



An Assessment of the Causes of Schedule and Cost Overruns in Megaprojects using a Z-BWM-MARCOS Integrated Method

Ali Memarpour Ghiaci* 

Morteza Abbasi** 

Jafar Gheidar-Kheljani*** 

Extended Abstract

Introduction: Megaprojects are defined as complex and large-scale investments, and their development and construction take many years. Schedule and cost overruns are among the most common challenges in megaprojects worldwide. Exceeding planned budgets and schedules are key factors contributing to the failure of many megaprojects. The aim of this research is to provide an integrated framework for evaluating the causes of schedule and cost overruns in megaprojects.

Methods: In this research, for the first time, an integrated approach combining the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method with the Best-Worst Method (BWM) and MARCOS, developed based on Z-number theory, has been used in three phases to analyze the causes of schedule and cost overruns in megaprojects. In the first phase, based on the literature, the causes and risks are identified using the FMEA method, and the factors determining the Risk Priority Number (RPN) are quantified. In the second phase, using the Z-BWM method, the weights of the criteria are calculated. In the third phase, based on the outputs of the previous phases, the causes are prioritized using the Z-MARCOS method. In addition to assigning different weights to the criteria and considering uncertainty, reliability is also incorporated in this approach through the theory of Z-numbers.

Received: Aug. 09, 2024; Revised: Nov. 29, 2024; Accepted: Jan. 27, 2025; Published Online: Feb. 06, 2025.

*Ph.D. Candidate, Industrial Engineering Department, Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

**Assistant Professor, Industrial Engineering Department, Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Corresponding Author: aaabbaii@mut.ac.ir

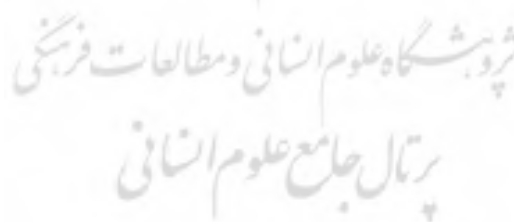
***Associate Professor, Industrial Engineering Department, Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.



Results and discussion: This study presents a novel methodology for assessing the schedule and cost overruns causes in megaprojects, utilizing the Z-BWM-MARCOS method to evaluate and prioritize 17 identified causes. The findings indicate that poor planning and scheduling, inadequate performance design, and a weak supplier network are the primary contributors to these overruns. To validate the proposed methodology, its results were compared with conventional methods, including FMEA, Fuzzy MARCOS, and Z-MOORA. The FMEA method exhibited significant shortcomings, notably, its failure to account for quality grades and conditions of uncertainty, which resulted in incomplete prioritization of failure causes. This limitation led to confusion among decision-makers regarding failure-related decisions. Similarly, while Fuzzy MARCOS addressed uncertainty, it still fell short in providing complete prioritization. In contrast, the Z-MOORA and Z-MARCOS methods effectively overcame these limitations by leveraging the advantages of Z-number theory, which incorporates both reliability and uncertainty. The implementation of the proposed approach demonstrated a strong correlation of 0.909 with the results of the Z-MOORA method, underscoring its effectiveness in delivering comprehensive rankings of causes.

Conclusions: Megaprojects are highly susceptible to significant cost overruns and schedule delays, posing major challenges for project management. The results of this study demonstrate the capability and superiority of the proposed approach compared to traditional methods such as FMEA and Fuzzy MARCOS in identifying the primary causes of cost and schedule overruns in megaprojects.

Keywords: Megaproject; Project Management; FMEA; Multi-criteria Decision-Making; Best-Worst Method (BWM); MARCOS; Z-number Theory.



How to Cite: Memarpour Ghiaci, Ali; Abbasi, Morteza; Gheidar-Kheljani, Jafar (2025). An Assessment of the Causes of Schedule and Cost Overruns in Megaprojects using a Z-BWM-MARCOS Integrated Method. *Ind. Manag. Persp.*, 15(1), 73-100 (In Persian).



ارزیابی علل افزایش زمان و هزینه مگاپروژه‌ها با استفاده از رویکرد یکپارچه مبتنی بر روش‌های بهترین-بدترین و مارکوس توسعه یافته بر اساس تئوری اعداد Z

علی معمارپور غیاثی* ID

مرتضی عباسی** ID

جعفر قیدر خلجانی*** ID

چکیده گسترده

مقدمه و اهداف: مگاپروژه‌ها به‌عنوان سرمایه‌گذاری‌های پیچیده و در مقیاس بزرگ تعریف می‌شوند و توسعه و ساخت آن‌ها سال‌ها به طول می‌انجامد. افزایش زمان و هزینه رایج‌ترین چالش‌ها در مگاپروژه‌ها در سراسر جهان هستند. افزایش هزینه نسبت به بودجه برنامه‌ریزی شده و افزایش زمان نسبت به برنامه زمان‌بندی، عوامل شکست بسیاری از مگاپروژه‌ها هستند. هدف این پژوهش ارائه یک چارچوب یکپارچه جهت ارزیابی علل افزایش زمان و هزینه در مگاپروژه‌ها است.

روش‌ها: در این پژوهش، برای اولین بار جهت تجزیه و تحلیل علل افزایش زمان و هزینه مگاپروژه‌ها از رویکرد یکپارچه روش FMEA مبتنی بر روش‌های بهترین-بدترین و مارکوس توسعه‌یافته بر اساس تئوری اعداد Z در سه فاز استفاده شده است. در فاز اول این رویکرد و بر اساس ادبیات، علل و ریسک‌ها با استفاده از روش FMEA شناسایی شده و عوامل تعیین‌کننده امتیاز RPN مقداردهی می‌شوند. در فاز دوم، با بهره‌گیری از روش بهترین-بدترین توسعه یافته بر اساس تئوری اعداد Z، وزن‌های شاخص‌ها محاسبه می‌شوند. سپس در فاز سوم و با توجه به خروجی‌های فازهای قبل، گزینه‌ها با استفاده از روش مارکوس توسعه یافته بر اساس تئوری اعداد Z اولویت‌بندی می‌شوند. علاوه بر تخصیص وزن‌های مختلف به شاخص‌ها و در نظر گرفتن عدم قطعیت، قابلیت اطمینان نیز به واسطه تئوری اعداد Z در این رویکرد در نظر گرفته شده است.

یافته‌ها: رویکرد پیشنهادی این تحقیق در ارزیابی علل افزایش زمان و هزینه مگاپروژه‌ها پیاده‌سازی گردید و ۱۷ علت شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگاپروژه‌ها، با استفاده از رویکرد یکپارچه Z-BWM-MARCOS ارزیابی و اولویت‌بندی شدند. بر اساس نتایج، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف، کمبود نیروی کار ماهر و طراحی ضعیف شبکه همکاری تامین‌کنندگان به عنوان علل اصلی شناسایی شده‌اند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۹، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸.

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

نویسنده مسئول: mabbasi@mut.ac.ir

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



نوع مقاله: پژوهشی

تخصیص نادرست منابع، شناسایی نادرست ریسک‌ها و ایجاد گلوگاه‌هایی در اجرای مگاپروژه از جمله پیامدهای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف در مگاپروژه‌ها است. پیاده‌سازی استراتژی‌هایی نظیر استفاده از ابزارهای پیشرفته مدیریت پروژه و هوش مصنوعی برای پیش‌بینی دقیق‌تر، یکپارچه‌سازی مدیریت ریسک برای پیش‌بینی عدم قطعیت‌ها و تأخیرهای احتمالی، اجرای برنامه‌ریزی مشترک با مشارکت تمام ذینفعان برای یکپارچه و همسوسازی اهداف و انجام ممیزی‌های منظم برنامه‌های پروژه برای شناسایی انحرافات و اصلاح آن‌ها به حل این مشکل کمک می‌کند. کمبود نیروی کار ماهر مستقیماً بر بهره‌وری، کیفیت کار و پایداری به برنامه‌های زمانی در مگاپروژه‌ها تأثیر می‌گذارد. استراتژی‌هایی نظیر، سرمایه‌گذاری در برنامه‌های توسعه و ارتقاء مهارت نیروی کار، پیش‌بینی تقاضای نیروی کار و پیاده‌سازی نظام مدیریت عملکرد و جبران خدمات کارکنان عادلانه و شفاف، به رفع این مسئله کمک می‌کنند. طراحی ضعیف شبکه همکاری تأمین‌کنندگان، باعث ایجاد اختلال در فرآیندهای تأمین و تحویل شده و منجر به کمبود مواد اولیه، تأخیرات و افزایش هزینه‌های غیرمنتظره می‌شود. ایجاد سیستم متمرکز مدیریت زنجیره تأمین، توسعه روابط استراتژیک بلندمدت با تأمین‌کنندگان کلیدی بر اساس اهداف مشترک، استفاده از فناوری بلاک‌چین برای ردیابی و افزایش شفافیت در زنجیره تأمین و پیاده‌سازی اصول زنجیره تأمین ناب برای کاهش اتلاف و ساده‌سازی فرآیندها از جمله استراتژی‌های مقابله با این مسئله هستند. برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی، نتایج ارزیابی علل با برخی روش‌های موجود در ادبیات نظیر FMEA، مارکوس فازی و روش توسعه‌یافته مورا بر اساس تئوری اعداد Z مقایسه شد، که نتایج نشان می‌دهد برخی کاستی‌های روش‌های FMEA و مارکوس فازی نظیر عدم ارائه رتبه‌بندی کامل گزینه‌ها، در رویکرد پیشنهادی به واسطه در نظر گرفتن عدم اطمینان در کنار عدم قطعیت پوشش داده شده است. همچنین نتایج رویکرد پیشنهادی با روش مورا توسعه‌یافته بر اساس تئوری اعداد Z در اولویت‌بندی علل شکست تقریباً مشابه بوده و ضریب همبستگی ۰.۹۰۹ را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری: مگاپروژه‌ها مستعد افزایش قابل توجه هزینه‌ها و تأخیرهای زمانی هستند که این موضوع، چالش‌های مهمی را برای مدیریت پروژه به همراه دارند. نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی نشانگر قابلیت و برتری آن در مقایسه با سایر روش‌ها نظیر FMEA و مارکوس فازی در تعیین علل اصلی علل افزایش هزینه‌ها و تأخیرهای زمانی مگاپروژه‌ها بوده است.

کلیدواژه‌ها: مگاپروژه؛ مدیریت پروژه؛ FMEA؛ تصمیم‌گیری چندمعیاره؛ روش بهترین-بدترین؛ MARCOS؛ تئوری اعداد Z.

استناددهی: معمارپور غیائی، علی؛ عباسی، مرتضی؛ قیدر خلجانی، جعفر (۱۴۰۴). ارزیابی علل افزایش زمان و هزینه مگاپروژه‌ها با استفاده از رویکرد یکپارچه مبتنی بر روش‌های بهترین-بدترین و مارکوس توسعه یافته بر اساس تئوری اعداد Z. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۵(۱)، ۷۳-۱۰۰.



۱. مقدمه

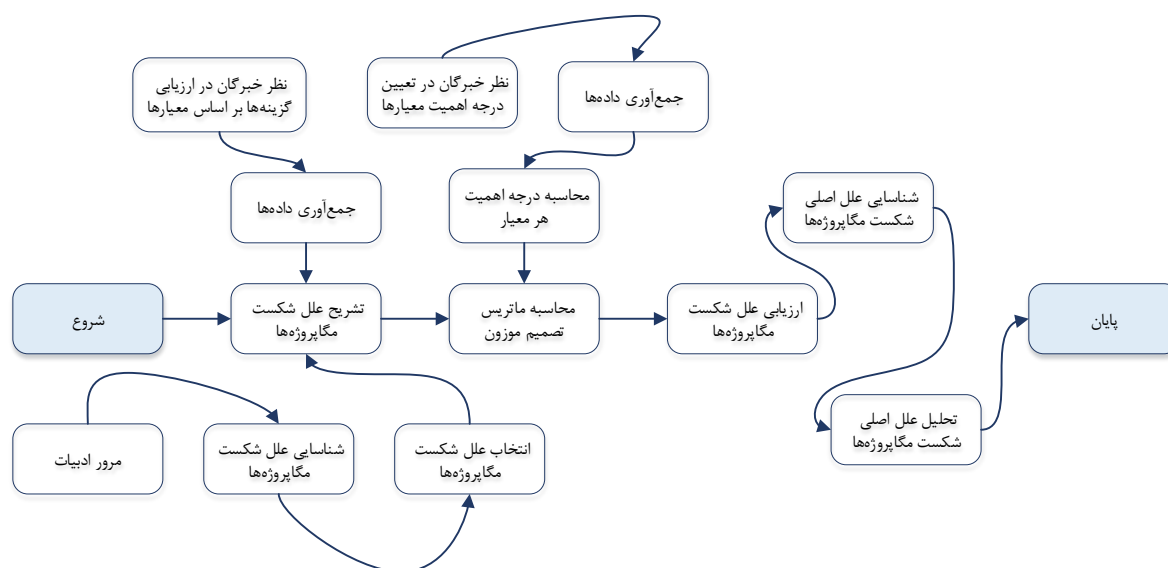
با توسعه سریع اقتصاد جهانی، رونق سرمایه‌گذاری در پروژه‌های بزرگ در سراسر جهان در چند دهه گذشته رو به افزایش بوده است [۵۴]. پروژه‌ای که یک میلیارد دلار یا بیش از آن هزینه دارد به عنوان یک مگا پروژه تعریف می‌شود [۱۷]. این پروژه‌ها نقش حیاتی در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه ایفا می‌کنند و بر پویایی‌های سیاسی، اثرات اجتماعی و نتایج اقتصادی تأثیر می‌گذارند [۴۷]. مگا پروژه‌ها به طور ذاتی با رشد، توسعه و رقابت‌پذیری مرتبط هستند و به عنوان زیرساخت‌های جهانی شدن عمل می‌کنند [۱۲]. مگا پروژه‌ها هزینه زیادی دارند و ریسک‌های زیادی می‌توانند باعث تاخیر یا شکست در طول اجرای آن شوند [۵۱، ۳۵]. در عمل، افزایش هزینه نسبت به بودجه برنامه‌ریزی شده و افزایش زمان نسبت به برنامه زمان‌بندی، دو مشکل رایج در اجرای مگا پروژه‌ها هستند [۴، ۱۴]. "قانون آهنین مگا پروژه‌ها" تمایل مگا پروژه‌ها به فراتر رفتن از بودجه‌ها، عدم تحقق زمان‌بندی‌ها و ارائه مزایای کمتر از انتظار را نشان می‌دهد [۱۵]. خانه اپرای سیدنی نمونه‌ای از یک مگا پروژه است که بیش از بودجه برنامه‌ریزی شده، هزینه داشت و خارج از برنامه زمان‌بندی پیشنهادی تکمیل شد. تکمیل این مگا پروژه ده سال بیش از زمان برنامه‌ریزی شده به طول انجامید و هزینه ساخت آن ۱۴۰۰ درصد بیش از بودجه برنامه‌ریزی شده بود [۱۷]. تنها خانه اپرای سیدنی نیست و مگا پروژه‌های بسیاری مگا پروژه‌ها افزایش هزینه نسبت به بودجه برنامه‌ریزی شده و افزایش زمان نسبت به برنامه زمان‌بندی را تجربه می‌کنند [۱۶]. بنابراین، ارزیابی علل افزایش زمان و هزینه مگا پروژه‌ها مسئله مهمی در مدیریت این پروژه‌ها است.

