



Paper Type: Original Article



Prioritizing Environmental Risks of Tourism Activities Using a Z-Number-Based Multi-Criteria Decision-Making Approach

Shakiba Shabani¹, Farid Momayezi^{1,*} , Saeid Jafarzadeh Ghouschi¹

¹Department of Industrial Engineering, Urmia University, Urmia, Iran; shabanishakiba76@gmail.com; farid.momayezi@uut.ac.ir; s.jafarzadeh@uut.ac.ir.

Citation:



Shabani, Sh., Momayezi, F., & Jafarzadeh Ghouschi, S. (2026). Prioritizing environmental risks of tourism activities using a z-number-based multi-criteria decision-making approach. *Management Sciences and Decision Analysis*, 4(1), 1-13.

Received: 04/05/2025

Reviewed: 14/06/2025

Revised: 24/08/2024

Accepted: 01/11/2024

Abstract

Purpose: The expansion of tourism activities, while generating economic and social benefits, may also create significant environmental challenges. Identifying and prioritizing environmental risks associated with tourism is essential for designing effective policies and sustainable development strategies. However, environmental risk assessment is often affected by uncertainty and ambiguity in expert judgments, which conventional risk assessment approaches cannot adequately address. Therefore, this study aims to evaluate and prioritize the environmental risks of tourism activities in Urmia city using a Z-number-based multi-criteria decision-making framework.

Methodology: This applied study proposes an integrated framework combining Failure Mode and Effects Analysis with multi-criteria decision-making techniques. Environmental risks associated with tourism activities were first identified through field investigations and expert assessments. The severity, occurrence, and detectability criteria were then evaluated for each risk. Subsequently, criterion weights were determined using the Z-SWARA method, which incorporates both uncertainty and the reliability of expert judgments. The identified risks were then prioritized using the Z-MABAC method. To assess the robustness and validity of the proposed framework, the results were compared with those obtained from FMEA, F-MABAC, Z-TOPSIS, and Z-ARAS, and sensitivity analyses were conducted.

Findings: The study identified 31 environmental risks related to tourism activities in Urmia city. The results indicated that ecological imbalance, reduction of animal species, threats to wildlife, and biodiversity loss were the most critical environmental risks. Comparative analyses demonstrated that the proposed framework generated a complete and distinct ranking of all risks, whereas several conventional approaches produced tied rankings. Furthermore, the high correlation coefficients with Z-TOPSIS and Z-ARAS results, together with the stability observed in sensitivity analyses, confirmed the reliability and robustness of the proposed approach.

Originality/Value: The primary contribution of this study lies in integrating Failure Mode and Effects Analysis with Z-SWARA and Z-MABAC to simultaneously address uncertainty and the reliability of expert judgments. Unlike traditional approaches that assume equal importance of evaluation criteria and often fail to generate complete rankings, the proposed framework enables realistic weighting and comprehensive prioritization of environmental risks. The findings provide practical support for tourism and environmental managers in resource allocation, preventive planning, and sustainable tourism development.

Keywords: Tourism, Failure modes and effects analysis, Urmia city, Environmental risks, SWARA-MABAC method, Z-number environment.



Corresponding Author: farid.momayezi@uut.ac.ir

<https://doi.org/10.22105/msda.v4i1.143>

Licensee. *Management Sciences and Decision Analysis*. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

اولویت‌بندی ریسک‌های زیست‌محیطی گردشگری با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر اعداد Z

شکیبا شعبانی^۱، فرید ممیزی^{۲*}، سعید جعفرزاده قوشچی^۱

^۱گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران.

چکیده

هدف: گسترش فعالیت‌های گردشگری، علاوه بر آثار اقتصادی و اجتماعی، می‌تواند پیامدهای قابل توجهی برای محیط‌زیست به همراه داشته باشد. شناسایی و اولویت‌بندی ریسک‌های زیست‌محیطی ناشی از گردشگری، پیش‌نیاز تدوین سیاست‌ها و اقدامات موثر برای توسعه پایدار این صنعت است. با این حال، ارزیابی این ریسک‌ها معمولاً با عدم قطعیت و ابهام در قضاوت‌های کارشناسی همراه است و روش‌های متعارف ارزیابی ریسک توانایی محدودی در مدیریت این شرایط دارند. در پاسخ به این چالش، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌های زیست‌محیطی فعالیت‌های گردشگری در شهر ارومیه با بهره‌گیری از یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر اعداد Z انجام شد.

روش‌شناسی پژوهش: این پژوهش از نوع کاربردی بوده و یک رویکرد یکپارچه مبتنی بر تحلیل حالات و اثرات شکست و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ارایه می‌کند. ابتدا ریسک‌های زیست‌محیطی فعالیت‌های گردشگری از طریق مطالعات میدانی و نظر خبرگان شناسایی شدند. سپس معیارهای شدت، احتمال وقوع و قابلیت تشخیص برای هر ریسک تعیین گردید. در ادامه، اهمیت معیارها با استفاده از روش Z-SWARA و با در نظر گرفتن عدم قطعیت و قابلیت اعتماد قضاوت‌های کارشناسان محاسبه شد. در مرحله بعد، ریسک‌ها از طریق روش Z-MABAC رتبه‌بندی شدند. همچنین برای ارزیابی اعتبار و پایداری نتایج، یافته‌ها با روش‌های Z-ARAS، Z-TOPSIS، F-MABAC، FMEA و مقایسه و تحلیل حساسیت نیز انجام شد.

یافته‌ها: نتایج پژوهش منجر به شناسایی ۳۱ ریسک زیست‌محیطی مرتبط با فعالیت‌های گردشگری در شهر ارومیه شد. بر اساس نتایج روش پیشنهادی، ریسک‌های برهم خوردن تعادل اکولوژیکی محیط، کاهش گونه‌های جانوری و تهدید حیات وحش و از دست دادن تنوع زیستی در اولویت‌های نخست قرار گرفتند. مقایسه نتایج با سایر روش‌ها نشان داد رویکرد پیشنهادی توانسته است رتبه‌بندی کامل و متمایزی برای تمامی ریسک‌ها ارایه دهد، درحالی‌که برخی روش‌های متداول با مشکل رتبه‌های تکراری مواجه بودند. همچنین ضرایب همبستگی بالا با روش‌های Z-TOPSIS و Z-ARAS و پایداری نتایج در تحلیل حساسیت، قابلیت اعتماد چارچوب پیشنهادی را تایید کرد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق تحلیل حالات و اثرات شکست با روش‌های Z-SWARA و Z-MABAC برای مدیریت هم‌زمان عدم قطعیت و قابلیت اعتماد قضاوت‌های کارشناسی است. برخلاف رویکردهای سنتی که معمولاً وزن یکسانی برای معیارهای ارزیابی در نظر می‌گیرند و در رتبه‌بندی کامل ریسک‌ها با محدودیت مواجه‌اند، چارچوب پیشنهادی امکان وزن‌دهی واقع‌بینانه معیارها و اولویت‌بندی دقیق ریسک‌ها را فراهم می‌کند. نتایج پژوهش می‌تواند به مدیران و سیاست‌گذاران حوزه گردشگری و محیط‌زیست در تخصیص موثر منابع، طراحی اقدامات پیشگیرانه و تدوین راهبردهای توسعه پایدار گردشگری کمک کند.

کلیدواژه‌ها: گردشگری، تحلیل حالات و اثرات شکست، شهر ارومیه، ریسک‌های زیست‌محیطی، روش سورا-ماباک، محیط Z-numbe.

