳۱]	FMEA و FAHP	صنعت ساخت و ساز	✓	✓	-	✓	✓	-
لیو[5] و همکاران [۳۲]	روش‌های ترکیبی AHP، آنتروپی و ویکور بر مبنای تکنیک FMEA تحت شرایط فازی	خدمات درمانی	✓	✓	-	✓	✓	-
وانگ[6] و همکاران [۳۳]	روش‌های ترکیبی فرآیند تحلیل شبکه‌ای و کوپراس بر مبنای تکنیک FMEA تحت شرایط فازی	خدمات بیمارستان	✓	✓	-	✓	✓	-
بولاچ و محمدیان[7] [۳۴]	روش‌های ترکیبی AHP، ویکور و تحلیل پوشش داده‌ها بر مبنای تکنیک FMEA تحت شرایط فازی	صنعت خودرو	✓	✓	-	✓	✓	-
ناظری و نادری‌کیا [۳۵][8]	روش‌های ترکیبی ANP و دیمتل بر مبنای تکنیک FMEA تحت شرایط فازی	مدیریت تعمیر و نگهداری راه-آهن	✓	✓	-	✓	✓	-
رویکرد پیشنهادی	روش ترکیبی سوارا و واسپاس بر مبنای تکنیک FMEA تحت شرایط فازی	پروژه کتابخانه مرکزی استان مرکزی	✓	-	✓	✓	-	✓

بررسی ادبیات صورت گرفته نشان می‌دهد که تلاش‌های گسترده‌ای برای بهبود روش FMEA کلاسیک انجام شده است. از طرفی اکثر تکنیک‌های ترکیبی ارائه شده از روش‌های تصمیم‌گیری چون AHP [۲۵-۲۱، ۳۲، ۳۴]،ANP [۱۵، ۳۳، ۳۵]، BWM [۲۶] برای وزن-دهی معیارهای تصمیم‌گیری استفاده نمودند. با این حال، فرآیند خسته‌کننده و پیچیده محاسبات، در نظر گرفتن تعداد زیاد مقایسات زوجی و محاسبه نرخ ناسازگاری مانع از محبوبیت و کاربرد آن‌ها در مدل‌های FMEA می‌شوند. بر این اساس مطالعه حاضر، تکنیک جدید تصمیم‌گیری چند معیاره SWARA تحت شرایط فازی را که ابزاری مناسب برای بدست آوردن وزن شاخص‌ها و برطرف نمودن معایب

[1] Vikor
[2] Boral
[3] Multi-Attribute Ideal Real Comparative Analysis (MAIRCA)
4 Abdelgawad and Fayek
[5] Liu
[6] Wang
[7] Baloch and Mohammadian
[8] Nazeri and Naderikia

تکنیک‌های قبل بکار می‌گیرد چرا که فهم روش SWARA آسان است و نسبت به سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP، ANP و BWM به تعداد مقایسات و زمان کمتری برای محاسبه نیاز دارد. هم‌چنین، نظرات کارشناسان را تجزیه و تحلیل نموده و نسبت اهمیت نسبی هر شاخص بدون استفاده از مقیاس‌بندی تخمین می‌زند. براین اساس پژوهش حاضر، با به‌کارگیری روش سوارای فازی ابزاری مناسب برای بدست آوردن وزن شاخص‌ها از نظر متخصصان با توجه به شرایط فعلی ارائه داده و مشکلات مرتبط با پیچیدگی مرتبط در محاسبات برای تعیین وزن شاخص‌ها را برطرف نموده است. در سال‌های اخیر در چندین تحقیق جهت ارزیابی و اولویت‌بندی شاخص‌های تصمیم-گیری مورد استفاده قرارگرفته است که از آن جمله می‌توان به تحقیقات وسکویک[1] و همکاران [۳۶] برای ارزیابی مدیران راه آهن، ماوی[2] و همکاران [۳۷] در خصوص ارائه خدمات لجستیک، کربسویک[3] و همکاران [۳۸] برای انتخاب پرسنل و بسیاری از تحقیقات دیگر اشاره کرد. هم‌چنین، مسئله مهم دیگر بعد از برطرف نمودن موانع تکنیک‌های پیشین وزن‌دهی، ارزیابی و اولویت‌بندی رویدادهای متعدد ریسک است. بدین منظور، از تکنیک جدید تصمیم‌گیری چندمعیاره WASPAS تحت شرایط فازی بکار گرفته می‌شود. تکنیک مورد نظر برمبنای دو مدل جمع وزنی و ضرب وزنی است که منجر به افزایش دقت اولویت‌بندی روش مورد استفاده می‌شود. روش مورد نظر، گزینه‌های ارزیابی را براساس مدل‌های بهینه ترکیبی بدست آمده WPS و WSM اولویت‌بندی می‌نماید و زمان کمتری نسبت به سایر روش‌های MCDM مصرف می‌کند. از این رو، با توجه به مزایای مطرح شده هر دو تکنیک تصمیم‌گیری و بررسی برخی کاستی‌های تکنیک FMEA، پژوهش حاضر به ارائه یک رویکرد ترکیبی جدید تصمیم‌گیری بر مبنای تکنیک متداول FMEA می‌پردازد که پس از بررسی‌های صورت گرفته پژوهش حاضر به عنوان اولین مطالعه در مورد ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های متعدد پروژه‌های عمرانی با روش ترکیبی دو مرحله ای SWARA و WASPAS بر مبنای تکنیک متداول FMEA است. این امر به نوبه خود باعث کاهش تقاضای عدد اولویت‌های ریسک شده و می‌تواند عملکرد FMEA را بهبود ببخشد.

۳- روش‌شناسی پژوهش

این بخش به معرفی تئوری مجموعه فازی و رویکرد ترکیبی پیشنهادی پژوهش برای ارزیابی و اولویت‌بندی رویدادهای متعدد ریسک پروژه‌های عمرانی می‌پردازد. در این راستا، ابتدا به تشریح تئوری مجموعه فازی شامل مجموعه‌های فازی و متغییرهای زبانی پرداخته و سپس رویکرد ترکیبی نوین تحت شرایط فازی بر مبنای روش FMEA ارائه می‌دهد. در روش ترکیبی پیشنهادی به ترتیب از SWARA برای وزن‌دهی و اهمیت‌سنجی شاخص‌های تصمیم‌گیری و سپس از روش WASPAS برای ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های متعدد در پروژه‌های عمرانی استفاده شده است.

۳-۱- تئوری مجموعه فازی

۳-۱-۱- مجموعه‌های فازی

تئوری مجموعه فازی در سال ۱۹۷۲ توسط لطفی‌زاده مطرح شد. پروفسور لطفی‌زاده عدم قطعیت ناشی از ابهامات تفکرات انسان را در تئوری فازی مطرح نمود [۲۶]. مهم‌ترین قابلیت مجموعه فازی توانایی‌اش در نشان دادن داده‌های مبهم و نامشخص است. از ویژگی این مجموعه، در نظر گرفتن تابع عضویتی است که به هر عضو آن درجه عضویتی در یک بازه زمانی مشخص که معمولا این بازه بین [۰،۱] تعلق می‌گیرد. توابع عضویت همان نظرات خبرگان پیرامون هرگزینه هستند. بدین منظور برای فازی‌سازی نظرات خبرگان از اعداد فازی استفاده شد. اعداد فازی، نوعی خاص از مجموعه‌های فازی هستند. بنابراین با درک مفهوم مجموعه فازی می‌توان اعداد فازی را بسادگی فرا گرفت. در منطق کلاسیک هر عدد یک مقدار قطعی و مشخص است اما در منطق فازی هر عدد مقداری تقریبی است. انواع بسیار متنوعی از اعداد فازی با نام‌های اعداد فازی مثلثی[4]، ذوزنقه‌ای[5]، گاوس[6] ارائه شده است [۳۹]. TFN در کاربردها مناسب‌تر هستند و به دلیل سادگی

[1] Vesković
[2] Mavi
[3] Karabasevic
[4] Triangular Fuzzy Number (TFN)
[5] Trapezoidal
[6] Gaussian

محاسباتی آنها در ارتقاء پردازش اطلاعات در این زمینه مناسب هستند. علاوه بر این، اعداد فازی مثلثی برای ماهیت ارزیابی‌های زبانی متخصصان کاربرد دارند و در مطالعات تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی بطور گسترده استفاده شده است.

۲-۱-۳- متغییرهای زبانی

متغیرهای زبانی، معمولا برای بیان عملکرد شاخص‌های کیفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. متغییرهای کیفی برای مقابله با موقعیت‌های تعریف نشده در اصطلاحات کیفی بسیار مفید هستند. این مطالعه، اهمیت وزن فاکتورهای ریسک و ارزیابی کیفی حالت‌های عدم موفقیت از نظر عوامل ریسک به عنوان متغیرهای زبانی بیان شده است. متغیرهای زبانی در جدول ۳ و جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳ : عبارات زبانی و اعداد فازی مثلثی [۳۷].

عبارات زبانی	اعداد فازی مثلثی
اهمیت برابر	(۱، ۱، ۱)
اهمیت نسبتا کم	(۰,۶۷، ۱، ۱,۵)
اهمیت کم	(۰,۴، ۰,۵، ۰,۶۷)
اهمیت خیلی کم	(۰,۲۸۶، ۰,۳۳، ۰,۴)
اهمیت بسیار کم	(۰,۲۲، ۰,۲۵، ۰,۲۸۶)

جدول٤: عبارات کلامی و اعداد فازی متناظر جهت رتبه‌بندی گزینه‌ها [٤٠].

عبارات زبانی	اعداد فازی مثلثی
خیلی ضعیف	(۱، ۱، ۳)
ضعیف	(۱، ۳، ۵)
متوسط	(۳، ۵، ۷)
خوب	(۵، ۷، ۹)
خیلی خوب	(۷، ۹، ۱۱)

۲-۳- رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری نوین بر مبنای روش تحلیل حالات و آثار شکست در محیط فازی

رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره تحت شرایط فازی، یکی از محبوب‌ترین تکنیک‌ها برای تصمیم‌گیری پیرامون ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌های مهم براساس مجموعه‌ای پیچیده از شاخص‌های مرتبط هستند. با این حال، روش‌های تصمیم‌گیری فازی معایبی به همراه دارند که با به کارگیری رویکردهای ترکیبی تصمیم‌گیری فازی قابل حل است. طی چند سال گذشته، از رویکردهای ترکیبی برای پشتیبانی و حل مشکلات مرتبط با آن به طور فزاینده‌ای استفاده شده است. برخی از محققان SWARA و WASPAS را به عنوان یک رویکرد جدید ترکیبی MCDM تحت شرایط فازی برای محاسبه وزن شاخص‌ها و ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌های تصمیم‌گیری و در نهایت انتخاب گزینه بهینه استفاده نمودند چرا که روش ترکیبی مورد نظر به تصمیم‌گیرنده اجازه می‌دهد تا با اطمینان و دقت بیشتری نسبت به سایر رویکردهای ترکیبی چندمعیاره تصمیم‌گیری نماید. در روش ترکیبی ابتدا، به شناسایی شاخص‌ها و گزینه‌های ارزیابی پرداخته می‌شود و سپس تیم ارزیابی مشخص و تشکیل می‌گردد. در ادامه، با توجه به مراحل ذکر شده در بخش ۳-۲-۱ اوزان شاخص‌های ارزیابی مشخص می‌شود. در نهایت، با به کارگیری تکنیک WASPAS با توجه به مراحل شرح داده شده آن در بخش ۳-۲-۲ به اولویت‌بندی گزینه‌های ارزیابی پرداخته می‌شود. اولویت‌بندی روش معرفی شده بر مبنای دو مدل ترکیبی بهینه WPS و WSM می‌باشد که منجر به افزایش دقت تصمیم‌گیری و با یکپارچه‌سازی مقدار عملکرد یکپارچه WASPAS برای هر گزینه منجر به صحت اولویت‌بندی و افزایش اثربخشی روش مورد استفاده می‌گردد. در ادامه، تعاریف و اصول روش‌های SWARA و WASPAS تحت شرایط فازی به تفصیل ارائه شده است.