روش $FMEA^1$ یکی از روش‌های شناسایی و ارزیابی علل شکست است. روش $FMEA$ یک رویکرد سیستماتیک بر پایه تیمی از خبرگان است [۲۸]. در اغلب تحقیقاتی که از روش $FMEA$ استفاده شده است، شناسایی ریسک‌ها و عوامل شکست بر اساس شاخص سنتی RPN^2 انجام شده است. این در حالی است که این شاخص دارای کاستی‌هایی است. مقادیر مختلف معیارهای سه‌گانه ممکن است منجر به امتیاز یکسان شوند، در حالیکه اولویت‌های علل کاملاً متفاوت است [۲۹، ۲۵]. عدم در نظر گرفتن اهمیت نسبی معیارها در محاسبه امتیاز RPN نیز از دیگر کاستی‌های این روش است [۲۱، ۴۳]. همچنین، به دلیل کنشی بودن و تیمی بودن روش $FMEA$ ، اغلب مقدار عوامل تعیین کننده RPN را نمی‌توان به صورت قطعی در نظر گرفت [۱۸]. بنابراین، جهت دستیابی به نتایج قابل اطمینان در برابر نظرات خبرگان، نیاز است تا اولویت‌بندی گزینه‌ها با توجه به عدم قطعیت موجود در معیارها انجام شود [۳۰].

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی و اولویت‌بندی علل افزایش زمان و هزینه در مگا پروژه‌ها با ارائه یک رویکرد جدید جهت پوشش برخی از کاستی‌های روش $FMEA$ سنتی می‌باشد. این رویکرد برای اولین بار بر اساس روش توسعه‌یافته $FMEA$ مبتنی بر روش $Z-BWM$ جهت وزن‌دهی به شاخص‌ها و روش $Z-MARCOS$ جهت اولویت‌بندی علل ارائه می‌گردد. در این رویکرد، با به کارگیری تئوری اعداد Z ، سعی بر آن است عدم قطعیت و قابلیت اطمینان در عوامل تعیین کننده RPN در نظر گرفته شود. جهت ارزیابی قابلیت رویکرد پیشنهادی، اولویت‌بندی علل افزایش زمان و هزینه در مگا پروژه‌ها توسط شاخص حاصل از رویکرد ترکیبی $Z-BWM-MARCOS$ انجام شده و نتایج آن در مقایسه با برخی از روش‌های سنتی ارائه شده است. مسیر پژوهش در شکل ۱ نمایش داده شده است.

1. Failure mode and effects analysis

2. Risk priority number



شکل ۱. مسیر پژوهش

ادامه مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است.

در بخش دوم، مرور ادبیات مربوط به مگاپروژه‌ها، همچنین ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با روش FMEA و همچنین شکاف تحقیقاتی موجود ارائه می‌گردد. در بخش سوم، مفاهیم تئوری اعداد Z، گام‌های روش توسعه‌یافته BWM و MARCOS بر اساس تئوری اعداد Z و همچنین رویکرد پیشنهادی پژوهش ارائه شده است. در بخش چهارم، نتایج حاصل از پیاده‌سازی مراحل رویکرد Z-MARCOS و همچنین ملاحظات مدیریتی بیان خواهد شد. در انتها و در بخش پنجم، نتیجه‌گیری به همراه پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مگاپروژه. مگاپروژه‌ها را می‌توان به عنوان پروژه‌های پیچیده و در مقیاس بزرگ تعریف کرد [۱۷]، که معمولاً طی پنج سال یا بیشتر تکمیل می‌شوند [۵۵]، دارای سطح بالایی از ریسک هستند [۳۲]، گروه مختلفی از ذینفعان خصوصی و عمومی را درگیر می‌کند [۵۳] و توجه عموم را بر می‌انگیزد [۵۵]. مگاپروژه‌ها، پروژه‌های گرانی هستند که معمولاً توسط دولت‌ها سفارش داده می‌شوند و توسط ارگان‌های وابسته به دولت و شرکت‌های خصوصی اجرا می‌شوند [۵۲، ۴۴]. مگاپروژه‌ها با سرمایه‌گذاری‌های عظیم شناخته می‌شوند، با این حال، راه‌های زیادی برای شناسایی این پروژه‌ها وجود دارد [۴۹]. به عنوان مثال، بواتنگ و چن^۱ (۲۰۱۷) مگاپروژه‌ها را به عنوان پروژه‌های پیچیده و گران‌قیمتی توصیف می‌کنند که اغلب از ریسک‌های چالش برانگیزی تشکیل شده‌اند [۹]. مگاپروژه‌ها شامل برنامه‌ریزی پیچیده، مدیریت سرمایه هم‌هنگ، فناوری‌های پیچیده و نفوذ سیاسی هستند [۳۲]. از نظر واترمیر و فیلیپس^۲ (۲۰۲۰)، مگاپروژه‌ها با عدم قطعیت، فناوری‌های پیچیده، چالش‌های مالی، نفوذ سیاسی و پیچیدگی شناخته می‌شوند [۵۵]. همچنین بر اساس مطالعه آیتن و داس^۳ (۲۰۲۲) مگاپروژه‌ها، دارای تعهدات بسیار پیچیده‌ای هستند [۲]. بنابراین، به نظر می‌رسد که ریسک بالا، نفوذ سیاسی و پیچیدگی از جمله ویژگی‌های اصلی مگاپروژه‌ها هستند [۳۶].

1. Boateng & Chen
2. Watermeyer & Phillips
3. Aiyetan & Das

مگا پروژه‌ها، اغلب با تاخیر در زمان‌بندی و افزایش هزینه‌ها مواجه می‌شوند. اختلافات بین برآوردهای اولیه هزینه پروژه و هزینه نهایی آن می‌تواند قابل توجه باشد، به‌طوری‌که هزینه نهایی اغلب بسیار بیشتر از برآورد اولیه است [۲۷]. بر اساس یک مرور سیستماتیک، ۱۸ علت و ۵۴ راه‌حل برای عملکرد ضعیف مگا پروژه‌ها شناسایی شد [۱۳]. در آفریقای جنوبی، مطالعات در زمینه پروژه‌های عظیم انرژی نشان می‌دهند که تصمیم‌گیری‌های کند، کمبود نیروی کار ماهر، برآوردهای نادرست و مدیریت ضعیف سایت از جمله عوامل افزایش هزینه‌ها و تأخیرها هستند. درک این چالش‌ها برای بهبود نتایج مگا پروژه‌ها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، حیاتی است و نیاز به تحقیقات بیشتر در مورد استراتژی‌های مؤثر برای کاهش این مسائل را برجسته می‌کند [۵۱]. مطالعه‌ای در عمان به بررسی علل و اثرات تاخیر در مگا پروژه‌ها پرداخته است [۴۲]. شرکت مشاوره مدیریت مکنزی^۱ (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای به علل افزایش هزینه‌ها و تأخیرها در مگا پروژه‌ها پرداخت [۳۷]. مطالعه‌ای در آفریقا به ارزیابی علل افزایش هزینه‌ها نسبت به بودجه برنامه‌ریزی شده، تأخیرها و کیفیت پایین در مگا پروژه‌ها پرداخته است [۳۶]. دلایل افزایش هزینه و زمان مگا پروژه مربوط به ساخت ۱۰ استادیوم برای میزبانی جام جهانی فوتبال در مطالعه‌ای مورد بررسی قرار گرفت [۸]. گومز-کابرا و همکاران^۲ (۲۰۲۴) عوامل مؤثر بر تأخیرها و افزایش هزینه‌ها را بر اساس مراحل چرخه عمر پروژه گروه‌بندی کردند؛ به‌طوری‌که ۱۷ عامل به مرحله برنامه‌ریزی/طراحی، ۴۶ عامل به مرحله ساخت، و ۱۰ عامل به علل خارجی مرتبط هستند [۲۳]. الاتونجی و همکاران^۳ (۲۰۲۴) به بررسی رابطه علی بین تامین مالی پروژه و افزایش هزینه بر اساس داده‌های ۲۸ پروژه بزرگ سد سازی پرداختند [۴۱]. از یک رویکرد نوآورانه مبتنی بر تحلیل علل ریشه‌ای برای تحلیل علل افزایش هزینه و زمان بندی مگا پروژه‌ها استفاده شد [۵]. الحمیدی و همکاران^۴ (۲۰۲۴) به بررسی پروژه‌هایی که هزینه آن‌ها بیشتر از بودجه برنامه‌ریزی شده بوده است، پرداختند و راهکارهایی جهت کاهش هزینه‌های مگا پروژه‌ها ارائه کردند [۳]. کستلبلانکو و همکاران^۵ یک رویکرد توسعه یافته مبتنی بر ریسک و تحلیل ذی‌نفعان مگا پروژه ارائه کردند [۱۰]. علل شکست مگا پروژه‌ها در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه‌ها شناسایی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. علل شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه‌ها

عنوان	توضیح	منابع
نقشه‌های ناقص	در مگا پروژه‌ها، نقشه‌های ناقص یا فاقد جزئیات کافی می‌تواند منجر به تأخیرات قابل‌توجهی شود. این پروژه‌ها به طراحی‌های پیچیده‌ای وابسته هستند و نبود جزئیات می‌تواند فعالیت‌های حیاتی را متوقف یا با تاخیر مواجه کند.	[۵۱، ۸]
تغییرات طراحی	تغییرات مکرر یا عمده در طراحی موجب اختلال در زمان‌بندی و بودجه مگا پروژه‌ها پروژه می‌شود، زیرا این تغییرات نیازمند دوباره کاری، منابع اضافی و زمان‌بندی مجدد هستند.	[۵۱]
سرعت پایین در تصمیم‌گیری	سرعت پایین در تصمیم‌گیری، که اغلب به دلیل وجود ذی‌نفعان متعدد در مگا پروژه‌ها اتفاق می‌افتد، می‌تواند فرآیند تأیید و انجام فعالیت‌های بعدی را کند کند.	[۵۱، ۴۲]
تاخیر در آموزش	تاخیر در آموزش باعث ناکارآمدی می‌شود، زیرا تیم‌ها ممکن است با اطلاعات ناقص پیش بروند یا مجبور شوند کارهای انجام‌شده را اصلاح کنند.	[۵۱، ۸]
کمبود نیروی کار ماهر	نیازهای گسترده مگا پروژه‌ها اثر کمبود نیروی کار ماهر را تشدید می‌کند و منجر به تأخیر در مراحل تخصصی کار و کاهش بهره‌وری می‌شود.	[۵۱، ۸]
برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف	برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف و ناکارآمد می‌تواند گلوگاه‌هایی در اجرا ایجاد کند. در مگا پروژه‌ها، این مسئله به دلیل پیچیدگی و مقیاس آن‌ها بیشتر برجسته می‌شود.	[۵۱]

1. McKinsey & Company

2. Gómez-Cabrera et al.

3. Olatunji et al.

4. Alhamadi et al.

5. Castelblanco et al.

عنوان	توضیح	منابع
نارضایتی نیروی کار	نارضایتی نیروی کار و اعتصابات، می‌تواند پیشرفت مگاپروژه‌ها را متوقف کند و به افزایش هزینه‌ها و زمان منجر شود.	[۵۱، ۸]
کمبود نیروی انسانی	کمبود نیروی انسانی می‌تواند زمان‌بندی مگاپروژه‌ها را به‌ویژه در مناطق دورافتاده یا کم‌منبع مختل کند.	[۵۱]
افزایش قیمت مواد	مگاپروژه‌ها اغلب سال‌ها به طول می‌انجامد و در نتیجه در برابر تورم و نوسانات بازار آسیب‌پذیر هستند که این امر باعث افزایش قیمت مواد و عبور هزینه‌ها از بودجه برنامه‌ریزی شده می‌شود.	[۸]
برآورد نادرست مواد مورد نیاز	برآورد نادرست از مواد موردنیاز باعث تأخیر در تأمین و تنظیم بودجه می‌شود و به طور مستقیم بر زمان‌بندی و هزینه پروژه تأثیر می‌گذارد.	[۵۱]
تأخیر در عقد قرارداد با تامین کنندگان	تأخیر در نهایی کردن و عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان می‌تواند فرایند تأمین را با تأخیر روبه‌رو کند و پیشرفت مگاپروژه را مختل کند.	[۵۱، ۳۶]
انتخاب تامین کنندگان نامناسب	انتخاب تأمین‌کنندگانی که ظرفیت و شایستگی لازم برای رفع نیازهای مگاپروژه‌ها را ندارند، می‌تواند منجر به کاهش کیفیت، بهره‌وری و همچنین شکست در برنامه زمان‌بندی مگاپروژه شود.	[۱۰]
شرایط آب و هوایی نامطلوب	با توجه به طولانی بودن زمان تکمیل مگاپروژه‌ها، شرایط آب‌وهوایی نامطلوب و غیرقابل پیش‌بینی می‌تواند فعالیت‌های مگاپروژه را متوقف کند و باعث تأخیر در پیشرفت مگاپروژه شود.	[۱۰]
پیچیدگی پروژه	پیچیدگی مگاپروژه‌ها باعث می‌شود که آن‌ها به دلیل چالش‌های پیش‌بینی‌نشده در اجرا با تأخیر مواجه شوند.	[۳۶، ۳۷]
طراحی ضعیف شبکه همکاری تامین کنندگان	با توجه به پیچیدگی مگاپروژه‌ها و تعدد تأمین‌کنندگان، طراحی ضعیف شبکه همکاری میان آن‌ها منجر به ارتباطات ناکارآمد و تأخیر در تأمین می‌شود.	[۱۰]
تأخیر در تامین مواد و تجهیزات	تأخیر در تأمین مواد و تجهیزات پیشرفت مگاپروژه را مختل می‌کند و باعث تأخیرهای زنجیره‌ای در زمان‌بندی مگاپروژه‌ها می‌شوند.	[۳۶، ۸]
تأخیر در تایید کار	تعدد فعالیت‌ها در فرایند تایید کار در مگاپروژه‌ها اغلب منجر به تأخیر می‌شود، به‌ویژه زمانی که ذی‌نفعان ترجیحات متضادی دارند.	[۵۱]