۱- مقدمه

حوزه محیط‌زیست یکی از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین عرصه‌ها در جهان امروز است؛ به گونه‌ای که می‌توان بزرگ‌ترین چالش بشر در قرن حاضر را در این حوزه دانست. در برخی موارد حتی این نگرانی وجود دارد که زمانی فرا برسد که برای اقدامات جبرانی بسیار دیر شده باشد. از این رو، حفاظت از محیط‌زیست و پیشگیری از آسیب‌های بیشتر ضرورتی انکارناپذیر است و همه ما باید به‌طور فعال در صیانت و حراست از آن مشارکت کنیم [1]. در دهه‌های گذشته، تصمیمات نادرست و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ای در بسیاری از کشورها، بحران‌ها و مشکلات زیست‌محیطی متعددی را به وجود

آورده است. همین امر سبب شده که اهمیت مسایل محیط‌زیستی در جوامع امروزی بیش‌ازپیش موردتوجه قرار گیرد [2]. در این میان، بحران آب به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های آینده بشر شناخته می‌شود. استفاده بی‌رویه از منابع آب شیرین موجب کاهش این منابع در سراسر جهان شده و برخی تحلیل‌گران حتی پیش‌بینی می‌کنند که در آینده رقابت بر سر دسترسی به آب می‌تواند منجر به درگیری و جنگ شود. هم‌اکنون یک‌سوم جمعیت جهان با کمبود آب مواجه‌اند و برآورد می‌شود این رقم تا بیست سال آینده به دوسوم افزایش یابد؛ بنابراین، مدیریت پایدار منابع آب ضرورتی فوری است. مسیر دشوار حفاظت از محیط‌زیست امروز به مرحله‌ای رسیده است که دغدغه‌مندان این حوزه در سطوح مختلف، از رسانه‌ها تا گروه‌های مردمی، خواستار اقدام جدی هستند [3]. در ایران نیز محیط‌زیست با چالش‌های فراوانی روبه‌روست؛ مسایلی مانند بحران آب، نابسامانی تالاب‌ها، فرونشست زمین، آلودگی هوا، مدیریت نامناسب پسماند، فرسایش خاک، گردوغبار، تخریب زیستگاه‌ها و انقراض گونه‌ها. با این حال، نه‌تنها این مشکلات برطرف نشده، بلکه مطالبه‌گری عمومی نیز در این زمینه کمتر از حد انتظار است. در شرایطی که بسیاری از تصمیمات کلان کشور بر محیط‌زیست اثر مستقیم می‌گذارد، ارتقای سطح آگاهی، به‌ویژه در میان تصمیم‌سازان و مدیران، می‌تواند راهکاری موثر و پایدار برای حفاظت از محیط‌زیست ایران باشد [4]. حفاظت از محیط‌زیست به معنای تقویت امنیت ملی، قدرت اقتصادی و سرمایه‌گذاری بلندمدت برای توسعه پایدار کشور است. با این حال، تاکنون توجه کافی به حفاظت از منابع حیاتی مانند آب، خاک، جنگل‌ها و تنوع زیستی صورت نگرفته است؛ منابعی که حیات انسان و سایر موجودات زنده به آن‌ها وابسته است. اگر اقدامات جدی در سطح ملی و بین‌المللی انجام نشود، پیامدهای سنگین و جبران‌ناپذیری به دنبال خواهد داشت [5]. تغییرات اقلیمی یکی از چالش‌های اصلی و جهانی امروز به شمار می‌آید که با تخریب محیط‌زیست، کاهش منابع آب و خسارات جدی به بخش کشاورزی همراه است. علاوه بر این، بی‌توجهی به محیط‌زیست می‌تواند زمینه‌ساز گسترش بیماری‌های نوظهور در مناطق مختلف شود؛ بیماری‌هایی که اغلب ناشی از تغییرات اقلیمی و نابسامانی‌های زیست‌محیطی‌اند. برای مثال، افزایش بیماری‌های مرتبط با کمبود آب در مناطق خشک، گواه روشنی بر این واقعیت است [6].

در این پژوهش، به بررسی ریسک‌ها و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های گردشگری در شهر ارومیه پرداخته شده است. در این راستا، با بهره‌گیری از روش تجزیه و تحلیل حالات شکست^۱ زیست‌محیطی و بر پایه مشاهدات میدانی و دیدگاه‌های متخصصان محیط‌زیست و گردشگری، ریسک‌ها شناسایی و تحلیل شده‌اند. تجزیه و تحلیل حالت و اثرات شکست یکی از روش‌های پرکاربرد مدیریت ریسک است که بر مبنای کار تیمی و رویکردی پیشگیرانه طراحی شده و با شناسایی خرابی‌های بالقوه، علل و اثرات آن‌ها، امکان ارزیابی اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه را فراهم می‌آورد [7]. مزیت اصلی این روش پیش‌بینی خرابی‌ها و سنجش سطح ریسک آن‌ها پیش از وقوع است که موجب صرفه‌جویی در هزینه و زمان در مقایسه با اقدامات اصلاحی پس از وقوع شکست می‌شود [8]. در *FMEA* سنتی، ریسک‌ها بر اساس سه شاخص شدت (*S*)، وقوع (*O*) و قابلیت تشخیص (*D*) ارزیابی و عدد اولویت ریسک^۲ با ضرب این عوامل محاسبه می‌شود. با وجود کاربرد گسترده، *RPN* دارای محدودیت‌هایی است؛ از جمله ناتوانی در تخصیص وزن‌های متفاوت به معیارها و بی‌توجهی به عدم قطعیت در قضاوت‌های کارشناسان.

برای رفع این محدودیت‌ها، پژوهش حاضر رویکردی توسعه‌یافته ارائه می‌دهد که شامل سه فاز است:

۱. شناسایی ریسک‌ها با استفاده از مدل *FMEA*.

۲. وزن‌دهی معیارهای *SOD* با روش *Z-SWARA* که ضمن کاهش مقایسه‌های زوجی، امکان لحاظ عدم قطعیت و تضاد نظرات کارشناسان را فراهم می‌آورد.

۳. اولویت‌بندی ریسک‌ها با روش *Z-MABAC* که قابلیت توجه هم‌زمان به عدم قطعیت و قابلیت اعتماد در مقادیر *SOD* را دارد.

امتیاز پیشنهادی در این پژوهش بر اساس رویکرد توسعه‌یافته *FMEA* و با ترکیب دو روش *Z-SWARA* و بهینه‌سازی چندهدفه *Z-MABAC* طراحی شده است تا از مزایای هر یک بهره‌برداری شود. در فاز نخست، ریسک‌ها با استفاده از مدل *FMEA* شناسایی می‌شوند. سپس در فاز دوم، معیارهای شدت (*S*)، وقوع (*O*) و قابلیت تشخیص (*D*) با روش *Z-SWARA* وزن‌دهی می‌شوند. این روش علاوه بر کاهش تعداد مقایسه‌های زوجی و ساده‌تر کردن محاسبات نسبت به فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی^۳، امکان توجه به عدم قطعیت و تضاد احتمالی در نظرات کارشناسان را نیز فراهم می‌کند. بدین ترتیب، یکی از محدودیت‌های مهم *FMEA* متعارف، یعنی ناتوانی در تخصیص وزن‌های متفاوت به عوامل *SOD* و بی‌توجهی به ابهامات موجود در قضاوت‌ها، برطرف می‌شود. در فاز سوم، روش *Z-MABAC* به‌کار گرفته می‌شود تا علاوه بر در نظر گرفتن عدم قطعیت در بیان مقادیر عوامل

¹ Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

² Risk Priority Number (RPN)

³ Analytic Hierarchy Process (AHP)

SOD، قابلیت اعتماد نتایج نیز افزایش یابد. در این رویکرد، خرابی‌های شناسایی شده به‌عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری و معیارهای وزن‌دهی شده به‌وسیله Z-SWARA به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی در نظر گرفته می‌شوند. مزیت اصلی نظریه اعداد Z نسبت به روش‌های فازی مرسوم، توانایی آن در مدل‌سازی هم‌زمان عدم قطعیت و اعتبار قضاوت‌های کارشناسان است. همچنین، روش MABAC فازی قابلیت ویژه‌ای در حل مسایل تصمیم‌گیری با داده‌های مبهم و نامشخص دارد. ترکیب Z-SWARA و Z-MABAC در چارچوب نظریه اعداد Z، این امکان را فراهم می‌کند که علاوه بر پوشش کاستی‌های RPN سنتی، یک اولویت‌بندی کامل و قابل اعتماد از خرابی‌ها ارائه شود. این موضوع برای تصمیم‌گیرندگان اهمیت بالایی دارد، زیرا اولویت یکسان برخی خرابی‌ها در شرایط محدودیت منابع می‌تواند موجب سردرگمی تیم‌های اجرایی شود. در مقابل، اولویت‌بندی دقیق و جامع، زمینه‌ساز انتخاب موثر اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه خواهد بود. در نهایت، به‌منظور بررسی و اعتبارسنجی کارایی رویکرد پیشنهادی، پژوهش حاضر به اجرا درآمده است.

۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

امروزه در پیکار انسان با طبیعت، مشکلات متعددی به وجود آمده است که نمی‌توان از پیامدهای منفی این تعامل چشم‌پوشی کرد. کاهش تنوع زیستی، آلودگی محیط‌زیست، دخالت‌های انسانی در اکوسیستم‌ها و بهره‌برداری بی‌وقفه از منابع طبیعی تنها بخشی از این مشکلات هستند که به‌تدریج ظرفیت ترمیم و بازسازی طبیعت را تضعیف کرده‌اند. ریشه اصلی این چالش‌ها را باید در بهره‌برداری نادرست از سرزمین و مدیریت ناکارآمد جستجو کرد. یکی از موضوعات مهم در این زمینه، گردشگری است که پدیده‌ای دو وجهی محسوب می‌شود. از یک سو می‌تواند به‌عنوان عاملی بالقوه در توسعه فرهنگی و اجتماعی-اقتصادی نقش‌آفرین باشد، اما از سوی دیگر ممکن است به تخریب محیط‌زیست و نابودی هویت محلی بینجامد [9]. صنعت گردشگری یکی از صنایع مهم و پردرآمد در جهان است، با این حال در صورت فقدان مدیریت کارآمد و استفاده بهینه از دانش، فناوری و منابع انسانی، می‌تواند به بروز آسیب‌های جدی منجر شود. از مهم‌ترین اثرات منفی گردشگری می‌توان به تخریب محیط طبیعی ناشی از پیاده‌روی در مراتع و بیشه‌زارها، آتش‌سوزی در جنگل‌ها، بوته‌کشی و نابودی پوشش گیاهی اشاره کرد. پراکندگی زباله در سواحل، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، پارک‌ها و سایر فضاهای طبیعی نیز از دیگر پیامدهای منفی این صنعت است. علاوه بر این، ساخت‌وسازهای بی‌رویه در اطراف مراکز گردشگری موجب تغییر کاربری و تخریب زیستگاه‌های طبیعی می‌شود. افزایش آلودگی صوتی و آلودگی هوا ناشی از تردد وسایل نقلیه و تراکم جمعیت نیز در زمره دیگر آثار منفی گردشگری قرار دارد [10]. با توجه به چنین پیامدهایی، بررسی اثرات گردشگری بر محیط‌زیست امری ضروری است.

از دیگر چالش‌های محیط زیستی مهم، خشکسالی است که به دلیل روند تدریجی و مداوم خود، آثار عمیقی بر جوامع انسانی بر جای می‌گذارد. شدت و گستره خشکسالی به پارامترهای متنوعی همچون بارندگی، دما، تراکم جمعیت و نسبت زمین‌های آبی به ازای هر نفر وابسته است [11]. در ایران نیز مطالعاتی با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ و مدل مارکوف-چین^۲ برای تعیین و پیش‌بینی حساسیت به خشکسالی در جنوب غرب کشور انجام شده است [12]. همچنین در راستای مدیریت یکپارچه منابع آب، اثرات زیست‌محیطی، سیاسی و اجتماعی-اقتصادی خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه بررسی و موانع موجود در چارچوب‌های نهادی آب در سطوح ملی و منطقه‌ای تحلیل شده است [13]. با توجه به گسترش نقش ارزیابی ریسک در تصمیم‌گیری، انطباق آن با قوانین و مقررات موجب توسعه مبانی نظری و ابزارهای عملی متنوعی شده است. در میان این روش‌ها، تجزیه و تحلیل حالات و اثرات شکست یکی از پرکاربردترین تکنیک‌هاست که به‌عنوان ابزاری سیستماتیک برای تعریف، شناسایی و رفع عیوب احتمالی و ایجاد مزیت رقابتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. سهولت اجرا باعث شده است این تکنیک در حوزه‌های مختلف کاربرد گسترده‌ای داشته باشد FMEA برای نخستین بار در دهه ۱۹۲۰ معرفی شد، اما از اوایل دهه ۱۹۶۰ به‌طور چشمگیری در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفت [14]. باوجوداین، اولویت‌بندی خرابی‌ها در FMEA سنتی بر پایه عدد اولویت ریسک انجام می‌شود که کاستی‌های آن در مطالعات متعدد بررسی شده است [15]. به همین دلیل، پژوهشگران برای رفع این محدودیت‌ها، استفاده از روش‌های جایگزین به‌ویژه رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره را پیشنهاد کرده‌اند [16]. از جمله نخستین تلاش‌ها به ترکیب FMEA و AHP توسط بویلاکوا و براگلیا [17] اشاره کرد که برای اولویت‌بندی علل خرابی در یک شرکت تولید یخچال در ایتالیا به کار رفت. همچنین سید حسینی و همکاران [18] روش DEMATEL را برای ارزیابی مجدد حالات شکست پیشنهاد کردند. روش TOPSIS نیز توسط راو و همکاران [19] در اولویت‌بندی خطرات واحد بسته‌بندی یک شرکت

¹ Multi-Criteria Decision Making (MCDM)

² Markov chain

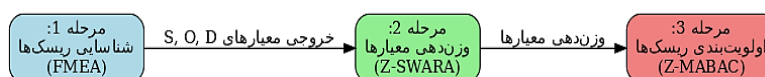
کامپیوتری به کار گرفته شد. روش *ANP* توسط زاموری و گابریلی [20] برای تحلیل روابط میان معیارهای ریسک در تصمیم‌گیری استفاده شد. علاوه بر این، شارما و همکاران [21] با به کارگیری روش *GRA* به ارزیابی و اولویت‌بندی عوامل پرهزینه در فرایند تولید پرداختند. لیو و همکاران [22] نیز رویکردی ترکیبی مبتنی بر *FMEA* فازی و *VIKOR* ارایه کردند تا مهم‌ترین حالت‌های شکست شناسایی شوند. ماهسواران و لوگاناتان [23] با ترکیب *PROMETHEE* و *AHP* به اولویت‌بندی حالات شکست پرداختند و داس آدیکاری و همکاران [24] از روش *COPRAS* برای تحلیل شکست‌ها در نیروگاه حرارتی زغال‌سنگی استفاده کردند.