۲-۲-۱-۳- روش SWARA تحت شرایط فازی

در بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری، وزن‌دهی به شاخص‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل در نظر گرفته شده است. روش FSWARA یکی از روش‌های نوین در ارزیابی و اهمیت‌سنجی اوزان است که در آن متخصصان نقش مهمی دارند. بر اساس روش مورد نظر، به مهم‌ترین شاخص رتبه نخست و به کم اهمیت‌ترین شاخص، آخرین رتبه را اختصاص می‌دهد. در نهایت، مقدار متوسط رتبه‌های اختصاص داده شده توسط متخصصان به هر شاخص، رتبه‌بندی و اهمیت هر شاخص را مشخص می‌شود. روش FSWARA در مواردی که اولویت‌بندی شاخص‌های تصمیم‌گیری مشخص است، می‌تواند مفید واقع شود. از طرفی دیگر، با توجه به کاهش تعداد مقایسات زوجی در مقایسه با سایر روش‌های AHP، ANP و BWM درک آن آسان و ساده است. به طور کلی، روش FSWARA دارای شش مرحله است که به شرح زیر است [۳۷]:

مرحله ۱- مرتب کردن شاخص‌های ارزیابی: شاخص‌های ارزیابی را به ترتیب نزولی بر اساس نظرات قابل توجه انتظارات خبرگان مرتب نموده.

مرحله ۲- تعیین اهمیت‌نسبی هر شاخص (S_j): به منظور تعیین اهمیت‌نسبی هر شاخص (S_j) باید شاخص (j) با شاخص قبلی خود یعنی (j-1) با استفاده از متغییرهای زبانی جدول ۳ مقایسه شود. سپس بعد از جمع‌آوری مقادیر S_j از همه تصمیم‌گیرندگان، اهمیت‌نسبی یکپارچه (S_J) با استفاده از میانگین حسابی بدست می‌آید. به طوریکه $S_J = (\tilde{s}_j^l, \tilde{s}_j^m, \tilde{s}_j^r)$.

مرحله ۳- محاسبه ضریب اهمیت نسبی $\tilde{k}_J$: ضریب اهمیت نسبی $\tilde{k}_J$ برای هر معیار با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\tilde{k}_j = \begin{cases} \tilde{1} & j = 1 \\ \tilde{s}_j + \tilde{1} & j > 1 \end{cases}, \quad (۱)$$

که در آن $\tilde{k_j} = (\tilde{k}_j^l, \tilde{k}_j^m, \tilde{k}_j^u)$.

مرحله ۴- محاسبه وزن فازی اولیه ($\tilde{q}_j$) هر شاخص: وزن اولیه شاخص‌های تصمیم‌گیری از طریق رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$\tilde{q}_j = \begin{cases} \tilde{1} & j = 1 \\ \frac{\tilde{q}_{j-1}}{\tilde{k}_j} & j > 1 \end{cases}, \quad (۲)$$

که در آن $\tilde{q_j} = (\tilde{q}_j^l, \tilde{q}_j^m, \tilde{q}_j^u)$.

مرحله ۵- محاسبه وزن نسبی: وزن نسبی شاخص‌ها از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد.

$$\tilde{w}_j = \frac{\tilde{q}_j}{\sum_{k=1}^{n} \tilde{q}_k}, \quad (۳)$$

که در آن $\tilde{w}_j = (\tilde{w}_j^l, \tilde{w}_j^m, \tilde{w}_j^r)$ است و $\tilde{w}_j$ وزن نسبی هر شاخص و n شماره هر شاخص را نشان می‌دهد.

گام ۶- تبدیل وزن‌های نسبی فازی $\tilde{w}$به اعداد قطعی با استفاده روش مرکز سطح (COA) که از رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$w_j^{non} = \frac{(w_j^r - w_j^l) + (w_j^m - w_j^l) + (w_j^l)}{3}. \quad (۴)$$

۲-۲-۳- روش WASPAS تحت شرایط فازی

روش FWASPAS یکی از تکنیک‌های دقیق تصمیم‌گیری که توسط زاواداسکاس و همکاران (۲۰۱۴) معرفی و به عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره دقیق شناخته شده است. روش معرفی شده براساس ترکیب دو مدل WSM و WPS به دست آمده که

می‌تواند در مسائل پیچیده تصمیم‌گیری کارایی بالایی داشته باشد و همچنین نتایج حاصل از این مدل ترکیبی از دقت بالایی نسبت به سایر روش‌های تصمیم‌گیری برخوردار است. این روش دارای توانایی منحصر به فرد در مسائل بهینه‌سازی تکی و چندگانه است که شامل ریاضیات ساده و صحیح بوده و در دنیای واقعی کاملاً کاربرد دارد و به طور موفقیت‌آمیز در مورد مسائل تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گیرد. مراحل اصلی روش FWASPAS به صورت زیر است [۴۱]:

مرحله ۱- تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری فازی: اولین گام در FWASPAS تشکیل ماتریس تصمیم / ارزیابی به شرح زیر است:

$$\tilde{X}=\begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \cdots & \tilde{x}_{1j} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{i1} & \cdots & \tilde{x}_{ij} & \cdots & \tilde{x}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \cdots & \tilde{x}_{mj} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix}; \qquad i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,n}. \tag{۵}$$

$\tilde{X}=[\tilde{x}_{ij}]_{m\times n}$ یک ماتریس تصمیم فازی است که در آن x_{ij} عملکرد گزینه i ام نسبت به شاخص j ام است. همچنین، m تعداد گزینه‌های در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد و n تعداد شاخص‌های انتخاب شده را مشخص می‌کند. سپس، ماتریس تصمیم فازی بر اساس طیف‌های مختلف فازی جدول ۴ نمره گذاری می‌شود.

مرحله ۲- نرمال‌سازی ماتریس تصمیم فازی: ماتریس تصمیم‌گیری فازی باید نرمال شود که نرمالسازی از طریق دو معادله زیر صورت می‌گیرد:

- برای شاخص‌های منفی: $\tilde{\tilde{x}}_{ij}=\frac{\tilde{x}_{ij}}{max_i\,\tilde{x}_{ij}}.$ (۶)
- برای شاخص‌های مثبت: $\tilde{\tilde{x}}_{ij}=\frac{min_i\tilde{x}_{ij}}{\tilde{x}_{ij}}.$ (۷)

که در آن $\tilde{\tilde{x}}_{ij}$ یک ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده است.

مرحله ۳- محاسبه مقدار تابع بهینگی براساس WSM برای هر گزینه: نخستین معیار بهینگی گزینه‌ها روش جمع وزن‌دار است. برای این کار وزن هر معیار باید در عناصر ستون خود در ماتریس نرمال ضرب شود.

$$\tilde{Q}_i=\sum_{j=1}^{n}\tilde{\tilde{x}}_{ij}\,\tilde{w}_j,\ i=\overline{1,m}, \tag{۸}$$

که در آن $\tilde{w}_j$ وزن مرتبط با معیار j ام است.

مرحله ۴- محاسبه مقدار تابع بهینگی براساس WPM برای هر گزینه: دومین معیار بهینگی گزینه‌ها روش ضرب وزن‌دار است. برای این کار باید تمامی درایه‌های ماتریس تصمیم به توان وزن معیار مربوطه برسانید.

$$\tilde{P}_i=\prod_{j=1}^{n}\left(\tilde{\tilde{x}}_{ij}\right)^{\tilde{w}_j}, \qquad i=\overline{1,m}. \tag{۹}$$

مرحله ۵- نتایج بدست آمده از مرحله ۳ و ۴ با استفاده از رابطه (۱۰) و (۱۱) دیفازی می‌شوند.

$$Q_i=\frac{1}{3}(Q_{i\alpha},Q_{i\beta},Q_{i\gamma}). \tag{۱۰}$$

$$P_i = \frac{1}{3}(P_{i\alpha}, P_{i\beta}, P_{i\gamma}). \quad (۱۱)$$

مرحله ۶- یکپارچه‌سازی مقدار عملکرد یکپارچه FWASPAS برای هر گزینه: مقدار عملکرد یکپارچه تکنیک FWASPAS برای هر گزینه را می‌توان به شرح زیر محاسبه و تعریف کرد:

$$k_i = 0.5Q_i + 0.5P_i, \quad 0 \le k_i \le 1. \quad (۱۲)$$

بر مبنای مقادیر k_i گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند. اما ذکر این نکته الزامی است که مسئله مهم در روش FWASPAS افزایش دقت و اثربخشی رتبه‌بندی در فرآیند تصمیم‌گیری است. برای این منظور، می توان از یک معادله کلی تعمیم یافته برای ارزیابی اهمیت نسبی کل برای رتبه‌بندی گزینه‌ها به منظور افزایش دقت و اثربخشی روش تصمیم گیری ایجاد کرد. معادله تعمیم یافته برای تعیین اهمیت نسبی کل هر گزینه به شرح زیر است:

$$k_i^{\lambda} = \lambda \sum_{j=1}^{n} Q_i + (1-\lambda) \sum_{j=1}^{n} P_i, \lambda = 0, \dots, 1, \quad 0 \le k_i^{\lambda} \le 1. \quad (۱۳)$$

λ ضریب دقت تصمیم‌گیری است و به منظور افزایش دقت در فرآیند تصمیم‌گیری درFWASPAS توسعه یافته است. مقدار بهینه آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\lambda = \frac{\sum_{j=1}^{n} P_i}{\sum_{j=1}^{n} P_i + \sum_{j=1}^{n} Q_i}. \quad (۱۴)$$

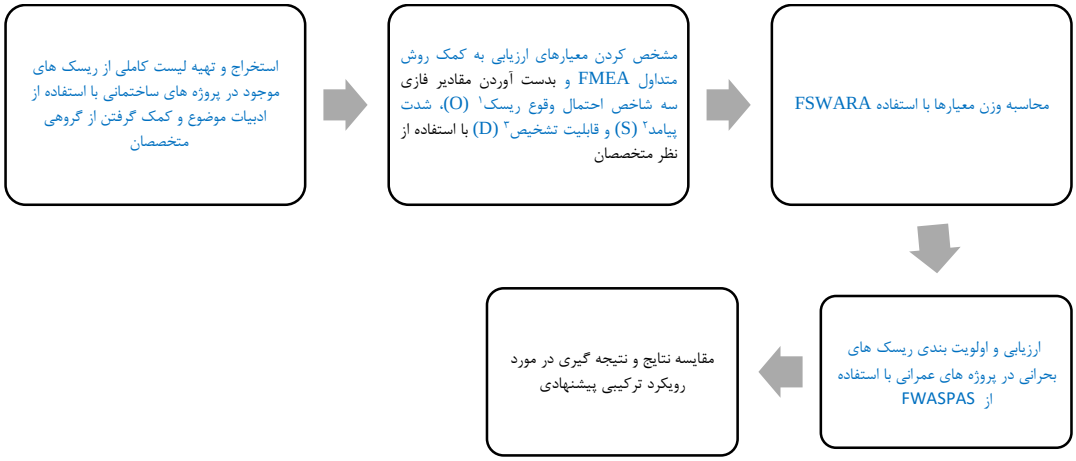
در نهایت گزینه‌ها بر مبنای بالاترین مقدار k_i^{λ} اولویت‌بندی می‌شوند.