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و FMEA. به عنوان یک حوزه شناخته شده از تحقیقات، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^۱ (MCDM) به طور گسترده توسط محققان برای بهبود عملکرد FMEA مورد استفاده قرار گرفته‌اند و به عنوان ابزاری ارزشمند در بهبود کاستی‌های مربوط به روش RPN مرسوم در نظر گرفته شده‌اند [۱۸]. خلیل‌زاده و قاسمی (۲۰۲۱) از یک رویکرد ترکیبی FMEA مبتنی بر روش‌های SWARA فازی و PROMETHEE و مدل برنامه‌ریزی خطی چند هدفه برای ارزیابی ریسک‌های پروژه‌های نفت گاز در ایران استفاده کردند. آن‌ها ۱۹ ریسک را با استفاده از روش دلفی به شش دسته طبقه‌بندی کردند، سپس با ارزیابی ریسک‌ها، استراتژی پاسخ به ریسک‌ها را تعیین کردند [۳۳]. قوشچی و همکاران از یک رویکرد یکپارچه SWARA-WASPAS جهت انتخاب محل مناسب دفن زباله‌های پزشکی استفاده کردند [۲۲]. امینی و همکاران از روش توسعه یافته BWM بر اساس تئوری مجموعه‌های رافبرای مسئله انتخاب تأمین‌کننده پایدار استفاده کردند [۷]. کیانی و همکاران (۲۰۲۳) از رویکرد فزاترکیب و دنپ فازی برای تحلیل موانع پیاده‌سازی اقتصاد چرخشی و صنعت ۴.۰ در زنجیره تأمین استفاده کردند [۳۴]. در مطالعه‌ای از یک رویکرد یکپارچه بر اساس روش توسعه یافته FMEA فازی، DEMATEL فازی و ANP جهت ارزیابی ریسک‌های پروژه‌های ساختمانی استفاده شد [۳۱]. معماریور غیائی و

قیدرخلجانی (۲۰۲۴) از مدل ترکیبی FMEA توسعه یافته مبتنی بر روش های تصمیم گیری چند معیاره و Bow Tie برای ارزیابی خطرات و ریسک های امنیت سایبری در انقلاب صنعتی چهارم استفاده کردند. آن ها از روش توسعه یافته PIPRECIA در محیط فازی (F-PIPRECIA) جهت تعیین وزن معیارها و همچنین از روش توسعه یافته EDAS بر اساس تئوری اعداد Z (Z-EDAS) جهت اولویت بندی ریسک ها استفاده کردند [۳۸]. به منظور شناسایی و ارزیابی ریسک های تأثیرگذار بر پروژه های ساختمانی و پوشش برخی کاستی های تکنیک FMEA، یک مدل یکپارچه مبتنی بر روش های FMEA، SWARA و WASPAS در محیط فازی پیشنهاد شد [۶]. معمارپور غیائی و کریمی (۲۰۲۴) از روش های توسعه یافته SWARA و MARCOS بر اساس تئوری اعداد Z برای ارزیابی استراتژی های مستخرج از روش SWOT برای اجرای واکسیناسیون استفاده کردند [۳۹]. گودرزی و نظری (۲۰۲۴) از رویکرد ترکیبی مبتنی بر دیمتل فازی و سیستم دینامیک برای ارزیابی ریسک های بهره‌وری منابع انسانی استفاده کردند [۲۴]. غیائی و عباسی (۲۰۲۴) از رویکرد ترکیبی FMEA مبتنی بر روش توسعه یافته ARAS بر اساس تئوری اعداد Z برای ارزیابی موانع پیاده سازی تکنولوژی بلاکچین در لجستیک بشردوستانه استفاده کردند [۱۹].

شکاف تحقیقاتی. در بخش اول مرور ادبیات، برخی از مقالات مرتبط با مگا پروژه ها و در بخش دوم، توسعه روش FMEA با روش های تصمیم گیری چندمعیاره مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه مقالاتی در حوزه مگا پروژه ها منتشر شده است، اما تعداد کمی از آن ها بر روی ارزیابی علل افزایش زمان و هزینه در مگا پروژه ها با استفاده از مدل های کمی متمرکز است. همچنین، با بررسی مقالات موجود مبتنی بر روش FMEA، کمبود روش توسعه یافته FMEA که علاوه بر عدم قطعیت، قابلیت اطمینان را نیز مورد بررسی قرار دهد، احساس می شود. در نتیجه، مطالعه حاضر برای اولین بار به ارائه یک رویکرد توسعه یافته FMEA بر اساس روش های تصمیم گیری چندمعیاره Z-BWM و Z-MARCOS جهت شناسایی و اولویت بندی علل افزایش زمان و هزینه در مگا پروژه ها می پردازد. برخی از نوآوری های مطالعه حاضر عبارتند از:

- ارائه یک چارچوب یکپارچه Z-BWM-MARCOS بر اساس رویکرد FMEA
- در نظر گرفتن قابلیت اطمینان در کنار عدم قطعیت برای تعیین درجه اهمیت فاکتورها در روش BWM به واسطه تئوری اعداد Z
- پیاده سازی رویکرد توسعه یافته در یک مطالعه موردی واقعی جهت نشان دادن کارایی و قابلیت مدل
- مقایسه رویکرد پیشنهادی با برخی رویکردهای موجود در ادبیات جهت اعتبارسنجی مدل

۳. روش شناسی پژوهش

روش پژوهش حاضر از نوع کیفی-کمی است. در مرحله نخست از جنبه کیفی، علل شکست در برنامه زمان بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه ها شناسایی و سپس داده های کیفی حاصل از قضاوت های تیم FMEA، به صورت متغیرهای زبانی و بر اساس تئوری اعداد Z گردآوری می شوند. در ادامه و با ارزیابی علل بر اساس معیارهای سه گانه روش FMEA، محاسبه وزن معیارها با استفاده از روش Z-BWM و با استفاده از داده های کمی انجام می شود. در آخر و با پیاده سازی روش Z-MARCOS، علل اولویت بندی شده و علل اصلی شکست در برنامه زمان بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه ها انتخاب می شوند. از نظر میزان کاربرد پژوهشی، پژوهش حاضر کاربردی-توسعه ای به شمار می رود؛ زیرا به دنبال توسعه رویکردی علمی و نوین از علل شکست در برنامه زمان بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه است. جامعه آماری در مرحله نخست پژوهش شامل کلیه پژوهش های منتشر شده در پایگاه های علمی معتبر مرتبط با چالش های موجود در مگا پروژه ها، تا زمان انجام این پژوهش است. با استفاده از روش نمونه گیری هدفمند، تیم FMEA از ۱۴ خبره دارای تجربه و تخصص در زمینه های نقشه برداری، مهندسی و مدیریت پروژه تشکیل شده است. در جدول ۲، مشخصات مرتبط با تیم خبره آمده است. این اطلاعات نشان می دهد اکثریت تیم خبره بین ۱۱ تا ۱۵ سال سابقه کار دارند.

جدول ۲. مشخصات تیم خبره

تعداد سال سابقه کار	نقشه بردار	مهندس	مدیر پروژه	مجموع
۵-۱	۱	-	-	۱
۱۰-۶	-	-	۲	۲
۱۵-۱۱	۲	۳	۲	۷
۲۰-۱۶	-	۲	-	۲
۲۱ و بیشتر	-	۱	۱	۲
مجموع پاسخ دهندگان	۳	۶	۵	۱۴

تئوری اعداد Z. اولین بار مفهوم اعداد Z^1 توسط زاده (۲۰۱۱) به عنوان یک نسخه عمومی از نظریه عدم قطعیت پیشنهاد شد [۵۶]. اعداد Z به صورت یک جفت عدد فازی بصورت $Z=(A,B)$ می‌باشد که مولفه اول A یک زیر مجموعه فازی از دامنه X و مولفه دوم B یک زیر مجموعه فازی از بازه واحد و نشانگر قابلیت اطمینان مولفه A می‌باشد.

$$Prob(X \text{ is } A) \text{ is } B \quad (۱)$$

این محدودیت عمومی به عنوان یک محدودیت احتمالی شناخته می‌شود که بیانگر یک تابع توزیع احتمالی $R(x)$ می‌باشد. به طور خاص می‌توان آن را به شرح رابطه (۲) عنوان کرد.

$$R(x): X \text{ is } \rightarrow poss(X = u) = \mu_A(u) \quad (۲)$$

در معادله فوق μ_A یک تابع عضویت از A می‌باشد و u یک مقدار کلی کلی از X است. μ_A می‌تواند به عنوان یک محدودیت مرتبط با $R(x)$ در نظر گرفته شود. این به این معنی است که $\mu_A(u)$ چه درجه ای از رضایتمندی u را پوشش می‌دهد. بنابراین، X یک متغیر تصادفی با توضیح احتمالی $R(x)$ است که نقش یک محدودیت احتمالی بر روی X دارد. محدودیت احتمالی و تابع چگالی احتمال X به شرح روابط (۳) و (۴) می‌باشند:

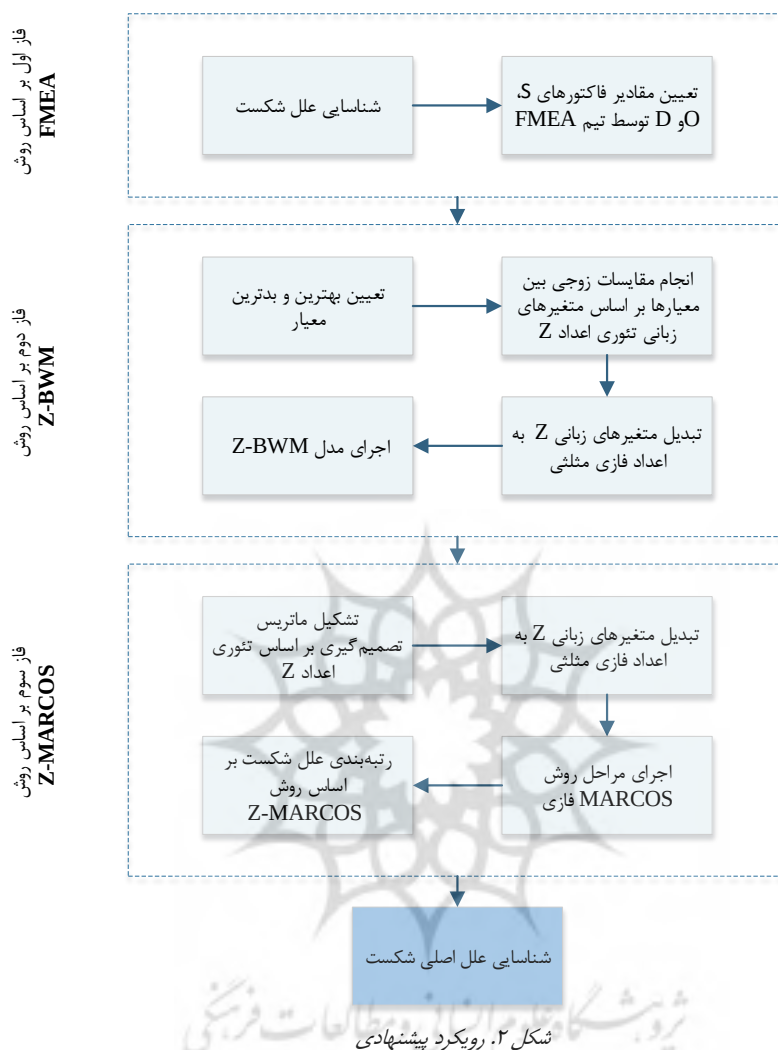
$$R(x): X \text{ is } p \quad (۳)$$

$$R(x): X \text{ is } p \rightarrow (u \leq X \leq u + du) = p(u) du \quad (۴)$$

در معادله (۴)، du نشانگر مشتق جزئی u می‌باشد.

رویکرد پیشنهادی. در این بخش، رویکرد پیشنهادی این تحقیق با بهره‌گیری از روش‌های FMEA، Z-BWM و Z-MARCOS برای ارزیابی و اولویت‌بندی علل شکست ارائه می‌گردد. رویکرد پیشنهادی در سه فاز ارائه می‌گردد. در فاز اول این رویکرد ضمن شناسایی علل شکست توسط تیم FMEA، مقادیر معیارهای سه‌گانه (شدت، وقوع و احتمال کشف) نیز امتیاز دهی می‌شوند. در این فاز قابلیت اطمینان هر کدام از علل شناسایی شده، توسط تیم خبره مربوطه تعیین می‌گردد. در فاز دوم، در راستای در نظر گرفتن اهمیت متفاوت به ازای معیارها روش Z-BWM پیاده‌سازی می‌گردد به نحوی که پس از تعیین بهترین و بدترین معیار، مقایسات زوجی بین معیارها بر اساس متغیرهای زبانی انجام می‌شود. سپس این متغیرها به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌گردد. در ادامه، با اجرای مدل Z-BWM، وزن مربوط به هر معیار بدست می‌آید. در فاز سوم و بر اساس خروجی‌های فاز اول و دوم، علل شناسایی شده با توجه به وزن معیارها، با استفاده از روش Z-MARCOS انجام می‌شود. این روش بر خلاف روش MARCOS مرسوم، علاوه بر در نظر گرفتن مقادیر فازی، قابلیت در نظر گرفتن قابلیت اطمینان برای هر معیار به ازای گزینه را دارد. در این روش پس از تعیین ماتریس تصمیم که درایه‌های آن متشکل از اعداد فازی و

مقادیر قابلیت اطمینان (اعداد-Z) هستند، این مقادیر به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند، سپس مراحل روش MARCOS در محیط فازی اجرا می‌گردند. روند اجرایی رویکرد پیشنهادی در شکل ۲ نیز نمایش داده شده است.



روش Z-BWM. رضایی روش بهترین-بدترین^۱ که یکی از کاراترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است را در سال ۲۰۱۵ معرفی کرد [۴۶]. این روش که به منظور وزن‌دهی عوامل و معیارهای تصمیم‌گیری به کار می‌رود، نسبت به روش‌های وزن‌دهی پیشین نظیر تحلیل سلسله مراتبی از مقایسه‌های زوجی کمتری استفاده می‌کند، نرخ پایداری بالاتری دارد و نتایج واقعی‌تری ارائه می‌دهد. همچنین این روش در برابر بروز خطاهای شناختی نظیر سوگیری لنگر کمتر مستعد است [۴۵، ۱۱]. روش پیشنهادی رضایی برای ارزیابی مقایسه‌ها از مقادیر قطعی استفاده می‌کند و نمی‌تواند وزن‌ها را در شرایط عدم قطعیت تعیین کند. در راستای رفع این کاستی، ژو و ژائو^۲ (۲۰۱۷) روش BWM فازی را پیشنهاد دادند. این روش با وجود مدیریت عدم قطعیت شرایط عینی، قابلیت اطمینان را در تعیین وزن معیارها در نظر نمی‌گرفت [۲۶]. سرانجام در سال ۲۰۱۸، ابوتراب و صابری روش Z-BWM را با استفاده از تئوری اعداد Z جهت در نظرگیری قابلیت اطمینان در کنار عدم قطعیت توسعه دادند [۱]. در ادامه، گام‌های روش Z-BWM آمده است.

1. Best-worst method
2. Guo & Zhao

گام (۱) در این گام، تیم خبره مجموعه‌ای از معیارها را شناسایی و ارزیابی می‌کنند. معیارهای تصمیم‌گیری به صورت مجموعه $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ تعریف می‌شود.

گام (۲) بهترین و بدترین معیار توسط تیم خبره شناسایی می‌شوند. بهترین معیار به صورت C_B و بدترین معیار به صورت C_W معرفی می‌شود.