اخیراً، مقالات متعددی بین سال‌های ۲۰۲۴ و ۲۰۲۵ منتشر شده‌اند که به موضوعات نزدیک به رویکرد این تحقیق اختصاص دارند. برای مثال، آلکسیچ و همکاران [25] در یک بررسی نظام‌مند کاربرد روش‌های *MADM* همراه با *FMEA* در محیط‌های دارای عدم قطعیت را مورد ارزیابی قرار داده‌اند که نشان‌دهنده مسیر تحقیقاتی مشابهی با این پژوهش است. در تحقیق [26] با استفاده از مدل *MFIS-FMEA* در ارزیابی ریسک زیست‌محیطی سدها به وزن‌دهی دقیق‌تر شاخص‌ها و رتبه‌بندی دقیق‌تر رسیده‌اند. همچنین مطالعه‌ای در کرواسی [27] به بررسی تهدیدهای گردشگری در پارک‌های حفاظت‌شده با روش *FMEA* و تحلیل حساسیت پرداخته است و نشان داده که فعالیت‌های خاص گردشگری خطرات متفاوتی برای انواع پارک‌ها دارند. به علاوه، چانگ و همکاران [28] روشی برای بهبود *RPN* سنتی پیشنهاد داده‌اند که وزن معیارها و عدم قطعیت را هم‌زمان در نظر می‌گیرد و نتایجی منطقی‌تر به دست می‌دهد. این مطالعات اخیر تأکید بر ضرورت ابزارها و روش‌هایی دارند که از کاستی‌های *FMEA* سنتی عبور کنند. علاوه بر این در سایر موضوعات از جمله افتخارزاده و همکاران [29] با ارایه رویکردی یکپارچه مبتنی بر مجموعه‌های فازی کروی و ترکیب روش‌های *BWM* و *CoCoSo*، به اولویت‌بندی خطاهای آزمایشگاهی و بهبود مدیریت ریسک در محیط‌های درمانی پرداختند. همچنین رحیمی کولورو همکاران [30] با بهره‌گیری از یک چارچوب ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل *CoCoSo*، *BWM*، *Fuzzy DEMATEL*، *MOORA* و *TOPSIS*، مدلی برای انتخاب تأمین‌کنندگان در سازمان‌های تولیدی دولتی ارایه کردند که کارایی رویکردهای ترکیبی *MCDM* را در مسایل تصمیم‌گیری پیچیده نشان می‌دهد. این مطالعات نیز بر اهمیت استفاده از روش‌های پیشرفته تصمیم‌گیری چندمعیاره در تحلیل مسایل پیچیده و مدیریت ریسک تأکید دارند.

با وجود توسعه این رویکردها، همچنان قضاوت‌های اعضای تیم *FMEA* به دلیل تفاوت تجربه و پیش‌زمینه ذهنی با عدم قطعیت همراه است. از این رو، به کارگیری رویکردهای مبتنی بر نظریه‌های فازی به عنوان ابزاری برای پوشش کاستی‌های *RPN* سنتی مورد توجه قرار گرفته است. هدف اصلی این تحلیل و ارزیابی، تعیین میزان عدم قطعیت در سیستم مورد مطالعه و هزینه‌های ناشی از آن است. همچنین، این روش به منظور ارایه راهکارهای کاهش ریسک و کاهش هزینه راهکارهای مربوطه به کار می‌رود. به طور کلی، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی به عنوان یک ابزار مهم در مدیریت محیط‌زیست، تأثیر قابل توجهی در کاهش مخاطرات و دستیابی به توسعه پایدار دارد. با استفاده از این ابزار، می‌توان به تعادل بین توسعه اقتصادی و حفظ محیط‌زیست دست یافت و بهبودی در شاخص‌های محیطی و اجتماعی را به همراه داشت. اغلب مطالعات انجام‌شده در کشورهای مختلف، از جمله کشور ما به جنبه‌های زیست‌محیطی کمتر توجه کرده‌اند؛ اما ارزیابی ریسک زیست‌محیطی به عنوان یک ابزار مهم در مدیریت محیط‌زیست، برای کاهش مخاطرات و دستیابی به توسعه پایدار بسیار حایز اهمیت است و به نظر می‌رسد با بررسی ریسک‌ها و اجرای روش پیشنهادی در این پژوهش می‌توان عدم قطعیت نظر خبرگان و همچنین ترجیحات تصمیم‌گیرندگان را بهتر نشان داد که در نهایت سبب تصمیم‌گیری بهتر شود.

۳- روش تحقیق پیشنهادی

این قسمت، روش پیشنهادی این تحقیق با استفاده از روش‌های *FMEA*، *Z-SWARA* و *Z-MABAC* برای ارزیابی و اولویت‌بندی ریسک‌ها در سه مرحله ارایه می‌شود. در مرحله اول، ضمن شناسایی ریسک‌ها توسط تیم *FMEA*، معیارهای سه‌گانه مقداردهی می‌شوند. در مرحله دوم، برای تعیین میزان اهمیت معیارهای به دست آمده از روش *Z-SWARA* استفاده می‌شود. روش *Z-SWARA* برخلاف روش *SWARA* سنتی، علاوه بر عدم قطعیت، قابلیت اطمینان هر یک از سه عامل را در نظر می‌گیرد. در مرحله سوم، با توجه به میزان اهمیت متفاوت معیارها، از روش *Z-MABAC* برای اولویت‌بندی ریسک‌ها استفاده شده است.



شکل ۱- فلوچارت روش پیشنهادی.

Figure 1- Flowchart of the proposed method.

۳-۱- روش Z-SWARA

هنگامی که یک مساله تصمیم‌گیری شامل چندین معیار باشد، لازم است رویکردی به کار گرفته شود که امکان محاسبه وزن معیارها را فراهم کند. در محیط‌های فازی از روش SWARA فازی (تحلیل نسبت ارزیابی وزنی مرحله‌ای فازی) به عنوان یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره برای محاسبه وزن معیارها و زیرمعیارها استفاده می‌شود. این روش مشابه روش SWARA کلاسیک عمل می‌کند، اما برای غلبه بر عدم قطعیت در تصمیم‌گیری با کمبود دانش، به حوزه فازی گسترش یافته است. در روش SWARA فازی، قضاوت و نظر کارشناسان نقش کلیدی در تعیین وزن معیارها ایفا می‌کند؛ از این رو داده‌های مورد استفاده تا حد زیادی به دیدگاه متخصصان وابسته است. در این پژوهش، روش SWARA فازی به تکنیک Z-SWARA توسعه داده شد و یک عامل "قابلیت اعتماد" برای افزایش دقت و اطمینان نتایج به آن افزوده شده است.

مرحله ۱- متخصصان معیارهایی را از ضروری‌ترین تا کم‌اهمیت‌ترین به ترتیب کاهشی ترتیب می‌دهند.

مرحله ۲- بر اساس نظر اولیه، کارشناسان باید متغیرهای زبانی را به اهمیت نسبی معیار نسبت به معیارهای I -زقبلی اختصاص دهند. پس از آن، کارشناسان مقدار مولفه اول (F_j) را مطابق جدول ۱ و مولفه قابلیت اطمینان ($\tilde{L}_j$) از طریق جدول ۲ تعیین می‌کنند. نتیجه یک عدد Z برای هر معیار تشکیل می‌دهد.

جدول ۱- متغیرهای زبانی برای معیارهای وزنی.

Table 1- Linguistic variables for weighted criteria.

Linguistic Variables	TFNs
Equally Important (EI)	(1, 1, 1)
Moderately Less Important (MOL)	(2.3, 1, 3.2)
Less Important (LI)	(2.5, 1.2, 2.3)
Very Less Important (VLI)	(2.7, 1.3, 2.5)
Much Less Important (MUL)	(2.9, 1.4, 2.7)

جدول ۲- متغیرهای زیان‌شناسی برای پایایی.

Table 2- Linguistic variables for reliability.

Linguistic Variables	Very Weak (VW)	Weak (W)	Medium (M)	High (H)	Very High (VH)
TFNs	(0, 0, 0.25)	(0.2, 0.35, 0.5)	(0.35, 0.5, 0.75)	(0.5, 0.75, 0.9)	(0.75, 1, 1)

مرحله ۳- جزء دوم (قابلیت اطمینان) برای تبدیل عدد Z تولیدشده در مرحله ۲ به TFN به یک عدد واضح تبدیل می‌شود. سپس از معادله برای اضافه کردن وزن به جزء اول استفاده می‌شود.

مرحله ۴- بسته به یافته‌های مرحله ۳، ضریب وزن فازی $\tilde{q}_j$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tilde{q}_j = \frac{\tilde{q}_j - 1}{\tilde{z}_j} \quad (1)$$

جدول ۳- قوانین تبدیل عدد Z به TFN بر اساس متغیرهای زبانی برای معیارهای وزنی.

Table 3- Rules for converting Z number to TFN based on linguistic variables for weighted criteria.