در بیشتر مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره هدف آن است تا با استفاده از شاخص‌های متعدد، گزینه‌های موجود را ارزیابی کرد. شاخص‌های متعددی با درجه اهمیت مختلف در امر تصمیم‌گیری دخیل هستند. می‌توان با استفاده از تیم ارزیابی میزان اهمیت شاخص‌ها را تعیین کرد، برای این منظور بهترین راهکار استفاده از روش SWARA است. پس از تعیین وزن شاخص‌ها باید به هر گزینه براساس هر شاخص امتیازی داده شود که این جدول نمرات همان ماتریس تصمیم است. ماتریس تصمیم وارد روش WASPAS شده پس از حل مدل به اولویت‌بندی نهایی گزینه‌ها می‌پردازد. براساس نتایج پژوهش بدل‌پور و نوربخش[1] [۴۲] تاکید کردند که دقت روش یکپارچه تصمیم‌گیری بسیار بیشتر از مدل‌های به صورت جداگانه است چرا که در اکثر تکنیک‌های تصمیم‌گیری از یک مدل به منظور اولویت‌بندی گزینه‌های تصمیم بکار گرفته می‌شود در حالیکه در روش WASPAS بر مبنای دو مدل ترکیبی بهینه WPS و WSM می‌باشد که منجر به افزایش دقت تصمیم‌گیری و با یکپارچه‌سازی مقدار عملکرد یکپارچه WASPAS برای هر گزینه منجر به دقت اولویت‌بندی روش مورد استفاده می‌گردد.

۴- رویکرد ترکیبی پیشنهادی بر مبنای FMEA در شرایط فازی

مراحل مدل یکپارچه پیشنهادی از پنج مرحله اصلی زیر تشکیل شده است. با این حال، الگوریتم اجرای تحقیق مدل پیشنهادی ما در شکل ۱ آورده شده است.

[1] Badalpur and Nurbakhsh



شکل ۱ : الگوریتم پیاده‌سازی رویکرد ترکیبی پیشنهادی.

مرحله ۱- استخراج و تهیه‌ی لیست کاملی از ریسک‌های موجود در پروژه‌های عمرانی با استفاده از ادبیات موضوع و کمک گرفتن از گروهی از متخصصان

در مرحله اول، مجموعه‌ی کامل از ریسک‌های موجود در پروژه‌های عمرانی، پس از انجام مطالعات کتابخانه‌ای و انجام مصاحبه با گروهی از متخصصان استخراج می‌شود و خطرات عمده به عنوان گزینه در رویکرد ترکیبی پیشنهادی در نظر گرفته می‌شوند. این ریسک‌ها را با $FM_i\ (i = 1,2, \dots, I)$ کدگذاری و در قسمت (۵-۲) به صورت کامل شرح داده شده است.

مرحله ۲- مشخص کردن شاخص‌های ارزیابی به کمک روش متداول FMEA و بدست آوردن مقادیر فازی سه شاخص ریسک

پس از مشخص کردن ریسک‌های موجود در پروژه‌های عمرانی، مهمترین شاخص‌های ارزیابی به کمک روش متداول FMEA به شرح زیر است:

- احتمال وقوع ریسک[1] (O)
- شدت پیامد (S)
- قابلیت تشخیص(D)

سپس، اعضای تیم ارزیابی ریسک باید قضاوت‌های خود را درباره شاخص‌ها براساس تجربه و دانش خود بیان کنند. خبرگان می‌توانند این قضاوت را براساس یک مقدار عددی دقیق، عبارات زبانی یا اعداد فازی بیان کنند، در بسیاری از موقعیت‌ها به علت عدم اطمینان یا غیر قابل اندازه‌گیری بودن شاخص‌ها به صورت کمی، ارائه مقادیر عددی توسط خبرگان دشوار است. بنابراین می‌توان از یک متغییر زبانی یا عدد فازی برای ارائه مدل استفاده کرد. در مدل پیشنهادی برای تحلیل کمی شاخص‌ها از اعداد فازی مثلثی استفاده شده است. عبارات زبانی و اعداد فازی در جدول ۳ ارائه شده است.

مرحله ۳- استفاده از SWARA تحت شرایط فازی محاسبه وزن شاخص‌ها

در این مرحله، وزن سه شاخص ارزیابی با استفاده از FSWARA پیشنهاد شده در بخش ۳-۲-۱ محاسبه می‌شود.

[1] Severity
[2] Detection
[3] Occurrence

مرحله ۴- استفاده از WASPAS تحت شرایط فازی برای اولویت‌بندی و ارزیابی ریسک‌های بحرانی در پروژه عمرانی

در این مرحله، برای اولویت‌بندی و شناسایی ریسک‌های مهم، از روش FWASPAS پیشنهاد شده در بخش ۳-۲-۲ استفاده می‌شود.

مرحله ۵- مقایسه نتایج و نتیجه‌گیری در مورد رویکرد ترکیبی پیشنهادی

در این مرحله بعد از بدست آوردن نتایج ارزیابی و اولویت‌بندی بکارگیری رویکرد ترکیبی پیشنهادی بر مبنای تکنیک متداول FMEA با استفاده از آزمون دوگانه به صحت‌سنجی نتایج پرداخته می‌شود.

۵-مطالعه موردی: کاربرد رویکرد ترکیبی پیشنهادی برای پروژه کتابخانه مرکزی استان مرکزی

در این بخش به منظور نشان دادن کاربرد رویکرد ترکیبی پیشنهادی در بخش‌های قبلی، مطالعه موردی ارائه شده است. بررسی و پیاده‌سازی در سازمان راه و شهرسازی استان مرکزی انجام شد. سازمان مورد نظر تجربه قابل توجهی در ساخت جاده، ساخت سازه‌های فلزی، سازه‌های عظیم، طراحی و ساخت بنگاه‌های تولیدی دارد. مطالعه موردی سازمان راه و شهرسازی در یک ساختمان۷ طبقه، واقع در میدان سرداران به نام کتابخانه مرکزی اراک مورد بررسی قرار گرفت و طرح اصلی آن شامل مخزن کتاب، سالن اجتماعات، کتابخانه کودکان، بازار کتاب، سایت رایانه، فضاهای مطالعه جداگانه، ساختمان اداری، اتاق محققان، بخش صحافی و غیره می‌باشد. علاوه بر این، مساحت پروژه ۶۸۰۰ مترمربع و با زیربنای ۱۸۵۰۰ مترمربع و هنگام جمع‌آوری داده‌ها در ۴۰ درصد پیشرفت فیزیکی سازه بوده است. در ادامه، برای دستیابی به هدف اصلی و اجرای یک الگوی تصمیم‌گیری معنی‌دار مراحل زیر انجام شد:

۵-۱- تشکیل تیم‌های ارزیابی

با توجه به اهمیت بررسی رویدادهای متعدد ریسک در پروژه‌های عمرانی، مطالعه حاضر از دو مرحله اصلی اقدام به گردآوری اطلاعات می‌نماید. براین اساس با توجه به مراحل پژوهش به معرفی تیم ارزیابی، روش نمونه‌گیری و حجم نمونه در هر مرحله پرداخته می‌شود.

- مرحله اول: شناسایی ریسک‌های موجود در پروژه‌های عمرانی

در این مرحله تیم ارزیابی، شامل کلیه خبرگان و متخصصین سازمان در حوزه‌ی مدیریت ساخت که طبق آئین‌نامه‌های داخلی دارای شرایط زیر می‌باشند:

۱) حداقل مدرک تحصیلی کارشناسی در زمینه تخصصی و مهندسی
۲) داشتن حداقل یک‌بار سمت مدیر ارشد در یکی از پروژه‌های ساخت
۳) تجربه کاری بیش از ۵ سال در مدیریت پروژه

بر این اساس با توجه به در نظرگرفتن شرایط خبرگان و متخصصین ارائه شده، تعداد این افراد ۱۲ نفر می‌باشد و از روش نمونه‌گیری هدفمند - برگزیده استفاده می‌شود.

مرحله دوم: ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های شناسایی شده بر پروژه‌های ساخت با استفاده از روش ترکیبی SWARA و WASPAS فازی بر مبنای تکنیک FMEA

در این مرحله تیم ارزیابی برخلاف مرحله اول، باید خبرگان شاغل در پروژه‌های معرفی شده از سوی سازمان باشند چراکه لازم است مدیر یا کارشناس مورد پرسش، اطلاعات کافی در مورد شرایط پروژه‌های مورد نظر را داشته باشد. خبرگان شاغل در پروژه‌های معرفی شده شامل تیم‌های زیر می‌باشند:

۱) تیم کارفرما
۲) تیم مهندس مشاور
۳) تیم پیمانکار

بر این اساس جمعیت آماری مورد پرسش در هر پروژه‌ی معرفی شده سازمان شامل ۳ نفر از تیم کارفرما (شامل: مالک، نماینده‌ی کارفرما و مدیر پروژه)، ۲ نفر از تیم مهندس مشاور (سرپرست تیم طراحی، سرناظر) و ۲ نفر از تیم پیمانکار (مدیر عامل و سرپرست کارگر) و در مجموع تعداد این افراد ۷ نفر در هر پروژه می‌باشند. در این مرحله از روش نمونه‌گیری غیر تصادفی هدفمند استفاده می‌شود.