گام (۳) ارجحیت بهترین معیار نسبت به سایر معیارها بر اساس متغیرهای زبانی مربوط به تئوری اعداد Z (جدول ۳) تعیین می‌شود. همچنین پس از تبدیل متغیرهای زبانی Z به اعداد فازی مثلثی، بردار ارجحیت بهترین معیار نسبت به سایر معیارها به صورت رابطه (۵) بدست می‌آید.

جدول ۳. تبدیل متغیرهای زبانی مربوط به اعداد Z به اعداد فازی مثلثی به همراه شاخص سازگاری (CI) برای روش $Z-BWM$ [۱]

متغیرهای زبانی	تابع عضویت			شاخص سازگاری	متغیرهای زبانی	تابع عضویت			شاخص سازگاری
	l	m	u			l	m	u	
EI,VL	۱	۱	۱	۳	FI,H	۱.۲۶	۱.۶۸	۲.۱۰	۴.۷۱
EI,L	۱	۱	۱	۳	FI,VH	۱.۴۳	۱.۹۰	۲.۳۸	۵.۱۱
EI,M	۱	۱	۱	۳	VI,VL	۰.۷۹	۰.۹۵	۱.۱۱	۳.۱۷
EI,H	۱	۱	۱	۳	VI,L	۱.۳۷	۱.۶۴	۱.۹۲	۴.۴۴
EI,VH	۱	۱	۱	۳	VI,M	۱.۷۸	۲.۱۳	۲.۴۹	۵.۲۷
WI,VL	۰.۲۱	۰.۳۲	۰.۴۷	۲.۰۷	VI,H	۲.۱۰	۲.۵۲	۲.۹۴	۵.۹۲
WI,L	۰.۳۷	۰.۵۵	۰.۸۲	۲.۷۰	VI,VH	۲.۳۸	۲.۸۵	۳.۳۳	۶.۴۵
WI,M	۰.۴۷	۰.۷۱	۰.۸۲	۳.۱۱	AI,VL	۱.۱۱	۱.۲۶	۱.۴۲	۳.۶۸
WI,H	۰.۵۶	۰.۸۴	۱.۲۶	۳.۴۲	AI,L	۱.۹۲	۲.۱۹	۲.۴۷	۵.۲۴
WI,VH	۰.۶۳	۰.۹۵	۱.۴۳	۳.۶۸	AI,M	۲.۴۹	۲.۸۴	۳.۲۰	۶.۲۷
FI,VL	۰.۴۷	۰.۶۳	۰.۷۹	۲.۶۴	AI,H	۲.۹۴	۳.۳۶	۳.۷۸	۷.۰۷
FI,L	۰.۸۲	۱.۱۰	۱.۳۷	۳.۶۰	AI,VH	۳.۳۳	۳.۸۰	۴.۲۸	۷.۷۴
FI,M	۱.۰۷	۱.۴۲	۱.۷۸	۴.۲۲					

$$\tilde{A}_B = (\tilde{a}_{B1}, \tilde{a}_{B2}, \dots, \tilde{a}_{Bn}) \quad (۵)$$

که در آن $\tilde{a}_{Bj}$ نشان‌دهنده اولویت بهترین معیار نسبت به معیار j و n تعداد معیارها است.

گام (۴) ارجحیت سایر معیارها نسبت به بدترین معیار بر اساس متغیرهای زبانی مربوط به تئوری اعداد Z (جدول ۳) تعیین می‌شود. همچنین پس از تبدیل متغیرهای زبانی Z به اعداد فازی مثلثی، بردار ارجحیت سایر معیارها نسبت به بدترین معیار به صورت رابطه (۶) نشان داده می‌شود.

$$\tilde{A}_W = (\tilde{a}_{1W}, \tilde{a}_{2W}, \dots, \tilde{a}_{nW}) \quad (۶)$$

گام (۵) در گام آخر، از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی (روابط ۷-۱۲) برای تعیین وزن فازی بهینه معیارها استفاده می‌شود.

$$\text{Min } \xi \quad (۷)$$

$$\left| \frac{\tilde{w}_B}{\tilde{w}_j} - \tilde{a}_{Bj} \right| \leq \xi, \quad \forall j, \quad (۸)$$

$$\left| \frac{\tilde{w}_j}{\tilde{w}_W} - \tilde{a}_{Bj} \right| \leq \xi, \quad \forall j, \quad (۹)$$

$$\sum_{j=1}^n R(\tilde{w}_j) = 1, \quad (10)$$

$$l_j^w \leq m_j^w \leq u_j^w, \quad \forall j, \quad (11)$$

$$l_j^w \geq 0, \quad \forall j, \quad (12)$$

که در آن $l^\xi \leq m^\xi \leq u^\xi$ است. با در نظر گرفتن $\xi^* = (\theta^*, \theta^*, \theta^*)$ و $\theta^* \leq l^\xi$ مدل بالا به صورت زیر در می‌آید.

Min ξ^*

s. t.

$$(19) - (21),$$

$$\left| \frac{(l_B^w, m_B^w, u_B^w)}{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)} - (l_{Bj}, m_{Bj}, u_{Bj}) \right| \leq (\theta^*, \theta^*, \theta^*), \quad \forall j, \quad (13)$$

$$\left| \frac{(l_j^w, m_j^w, u_j^w)}{(l_W^w, m_W^w, u_W^w)} - (l_{jW}, m_{jW}, u_{jW}) \right| \leq (\theta^*, \theta^*, \theta^*), \quad \forall j,$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

با حل مدل (۱۳) جواب‌های فازی بهینه و شاخص سازگاری بهینه ξ^{θ^*} بدست می‌آید. حداکثر شاخص سازگاری ممکن در رابطه با متغیرهای زبانی برای Z-BWM در جدول (۳) آمده است. نرخ سازگاری با استفاده از رابطه $CR = \frac{\xi^{\theta^*}}{CI}$ محاسبه می‌شود که در آن $CR < 0.1$ قابل قبول است [۴۸، ۲۰].

روش Z-MARCOS. اندازه‌گیری گزینه‌ها و رتبه‌بندی بر اساس راه حل سازش^۱ (MARCOS) یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره جدید است که توسط زلیکو استویچ (۲۰۲۰) معرفی شده است [۵۰]. MARCOS با حل طیف وسیعی از مسائل مختلف تصمیم‌گیری در مطالعات مورد توجه قرار گرفته است. روش MARCOS با تعریف رابطه بین گزینه‌ها و درجه ایده‌آل و ضد ایده‌آل به عنوان نقاط مرجع، توابع سودمندی گزینه‌ها را تعیین می‌کند و یک رتبه‌بندی سازشی از گزینه‌ها را بدست می‌آورد. راندمان بیشتر، سهولت در ساختار و بهینه‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری، تعیین دقیق‌تر درجه مطلوبیت در رابطه با نقطه مرجع، پایداری بیشتر نتایج در شرایط تغییر مقیاس‌های اندازه‌گیری و عدم وجود مشکل وارونگی رتبه‌بندی برخی از مزایای روش MARCOS در مقایسه با سایر روش‌های تصمیم‌گیری مانند SAW, WASPAS, TOPSIS و غیره می‌باشد [۳۹، ۴۰].

گام ۱: اولین گام در تمامی تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره که هدفشان رتبه‌بندی می‌باشد، تشکیل ماتریس تصمیم است. در تکنیک MARCOS با استفاده از n معیار به ارزیابی m گزینه پرداخته می‌شود و به هر گزینه براساس هر معیار امتیاز داده می‌شود. A_i نشانگر گزینه‌ها و C_j نشانگر معیارهای مدنظر است. بنابراین ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری رابطه (۱۶) با درایه‌های اعداد Z تشکیل می‌شود.

$$\tilde{C}_1 \quad \tilde{C}_2 \quad \dots \quad \tilde{C}_n$$

(۱۴)

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_1 \\ \tilde{A}_2 \\ \vdots \\ \tilde{A}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix}$$

به عنوان مثال:

$$\tilde{x}_{11} = (VH, VL)$$

گام ۲: در این گام اعداد Z با توجه به ماتریس تصمیم‌گیری در گام اول درایه‌های ماتریس با استفاده از جدول ۴ به اعداد فازی مثلثی تبدیل شده و یک ماتریس تصمیم‌گیری با درایه‌های اعداد فازی مثلثی بدست می‌آید.

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_1 \\ \tilde{A}_2 \\ \vdots \\ \tilde{A}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{C}_1 & \tilde{C}_2 & \dots & \tilde{C}_n \\ (x_{11}^l, x_{11}^m, x_{11}^u) & (x_{12}^l, x_{12}^m, x_{12}^u) & \dots & (x_{1n}^l, x_{1n}^m, x_{1n}^u) \\ (x_{21}^l, x_{21}^m, x_{21}^u) & (x_{22}^l, x_{22}^m, x_{22}^u) & \dots & (x_{2n}^l, x_{2n}^m, x_{2n}^u) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (x_{m1}^l, x_{m1}^m, x_{m1}^u) & (x_{m2}^l, x_{m2}^m, x_{m2}^u) & \dots & (x_{mn}^l, x_{mn}^m, x_{mn}^u) \end{bmatrix} \quad (15)$$

جدول ۴. تبدیل متغیرهای زبانی مربوط به اعداد Z به اعداد فازی مثلثی

متغیرهای زبانی	تابع عضویت			متغیرهای زبانی	تابع عضویت		
	l	m	u		l	m	u
VH, VH	۸.۵۴	۹.۴۹	۹.۴۹	VH, H	۷.۷۵	۸.۳۷	۸.۳۷
VH, M	۶.۳۶	۷.۰۷	۷.۰۷	VH, L	۴.۹۳	۵.۴۸	۵.۴۸
VH, VL	۲.۸۵	۳.۱۶	۳.۱۶	H, VH	۶.۶۴	۸.۵۴	۹.۴۹
H, H	۵.۸۶	۷.۵۳	۸.۳۷	H, M	۴.۹۵	۶.۳۶	۷.۰۷
H, L	۳.۸۴	۴.۹۳	۵.۴۸	H, VL	۲.۲۱	۲.۸۵	۳.۱۶
MH, VH	۴.۷۴	۶.۶۴	۸.۵۴	MH, H	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳
MH, M	۳.۵۴	۴.۹۵	۶.۳۶	MH, L	۲.۷۴	۳.۸۴	۴.۹۳
MH, VL	۱.۵۸	۲.۱۲	۲.۸۵	M, VH	۲.۸۵	۴.۷۴	۶.۶۴
M, H	۲.۵۱	۴.۲۸	۵.۸۶	M, M	۲.۱۲	۳.۵۴	۴.۹۵
M, L	۱.۶۴	۲.۷۴	۳.۸۳	M, VL	۰.۹۵	۱.۵۸	۲.۲۱
ML, VH	۰.۹۵	۲.۸۵	۴.۷۴	ML, H	۰.۸۴	۲.۵۱	۴.۱۸
ML, M	۰.۷۱	۲.۱۲	۳.۵۴	ML, L	۰.۵۵	۱.۶۴	۲.۷۴
ML, VL	۰.۳۲	۰.۹۵	۱.۵۸	L, VH	۰	۰.۹۵	۲.۸۵
L, H	۰	۰.۸۴	۲.۵۱	L, M	۰	۰.۷۱	۲.۱۲
L, L	۰	۰.۵۵	۱.۶۴	L, VL	۰	۰.۳۲	۰.۹۵
VL, VH	۰	۰	۰.۹۵	VL, H	۰	۰	۰.۸۴
VL, M	۰	۰	۰.۷۱	VL, L	۰	۰	۰.۵۵
VL, VL	۰	۰	۰.۳۱				

گام ۳: در این بخش براساس روابط (۱۷) و (۱۶) مقادیر ایده‌آل $\tilde{A}_{id}$ و ضد ایده‌آل $\tilde{A}_{ai}$ تعیین می‌شوند.

$$\tilde{A}_{ai} = \min_{1 \leq i \leq m} \tilde{x}_{ij}, \quad j \in B^{max}, \quad \max_{1 \leq i \leq m} \tilde{x}_{ij}, \quad j \in C^{min} \quad (16)$$

$$\tilde{A}_{id} = \max_{1 \leq i \leq m} \tilde{x}_{ij}, \quad j \in B^{max}, \quad \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij}, \quad j \in C^{min} \quad (17)$$

عبارت B به معنای معیارهایی می‌باشد که جنبه سود دارند و عبارت C به معنای معیارهایی که جنبه هزینه دارند. گام ۴: در این مرحله نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری صورت می‌گیرد. با استفاده از رابطه (۱۹) نرمال‌سازی برای معیارهای از نوع سود صورت می‌گیرد و با استفاده از رابطه (۱۸) نرمال‌سازی برای معیارهای از نوع هزینه صورت می‌گیرد.

$$\tilde{n}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{id}}{\tilde{x}_{ij}} \text{ if } j \in C \quad (18)$$

$$\tilde{n}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{ij}}{\tilde{x}_{id}} \text{ if } j \in B \quad (19)$$

گام ۵: ماتریس نرمال‌شده با استفاده از رابطه (۲۰) در وزن معیارها ضرب می‌شود تا ماتریس نرمال وزن‌دار شده تشکیل شود.