TFNs	Linguistics Variables	TFNs	Linguistics Variables
(0.34, 0.42, 0.56)	(LI, H)	(1, 1, 1)	(EI, VW)
(0.38, 0.48, 0.64)	(LI, VH)	(1, 1, 1)	(EI, W)
(0.08, 0.10, 0.12)	(VLI, VW)	(1, 1, 1)	(EI, M)
(0.17, 0.20, 0.24)	(VLI, W)	(1, 1, 1)	(EI, H)
(0.21, 0.24, 0.29)	(VLI, M)	(1, 1, 1)	(EI, VH)
(0.24, 0.28, 0.34)	(VLI, H)	(0.19, 0.29, 0.43)	(MOL, VW)
(0.27, 0.32, 0.38)	(VLI, VH)	(0.39, 0.59, 0.89)	(MOL, W)
(0.06, 0.07, 0.08)	(MUL, VW)	(0.49, 0.73, 1.10)	(MOL, M)

جدول ۳- ادامه.

Table 3- Continued.

TFNs	Linguistics Variables	TFNs	Linguistics Variables
(0.13,0.15,0.17)	(MUL,W)	(0.56,0.85,1.27)	(MOL,H)
(0.16,0.18,0.21)	(MUL,M)	(0.64,0.96,1.44)	(MOL,VH)
(0.19,0.21,0.24)	(MUL,H)	(0.12,0.14,0.19)	(LI,VW)
(0.21,0.24,0.27)	(MUL,VH)	(0.24,0.30,0.39)	(LI,W)
		(0.29,0.37,0.49)	(LI,M)

مرحله ۵- در نهایت، وزن نسبی معیارهای ارزیابی Z را در نظر گرفتن n معیار ارزیابی محاسبه شد.

$$\bar{w}_j = \frac{\bar{q}_j}{\sum_{j=1}^n \bar{q}_j}. \quad (2)$$

۲-۳- روش Z-MABAC

در این بخش، روش Z-MABAC را پیشنهاد می‌کنیم که وزن‌های هدف و قابلیت اطمینان اطلاعات در محیط فازی را در نظر می‌گیرد و می‌تواند از دست رفتن اطلاعات در فرایند تصمیم‌گیری را کاهش دهد. ما از این روش در اعداد فازی برای گسترش دامنه کاربرد آن استفاده می‌کنیم. روش Z-MABAC در هفت مرحله زیر پیاده‌سازی می‌شود.

مرحله ۱- یک ماتریس تصمیم اولیه Z را با استفاده از اعداد Z بسازید.

مرحله ۲- برای تصمیم‌گیری اعداد Z را به اعداد فازی تبدیل کنید.

مرحله ۳- ماتریس فازی تجمیع شده برای به‌دست آوردن ماتریس $\tilde{Z}$ نرمال می‌شود. با استفاده از معادله (۳) برای معیارهای سود و معادله (۴) برای معیارهای هزینه:

$$\tilde{n}_{ij} = \left(\frac{x_{ij}^l - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-}, \frac{x_{ij}^m - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-}, \frac{x_{ij}^r - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \right). \quad (3)$$

$$\tilde{n}_{ij} = \left(\frac{x_{ij}^l - x_i^+}{x_i^- - x_i^+}, \frac{x_{ij}^m - x_i^+}{x_i^- - x_i^+}, \frac{x_{ij}^r - x_i^+}{x_i^- - x_i^+} \right). \quad (4)$$

مرحله ۴- ماتریس وزن‌دار ($\tilde{V}ek$) با عبارت زیر محاسبه کنید.

$$\tilde{v}_{ij} = (w_i \cdot \tilde{n}_{ij}^l + w_i, w_i \cdot \tilde{n}_{ij}^m + w_i, w_i \cdot \tilde{n}_{ij}^r + w_i), \quad (5)$$

$$\tilde{c} = (1, 1, 1, 1).$$

مرحله ۵- ماتریس ناحیه تقریبی مرزی $\tilde{G}$ را تعیین کنید. مساحت تقریبی مرزی هر استاندارد را طبق معادله (۴) محاسبه کنید.

$$\tilde{g}_i = \left(\prod_{j=1}^s \tilde{v}_{ij} \right)^{1/s}, \quad (6)$$

$$\tilde{G} = (\tilde{g}_1, \tilde{g}_2, \dots, \tilde{g}_n).$$

مرحله ۶- فاصله بین گزینه جایگزین و ناحیه تقریبی مرز برای عناصر ماتریس را محاسبه کنید.

$$\tilde{Q}^{ek} = \tilde{V}^{ek} - \tilde{G}^{ek}. \quad (7)$$

مرحله ۷- رتبه‌بندی گزینه‌های جایگزین:

$$\tilde{s}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{q}_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

مرحله ۸- محاسبه مقادیر نهایی با اعمال عبارت انجام می‌شود:

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{q}_{ij} = \left(\sum_{j=1}^n q_{ij}^l, \sum_{j=1}^n q_{ij}^m, \sum_{j=1}^n q_{ij}^r \right). \quad (9)$$

مرحله ۹- بیرنگ کردن گزینه‌های مقدار فازی با استفاده از رابطه‌های (۸) و (۹):

$$S_i = ((t^r - t^l) + (t^m - t^l))/3 + t^l. \quad (10)$$

$$S_i = [\lambda t^r + t^m + (1 - \lambda)t^l]/2. \quad (11)$$

مرحله ۱۰- تجمیع مقادیر نهایی برای k خبره با استفاده از میانگین حسابی ساده انجام می‌شود.

$$S_i^G = \frac{\sum_{i=1}^k S_i}{k}. \quad (12)$$

۴- نتایج

در این قسمت چارچوب توسعه‌یافته Z-SWARA-MABAC برای اولویت‌بندی و ارزیابی ریسک‌های فعالیت‌های گردشگری شهر ارومیه اجرا شده است که کارایی و اثربخشی روش معرفی شده را نشان می‌دهد که ۳۱ ریسک فعالیت‌های گردشگری شهر ارومیه شناسایی شده و در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- ریسک‌های شناسایی شده.

Table 4- Identified risks.

شماره ریسک	شرح ریسک
R1	تغییر اقلیم
R2	تخریب منابع معیشتی کشاورزی و دامداری
R3	معیشت مردم/بیکاری
R4	کاهش گونه‌های جانوری، تهدید حیات وحش و از دست دادن زیستگاه
R5	تخریب محیط طبیعی در اثر پیاده‌روی در بیشه‌زارها و مراتع
R6	آتش‌سوزی در جنگل‌ها، بوته کنی و نابودی گیاهان
R7	پراکندگی زباله‌ها در سواحل آبی، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، چشمه‌ها، پارک‌ها و فضای باز
R8	تخریب ظاهر فیزیکی آب و سواحل خطی
R9	مرگ حیوانات دریایی
R10	ریزش و ورود سوخت قایق و ورود روغن و مواد نفتی به درون دریا در محل اسکله‌ها و پهلوگیری قایق‌ها
R11	تخلیه فاضلاب کشتی و مواد زاید
R12	نشر رنگ‌های ضدخزه قایق‌ها به آب
R13	اختلال برای حیات وحش به دلیل حرکت قایق‌ها به‌ویژه پرندگان
R14	کمبود آب و تخریب منابع آب و تولید حجم بیشتری از فاضلاب به دلیل استفاده از آب برای هتل‌ها، استخرهای شنا، زمین‌های گلف و استفاده شخصی گردشگران
R15	تخریب مستقیم اکوسیستم‌های دریایی مانند صخره‌های مرجانی و اثرات متعاقب آن بر حفاظت ساحلی و شیلات بر اثر لنگر انداختن، غواصی، ماهیگیری ورزشی و قایق‌سواری
R16	افزایش سروصدا ناشی از حرکت هواپیماها و خودروها
R17	آلودگی هوا
R18	آلودگی توسط فاضلاب‌ها، تولید زباله‌ها توسط گردشگران

جدول ۴- ادامه.

Table 4- Continued.