۲-۵- شناسایی ریسک‌های موجود در پروژه‌های عمرانی

پس از انجام مطالعات کتابخانه‌ای بر روی ریسک‌های موجود در پروژه‌های عمرانی و انجام مصاحبه با تیم ارزیابی (گروه اول که شامل خبرگان و متخصصین سازمان در حوزه‌ی مدیریت ساخت می‌باشند)، ریسک‌های موجود در پروژه‌های عمرانی استخراج می‌شوند. در ادامه، نتایج تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از مطالعات کتابخانه‌ای و مصاحبه با تیم ارزیابی گروه اول، منجر به برجسته‌سازی ۲۳ رویداد مهم ریسک در ۶ گروه فنی، پویایی محیط پروژه، تعدد ذینفعان پروژه، کارفرما، مدیریت پروژه و پیمانکار شد که نتایج به ترتیب در جدول ۵ و ۶ ارائه شده است.

جدول ۵. شناسایی ریسک پروژه‌های عمرانی.

کد ریسک	شرح ریسک	منابع
FM_1	نیازمندی‌ها	محقر و همکاران [۴۳]
FM_2	عدم قطعیت در نرخ تورم و رشد قیمت	رحیمی و همکاران [۴] و فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_3	عملکرد پائین منابع انسانی	رحیمی و همکاران [۴]
FM_4	تغییر سفارشات توسط کارفرما در طی ساخت و ساز	فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_5	پیچیدگی	محقر و همکاران [۴۳]
FM_6	کمبود نیروی انسانی ماهر و غیر ماهر	رحیمی و همکاران [۴]
FM_7	عدم هماهنگی بین منابع انسانی مرتبط با پروژه	مصاحبه با خبرگان
FM_8	ناکافی بودن تجربه تیم طراحی	فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_9	بررسی‌های ناقص در مورد معارض و بروز اختلاف در واگذاری زمین	فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_{10}	دعاوی پیمانکاران با شرکت های طرف قرارداد	فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_{11}	اجرای روش‌های اشتباه ساخت و ساز توسط پیمانکار (ناسازگاری طراحی معماری با طراحی سازه)	رحیمی و همکاران [۴] و فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_{12}	ارتباط و همکاری ضعیف پیمانکار با سایر گروه ها	فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_{13}	عدم هماهنگی، اولویت بندی و بودجه بندی مناسب بین پروژه های چندگانه پیمانکار	فاروقی و همکاران [۴۴] و مصاحبه با خبرگان
FM_{14}	ابهام در شرح وظایف و اختیارات	مصاحبه با خبرگان
FM_{15}	عدم آشنائی پیمانکار در برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل پروژه	فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_{16}	شرایط و روابط قراردادی نامناسب تعیین شده توسط پیمانکار	فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_{17}	ضعیف بودن مهارت فنی کارکنان پیمانکار و ناآشنائی از کدهای ساختمانی و مقررات ایمنی	رحیمی و همکاران [۴] و فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_{18}	بروز اختلاف عمده کارفرما و پیمانکار	فاروقی و همکاران [۴۴] و مصاحبه با خبرگان
FM_{19}	عدم مدیریت مناسب توسط پیمانکار در رابطه با مسائل مالی، حمایت تامین کنندگان و زیر مجموعه‌های آن	فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_{20}	عدم قطعیت دربرآورد کیفیت مورد نیاز پروژه	محقر و همکاران [۴۳]
FM_{21}	ناکافی بودن تجربه تیم مشاور	فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_{22}	ناسازگاری موجود بین برنامه زمان بندی پیمانکاران در اجرای طرح	رحیمی و همکاران [۴] و فاروقی و همکاران [۴۴]
FM_{23}	هماهنگی نامناسب با شرکت ها و سازمان های دیگر	فاروقی و همکاران [۴۴]

جدول ٦: طبقه‌بندی ریسک در پروژه‌های ساختمانی.

طبقه‌بندی ریسک	شرح ریسک
فنی	نیازمندی‌ها
	پیچیدگی
پویایی محیط پروژه	عدم قطعیت در نرخ تورم و رشد قیمت
تعدد ذینفعان پروژه	عدم هماهنگی بین منابع انسانی مرتبط با پروژه
	ابهام در شرح وظایف و اختیارات
کارفرما	تغییر سفارشات توسط کارفرما در طی ساخت و ساز
	ناکافی بودن تجربه تیم طراحی
	بررسی‌های ناقص در مورد معارض و بروز اختلاف در واگذاری زمین
	بروز اختلاف عمده کارفرما و پیمانکار
	ناکافی بودن تجربه تیم مشاور
مدیریت پروژه	عدم قطعیت دربرآورد کیفیت مورد نیاز پروژه
پیمانکار	عملکرد پائین منابع انسانی
	کمبود نیروی انسانی ماهر و غیر ماهر
	دعاوی پیمانکاران با شرکت های طرف قرارداد
	اجرای روش‌های اشتباه ساخت و ساز توسط پیمانکار (ناسازگاری طراحی معماری با طراحی سازه)
	ارتباط و همکاری ضعیف پیمانکار با سایر گروه‌ها
	شرایط و روابط قراردادی نامناسب تعیین شده توسط پیمانکار
	ضعیف بودن مهارت فنی کارکنان پیمانکار و ناآشنائی از کدهای ساختمانی و مقررات ایمنی
	عدم مدیریت مناسب توسط پیمانکار در رابطه با مسائل مالی، حمایت تامین کنندگان و زیر مجموعه‌های آن
	عدم آشنائی پیمانکار در برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل پروژه
	شرایط و روابط قراردادی نامناسب تعیین شده توسط پیمانکار
	ناسازگاری موجود بین برنامه زمان بندی پیمانکاران در اجرای طرح
	هماهنگی نامناسب با شرکت ها و سازمان های دیگر

۵-۲- مشخص کردن مجموعه شاخص‌های ارزیابی کمک روش متداول FMEA

در بیشتر تحقیقات صورت گرفته از پارامترهای S، D و O برای ارزیابی گزینه‌های تصمیم‌گیری استفاده می‌شود.

۵-۳- استفاده از FSWARA برای محاسبه وزن شاخص‌ها

در مرحله سوم، وزن‌دهی شاخص‌های تصمیم‌گیری بر اساس نظرات تیم ارزیابی (گروه دوم) و گام به گام براساس مراحل روش FSWARA انجام می‌شود. بدین‌منظور، از تیم ارزیابی (خبرگان شاغل در پروژه) خواسته شد که بر مبنای جدول ۳ قضاوت‌های خود را پیرامون اهمیت نسبی هر شاخص بیان کنند. سپس، داده‌های جمع‌آوری شده از تیم ارزیابی به اعداد فازی مثلثی تبدیل شده و براساس روابط (۱) تا (۳) وزن‌های شاخص‌های تصمیم‌گیری بدست آمدند. در نهایت، وزن‌های فازی نسبی بدست آمده با استفاده از رابطه (۴) دیفازی گردیده و نتایج در جدول ۷ ارائه گردیده است.

جدول۷: وزن شاخص‌ها.

کد شاخص	تعیین نسبی هر شاخص ($\tilde{S}_j$)			ضریب ($\tilde{k}_j$)			وزن فازی اولیه ($\tilde{q}_j$)			وزن($\tilde{w}_j$)			دیفازی
S	-	-	-	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰,۴۰۴	۰,۴۶۶	۰,۵۰۲	۰,۴۷۰
O	0.354571	0.451429	0.601714	1.360171	1.451429	1.354671	0.624331	0.688976	0.738241	0.275	0.321	0.371	0.322
D	0.383714	0.511429	0.704	1.704	1.511429	1.383714	0.366391	0.455844	0.533521	0.161	0.213	0.268	0.214

براساس نتایج وزن‌دهی توسط تیم ارزیابی مشخص شد که شاخص شدت ریسک نسبت شاخص‌های احتمال ریسک و احتمال تشخیص ریسک از اولویت بالاتری برخوردار است که نشان دهنده اهمیت این مسئله برای خبرگان است.

۴-۵- اولویت‌بندی و ارزیابی ریسک‌های بحرانی در پروژه عمرانی با استفاده از روش FWASPAS

در این پژوهش، از روش FWASPAS به عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌های ارزیابی و اولویت‌بندی برای رتبه‌بندی ریسک‌های بحرانی استفاده شده است. بدین منظور، بر اساس توضیحات ارائه شده در بخش (۳-۲-۲) ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل می‌شود. ماتریس تصمیم‌گیری شامل سطرها و ستون‌هایی است که به ترتیب شاخص‌ها و گزینه‌های تصمیم‌گیری را شامل می‌شود. ماتریس تصمیم توسط تیم ارزیابی (گروه دوم – خبرگان شاغل در پروژه) تکمیل گردیده و به روش میانگین حسابی نتایج ادغام گردید. سپس، ماتریس تصمیم براساس روابط (۶) و (۷) نرمالسازی صورت گرفته و در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸: ماتریس تصمیم‌گیری نرمال FWASPAS.