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{n}_{ij} * \tilde{w}_j \quad (20)$$

گام ۶: در این گام درجه مطلوبیت ایده‌آل $\tilde{K}_i^+$ و ضد ایده‌آل $\tilde{K}_i^-$ گزینه‌ها با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\tilde{K}_i^- = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{S}_{ai}} \quad (21)$$

$$\tilde{K}_i^+ = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{S}_{id}} \quad (22)$$

در رابطه بالا $\tilde{S}_i$ جمع مقادیر هر سطر در ماتریس وزن‌دار شده می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^n \tilde{v}_{ij} \quad (23)$$

گام ۷: در نهایت، عملکرد مطلوب $f(k_i)$ هر گزینه با استفاده از معادله (۲۴) محاسبه می‌شود.

$$f(k_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1 - f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1 - f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (24)$$

در رابطه بالا $f(K_i^-)$ عملکرد مطلوبیت ضد ایده‌آل و $f(K_i^+)$ عملکرد مطلوبیت ایده‌آل برای هر گزینه می‌باشد که از رابطه‌های (۲۵) و (۲۶) محاسبه می‌شود. سپس براساس اعداد بدست آمده از $f(k_i)$ هر گزینه، رتبه‌بندی به صورت نزولی انجام می‌شود.

$$\tilde{f}(K_i^-) = \frac{\tilde{K}_i^+}{\tilde{K}_i^+ + \tilde{K}_i^-} \quad (25)$$

$$\tilde{f}(K_i^+) = \frac{\tilde{K}_i^-}{\tilde{K}_i^+ + \tilde{K}_i^-} \quad (26)$$

مراحل الگوریتم پیاده‌سازی رویکرد یکپارچه Z-BWM-MARCOS در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. الگوریتم پیاده‌سازی رویکرد یکپارچه Z-BWM-MARCOS

ورودی	m: تعداد گزینه‌ها ($i = 1, 2, 3, \dots, m$)
خروجی	n: تعداد معیارها ($j = 1, 2, 3, \dots, n$)
شروع	اولویت‌بندی گزینه‌ها
گام ۱	ارزیابی هر گزینه بر اساس هر یک از معیارهای سه‌گانه روش FMEA (شدت، وقوع و احتمال کشف) توسط تیم خبره و تشکیل ماتریس تصمیم بر اساس متغیرهای زبانی مربوط به تئوری اعداد Z
گام ۲	شناسایی بهترین (C_B) و بدترین (C_W) معیار توسط تیم خبره
گام ۳	تعیین ارجحیت بهترین معیار نسبت به سایر معیارها بر اساس متغیرهای زبانی مربوط به تئوری اعداد Z و تبدیل متغیرها به اعداد فازی مثلی با استفاده از جدول ۳
گام ۴	تعیین ارجحیت سایر معیارها نسبت به بدترین معیار بر اساس متغیرهای زبانی مربوط به تئوری اعداد Z و تبدیل متغیرها به اعداد فازی مثلی با استفاده از جدول ۳
گام ۵	حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی Z-BWM و تعیین درجه اهمیت (وزن) معیارها
گام ۶	تبدیل ماتریس تصمیم متشکل از متغیرهای زبانی Z به اعداد فازی مثلی با استفاده از جدول ۴
گام ۷	تعیین مقادیر ایده‌آل $\tilde{A}_{id}$ و ضد ایده‌آل $\tilde{A}_{ai}$ با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۷)
گام ۸	نرمال‌سازی ماتریس تصمیم با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹)
گام ۹	محاسبه ماتریس نرمال وزن‌دار با استفاده از رابطه (۲۰)
گام ۱۰	محاسبه مقدار $\tilde{G}_i$ بر اساس ماتریس وزن‌دار شده با استفاده از رابطه (۲۳)
گام ۱۱	محاسبه درجه مطلوبیت ایده‌آل $\tilde{K}_i^+$ و ضد ایده‌آل $\tilde{K}_i^-$ گزینه‌ها با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۱)
گام ۱۲	محاسبه مقادیر عملکرد مطلوبیت ضد ایده‌آل $f(K_i^-)$ و عملکرد مطلوبیت ایده‌آل $f(K_i^+)$ با استفاده از روابط (۲۵) و (۲۶) برای هر گزینه
گام ۱۳	محاسبه عملکرد مطلوب $f(k_i)$ هر گزینه با استفاده از معادله (۲۴)
گام ۱۴	اولویت‌بندی گزینه‌ها بر اساس مقادیر عملکرد مطلوب $f(k_i)$ به صورت نزولی
پایان	

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از پیاده‌سازی مراحل Z-BWM-MARCOS در راستای بررسی قابلیت رویکرد پیشنهادی در این تحقیق، سعی بر آن است تا اولویت‌بندی علل شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگاپروژه‌ها با استفاده از این رویکرد صورت پذیرد. فهرست ۱۷ علت شکست شناسایی شده در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. علل شکست مگاپروژه‌ها

نشان	عنوان
C1	نقشه‌های ناقص
C2	تغییرات طراحی
C3	سرعت پایین در تصمیم‌گیری
C4	تاخیر در آموزش
C5	کمبود نیروی کار ماهر
C6	برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف
C7	نارضایتی نیروی کار
C8	کمبود نیروی انسانی

نشان	عنوان
C9	افزایش قیمت مواد
C10	برآورد نادرست مواد مورد نیاز
C11	تاخیر در عقد قرارداد با تامین کنندگان
C12	انتخاب تامین کنندگان نامناسب
C13	شرایط آب و هوایی نامطلوب
C14	پیچیدگی پروژه
C15	طراحی ضعیف شبکه همکاری تامین کنندگان
C16	تأخیر در تامین مواد و تجهیزات
C17	تأخیر در تایید کار

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی در ارزیابی علل شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه‌ها بررسی می‌شود. ابتدا علل شکست موجود توسط تیم FMEA شناسایی گردیده و مقادیر فاکتورهای سه‌گانه (شدت (S)، وقوع (O) و احتمال کشف (D)) با توجه به عدم قطعیت و همچنین عدم اطمینان موجود در معیارها، به ازای هر علت شکست بر اساس مقادیر Z توسط این تیم تعیین می‌گردد. تئوری اعداد Z علاوه بر در نظر گرفتن عدم قطعیت در معیارها، عدم قطعیت نظرات خبرگان را نیز مورد توجه قرار می‌دهد. مقادیر متغیرهای زبانی معیارهای سه‌گانه به ازای علل شکست با توجه به نظرات تیم FMEA در جدول ۷ ارائه شده است. در ادامه، این مقادیر با استفاده از جدول ۴ به مقادیر فازی مثلثی تبدیل می‌شوند.

جدول ۷. مقادیر شاخص‌ها به ازای به ازای علل شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه‌ها در قالب متغیرهای زبانی Z

D	O	S	
ML,H	MH,H	ML,H	C1
MH,VL	H,H	M,H	C2
M,M	MH,VL	VH,H	C3
MH,VL	M,M	VL,H	C4
MH,VL	MH,VL	VH,VH	C5
ML,H	H,H	MH,H	C6
MH,H	MH,VL	ML,VL	C7
VH,H	MH,L	L,H	C8
MH,H	L,VL	MH,L	C9
ML,VL	ML,M	H,L	C10
H,VL	M,H	VL,VH	C11
H,L	ML,M	MH,VL	C12
MH,VL	M,VL	L,VL	C13
VH,H	MH,L	MH,H	C14
ML,VL	MH,H	M,H	C15
M,H	H,H	L,H	C16
MH,L	ML,VL	VH,M	C17

در ادامه و بر اساس فاز دوم رویکرد پیشنهادی، وزن معیارهای سه‌گانه با استفاده از روش Z-BWM تعیین می‌گردد. در این راستا، ابتدا تیم FMEA میزان اهمیت بهترین معیار نسبت به سایر معیارها و همچنین میزان اهمیت معیارها نسبت به بدترین معیار را در قالب متغیرهای کلامی تعیین کرده‌اند. اطلاعات مرتبط با بردار مقایسه میزان اهمیت بهترین معیار نسبت به سایر معیارها جدول ۸ آمده است.

جدول ۸. بردار مقایسه میزان اهمیت بهترین معیار نسبت به سایر معیارها بر اساس متغیرهای کلامی Z

S	O	D
EI,VH	FI,M	VI,M
بهترین معیار - S		

همچنین تیم FMEA میزان اهمیت معیارها نسبت به بدترین معیار را در قالب متغیرهای کلامی Z به صورت جدول ۹ تعیین نموده‌اند.

جدول ۹. بردار مقایسه میزان اهمیت معیارها نسبت به بدترین معیار بر اساس متغیرهای کلامی Z

بدترین معیار - D	
VI,M	S
WI,H	O
EI,VH	D

حال با توجه به جدول ۳، متغیرهای کلامی ارائه شده در جداول ۸ و ۹ به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند. اطلاعات مربوط به بردار مقایسه میزان اهمیت بهترین معیار نسبت به سایر معیار در قالب اعداد فازی در جدول ۱۰ آمده است.

جدول ۱۰. بردار مقایسه میزان اهمیت بهترین معیار نسبت به سایر معیارها بر اساس اعداد فازی مثلثی

S	O	D
(۱,۱,۱)	(۱,۰۷,۱,۴۲,۱,۷۸)	(۱,۷۸,۲,۱۳,۲,۴۹)
بهترین معیار - S		

همچنین بردار میزان اهمیت معیارها نسبت به بدترین معیار در قالب اعداد فازی مثلثی به در جدول ۱۱ آمده است.

جدول ۱۱. بردار مقایسه میزان اهمیت معیارها نسبت به بدترین معیار بر اساس اعداد فازی مثلثی

بدترین معیار - D	
(۱,۷۸,۲,۱۳,۲,۴۹)	S
(۰,۵۶,۰,۸۴,۱,۲۶)	O
(۱,۱,۱)	D

سپس مدل ریاضی Z-BWM با توجه به این اعداد فازی مثلثی اجرا می‌شود.

Min ξ

s. t.

$$\begin{aligned}
 l_2 - 1.07u_1 &\leq \xi u_1; & l_2 - 1.07u_1 &\geq -\xi u_1; \\
 m_2 - 1.42m_1 &\leq \xi m_1; & m_2 - 1.42m_1 &\geq -\xi m_1; \\
 u_2 - 1.78l_1 &\leq \xi l_1; & u_2 - 1.78l_1 &\geq -\xi l_1; \\
 l_2 - 1.78u_3 &\leq \xi u_3; & l_2 - 1.78u_3 &\geq -\xi u_3; \\
 m_2 - 2.13m_3 &\leq \xi m_3; & m_2 - 2.13m_3 &\geq -\xi m_3; \\
 u_2 - 2.49l_3 &\leq \xi l_3; & u_2 - 2.49l_3 &\geq -\xi l_3; \\
 l_1 - 0.56u_3 &\leq \xi u_3; & l_1 - 0.56u_3 &\geq -\xi u_3; \\
 m_1 - 0.84m_3 &\leq \xi m_3; & m_1 - 0.84m_3 &\geq -\xi m_3; \\
 u_1 - 1.26l_3 &\leq \xi l_3; & u_1 - 1.26l_3 &\geq -\xi l_3; \\
 l_1 + 4m_1 + u_1 + l_2 + 4m_2 + u_2 + l_3 + 4m_3 + u_3 &= 6; \\
 l_1 &\leq m_1; & l_2 &\leq m_2; & l_3 &\leq m_3; \\
 m_1 &\leq u_1; & m_2 &\leq u_2; & m_3 &\leq u_3; \\
 l_1 &> 0; & l_2 &> 0; & l_3 &> 0; \\
 \xi &\geq 0
 \end{aligned}$$

(۲۷)

مدل (۲۷) با استفاده از نرم افزار GAMS قابل حل است. وزن معیارهای شدت (S)، وقوع (O) و احتمال کشف (D) به ترتیب (۰.۴۷۶، ۰.۴۲۶، ۰.۳۱۹)، (۰.۲۸۲، ۰.۳۳۲، ۰.۲۸۲) و (۰.۲۱۴، ۰.۲۵۵، ۰.۲۸۲) بدست آمده است. شاخص سازگاری بهینه $\xi^* = ۰.۲۶۶$ بدست می‌آید. برای نرخ سازگاری $۰.۱ < ۰.۰۵ = \frac{۰.۲۶۶}{۵.۲۷}$ ، بنابراین نتایج بدست آمده قابل قبول است.

در فاز سوم رویکرد پیشنهادی و بر اساس نتایج فازهای اول و دوم، اولویت‌بندی علل شکست با استفاده از روش توسعه‌یافته Z-MARCOS انجام می‌پذیرد. در ابتدا، ماتریس تصمیم‌گیری روش Z-MARCOS در قالب درایه‌های اعداد Z تشکیل می‌شود به نحوی که سطرها نشانگر گزینه‌های مورد ارزیابی یا همان علل شکست و ستون‌های این ماتریس نشانگر معیارهای ارزیابی یا همان فاکتورهای سه‌گانه می‌باشد. جدول ۷ ماتریس تصمیم‌گیری مسئله اولویت‌بندی علل شکست در قالب متغیرهای کلامی Z می‌باشد. در ادامه ماتریس تصمیم‌گیری تجمیع یافته از نظر خبرگان با استفاده از جدول ۴ به ماتریسی متشکل از اعداد فازی مثلثی (جدول ۱۲) تبدیل می‌شود.

جدول ۱۲. ماتریس تصمیم‌گیری بر اساس اعداد فازی مثلثی

	D			O			S			
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
C1	۰.۸۴	۲.۵۱	۴.۱۸	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳	۰.۸۴	۲.۵۱	۴.۱۸	C1
C2	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۵.۸۶	۷.۵۳	۸.۳۷	۲.۵۱	۴.۲۸	۵.۸۶	C2
C3	۲.۱۲	۳.۵۴	۴.۹۵	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۷.۵۳	۸.۳۷	۸.۳۷	C3
C4	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۲.۱۲	۳.۵۴	۴.۹۵	.	.	۰.۸۴	C4
C5	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۸.۵۴	۹.۴۹	۹.۴۹	C5
C6	۰.۸۴	۲.۵۱	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳	۹.۳۷	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳	C6
C7	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۰.۳۲	۰.۹۵	۱.۵۸	C7
C8	۷.۵۳	۸.۳۷	۸.۳۷	۲.۷۴	۳.۸۴	۴.۹۳	.	۰.۸۴	۲.۵۱	C8
C9	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳	.	۰.۳۲	۰.۹۵	۲.۷۴	۳.۸۴	۴.۹۳	C9
C10	۰.۳۲	۰.۹۵	۱.۵۸	۰.۷۱	۲.۱۲	۳.۵۴	۳.۸۴	۴.۹۳	۵.۴۸	C10
C11	۲.۲۱	۲.۸۵	۳.۱۶	۲.۵۱	۴.۲۸	۵.۸۶	.	.	۰.۹۵	C11
C12	۳.۸۴	۴.۹۳	۵.۴۸	۰.۷۱	۲.۱۲	۳.۵۴	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	C12
C13	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۰.۹۵	۱.۵۸	۲.۲۱	.	۰.۳۲	۰.۹۵	C13
C14	۷.۵۳	۸.۳۷	۸.۳۷	۲.۷۴	۳.۸۴	۴.۹۳	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳	C14
C15	۰.۳۲	۰.۹۵	۱.۵۸	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳	۲.۵۱	۴.۲۸	۵.۸۶	C15
C16	۲.۵۱	۴.۲۸	۵.۸۶	۵.۸۶	۷.۵۳	۸.۳۷	.	۰.۸۴	۲.۵۱	C16
C17	۲.۷۴	۳.۸۴	۴.۹۳	۰.۳۲	۰.۹۵	۱.۵۸	۶.۳۶	۷.۰۷	۷.۰۷	C17

پس از محاسبه ماتریس تصمیم‌گیری بر اساس اعداد فازی مثلثی، بر اساس گام دوم از روش MARCOS، مقادیر ایده‌آل و ضد ایده‌آل با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۶) به صورت زیر تعیین می‌شود. به عنوان مثال، نحوه محاسبه مقادیر ایده‌آل و ضد ایده‌آل بر اساس معیار اول (D) در ادامه آمده است.

$$\tilde{A}_{aid} = \max ((0.84, 2.51, 4.18), (1.58, 2.21, 2.85), \dots, (2.74, 3.84, 4.93)) = (7.53, 8.37, 8.37)$$

$$\tilde{A}_{id} = \min ((0.84, 2.51, 4.18), (1.58, 2.21, 2.85), \dots, (2.74, 3.84, 4.93)) = (0.32, 0.95, 1.58)$$

در گام بعد، ماتریس نرمال شده در قالب اعداد فازی مثلثی با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه و در ادامه (جدول ۱۳) ارائه شده است. به عنوان مثال، نحوه محاسبه مقدار نرمال شده گزینه اول (C1) بر اساس معیار اول (D) در ادامه آمده است.