شماره ریسک	شرح ریسک
R19	آلودگی‌های معماری/بصری
R20	به هم خوردن تعادل اکولوژیکی محیط
R21	تغییر کاربری اراضی به‌خصوص اراضی کشاورزی
R22	کاهش ارزش‌های زیبایی و معماری
R23	از بین رفتن چشم‌اندازها و توسعه شهری
R24	بروز ساخت‌وسازهای بی‌رویه در حوالی مراکز گردشگری
R25	فرسایش خاک ناشی از فرسایش زمین
R26	فشار بر منابع و مناظر دیدنی بر اثر ساخت‌وسازهای گردشگری و تفریحی ناشی از استفاده از زمین برای اقامت و سایر تامین زیرساخت‌ها و استفاده از مصالح ساختمانی
R27	جنگل‌زدایی و استفاده شدید یا ناپایدار از زمین
R28	افزایش میزان تقاضای انرژی
R29	از دست دادن تنوع زیستی
R30	تخریب لایه اوزون
R31	تغییرات آب‌وهوا

در این پژوهش، اولویت‌بندی ریسک‌ها بر اساس روش *Z-MABAC* با نتایج حاصل از روش‌های *FMEA* سنتی و *F-MABAC* مقایسه شده است. بر اساس جدول بعدی، در روش *FMEA* سنتی، ریسک *R22* در اولویت نخست قرار گرفته است؛ ریسک *R13* در رتبه دوم و ریسک‌های *R26* و *R30* به‌طور مشترک در جایگاه سوم قرار گرفته‌اند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در این روش، ریسک‌ها به‌جای ۳۱ رتبه مستقل، در ۲۷ دسته قرار گرفته‌اند. این امر بیانگر آن است که *FMEA* سنتی قادر به ارایه یک اولویت‌بندی کامل و دقیق برای تمامی ریسک‌ها نیست. از سوی دیگر، در روش *Z-MABAC* با لحاظ کردن عدم قطعیت، این محدودیت تا حدی برطرف شده است؛ با این حال، به‌طور کامل حل نشده است. به‌عنوان نمونه، ریسک‌های *R4* و *R20* به‌طور مشترک در رتبه نخست و ریسک‌های *R7* و *R21* در رتبه دوازدهم قرار گرفته‌اند. همچنین، روش *F-MABAC* ریسک‌ها را در ۲۹ دسته به‌جای ۳۱ دسته تفکیک کرده است. این نقص در اولویت‌بندی که منجر به تجمیع چند ریسک در یک رتبه می‌شود، می‌تواند در فرایند تصمیم‌گیری، مدیریت ریسک و برنامه‌ریزی اقدامات اصلاحی باعث سردرگمی مدیران شود. با این حال، پیاده‌سازی روش *Z-MABAC* با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در کنار عدم قطعیت توانسته است این کاستی را به‌طور کامل برطرف کند، به‌گونه‌ای که ریسک‌ها در ۳۱ دسته مستقل (مطابق جدول ۵) رتبه‌بندی شده‌اند.

جدول ۵- مقایسه نتایج رویکرد توسعه‌یافته با روش‌های *FMEA* و *F-MABAC*.Table 5- Comparison of the results of the developed approach with *F-MABAC* and *FMEA* methods.

F-MABAC and FMEA methods.						
FMEA		F-Mabac			Proposed Approach	
Risk	Score	Rank	Score	Rank	Score	Rank
R1	137.33	12	0.25	3	0.15	6
R2	61.33	25	-0.13	22	-0.08	24
R3	155.00	8	0.14	6	0.10	8
R4	147.00	10	0.28	1	0.40	1
R5	155.00	8	0.00	17	-0.07	23
R6	193.67	4	0.10	10	-0.09	26
R7	83.33	18	0.06	12	0.01	16
R8	102.67	14	-0.39	29	-0.41	31
R9	50.67	26	-0.24	26	-0.20	28
R10	82.67	19	-0.02	19	0.03	15
R11	88.67	17	-0.19	24	-0.11	27
R12	74.67	21	-0.03	20	0.05	13

جدول ۵- ادامه.

Table 5- Continued.

FMEA			F-Mabac		Proposed Approach	
Risk	Score	Rank	Score	Rank	Score	Rank
R13	261.33	2	0.18	4	0.28	4
R14	82.67	19	-0.28	28	-0.21	29
R15	148.67	9	0.04	13	0.05	11
R16	66.67	23	-0.01	18	-0.02	21
R17	49.33	27	-0.23	25	-0.24	30
R18	180.00	5	-0.04	21	0.01	17
R19	108.33	13	0.12	9	0.20	5
R20	147.00	10	0.28	1	0.38	2
R21	75.00	20	0.06	12	0.13	7
R22	270.00	1	0.12	8	-0.02	20
R23	99.00	15	0.07	11	0.07	10
R24	73.33	22	-0.25	27	-0.06	22
R25	165.00	7	0.01	15	-0.08	25
R26	210.00	3	0.13	7	0.08	9
R27	64.00	24	-0.15	23	-0.01	19
R28	168.33	6	0.03	14	0.05	12
R29	140.00	11	0.25	2	0.36	3
R30	210.00	3	0.00	16	-0.01	18
R31	95.33	16	0.15	5	0.05	14

در این قسمت به منظور اثبات اعتبار نتایج به دست آمده و کارایی رویکرد پیشنهادی این روش با روش‌های *Z-TOPSIS* و *Z-ARAS* مقایسه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده حاصل از پیاده‌سازی هر ۳ روش به ترتیب *R4* و *R20* و *R29* در اولویت اول الی سوم قرار گرفته است و با عنوان ریسک‌های بحرانی انتخاب شده‌اند. همچنین *R8* در هر ۳ روش در اولویت آخر قرار گرفته است و در اولویت رسیدگی نمی‌باشد. نتایج به دست آمده حاصل از پیاده‌سازی این ۳ رویکرد در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶- نتایج پیاده‌سازی سه رویکرد در محیط *Z-NUMBER*.

Table 6- Results of implementing three approaches in the Z-NUMBER environment.

Proposed Approach			Z-TOPSIS		Z-ARAS	
Risk	Score	Rank	Score	Rank	Score	Rank
R1	0.15	6	0.56	6	0.00	7
R2	-0.08	24	0.46	22	0.00	17
R3	0.10	8	0.54	10	0.00	15
R4	0.40	1	0.70	1	0.01	1
R5	-0.07	23	0.43	26	0.00	24
R6	-0.09	26	0.42	27	0.00	27
R7	0.01	16	0.50	18	0.00	10
R8	-0.41	31	0.20	31	0.00	31
R9	-0.20	28	0.39	28	0.00	26
R10	0.03	15	0.51	16	0.00	9
R11	-0.11	27	0.43	25	0.00	28
R12	0.05	13	0.53	15	0.00	8
R13	0.28	4	0.65	4	0.00	12
R14	-0.21	29	0.35	30	0.00	30
R15	0.05	11	0.54	11	0.00	18
R16	-0.02	21	0.50	19	0.00	6
R17	-0.24	30	0.37	29	0.00	29
R18	0.01	17	0.49	20	0.00	20

جدول ۶- ادامه.

Table 6- Continued.

Proposed Approach			Z-TOPSIS		Z-ARAS	
Risk	Score	Rank	Score	Rank	Score	Rank
R19	0.20	5	0.61	5	0.00	5
R20	0.38	2	0.69	2	0.01	2
R21	0.13	7	0.56	7	0.00	4
R22	-0.02	20	0.49	21	0.00	22
R23	0.07	10	0.53	13	0.00	13
R24	-0.06	22	0.46	23	0.00	23
R25	-0.08	25	0.45	24	0.00	25
R26	0.08	9	0.54	9	0.00	16
R27	-0.01	19	0.51	17	0.00	11
R28	0.05	12	0.53	14	0.00	21
R29	0.36	3	0.66	3	0.01	3
R30	-0.01	18	0.53	12	0.00	19
R31	0.05	14	0.55	8	0.00	14

۵- تحلیل حساسیت و مقایسه نتایج

برای ارزیابی پایداری و اعتبار رویکرد پیشنهادی، دو دسته تحلیل حساسیت انجام شد: ۱- مقایسه رتبه‌بندی‌ها با سایر روش‌ها و ۲- بررسی پایداری رتبه‌ها در برابر اغتشاش‌های کوچک در امتیازها.