کد ریسک	S	O	D
FM_1	(۰,۴۲۵،۰,۶۱۶،۰,۸۰۸)	(۰,۴۷۸،۰,۶۸۱،۰,۸۸۴)	(۰,۲۲،۰,۲۸۹،۰,۴۱۹)
FM_2	(۰,۴۵۲،۰,۶۴۴،۰,۸۳۶)	(۰,۴۴۹،۰,۶۵۲،۰,۸۵۵)	(۰,۲۲۸،۰,۳۰۲،۰,۴۴۸)
FM_3	(۰,۶۱۶،۰,۸۰۸،۱)	(۰,۵۹۴،۰,۷۹۷،۱)	(۰,۲۶۵،۰,۳۷۱،۰,۶۱۹)
FM_4	(۰,۳۱۵،۰,۴۷۹،۰,۶۷۱)	(۰,۲۷۵،۰,۴۴۹،۰,۶۵۲)	(۰,۳۳۳،۰,۵۲،۰,۷۶۵)
FM_5	(۰,۲۸۸،۰,۴۵۲،۰,۶۴۴)	(۰,۳۰۴،۰,۴۷۸،۰,۶۸۱)	(۰,۲۱۳،۰,۲۷۷،۰,۳۹۴)
FM_6	(۰,۴۵۲،۰,۶۴۴،۰,۸۳۶)	(۰,۵۰۷،۰,۷۱،۰,۹۱۳)	(۰,۲۲،۰,۲۸۹،۰,۴۱۹)
FM_7	(۰,۵۳۴،۰,۷۲۶،۰,۹۱۸)	(۰,۵۶۵،۰,۷۶۸،۰,۹۷۱)	(۰,۲۲،۰,۲۸۹،۰,۴۱۹)
FM_8	(۰,۵۰۷،۰,۶۹۹،۰,۸۹)	(۰,۳۶۲،۰,۵۳۶،۰,۷۳۹)	(۰,۲۱۳،۰,۲۷۷،۰,۳۹۴)
FM_9	(۰,۳۹۷،۰,۵۸۹،۰,۷۸۱)	(۰,۳۳۳،۰,۵۰۷،۰,۷۱)	(۰,۲۴۵،۰,۳۳۳،۰,۵۲)
FM_{10}	(۰,۵۳۴،۰,۷۲۶،۰,۹۱۸)	(۰,۵۶۵،۰,۷۶۸،۰,۹۷۱)	(۰,۲۱۳،۰,۲۷۷،۰,۳۹۴)
FM_{11}	(۰,۳۷،۰,۵۶۲،۰,۷۵۳)	(۰,۲۴۶،۰,۴۲،۰,۶۲۳)	(۰,۲۲،۰,۲۸۹،۰,۴۱۹)
FM_{12}	(۰,۴۷۹،۰,۶۷۱،۰,۸۶۳)	(۰,۵۳۶،۰,۷۳۹،۰,۹۴۲)	(۰,۲۸۹،۰,۴۱۹،۰,۷۶۵)
FM_{13}	(۰,۳۷،۰,۵۶۲،۰,۷۵۳)	(۰,۵۰۷،۰,۷۱،۰,۹۱۳)	(۰,۲۲،۰,۲۸۹،۰,۴۱۹)
FM_{14}	(۰,۳۹۷،۰,۵۸۹،۰,۷۸۱)	(۰,۴۷۸،۰,۶۸۱،۰,۸۸۴)	(۰,۲۶۵،۰,۳۷۱،۰,۶۱۹)
FM_{15}	(۰,۳۹۷،۰,۵۸۹،۰,۷۸۱)	(۰,۳۳۳،۰,۵۳۶،۰,۷۳۹)	(۰,۲۳۶،۰,۳۱۷،۰,۴۸۱)
FM_{16}	(۰,۴۵۲،۰,۶۴۴،۰,۸۳۶)	(۰,۵۰۷،۰,۷۱،۰,۹۱۳)	(۰,۲۲۸،۰,۳۰۲،۰,۴۴۸)
FM_{17}	(۰,۳۹۷،۰,۵۸۹،۰,۷۸۱)	(۰,۳۰۴،۰,۵۰۷،۰,۷۱)	(۰,۲۵۵،۰,۳۵۱،۰,۵۶۵)
FM_{18}	(۰,۴۵۲،۰,۶۴۴،۰,۸۳۶)	(۰,۳۹۱،۰,۵۹۴،۰,۷۹۷)	(۰,۲۰۶،۰,۲۶۵،۰,۳۷۱)
FM_{19}	(۰,۵۶۲،۰,۷۵۳،۰,۹۴۵)	(۰,۳۹۱،۰,۵۹۴،۰,۷۹۷)	(۰,۳۱۷،۰,۴۸۱،۱)
FM_{20}	(۰,۴۵۲،۰,۶۴۴،۰,۸۳۶)	(۰,۴۷۸،۰,۶۸۱،۰,۸۸۴)	(۰,۲۵۵،۰,۳۵۱،۰,۵۶۵)
FM_{21}	(۰,۳۳۲،۰,۵۰۴،۰,۶۵۷)	(۰,۲۸۴،۰,۵۵۱،۰,۸۰۱)	(۰,۲۶۷،۰,۴۰۶،۰,۵۱۸)
FM_{22}	(۰,۴۰۸،۰,۵۹۷،۰,۷۹۱)	(۰,۲۴،۰,۴۷۸،۰,۸۰۷)	(۰,۲۳۳،۰,۳۲۸،۰,۵۲۹)
FM_{23}	(۰,۴۳۸،۰,۵۳۴،۰,۷۲۷)	(۰,۳۳،۰,۶۹۵،۰,۹۰۹)	(۰,۲۲۹،۰,۲۶۶،۰,۴۱۵)

در ادامه، مقادیر WSM (Q) و WPS (P) با استفاده از معادلات (۸) و (۹) محاسبه و سپس، مقادیر فازی با بکارگیری روابط (۱۰) و (۱۱) دیفازی گردیدند و نتایج در جدول ۹ ارائه گردیدند.

جدول ۹: مقادیر WSM و WPM.

کد ریسک	P	Q	Q قطعی	P قطعی
FM_1	(۰,۳۶۳،۰,۵۷۷،۰,۸۵۶)	(۰,۳۳۵،۰,۵۵،۰,۷۷۷)	۰,۵۹۹	۰,۵۵۴
FM_2	(۰,۳۵۹،۰,۵۷۵،۰,۸۶)	(۰,۳۳۵،۰,۵۵۲،۰,۷۸۱)	۰,۵۹۸	۰,۵۵۶
FM_3	(۰,۴۷۴،۰,۷۱،۱,۰۳۹)	(۰,۴۵۱،۰,۶۸۱،۰,۹۲۶)	۰,۷۴۱	۰,۶۸۶
FM_4	(۰,۲۶۲،۰,۴۷۴،۰,۷۸۱)	(۰,۲۵۴،۰,۴۷۳،۰,۷۱۱)	۰,۵۰۶	۰,۴۷۹
FM_5	(۰,۲۴۷،۰,۴۲۷،۰,۶۸۷)	(۰,۲۲۹،۰,۴۱۸،۰,۶۴۴)	۰,۴۵۴	۰,۴۳۰
FM_6	(۰,۳۸۳،۰,۵۹۹،۰,۸۸۱)	(۰,۳۵۳،۰,۵۶۸،۰,۷۹۵)	۰,۶۲۱	۰,۵۷۲
FM_7	(۰,۴۳۱،۰,۶۵۳،۰,۹۴۱)	(۰,۳۹۷،۰,۶۱۳،۰,۸۳۸)	۰,۶۷۵	۰,۶۱۶
FM_8	(۰,۳۳۳،۰,۵۳۳،۰,۸۰۷)	(۰,۳۰۸،۰,۵۰۷،۰,۷۳)	۰,۵۵۸	۰,۵۱۵
FM_9	(۰,۲۹۵،۰,۴۹۷،۰,۷۸۶)	(۰,۲۸۱،۰,۴۸۷،۰,۷۲۳)	۰,۵۲۶	۰,۴۹۷
FM_{10}	(۰,۴۳،۰,۶۵،۰,۹۳۴)	(۰,۳۹۳،۰,۶۰۷،۰,۸۳)	۰,۶۷۱	۰,۶۱۰
FM_{11}	(۰,۲۴۶،۰,۴۳۸،۰,۷۰۵)	(۰,۲۲۸،۰,۴۲۶،۰,۶۵۳)	۰,۴۶۳	۰,۴۳۶
FM_{12}	(۰,۴۱۴،۰,۶۴۹،۰,۹۹۸)	(۰,۳۹۹،۰,۶۳۵،۰,۸۹۶)	۰,۶۸۷	۰,۶۴۳
FM_{13}	(۰,۳۶،۰,۵۷۳،۰,۸۵)	(۰,۳۲۸،۰,۵۴۴،۰,۷۷۳)	۰,۵۹۵	۰,۵۴۸
FM_{14}	(۰,۳۶۲،۰,۵۸۶،۰,۹)	(۰,۳۴۴،۰,۵۷۱،۰,۸۱۹)	۰,۶۱۶	۰,۵۷۸
FM_{15}	(۰,۲۹۴،۰,۵۰۷،۰,۷۹)	(۰,۲۷۸،۰,۴۹۴،۰,۷۲۷)	۰,۵۳۰	۰,۵۰۰
FM_{16}	(۰,۳۸۴،۰,۶۰۲،۰,۸۸۹)	(۰,۳۵۶،۰,۵۷۴،۰,۸۰۳)	۰,۶۲۵	۰,۵۷۸
FM_{17}	(۰,۲۸۴،۰,۵،۰,۷۹۸)	(۰,۲۷۱،۰,۴۹۲،۰,۷۳۳)	۰,۵۲۷	۰,۴۹۹
FM_{18}	(۰,۳۳،۰,۵۴،۰,۸۱)	(۰,۳۰۵،۰,۵۱۴،۰,۷۳۴)	۰,۵۶۰	۰,۵۱۸
FM_{19}	(۰,۳۷۸،۰,۶۲۱،۱,۰۱۹)	(۰,۳۷۰,۶۱۳،۰,۸۹۱)	۰,۶۷۳	۰,۶۲۵
FM_{20}	(۰,۳۷۶،۰,۵۹۹،۰,۹۰۵)	(۰,۳۵۷،۰,۵۸۱،۰,۸۲۲)	۰,۶۲۷	۰,۵۸۷
FM_{21}	(۰,۲۵۹،۰,۵۰۵،۰,۷۸۵)	(۰,۲۴۸،۰,۵۰۱،۰,۷۲۷)	۰,۵۱۶	۰,۴۹۲
FM_{22}	(۰,۲۵۵،۰,۴۸۴،۰,۸۴۱)	(۰,۲۳۷،۰,۴۷۴،۰,۷۷)	۰,۵۲۷	۰,۴۹۴
FM_{23}	(۰,۳۰۳،۰,۵۵۲،۰,۸۳۷)	(۰,۲۸۴،۰,۵۲۱،۰,۷۶۲)	۰,۵۶۴	۰,۵۲۲

بعد از دیفازی نمودن مقادیر، رتبه هر گزینه و مقدار بهینه λ با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) به ترتیب محاسبه گردید و نتایج در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۱۰: امتیاز هر گزینه و رتبه بندی آنها.

کد ریسک	K	مقدار نرمال k	اولویت‌بندی
FM_1	۰,۵۷۵	۰,۰۴۴۳	۱۱
FM_2	۰,۵۷۶	۰,۰۴۴۴	۱۰
FM_3	۰,۷۱۲	۰,۰۵۴۹	۱
FM_4	۰,۴۹۲	۰,۰۳۷۹	۲۱
FM_5	۰,۴۴۲	۰,۰۳۴۰	۲۳
FM_6	۰,۵۹۶	۰,۰۴۵۹	۹
FM_7	۰,۶۴۴	۰,۰۴۹۶	۴
FM_8	۰,۵۳۶	۰,۰۴۱۳	۱۵
FM_9	۰,۵۱۱	۰,۰۳۹۴	۱۸
FM_{10}	۰,۶۴۰	۰,۰۴۹۳	۵
FM_{11}	۰,۴۴۹	۰,۰۳۴۶	۲۲
FM_{12}	۰,۶۶۵	۰,۰۵۱۲	۲
FM_{13}	۰,۵۷۱	۰,۰۴۴۰	۱۲
FM_{14}	۰,۵۹۶	۰,۰۴۵۹	۸
FM_{15}	۰,۵۱۴	۰,۰۳۹۶	۱۶
FM_{16}	۰,۶۰۱	۰,۰۴۶۳	۷

FM_{17}	۰,۵۱۳	۰,۰۳۹۵	۱۷
FM_{18}	۰,۵۳۸	۰,۰۴۱۴	۱۴
FM_{19}	۰,۶۴۸	۰,۰۴۹۹	۳
FM_{20}	۰,۶۰۶	۰,۰۴۶۷	۶
FM_{21}	۰,۵۰۴	۰,۰۳۸۸	۲۰
FM_{22}	۰,۵۱۰	۰,۰۳۹۳	۱۹
FM_{23}	۰,۵۴۲	۰,۰۴۱۸	۱۳

نتایج ارزیابی جامع نشان می‌دهد که مهمترین ریسک FM_3 است که باید بالاترین اولویت ریسک را به خود اختصاص دهد. در ادامه، مزایای استفاده از این مدل یکپارچه پیشنهادی و مقایسه نتیجه با سایر روشهای MCDM در بخش‌های زیر ارائه شده است.