$$\tilde{n}_{11} = \left(\frac{0.32}{4.18} = 0.077, \frac{0.32}{2.51} = 0.127, \frac{0.32}{0.84} = 0.381 \right)$$

جدول ۱۳. ماتریس نرمال شده فازی

	D			O			S		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u
AAI	0.038	0.038	0.042	0.000	0.038	0.114	0.000	0.000	0.089
C1	0.077	0.127	0.381	0.499	0.700	0.900	0.089	0.264	0.440
C2	0.112	0.145	0.203	0.700	0.900	1.000	0.264	0.451	0.617
C3	0.065	0.090	0.151	0.189	0.264	0.341	0.793	0.882	0.882
C4	0.112	0.145	0.202	0.253	0.423	0.591	0.000	0.000	0.089
C5	0.112	0.145	0.203	0.189	0.264	0.341	0.900	1.000	1.000
C6	0.077	0.127	0.381	0.700	0.900	1.000	0.440	0.617	0.793
C7	0.042	0.055	0.077	0.189	0.264	0.341	0.034	0.100	0.166
C8	0.038	0.038	0.042	0.327	0.459	0.589	0.000	0.089	0.264
C9	0.042	0.055	0.077	0.000	0.038	0.114	0.289	0.405	0.519
C10	0.203	0.337	1.000	0.085	0.253	0.423	0.405	0.519	0.577
C11	0.101	0.112	0.145	0.300	0.511	0.700	0.000	0.000	0.100
C12	0.058	0.065	0.083	0.085	0.253	0.423	0.166	0.233	0.300
C13	0.112	0.145	0.203	0.114	0.189	0.264	0.000	0.034	0.100
C14	0.038	0.038	0.042	0.327	0.450	0.589	0.440	0.617	0.793
C15	0.203	0.337	1.000	0.499	0.700	0.900	0.264	0.451	0.617
C16	0.055	0.075	0.127	0.700	0.900	1.000	0.000	0.089	0.264
C17	0.065	0.083	0.117	0.038	0.114	0.189	0.670	0.745	0.745
AID	0.203	0.337	1.000	0.700	0.900	1.000	0.900	1.000	1.000

حال، پس از نرمال سازی ماتریس تصمیم، ماتریس نرمال شده وزن دار با در نظر گرفتن وزن های بدست آمده حاصل از پیاده سازی روش Z-BWM برای شاخص ها، ماتریس وزن دار شده فازی با استفاده از رابطه (۲۰) به دست می آید (جدول ۱۴ مشاهده شود). به عنوان مثال، نحوه محاسبه مقدار وزن دار شده گزینه اول (C1) بر اساس معیار اول (D) در ادامه آمده است.

$$\tilde{v}_{11} = (0.077, 0.127, 0.381) \times (0.214, 0.255, 0.282) = (0.016, 0.033, 0.107)$$

جدول ۱۴. ماتریس وزن دار شده فازی

	D			O			S		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u
AAI	0.008	0.010	0.012	0.000	0.011	0.036	0.000	0.000	0.042
C1	0.016	0.033	0.107	0.116	0.197	0.287	0.038	0.126	0.210
C2	0.024	0.037	0.057	0.162	0.254	0.319	0.113	0.215	0.294
C3	0.014	0.023	0.043	0.044	0.074	0.109	0.338	0.420	0.420

	D			O			S			
C4	۰.۰۴۲	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۱۸۹	۰.۱۱۹	۰.۰۵۹	۰.۰۵۷	۰.۰۳۷	۰.۰۲۴	
C5	۰.۴۷۶	۰.۴۷۶	۰.۳۸۳	۰.۱۰۹	۰.۰۷۴	۰.۰۴۴	۰.۰۵۷	۰.۰۳۷	۰.۰۲۴	
C6	۰.۳۷۸	۰.۲۹۴	۰.۱۸۸	۰.۳۱۹	۰.۲۵۴	۰.۱۶۲	۰.۱۷	۰.۰۳۳	۰.۰۱۶	
C7	۰.۰۷۹	۰.۰۴۸	۰.۰۱۴	۰.۱۰۹	۰.۰۷۴	۰.۰۴۴	۰.۰۲۲	۰.۰۱۴	۰.۰۰۹	
C8	۰.۱۲۶	۰.۰۴۲	۰.۰۰۰	۰.۱۸۸	۰.۱۲۹	۰.۰۷۶	۰.۰۱۲	۰.۰۱۰	۰.۰۰۸	
C9	۰.۲۴۷	۰.۱۹۳	۰.۱۲۳	۰.۰۳۶	۰.۰۱۱	۰.۰۰۰	۰.۰۲۲	۰.۰۱۴	۰.۰۰۹	
C10	۰.۲۷۵	۰.۲۴۷	۰.۱۷۲	۰.۱۳۵	۰.۰۷۱	۰.۰۲۰	۰.۲۸۲	۰.۰۸۶	۰.۰۴۳	
C11	۰.۰۴۸	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۲۲۳	۰.۱۴۴	۰.۰۷۰	۰.۰۴۱	۰.۰۲۹	۰.۰۲۲	
C12	۰.۱۴۳	۰.۱۱۱	۰.۰۷۱	۰.۱۳۵	۰.۰۷۱	۰.۰۲۰	۰.۰۲۴	۰.۰۱۷	۰.۰۱۲	
C13	۰.۰۴۸	۰.۰۱۶	۰.۰۰۰	۰.۰۸۴	۰.۰۵۳	۰.۰۲۶	۰.۰۵۷	۰.۰۳۷	۰.۰۲۴	
C14	۰.۳۷۸	۰.۲۹۴	۰.۱۸۸	۰.۱۸۸	۰.۱۲۹	۰.۰۷۶	۰.۰۱۲	۰.۰۱۰	۰.۰۰۸	
C15	۰.۲۹۴	۰.۲۱۵	۰.۱۱۳	۰.۲۸۷	۰.۱۹۷	۰.۱۱۶	۰.۲۸۲	۰.۰۸۶	۰.۰۴۳	
C16	۰.۱۲۶	۰.۰۴۲	۰.۰۰۰	۰.۳۱۹	۰.۲۵۴	۰.۱۶۲	۰.۰۳۶	۰.۰۱۹	۰.۰۱۲	
C17	۰.۳۵۵	۰.۳۵۵	۰.۲۸۵	۰.۰۶۰	۰.۰۳۲	۰.۰۰۹	۰.۰۳۳	۰.۰۲۱	۰.۰۱۴	
AID	۰.۴۷۶	۰.۴۷۶	۰.۳۸۳	۰.۳۱۹	۰.۲۵۴	۰.۱۶۲	۰.۲۸۲	۰.۰۸۶	۰.۰۴۳	

در ادامه، مراحل روش MARCOS فازای اجرا شده و علل شکست بر اساس امتیاز $f(k_i)$ بدست آمده با استفاده از رابطه (۲۴)، به صورت نزولی اولویت‌بندی می‌شود. نتیجه پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی و اولویت‌بندی علل شکست مگاپروژه‌ها در جدول ۱۵ آمده است. به عنوان مثال، مقدار $f(k_1)$ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$f(k_1) = \frac{0.488 + 24.174}{1 + \frac{1 - 0.632}{0.632} + \frac{1 - 0.13}{0.13}} = 0.312$$

جدول ۱۵. محاسبات و نتایج روش Z-MARCOS

Rank	$f(K_i)$	K-	K+	fK-	fK+	$\tilde{f}(K-)$			$\tilde{f}(K+)$			
						l	m	u	l	m	u	
۸	۰.۳۱۲	۲۴.۱۷۴	۰.۴۸۸	۰.۰۱۳	۰.۶۳۲	۰.۰۰۴	۰.۰۱۱	۰.۰۲۷	۰.۰۴۹	۰.۴۵۳	۱.۹۲۹	C1
۴	۰.۵۲۸	۳۰.۶۰۹	۰.۶۴۹	۰.۰۱۷	۰.۸۰۰	۰.۰۰۷	۰.۰۱۶	۰.۰۳۰	۰.۰۸۷	۰.۶۴۳	۲.۱۳۹	C2
۵	۰.۵۰۰	۲۹.۱۶۱	۰.۶۴۶	۰.۰۱۷	۰.۷۶۲	۰.۰۱۰	۰.۰۱۷	۰.۰۲۵	۰.۱۱۴	۰.۶۵۸	۱.۸۲۳	C3
۱۵	۰.۰۶۵	۱۱.۰۸۹	۰.۲۲۲	۰.۰۰۶	۰.۲۹۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۵	۰.۰۱۳	۰.۰۲۴	۰.۱۹۹	۰.۹۱۹	C4
۲	۰.۶۴۲	۳۲.۹۷۹	۰.۷۳۱	۰.۰۱۹	۰.۸۶۲	۰.۰۱۱	۰.۰۱۹	۰.۰۲۸	۰.۱۳۰	۰.۷۴۷	۲.۰۴۹	C5
۱	۰.۷۲۵	۳۵.۸۹۵	۰.۷۵۸	۰.۰۲۰	۰.۹۳۸	۰.۰۰۹	۰.۰۱۹	۰.۰۳۶	۰.۱۰۶	۰.۷۳۸	۲.۵۶۸	C6
۱۶	۰.۰۴۲	۸.۸۰۸	۰.۱۸۱	۰.۰۰۵	۰.۲۳۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۴	۰.۰۰۹	۰.۰۱۹	۰.۱۷۳	۰.۶۶۹	C7
۱۳	۰.۰۸۴	۱۲.۶۷۷	۰.۲۵۳	۰.۰۰۷	۰.۳۳۱	۰.۰۰۲	۰.۰۰۶	۰.۰۱۴	۰.۰۲۴	۰.۲۳۱	۱.۰۴۰	C8
۱۱	۰.۱۰۱	۱۳.۵۱۵	۰.۲۸۵	۰.۰۰۷	۰.۳۵۳	۰.۰۰۳	۰.۰۰۷	۰.۰۱۴	۰.۰۳۸	۰.۲۷۷	۰.۹۷۴	C9
۶	۰.۴۱۳	۲۷.۶۶۵	۰.۵۶۳	۰.۰۱۵	۰.۷۲۳	۰.۰۰۶	۰.۰۱۳	۰.۰۳۱	۰.۰۶۸	۰.۵۱۵	۲.۲۰۹	C10
۱۴	۰.۰۷۸	۱۳.۱۳۳	۰.۲۴۴	۰.۰۰۶	۰.۳۱۷	۰.۰۰۲	۰.۰۰۶	۰.۰۱۴	۰.۰۲۶	۰.۲۲۰	۰.۹۹۶	C11
۱۲	۰.۰۸۹	۱۲.۷۸۶	۰.۲۶۴	۰.۰۰۷	۰.۳۳۴	۰.۰۰۳	۰.۰۰۶	۰.۰۱۳	۰.۰۳۰	۰.۲۵۳	۰.۹۶۲	C12
۱۷	۰.۰۲۹	۷.۳۹۲	۰.۱۴۸	۰.۰۰۴	۰.۱۹۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۳	۰.۰۰۸	۰.۰۱۵	۰.۱۳۵	۰.۶۰۳	C13

Rank	$f(K_i)$	K-	K+	fK-	fK+	$\tilde{f}(K-)$			$\tilde{f}(K+)$			
						l	m	u	l	m	u	
۷	۰.۳۹۰	۲۶.۳۲۹	۰.۵۵۹	۰.۰۱۵	۰.۶۸۸	۰.۰۰۷	۰.۰۱۴	۰.۰۲۶	۰.۰۷۹	۰.۵۵۱	۱.۸۴۴	C14
۳	۰.۶۳۲	۳۴.۲۵۱	۰.۶۹۳	۰.۰۱۸	۰.۸۹۵	۰.۰۰۷	۰.۰۱۶	۰.۰۳۸	۰.۰۷۹	۰.۶۳۴	۲.۷۵۵	C15
۱۰	۰.۲۲۶	۲۰.۳۴۲	۰.۴۲۰	۰.۰۱۱	۰.۵۳۱	۰.۰۰۴	۰.۰۱۰	۰.۰۲۱	۰.۰۵۰	۰.۴۰۱	۱.۵۳۵	C16
۹	۰.۳۰۸	۲۲.۹۳۵	۰.۵۰۸	۰.۰۱۳	۰.۵۹۹	۰.۰۰۷	۰.۰۱۳	۰.۰۲۰	۰.۰۸۹	۰.۵۱۹	۱.۴۳۰	C17

با توجه به جدول ۱۵ مشاهده می‌شود که بر اساس رویکرد Z-BWM-MARCOS علل C6 (برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف)، C5 (کمبود نیروی کار ماهر) و C15 (طراحی ضعیف شبکه همکاری تامین کنندگان) به ترتیب با امتیازهای ۰.۷۲۵، ۰.۶۴۲ و ۰.۶۳۲ در اولویت‌های اول الی سوم قرار گرفته‌اند. به بیانی دیگر این علل به عنوان علل اصلی شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگاپروژه‌ها انتخاب شده و نیازمند برنامه ریزی جهت اقدامات اصلاحی / پیشگیرانه می‌باشند همچنین با توجه به این نتایج رویکرد پیشنهادی، مشاهده می‌شود که گزینه C13 (شرایط آب و هوایی نامطلوب) با امتیاز ۰.۰۲۹ در اولویت آخر قرار گرفته در اولویت آخر قرار گرفته و در حال حاضر نیازی به اقدامات پیشگیرانه نمی‌باشد و در حال حاضر در اولویت رسیدگی قرار ندارد.

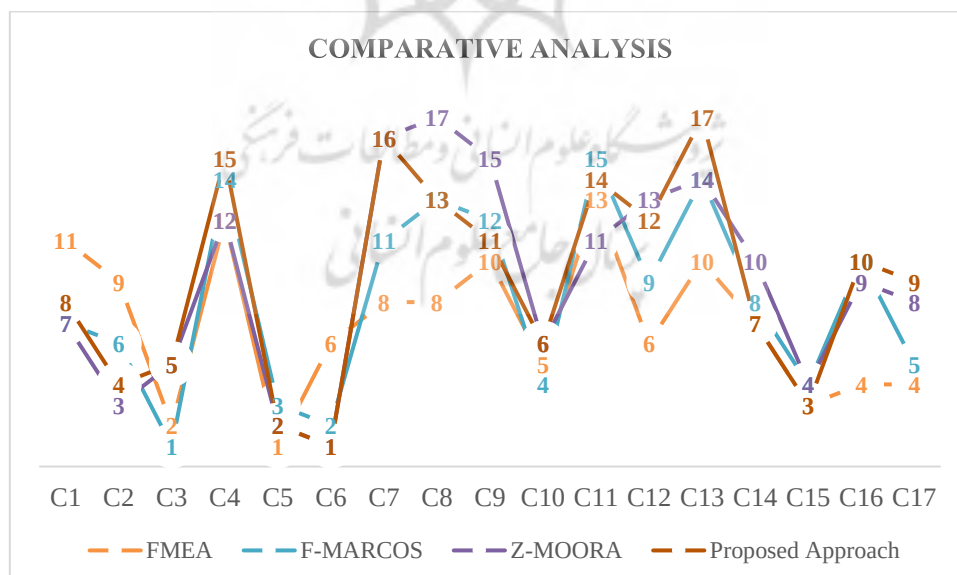
مقایسه‌ی روش ارائه‌شده با روش‌های قبلی. در ادامه، به منظور نشان دادن اعتبار و کارایی روش پیشنهادی و صحت خروجی‌های بدست آمده، این روش با روش‌های Z-MOORA (روش توسعه‌یافته MOORA بر اساس تئوری اعداد Z)، F-MARCOS (روش توسعه‌یافته MARCOS در محیط فازی) و FMEA (امتیاز RPN) مقایسه می‌شود (جدول ۱۶).