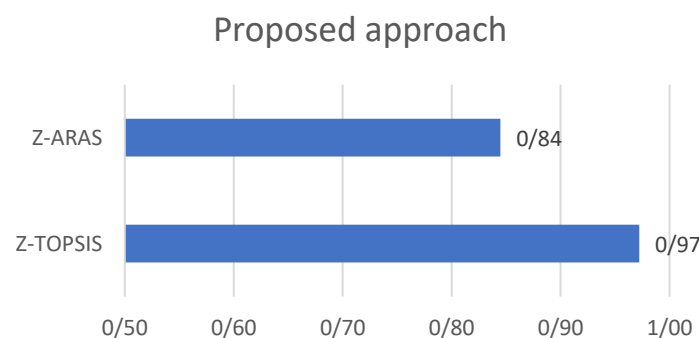
۵-۱- مقایسه با روش‌های موجود

برای مقایسه نتایج این ۳ روش از روش همبستگی اسپیرمن استفاده شده است. بر این اساس درجه همبستگی رویکرد پیشنهادی با روش‌های Z-TOPSIS و Z-ARAS به‌عنوان روش‌های معتبر موجود در ادبیات مطابق شکل ۱ به ترتیب با مقادیر ۰/۹۷ و ۰/۸۴ است که این مقادیر، همبستگی بالایی نتایج به‌دست آمده از رویکرد پیشنهادی با این روش‌ها را نشان می‌دهد؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که رویکرد پیشنهادی می‌تواند جزو روش‌های قابل اطمینان در ادبیات مطرح شود (جدول ۷).

جدول ۷- درجه همبستگی رویکرد Z-TOPSIS و Z-ARAS.

Table 7- Correlation degree of Z-TOPSIS and Z-ARAS approaches.

Proposed Approach	
0.97	Z-TOPSIS
0.84	Z-ARAS



شکل ۱- شکل درجه همبستگی رویکرد Z-TOPSIS و Z-ARAS.

Figure 1- Correlation degree graph of Z-TOPSIS and Z-ARAS approaches.

نتایج حاصل از مقایسه رتبه‌های ریسک‌ها در جدول‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که همبستگی اسپیرمن بین رویکرد پیشنهادی و روش *Z-TOPSIS* برابر ۰/۹۷ (سطح اطمینان بالا) است. همبستگی با *Z-ARAS* نیز ۰/۸۴ به‌دست آمده که نشان‌دهنده همسویی قوی این دو روش است. همبستگی بین رویکرد پیشنهادی و *F-MABAC* حدود ۰/۸۲۲ بود که در مقابل، مقایسه با *FMEA* سنتی ضریب همبستگی بسیار پایین‌تری حدود ۰/۱۰۳ نشان داد. این نتایج بیانگر آن است که رویکرد پیشنهادی بیشترین سازگاری را با روش‌های *Z-MCDM* داشته و کاستی‌های *FMEA* سنتی در رتبه‌بندی کامل ریسک‌ها را به‌طور موثری پوشش داده است. این تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی علاوه بر همسویی با روش‌های معتبر تصمیم‌گیری چندمعیاره *Z-TOPSIS* و *Z-ARAS*، از پایداری بالایی در رتبه‌بندی ریسک‌ها برخوردار است؛ بنابراین، می‌توان آن را به‌عنوان ابزاری قابل‌اعتماد برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه معرفی کرد.

۵-۲- پایداری رتبه‌ها در برابر اغتشاش امتیازها

برای بررسی پایداری نتایج، اغتشاش یکنواختی در بازه $\pm 5\%$ و $\pm 10\%$ بر امتیازهای رویکرد پیشنهادی اعمال شد (۳۰۰۰ تکرار شبیه‌سازی برای هر سطح). نتایج به‌صورت زیر خلاصه می‌شود.

جدول ۸- نتایج تحلیل حساسیت تحت اغتشاش‌های $\pm 5\%$ و $\pm 10\%$.

Table 8- Sensitivity analysis results under $\pm 5\%$ and $\pm 10\%$ perturbations.

Risk	Mean Rank $\pm 5\%$	Std Rank $\pm 5\%$	Top3 Frequency $\pm 5\%$	Mean Rank $\pm 10\%$	Std Rank $\pm 10\%$	Top3 Frequency $\pm 10\%$
R4	1.118	0.323	1	1.383	0.606	1
R20	1.989	0.474	1	1.991	0.714	1
R29	2.893	0.309	1	2.626	0.592	1
R13	4	0	0	4	0	0
R19	5	0	0	5	0	0
R1	6	0	0	6.038	0.191	0
R21	7	0	0	6.962	0.191	0
R3	8	0	0	8	0	0
R26	9	0	0	9.053	0.225	0
R23	10	0	0	9.947	0.225	0
R28	12.48	1.128	0	12.507	1.122	0
R15	12.481	1.11	0	12.512	1.103	0
R12	12.506	1.11	0	12.467	1.117	0
R31	12.533	1.123	0	12.514	1.129	0
R10	15	0	0	15	0	0
R7	16.488	0.5	0	16.508	0.5	0
R18	16.512	0.5	0	16.492	0.5	0
R30	18.498	0.5	0	18.5	0.5	0
R27	18.502	0.5	0	18.5	0.5	0
R22	20.494	0.5	0	20.496	0.5	0
R16	20.506	0.5	0	20.504	0.5	0
R24	22	0	0	22.03	0.171	0
R5	23	0	0	23.084	0.397	0
R25	24.494	0.5	0	24.54	0.707	0
R2	24.506	0.5	0	24.529	0.717	0
R6	26	0	0	25.817	0.455	0
R11	27	0	0	27	0	0
R9	28.128	0.334	0	28.289	0.461	0
R14	28.872	0.334	0	28.775	0.541	0
R17	30	0	0	29.936	0.25	0
R8	31	0	0	31	0	0

۱. مجموعه سه ریسک برتر ($Top-3$) در هر دو سطح اغتشاش، در ۱۰۰٪ موارد بدون تغییر باقی ماند. این موضوع نشان‌دهنده پایداری کامل رتبه‌های صدر جدول است.
۲. بررسی آماری نشان داد که ریسک‌های $R4$ ، $R20$ و $R29$ پایدارترین رتبه‌ها را در میان همه ریسک‌ها دارند.
۳. در مقابل، ریسک‌هایی مانند $R31$ ، $R28$ و $R12$ بیشترین نوسان رتبه را در شرایط اغتشاش $\pm 10\%$ تجربه کردند.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این پژوهش، رویکرد توسعه‌یافته $FMEA$ با بهره‌گیری از دو روش $Z-SWARA$ و $Z-MABAC$ ارایه شده است؛ هر یک از این روش‌ها برای رفع بخشی از محدودیت‌های $FMEA$ سنتی به‌کار گرفته شده‌اند. بدین ترتیب، پس از شناسایی ریسک‌ها با استفاده از $FMEA$ ، روش $Z-SWARA$ برای محاسبه وزن شاخص‌ها به‌کار رفته است تا مشکل یکسان در نظر گرفتن وزن معیارها در مدل سنتی برطرف شود. همچنین روش $Z-MABAC$ برای اولویت‌بندی ریسک‌ها به‌کار گرفته شده تا ناتوانی $FMEA$ سنتی در ارایه رتبه‌بندی کامل و دقیق جبران گردد. به‌این ترتیب، هم در مرحله وزن‌دهی و هم در مرحله رتبه‌بندی، یک چارچوب یکپارچه تصمیم‌گیری مبتنی بر تئوری اعداد Z طراحی شده است. این چارچوب با در نظر گرفتن تفاوت دیدگاه‌های اعضای تیم $FMEA$ و وجود عدم قطعیت و ابهام در نظرات آن‌ها، امکان تصمیم‌گیری معتبرتر و واقع‌بینانه‌تری را فراهم می‌کند؛ بنابراین، روش پیشنهادی با لحاظ هم‌زمان عدم اطمینان و عدم قطعیت و همچنین ارایه اولویت‌بندی کامل برای ریسک‌ها، ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری در زمینه اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه است. مقایسه این رویکرد با سایر روش‌های موجود در ادبیات نیز نشان می‌دهد که روش ارایه‌شده در این تحقیق از قابلیت اعتماد و اثربخشی بالاتری برخوردار است.