۶-بحث و صحت سنجی نتایج بدست آمده

هدف از انجام مطالعه حاضر ارائه رویکردی ترکیبی نوین برای سنجش و اولویت‌بندی ریسک‌های پروژه‌های ساخت و ساز بوده که ضمن بررسی جامع و دقیق، انواع ریسک‌های موجود در پروژه‌های ساخت و ساز را شناسایی نموده و همچنین منجر به بهبود در نتایج روش FMEA سنتی شده است. بدین منظور با استفاده از ترکیب چند روش تصمیم‌گیری چندمعیاره از جمله روش های سوارا و واسپاس بر مبنای روش FMEA سنتی در محیط فازی پیشنهاد گردید. در مرحله بعد روش پیشنهادی روی پروژه احداث کتابخانه مرکزی اراک اعمال شد و اعتبار یافته‌ها از جنبه‌های زیر مورد بررسی قرار گرفتند:

۶-۱- تحلیل حساسیت و آزمون صحت‌سنجی رویکرد ترکیبی پیشنهادی

در این بخش، یک آزمایش اعتبار دوگانه از رتبه‌بندی ترجیحی به دست آمده ارائه می‌دهیم. ابتدا، تحلیل حساسیت برای بررسی تأثیر نوسان وزن در عملکرد گزینه‌های تصمیم‌گیری (رویدادهای ریسک در پروژه‌های عمرانی) انجام می‌شود. سپس، براساس پژوهش تیان و همکاران [۲۶] آزمون اعتبارسنجی رویکرد ترکیبی پیشنهادی بررسی می‌شود.

۶-۱-۱- تحلیل حساسیت رویکرد ترکیبی پیشنهادی

در این بخش، تحلیل حساسیت برای آزمون ثبات رویکرد ترکیبی پیشنهادی با مبادله وزن هر یک از شاخص‌ها با وزن معیار دیگری انجام شد. وزن معیارها بیشترین تاثیر را در رتبه‌بندی گزینه‌ها دارد و تصمیم‌گیرنده باید درجه قابلیت اعتماد نتایج را برای تصمیم-گیری بداند. به دلیل عدم قطعیت در مراحل مختلف تصمیم‌گیری چندشاخصه لازم است که قبل از انتخاب گزینه نهایی، تحلیل حساسیت روی مسئله صورت گیرد. بنابراین انجام تحلیل حساسیت بعد از حصول رتبه بندی گزینه‌ها پیشنهاد می‌گردد. جهت تحلیل حساسیت در پژوهش حاضر، در هر حالت وزن دو معیار جابجا می‌شود چون ۳ معیار داریم پس در نهایت ۳ سناریو تغییر وزن حاصل می‌شود که در زیر معرفی شده‌اند:

- سناریوی ۱: تغییر وزن معیارهای S به O

سناریوی (S1) به صورت تغییر وزن معیارهای S به O تعریف می‌شود. به طوریکه دیگر اوزان بدون تغییر باقی می‌ماند.

- سناریوی ۲ : تغییر وزن معیارهای S به D

سناریوی (S2) به صورت تغییر وزن معیارهای S به D تعریف می‌شود. به طوریکه دیگر اوزان بدون تغییر باقی می‌ماند.

- سناریوی ۳ : تغییر وزن معیارهای O به D

سناریوی (S3) به صورت تغییر وزن معیارهای O به D تعریف می‌شود. به طوریکه دیگر اوزان بدون تغییر باقی می‌ماند.

در هر سناریو اولویت‌بندی گزینه‌ها توسط روش FWASPAS محاسبه شده و نتایج در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۱: رتبه‌بندی گزینه‌ها به ازای سناریوهای مختلف.

کد ریسک	اولویت‌بندی متعدد تحت سناریوهای مختلف		
	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
FM_1	۱۱	۱۲	۱۳
FM_2	۱۰	۱۱	۱۱
FM_3	۱	۱	۲
FM_4	۲۱	۱۴	۷
FM_5	۲۳	۲۲	۲۳
FM_6	۸	۹	۱۰
FM_7	۴	۴	۶
FM_8	۱۲	۱۸	۱۷
FM_9	۱۹	۲۰	۱۴
FM_{10}	۵	۵	۸
FM_{11}	۲۲	۲۳	۲۲
FM_{12}	۳	۲	۳
FM_{13}	۱۳	۱۰	۱۶
FM_{14}	۹	۷	۵
FM_{15}	۱۸	۱۹	۱۹
FM_{16}	۷	۸	۹
FM_{17}	۱۶	۱۷	۱۲
FM_{18}	۱۴	۱۵	۲۱
FM_{19}	۲	۳	۱
FM_{20}	۶	۶	۴
FM_{21}	۲۰	۱۶	۱۸
FM_{22}	۱۷	۲۱	۱۵
FM_{23}	۱۵	۱۳	۲۰

همانطور که در جدول ۱۱ مشاهده می‌شود در بیشتر حالات رتبه‌بندی گزینه‌ها بدون تغییر و یا تغییراتی جزیی داشته است که نشان می‌دهد گزینه FM_4 حساسیت بسیار زیادی به تغییر در وزن معیارها دارد. بنابراین می‌توان این گزینه را حساس‌ترین گزینه دانست زیرا به ازای کوچکترین تغییرات در اهمیت عوامل، رتبه‌اش تغییر می‌کند. گزینه‌های FM_8، FM_9، FM_{13}، FM_{18}، FM_{22}، FM_{23} نسبت به تغییرات وزن حساسیت کمتری نسبت به گزینه FM_4 دارند. مابقی گزینه‌ها به علت اینکه حساسیت چندان معناداری ندارند می‌توان جز گزینه‌هایی دسته‌بندی کرد که حساسیت ندارند.

۲-۱-۶- آزمون صحت‌سنجی

طبق ایده تیان و همکاران [۲۶]، سه معیار آزمون زیر برای ارزیابی اعتبار رویکردهای MCDM تدوین شده است.

۱) یک رویکرد تصمیم‌گیری موثر نباید باعث تغییر رتبه گزینه بهتر شود وقتی گزینه دیگری (غیربهینه) اضافه می شود.

۲) یک رویکرد تصمیم‌گیری موثر باید انتقالی باشد یعنی بتوان ماتریس تصمیم را به چند ماتریس تصمیم تقسیم کرد.

۳) هنگام تبدیل یک ماتریس تصمیم به چندین ماتریس تصمیم کوچکتر، رتبه‌بندی‌ها باید بگونه‌ای باشد که رتبه‌بندی ماتریس کلی حاصل شود.

- ✓ **آزمون صحت‌سنجی برای روش FWASPAS پیشنهادی برای FMEA با استفاده از معیارهای آزمون ۱**

برای تائید رویکرد ترکیبی پیشنهادی FWASPAS تحت معیار آزمون (۱)، یک گزینه غیربهینه مانند FM_9را جایگزین گزینه FM_9 می‌شود. فرض کنید که نتایج ارزیابی و ادغام تیم ارزیابی برای FM_9 مقادیر

(۷,۲۱۱، ۴,۸۸۷، ۲,۶۶۹؛ ۶,۷۸۵، ۴,۵۲۳، ۷,۵۵۴؛ ۷,۵۵۴، ۵,۸۸۵، ۳,۹۸۵)

باشند. با انجام همان مراحل محاسبه رویکرد ترکیبی پیشنهادی، رتبه‌بندی مربوطه به صورت زیر است:

$FM_3 > FM_{12} > FM_{19} > FM_7 > FM_{10} > FM_{20} > FM_{16} > FM_{14} > FM_6 > FM_2 > FM_1 > FM_{13} > FM_{23} > FM_{18} > FM_8 > FM_{15} > FM_{17} > FM_9 > FM_{22} > FM_{21} > FM_4 > FM_{11} > FM_5$

مجددا FM_3 بالاترین سطح ریسک را نشان می‌دهد. بنابراین، روش ترکیبی پیشنهادی برای FMEA، با جایگزینی گزینه غیربهینه با گزینه بدتر تغییر نمی‌کند. بنابراین، روش پیشنهادی FWASPAS تحت معیار آزمون ۱ معتبر است.

✓ آزمون صحت‌سنجی برای روش FWASPAS پیشنهادی برای FMEA با استفاده از معیارهای آزمون ۲ و ۳

برای تأیید FWASPAS پیشنهادی تحت معیارهای ۲ و ۳، مسئله اصلی به چهار مسئله کوچک تصمیم‌گیری چندمعیاره به صورت زیر تقسیم می‌شود:

بخش اول: $\{FM_3, FM_{12}, FM_{19}, FM_7, FM_{10}, FM_{20}, FM_{16}\}$

بخش دوم: $\{FM_{16}, FM_{14}, FM_6, FM_2, FM_1, FM_{13}, FM_{23}\}$

بخش سوم: $\{FM_{23}, FM_{18}, FM_8, FM_{15}, FM_{17}, FM_9, FM_{22}\}$

بخش چهارم: $\{FM_{22}, FM_{21}, FM_4, FM_{11}, FM_5\}$

مطابق همان مراحل رویکرد ترکیبی پیشنهادی، اولویت‌بندی مربوط به رویدادهای ریسک به شرح زیر بدست می‌آید:

$FM_3 > FM_{12} > FM_{19} > FM_7 > FM_{10} > FM_{20} > FM_{16}$, $FM_{16} > FM_{14} > FM_6 > FM_2 > FM_1 > FM_{13} > FM_{23}$, $FM_{23} > FM_{18} > FM_8 > FM_{15} > FM_{17} > FM_9 > FM_{22}$, $FM_{22} > FM_{21} > FM_4 > FM_{11} > FM_5$.

با جمع‌آوری رتبه‌بندی رویدادهای ریسک از زیر بخش‌ها، رتبه‌بندی نهایی رویدادهای ریسک به صورت زیر بدست می‌آید:

$FM_3 > FM_{12} > FM_{19} > FM_7 > FM_{10} > FM_{20} > FM_{16} > FM_{14} > FM_6 > FM_2 > FM_1 > FM_{13} > FM_{23} > FM_{18} > FM_8 > FM_{15} > FM_{17} > FM_9 > FM_{22} > FM_{21} > FM_4 > FM_{11} > FM_5$

که مشابه رتبه‌بندی اصلی مسئله بدون تقسیم است و ویژگی انتقالی را ارائه می دهد. بنابراین، روش پیشنهادی FWASPAS برای FMEA تحت معیارهای آزمون ۲ و ۳ معتبر است.