جدول ۱۶. مقایسه اولویت‌بندی حاصل از رویکرد پیشنهادی (Z-BWM-MARCOS) و روش‌های مرسوم

Proposed Approach		Z-MOORA		F-MARCOS		FMEA		
Rank	Score	Rank	Score	Rank	Score	Rank	Score	
۸	۰.۳۱۲	۷	۰.۰۴۸	۷	۰.۵۱۹	۱۱	۹۶	C1
۴	۰.۵۲۸	۳	۰.۰۸۰	۶	۰.۵۴۷	۹	۱۴۰	C2
۵	۰.۵۰۰	۵	۰.۰۶۷	۱	۰.۸۶۳	۲	۲۴۰	C3
۱۵	۰.۰۶۵	۱۲	۰.۰۱۲	۱۴	۰.۲۷۹	۱۲	۹۰	C4
۲	۰.۶۴۲	۲	۰.۰۸۸	۳	۰.۷۹۶	۱	۲۸۸	C5
۱	۰.۷۲۵	۱	۰.۰۹۲	۲	۰.۸۰۴	۶	۱۶۸	C6
۱۶	۰.۰۴۲	۱۶	-۰.۰۲۲	۱۱	۰.۴۰۰	۸	۱۴۴	C7
۱۳	۰.۰۸۴	۱۷	-۰.۰۳۰	۱۳	۰.۲۸۱	۸	۱۴۴	C8
۱۱	۰.۱۰۱	۱۵	-۰.۰۱۴	۱۲	۰.۳۴۸	۱۰	۱۲۰	C9
۶	۰.۴۱۳	۶	۰.۰۵۴	۴	۰.۷۶۱	۵	۱۷۵	C10
۱۴	۰.۰۷۸	۱۱	۰.۰۱۳	۱۵	۰.۱۹۸	۱۳	۷۰	C11
۱۲	۰.۰۸۹	۱۳	-۰.۰۰۲	۹	۰.۴۲۱	۶	۱۶۸	C12
۱۷	۰.۰۲۹	۱۴	-۰.۰۰۳	۱۴	۰.۲۷۹	۱۰	۱۲۰	C13
۷	۰.۳۹۰	۱۰	۰.۰۱۵	۸	۰.۵۱۵	۷	۱۶۰	C14
۳	۰.۶۳۲	۴	۰.۰۷۷	۴	۰.۷۶۱	۳	۱۹۶	C15
۱۰	۰.۲۲۶	۹	۰.۰۳۳	۱۰	۰.۴۱۸	۴	۱۹۲	C16
۹	۰.۳۰۸	۸	۰.۰۴۱	۵	۰.۶۴۳	۴	۱۹۲	C17

با توجه به جدول ۱۶ مشاهده می‌شود که بر اساس روش FMEA سنتی، علل C5 (کمبود نیروی کار ماهر) با امتیاز ۲۸۸، C3 (سرعت پایین در تصمیم‌گیری) با امتیاز ۲۴۰ و C15 (طراحی ضعیف شبکه همکاری تامین کنندگان) با امتیاز ۱۹۶ به ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفته و در اولویت توجه و رسیدگی می‌باشند. علاوه بر این علل C16 (تأخیر در تامین مواد و تجهیزات) و C17 (تأخیر در تایید کار) به طور مشترک در جایگاه چهارم، C6 (برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف) و C12 (انتخاب تامین کنندگان نامناسب) به طور مشترک در جایگاه ششم، C7 (نارضایتی نیروی کار) و C8 (کمبود نیروی انسانی) به طور مشترک در جایگاه هشتم و C9 (افزایش قیمت مواد) و C13 (شرایط آب و هوایی نامطلوب) نیز به طور مشترک در جایگاه دهم قرار گرفته‌اند. بنابراین، رویکرد FMEA سنتی علل شکست را در سیزده دسته به جای هفده دسته رتبه‌بندی کرده است که این موضوع موجب سردرگمی تصمیم گیرندگان در فرایند رسیدگی به علل شکست می‌شود. این ضعف در رویکرد MARCOS فازی با توجه به در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت و وزن‌دهی به فاکتورها بهبود یافته است اما به صورت کامل بر طرف نشده است. چرا که بر اساس اولویت‌بندی حاصل از این روش، C3 (سرعت پایین در تصمیم‌گیری) با امتیاز ۰.۸۶۳ در اولویت اول، C6 (برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف) با امتیاز ۰.۸۰۴ در اولویت دوم و C5 (کمبود نیروی کار ماهر) با امتیاز ۰.۷۹۶ در اولویت سوم قرار گرفته‌اند. از طرفی C10 (برآورد نادرست مواد مورد نیاز) و C15 (طراحی ضعیف شبکه همکاری تامین کنندگان) به طور مشترک در جایگاه چهارم و همچنین C4 (تأخیر در آموزش) و C13 (شرایط آب و هوایی نامطلوب) نیز به طور مشترک در جایگاه چهاردهم قرار گرفته‌اند و به این ترتیب روش F-MARCOS نیز علل شکست را به جای هفده دسته، در پانزده دسته ارائه کرده است و رتبه‌بندی ناقصی از علل شکست در این مسئله ارائه کرده است. در ادامه، و بر اساس نتایج حاصل از روش Z-MOORA، علل C6 (برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف) با امتیاز ۰.۰۹۲، C5 (کمبود نیروی کار ماهر) با امتیاز ۰.۰۸۸ و C2 (تغییرات طراحی) با امتیاز ۰.۰۸۰ به ترتیب در اولویت‌های اول تا سوم قرار گرفته‌اند. همچنین با توجه شکل ۳ مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن عدم اطمینان در کنار عدم قطعیت به واسطه توسعه روش‌ها بر اساس تئوری اعداد Z، مشکل عدم ارائه رتبه‌بندی کامل در نتایج روش‌های Z- و Z-MOORA و MARCOS به طور کامل حل شده و بر اساس نتایج این دو روش، علل شکست در هفده دسته رتبه‌بندی شده‌اند.

پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی با روش Z-MOORA به عنوان یک روش قابل اطمینان [۱۸] در اولویت‌بندی علل شکست تقریباً مشابه عمل کرده و نتایج ضریب همبستگی ۰.۹۰۹ را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت روش پیشنهادی قابل اطمینان و معتبر است.



شکل ۳. مقایسه اولویت‌بندی علل شکست مگا پروژه‌ها بر اساس رویکردهای Z-BWM-MARCOS (رویکرد پیشنهادی پژوهش)، MARCOS Fازی و FMEA (امتیاز RPN)

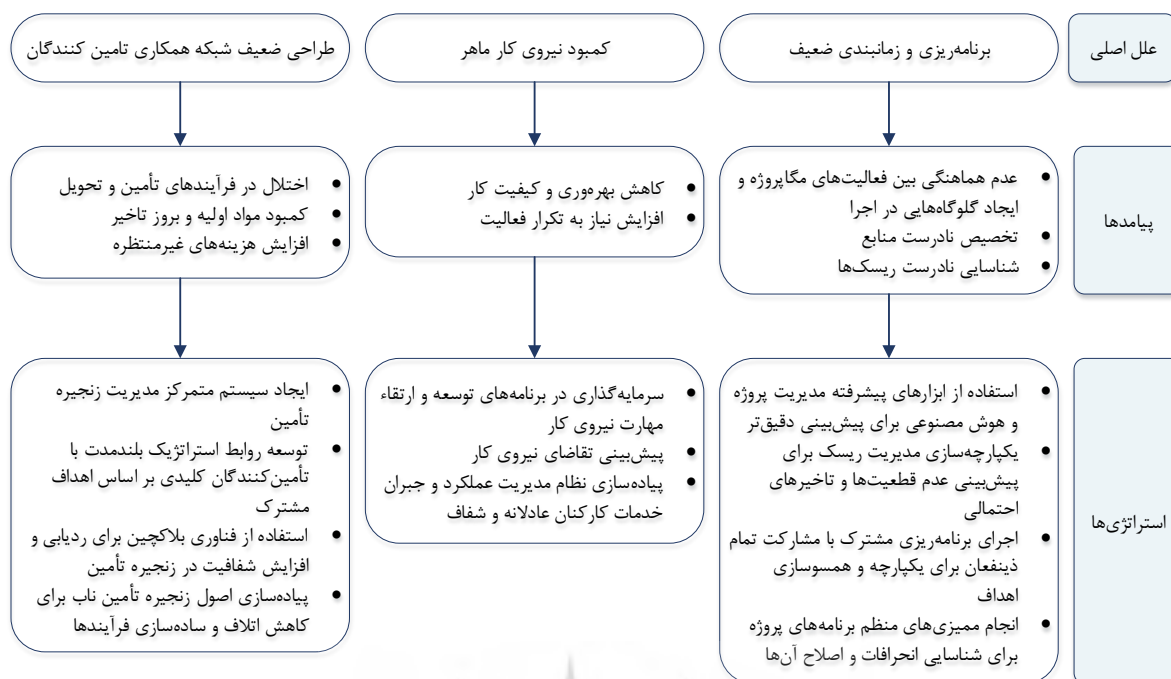
ملاحظات مدیریتی. در این بخش، تحلیل‌های مربوط به پیامدها و همچنین استراتژی‌هایی برای مقابله با علل اصلی شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه‌ها ارائه می‌شود. بر اساس نتایج این پژوهش، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف، کمبود نیروی کار ماهر و طراحی ضعیف شبکه همکاری تامین کنندگان به عنوان علل اصلی شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه‌ها انتخاب شدند. در ادامه، پیامدها و استراتژی‌های مقابله با این علل تشریح می‌گردد.

در این پژوهش، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف به عنوان مهم‌ترین علت شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه‌ها انتخاب شده است. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف اغلب منجر به تخصیص نادرست منابع، شناسایی نادرست ریسک‌ها و ایجاد گلوگاه‌هایی در اجرای مگا پروژه می‌شود. برای رفع این مشکل، استفاده از ابزارهای پیشرفته مدیریت پروژه و تحلیل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی ضروری است. این ابزارها دقت پیش‌بینی را افزایش داده و به مدیران پروژه امکان می‌دهد برنامه‌ها را به صورت پویا با چالش‌های اجرای پروژه تطبیق دهند. یکپارچه‌سازی شیوه‌های جامع مدیریت ریسک، تضمین می‌کند که عدم قطعیت‌ها و تأخیرات احتمالی به صورت سیستماتیک در برنامه‌ریزی لحاظ شوند. علاوه بر این، ایجاد برنامه‌ریزی مشترک از طریق مشارکت ذینفعان، هماهنگی انتظارات را تقویت کرده و اطمینان حاصل می‌کند که اهداف پروژه همسو، واقع‌بینانه و قابل دستیابی هستند. انجام میزهای منظم برنامه‌های پروژه نیز برای نظارت بر پیشرفت، شناسایی انحرافات و اجرای اقدامات اصلاحی به موقع ضروری است.

کمبود نیروی کار ماهر چالشی جدی است که مستقیماً بر بهره‌وری، کیفیت کار و پایداری به برنامه‌های زمانی در مگا پروژه‌ها تأثیر می‌گذارد. برای رفع این مشکل، سرمایه‌گذاری در برنامه‌های توسعه نیروی کار که بر ارتقاء مهارت‌ها و ظرفیت‌سازی تمرکز دارند، حیاتی است. ایجاد همکاری با مؤسسات آموزشی و مراکز آموزش حرفه‌ای می‌تواند جریان مداومی از نیروی کار ماهر متناسب با نیازهای مگا پروژه ایجاد کند. پیش‌بینی تقاضای نیروی کار و اطمینان از استخدام به موقع منابع، از بروز گلوگاه‌ها در مراحل حیاتی مگا پروژه جلوگیری می‌کند. استراتژی‌های نگهداشت نیروی کار، شامل نظام مدیریت عملکرد، برنامه‌های رفاهی کارکنان و مسیرهای پیشرفت شغلی شفاف، برای کاهش ترک کار و حفظ نیروی کار متعهد ضروری هستند.

طراحی ضعیف شبکه همکاری تامین کنندگان، فرآیندهای تامین و تحویل را مختل کرده و منجر به کمبود مواد اولیه، تأخیرات و افزایش هزینه‌ها می‌شود. برای رفع این چالش، مدیران باید بر ایجاد سیستم‌های متمرکز مدیریت زنجیره تامین تمرکز کنند که هماهنگی لحظه‌ای میان تمامی تامین کنندگان را فراهم کند. استفاده از فناوری‌هایی مانند بلاک‌چین می‌تواند شفافیت و قابلیت ردیابی در فرآیندهای تهیه را تضمین کرده و اعتماد بین ذینفعان را افزایش دهد. توسعه همکاری‌های بلندمدت با تامین کنندگان کلیدی، بر اساس اهداف مشترک و انگیزه‌های عملکردی، یک زنجیره تامین قابل اعتمادتر و پاسخگوتر را تقویت می‌کند. اجرای اصول زنجیره تامین ناب، اتلاف را به حداقل رسانده و فعالیت‌های مربوط به تامین را ساده می‌کند. توسعه ارتباطات و همکاری‌ها نیز تضمین می‌کند که تامین کنندگان، مدیران پروژه و سایر ذینفعان، پاسخگوی نیازهای در حال تغییر مگا پروژه باقی بمانند.

در ادامه، پیامدها و استراتژی‌های مقابله با علل اصلی شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه‌ها، در شکل ۴ نیز نمایش داده شده است.