۶-۱- پیشنهادها

رویکرد پیشنهادی این تحقیق قابل توسعه در سایر محیط‌های عدم قطعیت نظیر فازی فیناغورثی، فازی کروی و فازی شهودی توسعه یابد. همچنین رویکرد ارایه شده در سایر مسایل ارزیابی ریسک نظیر ارزیابی ریسک‌های جاده‌ای، ارزیابی ریسک‌های خشک شدن دریاچه‌ها، ارزیابی ریسک‌های لجستیک سبز و... قابل پیاده‌سازی است.

منابع

- [1] Tavakolnia, M. R., & Akbarian, M. A. (2011). Globalization, opportunity or threat to the environment? *Strategic Studies of Public Policy Making*, 2(5), 86-118. (In Persian). <https://www.noormags.ir/view/fa/articlepage/1790090/>
- [2] Sharif, A., Godil, D. I., Xu, B., Sinha, A., Khan, S. A. R., & Jermstittiparsert, K. (2020). Revisiting the role of tourism and globalization in environmental degradation in China: Fresh insights from the quantile ARDL approach. *Journal of Cleaner Production*, 272, 122906. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122906>
- [3] El Fadli, K. I., Cervený, R. S., Burt, C. C., Eden, P., Parker, D., Brunet, M., ..., & Pace, M. B. (2013). World Meteorological Organization assessment of the purported world record 58 C temperature extreme at El Azizia, Libya (13 September 1922). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(2), 199-204. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00093.1>
- [4] Ebadi, A. G., Toughani, M., Najafi, A., & Babaei, M. (2020). A brief overview on current environmental issues in Iran. *Central Asian Journal of Environmental Science and Technology Innovation*, 1(1), 1-11. <http://dx.doi.org/10.22034/CAJESTI.2020.01.08>
- [5] Tidwell, T. L. (2016). Nexus between food, energy, water, and forest ecosystems in the USA. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 6(1), 214-224. <https://doi.org/10.1007/s13412-016-0367-8>
- [6] Alizadeh-Choobari, O., Ahmadi-Givi, F., Mirzaei, N., & Owlad, E. (2016). Climate change and anthropogenic impacts on the rapid shrinkage of Lake Urmia. *International Journal of Climatology*, 36(13), 4276-4286. <https://doi.org/10.1002/joc.4630>
- [7] Bagheri, M., Yousefi, S., & Rezaee, M. J. (2018). Risk measurement and prioritization of auto parts manufacturing processes based on process failure analysis, interval data envelopment analysis and grey relational analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(8), 1803-1825. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1214-1>
- [8] Yousefi, S., Alizadeh, A., Hayati, J., & Bagheri, M. (2018). HSE risk prioritization using robust DEA-FMEA approach with undesirable outputs: A study of automotive parts industry in Iran. *Safety Science*, 102, 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.015>

- [9] Paramati, S. R., Shahbaz, M., & Alam, M. S. (2017). Does tourism degrade environmental quality? A comparative study of Eastern and Western European Union. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.034>
- [10] Ozturk, I., Al-Mulali, U., & Saboori, B. (2016). Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis: The role of tourism and ecological footprint. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(2), 1916–1928. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5447-x>
- [11] Sivakumar, V. L., Krishnappa, R. R., & Nallanathel, M. (2021). Drought vulnerability assessment and mapping using Multi-Criteria decision making (MCDM) and application of analytic hierarchy process (AHP) for namakkal district, tamilnadu, India. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1592–1599. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.657>
- [12] Mokarram, M., Pourghasemi, H. R., Hu, M., & Zhang, H. (2021). Determining and forecasting drought susceptibility in southwestern Iran using multi-criteria decision-making (MCDM) coupled with CA-Markov model. *Science of the Total Environment*, 781, 146703. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146703>
- [13] Zarrineh, N., & Abad, M. A. N. (2014). Integrated water resources management in Iran: Environmental, socio-economic and political review of drought in Lake Urmia. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 6(1), 40–48. <https://doi.org/10.5897/IJWREE2012.0380>
- [14] Rezaee, M. J., Yousefi, S., Valipour, M., & Dehdar, M. M. (2018). Risk analysis of sequential processes in food industry integrating multi-stage fuzzy cognitive map and process failure mode and effects analysis. *Computers & Industrial Engineering*, 123, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.07.012>
- [15] Spreafico, C., Russo, D., & Rizzi, C. (2017). A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents. *Computer Science Review*, 25, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.05.002>
- [16] Liu, H. C. (2016). FMEA using uncertainty theories and MCDM methods. In *FMEA using uncertainty theories and MCDM methods* (pp. 13–27). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1466-6_2
- [17] Bevilacqua, M., & Braglia, M. (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, 70(1), 71–83. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00047-8)
- [18] Seyed-Hosseini, S. M., Safaei, N., & Asgharpour, M. J. (2006). Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(8), 872–881. <https://doi.org/10.1016/j.res.2005.09.005>
- [19] Rau, H., Liao, C. P., Shiang, W. J., & Lin, C. H. (2007). Using fuzzy theory for packaging attribute deployment for new notebook computer introduction. In *international conference on industrial, engineering and other applications of applied intelligent systems* (pp. 250–259). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73325-6_25
- [20] Zammori, F., & Gabbriellini, R. (2012). ANP/RPN: A multi criteria evaluation of the risk priority number. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(1), 85–104. <https://doi.org/10.1002/qre.1217>
- [21] Sharma, R. K., & Sharma, P. (2012). Integrated framework to optimize RAM and cost decisions in a process plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(6), 883–904. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2012.04.013>
- [22] Liu, H. C., Liu, L., Liu, N., & Mao, L. X. (2012). Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 12926–12934. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.031>
- [23] Maheswaran, K., & Loganathan, T. (2013). A novel approach for prioritization of failure modes in FMEA using MCDM. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(4), 733–739. https://www.ijera.com/papers/Vol3_issue4/DT34733739.pdf
- [24] Das Adhikary, D., Kumar Bose, G., Bose, D., & Mitra, S. (2014). Multi criteria FMECA for coal-fired thermal power plants using COPRAS-G. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 31(5), 601–614. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-04-2013-0068>
- [25] Aleksić, A., Tadić, D., Komatina, N., & Nestić, S. (2025). Failure mode and effects analysis integrated with multi-attribute decision-making methods under uncertainty: A systematic literature review. *Mathematics*, 13(13), 2216. <https://doi.org/10.3390/math13132216>
- [26] Beiranvand, B. (2024). Development of modified fuzzy FMEA method in environmental risk assessment of earth dams. *Scientific Reports*, 14(1), 17585. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68217-w>
- [27] Mileusnić Škrtić, M., Tišma, S., & Grgurević, D. (2024). Conservation under siege: The intersection of tourism and environmental threats in Croatian protected areas. *Land*, 13(12), 2114. <https://doi.org/10.3390/land13122114>
- [28] Chang, K. H., Fang, T. Y., & Li, Z. S. (2025). Using a flexible risk priority number method to reinforce abilities of imprecise data assessments of risk assessment problems. *Electronics*, 14(3), 518. <https://doi.org/10.3390/electronics14030518>
- [29] Eftekharzadeh, S. S., Ghouschi, S. J., & Momayezi, F. (2024). Enhancing safety and risk management through an integrated spherical fuzzy approach for managing laboratory errors. *Decision Science Letters*, 13(3). <https://doi.org/10.5267/j.dsl.2024.5.006>
- [30] Kolour, H. R., Momayezi, V., & Momayezi, F. (2026). Enhancing supplier selection in public manufacturing: A hybrid multi-criteria decision-making approach. *Spectrum of Decision Making and Applications*, 3(1), 1–20. <https://doi.org/10.31181/sdmap31202629>