۲-۶- آزمون مقایسه و تحلیل نتایج

همان‌طور که قبلا گفته شد، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های پروژه عمرانی با استفاده از رویکرد ترکیبی نوین و همچنین بهبود نتایج روش سنتی FMEA انجام شده است. نخست، یافته‌های پژوهش حاضر شناسایی ریسک‌های بحرانی در یک مطالعه موردی پروژه احداث کتابخانه مرکزی اراک بود. سپس، معرفی رویکرد ترکیبی نوین تحت شرایط فازی با دقت بالا در تحلیل گزینه-های متعدد ریسک نسبت به سایر رویکردهای ترکیبی فازی بر مبنای روش متداول FMEA بود. همچنین، نتایج پژوهش حاضر با پژوهش-های دیگر که برای ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک بر مبنای روش متداول FMEA ارائه شده، قابل اعتماد بوده و شرایط واقعی سازگارتر است. به منظور نشان دادن مزایای رویکرد ترکیبی پیشنهادی بر مبنای FMEA، تحلیل مقایسه‌ای بین رویکرد ترکیبی پیشنهادی و دو رویکرد معرفی شده در پژوهش‌های رحیمی و همکاران [۴] و کوتلو و اکمکسیوگلو[1] [۴۵] انجام شد که نتایج بدست آمده با روش‌های مختلف در جدول ۱۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بالاترین اولویت رویداد ریسک همچنان FM_3 است و علیرغم تفاوت‌هایی در رتبه-بندی رویدادهای متعدد ریسک، نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی را تائید می‌کند. رویکرد ترکیبی پیشنهادی به ما امکان می دهد تا

[1] Kutlu and Ekmekçioğlu

دلایل اصلی شکست برخی از پروژه‌های عمرانی را کشف و به اهداف اصلی پروژه رسیده و به طور دقیق‌تری مسئله ارزیابی ریسک را بررسی نمائیم. در مقایسه با FMEA سنتی، اختلافات در رتبه بندی ریسک‌های FM_1 ، FM_2، FM_4، FM_5، FM_6، FM_8، FM_9، FM_{11}، FM_{13}، FM_{15}، FM_{16}، FM_{17}، FM_{18}، FM_{20}، FM_{21}، FM_{22}، FM_{23} وجود دارد. با توجه به اینکه FMEA سنتی اولویت‌بندی رویدادهای متعدد ریسک بر مبنای RPN معمولی است که با ضرب پارامترهای ریسک O، S و D بدون در نظر گرفتن اهمیت نسبی شاخص‌های ارزیابی رتبه‌بندی عوامل خطر بدست می‌آید که این مسئله می‌تواند در کاربردهای واقعی محدودیت‌هایی ایجاد کند. خوشبختانه، FSWARA پیشنهادی می‌تواند بر نقایص FMEA سنتی غلبه کند و به دلایل منطقی منجر شود. همچنین، با مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج بدست آمده روش پیشنهادی کوتلو و اکمکسیوگلو [۴۵] مشاهده می‌شود که اولویت‌بندی گزینه‌های FM_3، FM_4، FM_5، FM_7، FM_8، FM_{10}، FM_{11}، FM_{12}، FM_{13}، FM_{16}، FM_{18}، FM_{19}، FM_{20}، FM_{21}، FM_{23} مشابه با رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر است و چندین تغییر در اولویت‌بندی گزینه‌های FM_1، FM_2، FM_6، FM_9، FM_{15}، FM_{17}، FM_{22} وجود دارد. دلایل تفاوت ممکن است استفاده از وزن‌های مختلف و بکارگیری دو تکنیک TOPSIS و WASPAS با مشخصات متفاوت در مراحل تصمیم‌گیری باشد. این دو روش بر اساس اصول ریاضی مناسب برای ارزیابی و انتخاب گزینه بهینه استوار هستند اما مهم‌ترین مزیت روش WASPAS در مقایسه با TOPSIS دقت تصمیم‌گیری است. این امر شانس تصمیم‌گیری صحیح و قابل توجیه را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، در رویکرد ترکیبی پیشنهادی برای به دست آوردن وزن معیارها از FSWARA استفاده شده است که مقایسات زوجی کمتری نسبت به AHP فازی و روش BWM فازی نیاز داشته و نتایج قابل اطمینان‌تری ارائه می‌دهد. در ادامه، به منظور بررسی همبستگی نتایج بدست آمده از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد که در قسمت بعد شرح داده شده است.

جدول ۱۲: مقایسه رتبه‌بندی گزینه‌ها.

کد ریسک	شرح ریسک	روش متداول FMEA	روش FTOPSIS-FAHP	رویکرد ترکیبی پیشنهادی
FM_1	نیازمندی‌ها	9	10	11
FM_2	عدم قطعیت در نرخ تورم و رشد قیمت	9	11	10
FM_3	عملکرد پائین منابع انسانی	1	1	1
FM_4	تغییر سفارشات توسط کارفرما در طی ساخت و ساز	18	21	21
FM_5	پیچیدگی	17	23	23
FM_6	کمبود نیروی انسانی ماهر و غیر ماهر	8	8	9
FM_7	عدم هماهنگی بین منابع انسانی مرتبط با پروژه	4	4	4
FM_8	ناکافی بودن تجربه تیم طراحی	12	15	15
FM_9	بررسی‌های ناقص در مورد معارض و بروز اختلاف در واگذاری زمین	15	19	18
FM_{10}	دعاوی پیمانکاران با شرکت های طرف قرارداد	5	5	5
FM_{11}	اجرای روش‌های اشتباه ساخت و ساز توسط پیمانکار	15	22	22
FM_{12}	ارتباط و همکاری ضعیف پیمانکار با سایر گروه‌ها	2	2	2
FM_{13}	عدم هماهنگی، اولویت بندی و بودجه بندی مناسب بین پروژه های چندگانه پیمانکار	10	12	12
FM_{14}	ابهام در شرح وظایف و اختیارات	8	9	8
FM_{15}	عدم آشنائی پیمانکار در برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل پروژه	16	17	16
FM_{16}	شرایط و روابط قراردادی نامناسب تعیین شده توسط پیمانکار	6	7	7
FM_{17}	ضعیف بودن مهارت فنی کارکنان پیمانکار و ناآشنائی از کدهای ساختمانی و مقررات ایمنی	13	18	17
FM_{18}	بروز اختلاف عمده کارفرما و پیمانکار	11	14	14
FM_{19}	عدم مدیریت مناسب توسط پیمانکار در رابطه با مسائل مالی، حمایت تامین کنندگان و زیر مجموعه‌های آن	3	3	3
FM_{20}	عدم قطعیت دربرآورد کیفیت مورد نیاز پروژه	7	6	6
FM_{21}	ناکافی بودن تجربه تیم مشاور	17	20	20
FM_{22}	ناسازگاری موجود بین برنامه زمان بندی پیمانکاران در اجرای طرح	14	16	19
FM_{23}	هماهنگی نامناسب با شرکت‌ها و سازمان‌های دیگر	11	13	13

۱-۲-۶- بررسی همبستگی نتایج بدست آمده از طریق ضریب همبستگی اسپیرمن

هرگاه داده‌ها به صورت رتبه‌ای جمع‌آوری شده باشند یا به رتبه تبدیل شده باشند، می‌توان ضریب همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن استفاده کرد. ضریب همبستگی اسپیرمن، نحوه همبستگی و ارتباط دو متغییر دارای اهمیت است چرا که از این راه می‌توان یکی از دو را کنترل یا پیش‌بینی کرد. برای سنجش این نوع ضریب همبستگی ضرایب گوناگونی به کار می‌روند که یکی از آنها ضریب همبستگی اسپیرمن است و به عنوان یکی از روش‌های ناپارامتریک قلمداد می‌شود.

$$r_s = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{k} d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (۱۵)$$

فرض صفر در این آزمون، عدم همبستگی است. ضریب همبستگی رتبه‌ای را با r_s نشان می‌دهیم. طرز محاسبه‌ی ضریب همبستگی رتبه‌ای برای داده‌های زوجی (x_i, y_i) برای i=1,2,…, k بدین صورت است که ابتدا به تمام xها و yها بر حسب مقادیرشان رتبه اختصاص داده، سپس تفاضل بین رتبه‌های هر زوج d_i را محاسبه نموده. در مرحله بعد توان دوم dها را محاسبه و در نهایت با استفاده از فرمول ضریب همبستگی رتبه‌ای را حساب می‌کنیم. نتایج حاصل از ضریب همبستگی اسپیرمن بین نتایج رتبه‌بندی رویکرد ترکیبی پیشنهادی با رویکرد متداول FMEA، همچنین نتایج رتبه‌بندی رویکرد ترکیبی FAHP-FTOPSIS به ترتبب برابر ۰,۹۷۷ و ۰,۹۹۲ بدست آمد که می‌توان نتیجه گرفت که بین رتبه‌بندی ارائه شده رویکرد ترکیبی پیشنهادی با نتایج رتبه‌بندی دو رویکرد دیگر ارائه شده در جدول ۱۲ همبستگی بالایی وجود دارد. هم‌چنین با توجه به میزان sig یا همان سطح معناداری رابطه بین دو رویکرد ترکیبی پیشنهادی و روش متداول سنتی، رویکرد ترکیبی FAHP-FTOPSIS و دو رویکرد ترکیبی پیشنهادی معنادار و فرض صفر عدم همبستگی رد می‌شود. براین اساس روش پیشنهادی بسیار پایدار و توانسته در بهبود روش سنتی FMEA گام اساسی بردارد.