شکل ۴. پیامدها و استراتژی‌های مقابله با علل اصلی شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه‌ها

پرداختن به این سه علت اصلی با تصمیم‌گیری‌های مدیریتی هدفمند، می‌تواند به کاهش قابل توجه تأخیرات زمانی و افزایش هزینه‌ها در مگا پروژه‌ها کمک کند و احتمال موفقیت مگا پروژه‌ها را افزایش دهد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

اهمیت مگا پروژه‌ها در دنیای امروز قابل چشم‌پوشی نیست. مگا پروژه‌ها برای پاسخ به نیازهای زیرساختی جهانی، پیشبرد توسعه اقتصادی و شکل‌دهی به آینده جوامع ضروری هستند. با این حال، اکثر مگا پروژه‌ها با شکست مواجه می‌شوند. پیچیدگی و مقیاس ذاتی مگا پروژه‌ها آن‌ها را در برابر چالش‌های متعددی، به‌ویژه تأخیرهای زمانی و افزایش هزینه‌ها، آسیب‌پذیر می‌سازد. افزایش هزینه نسبت به بودجه برنامه‌ریزی شده و افزایش زمان نسبت به برنامه زمان‌بندی، دو مشکل رایج در اجرای مگا پروژه‌ها هستند. بنابراین، ارزیابی علل شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه‌ها از جمله مسائل مهم در مدیریت مگا پروژه‌ها است. این مطالعه بر اهمیت پرداختن به علل تأخیرها و افزایش هزینه‌ها در مگا پروژه‌ها تأکید دارد که همچنان از چالش‌های مهم در مدیریت آن‌ها محسوب می‌شوند. یکی از رویکردهای شناسایی و ارزیابی علل شکست، روش FMEA است که به دلیل تحلیل پذیری مناسب، جزء پرکاربردترین روش‌ها است. با وجود گستردگی کاربرد این روش، نقاط ضعف و کاستی‌های این روش منجر شده است که برخی از پژوهشگران به دنبال بهبود این روش مرسوم باشند. بنابراین در این پژوهش، یک رویکرد توسعه‌یافته از FMEA با استفاده از روش Z-BWM جهت وزن‌دهی به معیارها و Z-MARCOS جهت اولویت‌بندی علل شکست و شناسایی علل اصلی ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، به ترتیب، "برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف"، "کمبود نیروی کار ماهر" و "طراحی ضعیف شبکه همکاری تامین کنندگان" به عنوان علل اصلی شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه‌ها انتخاب شده و در اولویت توجه و رسیدگی می‌یاشند. از طرفی، "شرایط آب و هوایی نامطلوب" به عنوان اولویت آخر انتخاب شده و در حال حاضر نیازمند اقدامات پیشگیرانه نمی‌باشد. شیداوو و ختلی^۱ (۲۰۲۰) در پژوهش خود، به ارزیابی علل افزایش زمان و هزینه در مگا پروژه‌ها با استفاده از پرسشنامه و نظرات خبرگان پرداختند [۴۸]. در حالی که در پژوهش حاضر،

ارزیابی علل بر اساس معیارهای سه‌گانه روش FMEA انجام شده است و علل اصلی با استفاده از روش FMEA توسعه یافته مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره شناسایی شده است. استفاده از روش توسعه یافته منجر به رفع برخی نواقص روش FMEA مرسوم مانند عدم ارائه رتبه‌بندی کامل گزینه‌ها و عدم نظر گرفتن وزن برای معیارها شده است. تعداد محدود خبرگان در حوزه مدیریت مگا پروژه‌ها و همچنین عدم تخصیص وزن به قضاوت‌های هر یک از خبرگان بر اساس دانش و میزان تجربه آنها، از جمله محدودیت‌های این پژوهش می‌باشد. توسعه روش FMEA با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط‌های عدم قطعیت نظیر فازی فیثاغورثی، q-rung، فازی کروی و فازی فرماتیان و همچنین استفاده از رویکردهای ترکیبی عینی و ذهنی برای بدست آوردن وزن معیارهای ارزیابی از جمله پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی است. فارغ از مسئله استفاده شده برای پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی این پژوهش، این رویکرد در سناریوهای مختلف شناسایی و تحلیل ریسک و علل شکست قابل اجرا خواهد بود. همچنین ما تحقیقات خود را در راستای رفع برخی علل اصلی شکست شناسایی شده در مطالعه حاضر نظیر "برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف" و "طراحی ضعیف شبکه همکاری تامین‌کنندگان"، ما در آینده به بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی و کاهش زمان اتمام مگا پروژه‌ها با استفاده از ماژولار سازی آن‌ها و همچنین طراحی شبکه تامین‌کنندگان با توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی گسترش خواهیم داد.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

منابع

- Aboutorab, H., Saberi, M., Asadabadi, M. R., Hussain, O., Chang, E. (2018). ZBWM: The Z-number extension of Best Worst Method and its application for supplier development. *Expert Systems with Applications*, 107, 115-125.
- Aiyetan, A. O., Das, D. K. (2022). Factors and strategies for improving construction management on sites in mega-projects in South Africa: An explorative survey. *Infrastructures*, 7(2), 19.
- Alhammadi, Y., Al-Mohammad, M. S., Rahman, R. A. (2024). Modeling the causes and mitigation measures for cost overruns in building construction: The case of higher education projects. *Buildings*, 14(2), 487.
- Aljohani, A., Ahiaga-Dagbui, D., Moore, D. (2017). Construction projects cost overrun: What does the literature tell us?. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 8(2), 137.
- Alkhatib, M., Altarazi, S. (2019). A customized root cause analysis approach for cost overruns and schedule slippage in paper-machine-building projects. *Management and Production Engineering Review*.
- Alvand, A., Mirhosseini, S. M., Ehsanifar, M., Zeighami, E., Mohammadi, A. (2023). Identification and assessment of risk in construction projects using the integrated FMEA-SWARA-WASPAS model under fuzzy environment: a case study of a construction project in Iran. *International journal of construction management*, 23(3), 392-404.
- Amini, A., Alinezhad, A., Gharakhani, D. (2023). A New Rough BWM Approach for Evaluating and Selecting a Sustainable Supplier in Supply Chain Management. *Journal of Industrial Management Perspective*, 13(3), 9-38. (In Persian).
- Baloyi, L., Bekker, M. (2011). Causes of construction cost and time overruns: The 2010 FIFA World Cup stadia in South Africa. *Acta Structilia: Journal for the Physical and Development Sciences*, 18(1), 51-67.
- Boateng, P., Chen, Z., Ogunlana, S. O. (2015). An Analytical Network Process model for risks prioritisation in megaprojects. *International journal of project management*, 33(8), 1795-1811.
- Castelblanco, G., Fenoalte, E. M., De Marco, A., Demagistris, P., Petrucci, S., Zeppegno, D. (2024). Combining stakeholder and risk management: Multilayer network analysis for complex megaprojects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 150(2), 04023161.
- Corrente, S., Greco, S., Rezaei, J. (2024). Better decisions with less cognitive load: The Parsimonious BWM. *Omega*, 126, 103075.
- Del Cerro Santamaria, G. (2019). Megaprojects, development and competitiveness: Building the infrastructure for globalization and neoliberalism. *Athens journal of social sciences*, 6(4), 263-290.
- Denicol, J., Davies, A., Krystallis, I. (2020). What are the causes and cures of poor megaproject performance? A systematic literature review and research agenda. *Project management journal*, 51(3), 328-345.

14. Famiyeh, S., Amoatey, C. T., Adaku, E., Agbenohevi, C. S. (2017). Major causes of construction time and cost overruns: A case of selected educational sector projects in Ghana. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 15(2), 181-198.
15. Flyvbjerg, B. (2017). Introduction: The iron law of megaproject management. *Bent Flyvbjerg*, 1-18.
16. Flyvbjerg, B. (2021). Make megaprojects more modular. *Harvard Business Review*, 58-63.
17. Flyvbjerg, B. (2014). What you should know about megaprojects and why: An overview. *Project management journal*, 45(2), 6-19.
18. Ghiaci, A. M., Ghouschi, S. J. (2023). Assessment of barriers to IoT-enabled circular economy using an extended decision-making-based FMEA model under uncertain environment. *Internet of Things*, 22, 100719.
19. Memarpour Ghiaci, A., Abbasi, M., Piri, M., Akhavan, P. (2024). Barriers to blockchain adoption in humanitarian logistics in an uncertain environment. *Business Intelligence Management Studies*, 12(47), 153-184. (In Persian).
20. Ghouschi, S. J., 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. Ghouschi, S. J., Jalalat, S. M., Bonab, S. R., Ghiaci, A. M., Haseli, G., Tomaskova, H. (2022). Evaluation of wind turbine failure modes using the developed SWARA-CoCoSo methods based on the spherical fuzzy environment. *Ieee Access*, 10, 86750-86764.
22. Ghouschi, S. J., Bonab, S. R., Ghiaci, A. M., Haseli, G., Tomaskova, H., Hajiaghahi-Keshteli, M. (2021). Landfill site selection for medical waste using an integrated SWARA-WASPAS framework based on spherical fuzzy set. *Sustainability*, 13(24), 13950.
23. Gómez-Cabrera, A., Gutierrez-Bucheli, L., Muñoz, S. (2024). Causes of time and cost overruns in construction projects: a scoping review. *International Journal of Construction Management*, 24(10), 1107-1125.
24. Goodarzi, N., Nazari, A. (2024). Evaluation of Human Resource Productivity Risks, Fuzzy DEMATEL and System Dynamics Approach (Case Study: High-Rise Building Projects). *Journal of Industrial Management Perspective*, 14(3), 141-168. (In Persian)
25. Gul, M., Ak, M. F. (2021). A modified failure modes and effects analysis using interval-valued spherical fuzzy extension of TOPSIS method: case study in a marble manufacturing facility. *Soft Computing*, 25(8), 6157-6178.
26. Guo, S., Zhao, H. (2017). Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. *Knowledge-based systems*, 121, 23-31.
27. Hamad, S. (2023). Cause of delay and cost overrun in infrastructure projects. *Journal of Global Economics and Business*, 4(15), 11-24.
28. Jafarzadeh Ghouschi, S., Shaffiee Haghshenas, S., Memarpour Ghiaci, A., Guido, G., Vitale, A. (2023). Road safety assessment and risks prioritization using an integrated SWARA and MARCOS approach under spherical fuzzy environment. *Neural computing and applications*, 35(6), 4549-4567.
29. Jafarzadeh Ghouschi, S., Memarpour Ghiaci, A., Rahnamay Bonab, S., Ranjbarzadeh, R. (2022). Barriers to circular economy implementation in designing of sustainable medical waste management systems using a new extended decision-making and FMEA models. *Environmental science and pollution research*, 29(53), 79735-79753.
30. Jafarzadeh Ghouschi, S., Bonab, S. R., Ghiaci, A. M. (2023). A decision-making framework for COVID-19 infodemic management strategies evaluation in spherical fuzzy environment. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(4), 1635-1648.
31. Karamoozian, A., Wu, D. (2020). A hybrid risk prioritization approach in construction projects using failure mode and effective analysis. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 27(9), 2661-2686.
32. Kardes, I., Ozturk, A., Cavusgil, S. T., Cavusgil, E. (2013). Managing global megaprojects: Complexity and risk management. *International business review*, 22(6), 905-917.
33. Khalilzadeh, M., Ghasemi, P., Afrasiabi, A., Shakeri, H. (2021). Hybrid fuzzy MCDM and FMEA integrating with linear programming approach for the health and safety executive risks: a case study. *Journal of modelling in management*, 16(4), 1025-1053.
34. Kiani, M., Andalib Ardakani, D., Mirfakhredini, S. H., Zare Ahmadabadi, H. (2023). An analysis of the Barriers to the implementation of the circular economy and Industry 4.0 in the supply chain: the Meta-Synthesis approach and Fuzzy DANP. *Journal of Industrial Management Perspective*, 13(4), 9-45. (In Persian).
35. Ma, H., Zeng, S., Lin, H., Chen, H., Shi, J. J. (2017). The societal governance of megaproject social responsibility. *International Journal of Project Management*, 35(7), 1365-1377.
36. Mabaso, M. (2022). *Risk identification in megaprojects and its impacts on project management constraints in civil engineering and construction companies*.
37. McKinsey & Company (2023). *Increasing transparency in megaproject execution*. Available from: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/increasing-transparency-in-megaproject-execution>.

38. Ghiaci, A. M., Gheidar-Kheljani, J. (2024). A hybrid model of extended FMEA model based on F-PIPRECIA and Z-EDAS methods with Bow Tie to evaluate cybersecurity risks in Industry 4.0. *Engineering Management and Soft Computing*, 9(2), 149-176. (In Persian).
39. Memarpour Ghiaci, A., Karimi Gavareshki, M. H. (2024). An integrated Z-SWARA-MARCOS approach based on SWOT analysis to select infectious disease vaccination strategies. *Modern Research in Decision Making*, 9(2), 130-162. (In Persian).
40. Memarpour Ghiaci, A., Garg, H., Jafarzadeh Ghouschi, S. (2022). Improving emergency departments during COVID-19 pandemic: a simulation and MCDM approach with MARCOS methodology in an uncertain environment. *Computational and Applied Mathematics*, 41(8), 368.
41. Olatunji, O. A., Rotimi, J. O. B., Rotimi, F. E., Silva, C. C. (2024). Causal relationship between project financing and overruns in major dam projects in Africa. *Engineering, Construction and Architectural Management*.
42. Oyegoke, A. S., Al Kiyumi, N. (2017). The causes, impacts and mitigations of delay in megaprojects in the Sultanate of Oman. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 22(3), 286-302.
43. Park, J., Park, C., Ahn, S. (2018). Assessment of structural risks using the fuzzy weighted Euclidean FMEA and block diagram analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99, 2071-2080.
44. Platoni, S., Timpano, F. (2020). The economics of mega-projects. *Megaproject Management: A Multidisciplinary Approach to Embrace Complexity and Sustainability*, 43-54.
45. Rezaei, J., Arab, A., Mehregan, M. (2024). Analyzing anchoring bias in attribute weight elicitation of SMART, Swing, and boooooosmthlod. *International Transactions in Operational Research*, 31(2), 918-948.
46. Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
47. Rostami, A., dd uoaa, C. (2017). yyy rskss nnoonsrruooon pronnmmmmmyyyconrrccors' prrspccvvv. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 24(3), 451-462.
48. Saaty, T.L. (2013). Analytic hierarchy process. *Encyclopedia of operations research and management science. Encyclopedia of Operations Research and Management Science, US: Springer*, p. 52-64.
49. Söderlund, J., Sankaran, S., Biesenthal, C. (2017). The past and present of megaprojects. *SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA*. p. 5-16.
50. vvvv,, Ž., mmmmaar, .. , uušk,, .. , Chatterjee, P. (2020). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COmpromise solution (MARCOS). *Computers & industrial engineering*, 140, 106231.
51. Tshidavhu, F., Khatleli, N. (2020). An assessment of the causes of schedule and cost overruns in South African megaprojects: A case of the critical energy sector projects of Medupi and Kusile. *Acta Structilia*, 27(1), 119-143.
52. Van Marrewijk, A., Clegg, S. R., Pitsis, T. S., Veenswijk, M. (2008). Managing public-private megaprojects: Paradoxes, complexity, and project design. *International journal of project management*, 26(6), 591-600.
53. Walker, P., Walsh, A. J., Ellis, M. (2021). The underestimation of cultural risk in the execution of megaprojects. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 15(1).
54. Wang, S., Chong, H. Y., Zhang, W. (2024). The impact of BIM-based integration management on megaproject performance in China. *Alexandria Engineering Journal*, 94, 34-43.
55. Watermeyer, R., Phillips, S. (2020). Public infrastructure delivery and construction sector dynamism in the South African economy. *Background Paper. NPC's Economy Series. Pretoria: NPC*.
56. Zadeh, L. A. (2011). A note on Z-numbers. *Information sciences*, 181(14), 2923-2932.