۷-نتیجه‌گیری

مدیران و سیستم‌های پروژه ساخت، با ریسک‌های گوناگونی مواجه هستند که بی‌توجهی و عدم مدیریت مناسب آنها منجر به تاخیر، افزایش هزینه، برآورده نشدن الزامات پروژه به لحاظ کیفیت و ایمنی شده است. درصورت اتخاذ یک رویکرد علمی و مناسب نسبت به ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک می‌توان تا حد زیادی از اینگونه عواقب اجتناب کرد. در این راستا، یکی از تکنیک‌های سازنده برای سنجش ریسک در صنعت ساخت و ساز FMEA است که به دلیل در نظر گرفتن سه پارامتر O، S و D از دقت و درستی بیشتری نسبت به سایر تکنیک‌های ارزیابی ریسک برخوردار بوده است. همانطور که در بخش مقدمه به صورت کامل شرح داده شد، تکنیک مورد نظر از محدودیت-های خاصی در بکارگیری در شرایط واقعی برخوردار است. بر این اساس با توجه به اهمیت ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک بر مبنای روش FMEA سنتی، ما یک رویکرد ترکیبی نوین در محیط فازی برای ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک پروژه‌های ساخت و ساز ارائه نمودیم. رویکرد پیشنهادی بدین صورت است که با ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره SWARA و WASPASدر شرایط فازی برای ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های پروژه‌های ساخت و ساز استفاده نموده است. بدین منظور، روش FSWARA برای مشخص کردن اهمیت‌نسبی سه پارامتر O، S و D در محاسبه وزن معیارها و سپس از روش FWASPAS برای اولویت‌بندی ریسک‌های شناسایی شده استفاده نموده است. علاوه بر برطرف کردن مشکلات عدد اولویت ریسک معمولی، می‌تواند از مزایای دو روش نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط فازی برای بهبود ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های پروژه ساخت و ساز بهره برد. هم چنین مطالعه موردی ارائه شده به اعتبار بخشیدن به این امر که مدل ارائه شده یک ابزاری موثر و کارآمد در ارزیابی ریسک برای اولویت‌بندی حالت‌های ریسک در FMEA برای اقدامات اصلاحی کمک - نماید. نتایج به کارگیری رویکرد ترکیبی نشان داد که چگونه می‌توان با شناسایی ریسک های مهم، در تصمیم‌گیری در مورد مدیریت ریسک و تعیین ریسک‌های پراهمیت برای مدیران پروژه تحلیلی مناسب ارائه داد و یک چارچوبی مناسب برای بهبود ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک پروژه‌های ساخت و ساز در FMEA و راهنمایی برای انجام تجزیه و تحلیل ریسک در سایر پروژه‌ها و صنایع مختلف فراهم نمود. مطالعات آینده می‌تواند به جنبه‌های زیر توجه کند. اولا، استفاده از سایر اعداد فازی برای گرفتن اطلاعات ارزیابی ریسک در محیط تصمیم-

گیری بسیار پیچیده جالب خواهد بود. دوم، روش‌های دیگر تصمیم‌گیری چندمعیاره در بهبود روش FMEA اعمال کرد. سرانجام، مدل پیشنهادی FMEA را با نتایج پژوهش حاضر مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد.

مراجع

[1] Zarei, K. Mohebban, B. Esmaeilzadeh, A. Jamalian, A. (2019). Classify the Iranian's Construction Projects Key Risks by Structural Equation Modeling. *Journal of Industrial Management*, 13 (46), 1-14.

[2] Behroozi Gorabi, A. Mohammadi, Z. Javanmardi, E. (2017). Risk Identification and Evaluation of Shiraz Municipality Construction Projects Based on Risk Matrix. *3rd International Conference on Industrial Management and Engineering*. Tehran.

[3] Zegordi, S. H. Nazari, A. Rezaee Nik, E. (2014). Project risk assessment by a hybrid approach using fuzzy-anp and fuzzy-topsis. *Sharif Journal of Indusrial Engineering and Management*, 29(1), 3-14.

[4] Rahimi, Y. Tavakkoli-Moghaddam, R. Iranmanesh, S. H. Vaez-Alaei, M. (2018). Hybrid approach to construction project risk management with simultaneous FMEA/ISO 31000/evolutionary algorithms: Empirical optimization study. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144 (6), 04018043.

[5] Wehba, F. A. Hamzeh, F. R. (2013). Failure mode and effect analysis as a tool for risk management in construction planning, *21st Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, pp. 685-694.

[6] Ward, S. C., & Chapman, C. (2003). *Project risk management: processes, techniques and insights*, John Wiley, Chichester, UK.

[7] Hosseinzadeh, M. Gheidar Khaljani, J. (2013). A review of methods for detecting product design risks. *Standard management and quality*, 3(summer), 18-25.

[8] Somi, S. Seresht, N. G. & Fayek, A. R. (2020, November). Developing a risk breakdown matrix for the construction of on-shore wind farm projects. In *Construction Research Congress 2020: Infrastructure Systems and Sustainability* (pp. 43-51). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.

[9] Qazi, A. Shamayleh, A. El-Sayegh, S., & Formaneck, S. (2020). Prioritizing risks in sustainable construction projects using a risk matrix-based Monte Carlo Simulation approach. *Sustainable Cities and Society*, 102576.

[10] Feinstein, Z. (2020). Continuity and sensitivity analysis of parameterized Nash games. *arXiv preprint arXiv:2007.04388*.

[11] Hsu, P. Y. Aurisicchio, M. Angeloudis, P. & Whyte, J. (2020). Understanding and visualizing schedule deviations in construction projects using fault tree analysis. *Engineering, Construction and Architectural Management*.

[12] Abad, F. Naeni, L. M. (2020). A hybrid framework to assess the risk of change in construction projects using fuzzy fault tree and fuzzy event tree analysis. *International Journal of Construction Management*, 1-13.

[13] Chen, H. Li, H. Wang, Y. & Cheng, B. (2020). A comprehensive assessment approach for water-soil environmental risk during railway construction in ecological fragile region based on AHP and MEA. *Sustainability*, *12*(19), 7910.

[14] Fayek, A. R. (2020). Fuzzy Logic and Fuzzy Hybrid Techniques for Construction Engineering and Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, *146*(7), 04020064.

[15] Karamoozian, A.Wu, D. (2020). A hybrid risk prioritization approach in construction projects using failure mode and effective analysis. *Engineering, Construction and Architectural Management*.

[16] Soltanali, H. Rohani, A. Abbaspour-Fard, M. H. Parida, A., Farinha, J. T. (2020). Development of a risk-based maintenance decision making approach for automotive production line. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, *11*(1), 236-251.

[17] Liu, H. C. (2019). FMEA Using Combination Weighting and Fuzzy VIKOR and Its Application to General Anesthesia. In *Improved FMEA Methods for Proactive Healthcare Risk Analysis* (pp. 151-172). Springer, Singapore.

[18] Wu, H. Liu, S. Wang, J. & Yang, T. (2020). Construction Safety Risk Assessment of Bridges in the Marine Environment Based on CRITIC and TOPSIS Models. *Journal of Coastal Research*, *108*(SI), 206-210.

[19] Ahmadi, M. Behzadian, K. Ardeshir, A. Kapelan, Z. (2017). Comprehensive risk management using fuzzy FMEA and MCDA techniques in highway construction projects. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(2).300-310.

[20] Ghoushchi, SJ. Yousefi, S. Khazaeili, M. (2019). An extended FMEA approach based on the Z-MOORA and fuzzy BWM for prioritization of failures. *Applied Soft Computing*, 81:105505.

[21] Omidvar, M. Nirumand, F. (2017). Risk assessment using FMEA method and on the basis of MCDM, fuzzy logic and grey theory: A case study of overhead cranes. ***Journal of Health and Safety at Work***, 7(1), 63-76.

[22] Liu, H. C., Chen, X. Q., Duan, C. Y., & Wang, Y. M. (2019). Failure mode and effect analysis using multi-criteria decision making methods: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, *135*, 881-897.

[23] Fattahi, R. Khalilzadeh, M. (2018). Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA. extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment. *Safety Science*, 102, 290-300.

[24] Tavakolan, M. Mohammadi, A. (2018). Risk management workshop application: a case study of Ahwaz Urban Railway project. *International Journal of Construction Management*, 18(3):260-274.

[25] Ilbahar, E. Karaşan, A. Cebi, Kahraman, C. (2018). A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system. *Safety science*, 103:124-136.
[26] Tian, Z-p. Wang, J-q. Zhang, H-y. (2018). An integrated approach for failure mode and effects analysis based on fuzzy best-worst, relative entropy, and VIKOR methods. *Applied Soft Computing*, 72:636-646.
[27] Safari, H. Faraji, Z. Majidian, S. (2016). Identifying and evaluating enterprise architecture risks using FMEA and fuzzy VIKOR. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(2):475-486.
[28] Vahdani, B. Salimi, M. Charkhchian, M. (2015). A new FMEA method by integrating fuzzy belief structure and TOPSIS to improve risk evaluation process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(1-4):357-368.
[29] Boral, S. Howard, I. Chaturvedi, SK. McKee, K. Naikan, V. (2020). An integrated approach for fuzzy failure modes and effects analysis using fuzzy AHP and fuzzy MAIRCA. *Engineering Failure Analysis*, 108:104195.
[30] Mardani, A. Nilashi, M. Zakuan, N. Loganathan, N. Soheilirad, S. Saman, MZ. Ibrahim, O. (2017). A systematic review and meta-Analysis of SWARA and WASPAS methods: Theory and applications with recent fuzzy developments. *Applied Soft Computing*, 57:265-292.
[31] Abdelgawad, M. Fayek, AR. (2010). Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9):1028-1036.
[32] Liu, H. C. You, J. X. You, X. Y. Shan, M. M. (2015). A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy VIKOR method. *Applied soft computing*, *28*, 579-588.
[33] Wang, L. E. Liu, H. C. Quan, M. Y. (2016). Evaluating the risk of failure modes with a hybrid MCDM model under interval-valued intuitionistic fuzzy environments. *Computers & Industrial Engineering*, *102*, 175-185.
[34] Baloch, A. U. Mohammadian, H. (2016). Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy Vikor and Data Envelopment Analysis-based fuzzy AHP. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, *3*(8), 23-30.
[35] Nazeri, A. Naderikia, R. (2017). A new fuzzy approach to identify the critical risk factors in maintenance management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *92*(9-12), 3749-3783.
[36] Vesković, S. Stević, Ž. Stojić, G. Vasiljević, M. Milinković, S. (2018). Evaluation of the railway management model by using a new integrated model DELPHI-SWARA-MABAC. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 1(2), 34-50.
[37] Mavi, R. K. Goh, M. Zarbakhshnia, N. (2017). Sustainable third-party reverse logistic provider selection with fuzzy SWARA and fuzzy MOORA in plastic industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5-8), 2401-2418.
[38] Karabašević, D. Stanujkić, D. Urošević, S. (2015). The MCDM Model for Personnel Selection Based on SWARA and ARAS Methods. *Management*, (77), 1820-0222.
[39] Ehsanifar, M. Hemesy, M. (2019). A new hybrid multi-criteria decision-making model to prioritize risks in the construction process under fuzzy environment (case study: the Valiasr Street underpass project*). International Journal of Construction Management*, 1-16.
[40] Patil, S. K. Kant, R. (2014). A fuzzy AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of Knowledge Management adoption in Supply Chain to overcome its barriers. *Expert Systems with Applications*, 41(2), 679-693.
[41] Rani, P. Mishra, AR. Pardasani, KR. (2020). A novel WASPAS approach for multi-criteria physician selection problem with intuitionistic fuzzy type-2 sets. *Soft Computing*, 24(3):2355-2367.
[42] Badalpur, M. Nurbakhsh, E. (2019). An application of WASPAS method in risk qualitative analysis: a case study of a road construction project in Iran. *International Journal of Construction Management*, 1-9.
[43] Mohaghar, A. Hosseini Dehshiri, S.J. Arab, A. (2017). Investigating and evaluating project risks based on the best-worst approach. *Organizational Resource Management Research*, 7 (2), 157-173.
[44] Farughi, H. Alaniazar, S. Mousavipour, S. Moradi, V. (2017). A practical framework based on Fuzzy FMEA to diagnose causes of delay in construction projects. *Industrial Management Studies*, 15(45), 145-175.
[45] Kutlu, A. C. Ekmekçioğlu, M. (2012). Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications*, *39*(1), 61-67.