

# An assessment of the causes of schedule and cost overruns in megaprojects using Z-BWM-MARCOS integrated method

Ali Memarpour Ghiaci 

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

Morteza Abbasi 

Assistant Professor, Industrial Engineering Department, Faculty of Management and Industrial Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.  
mabbasi@mut.ac.ir

Jafar Gheidar-Kheljani 

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

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

## Abstract

**Introduction:** Megaprojects are defined as complex and large-scale investments, and their development and building take many years. Schedule and cost overruns are the most common challenges in megaprojects worldwide. Schedule and cost overruns are the reasons for 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, in order to analyze the schedule and cost overruns causes in megaprojects, the integrated approach of the FMEA method based on the BWM and MARCOS methods developed based on Z-number theory in three phases has been used. In the first phase of this approach and based on the literature, the causes are identified using the FMEA method and the factors determining the RPN are quantified. In the second phase, using the Z-BWM method, the weights of the factors are calculated. Then in the third phase and according to the outputs of the previous phases, the causes are prioritized using the Z-MARCOS method. In addition to assigning different weights to factors and considering uncertainty, reliability is also considered in this approach through the theory of Z numbers.

**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:** The developed methodology effectively overcomes the limitations of the conventional FMEA method, particularly its deficiencies in comprehensive prioritization and weighting of criteria. The results highlight the capability and superiority of the proposed method when compared to traditional FMEA and Fuzzy MARCOS approaches. This offers a more reliable framework for managing the complexities and risks inherent in megaprojects.

**Keywords:** Megaproject; Project Management; FMEA; Multi-criteria decision-making; BWM; MARCOS; Z-number theory.

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

## علی معمارپور غیائی <sup>id</sup>

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

## مرتضی عباسی <sup>id</sup>

استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.  
mabbasi@mut.ac.ir

## جعفر قیدر خلجانی <sup>id</sup>

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

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

## چکیده

**مقدمه و اهداف:** مگا پروژه‌ها 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 مگا پروژه‌ها در سراسر جهان هستند. افزایش هزینه نسبت به بودجه برنامه‌ریزی شده و افزایش زمان نسبت به برنامه زمان‌بندی، عوامل شکست بسیاری از مگا پروژه‌ها هستند. هدف این پژوهش ارائه یک چارچوب یکپارچه جهت ارزیابی علل افزایش زمان و هزینه در مگا پروژه‌ها است.

**روش‌ها:** در این پژوهش، برای اولین بار جهت تجزیه و تحلیل علل افزایش زمان و هزینه مگا پروژه‌ها از رویکرد یکپارچه روش FMEA مبتنی بر روش‌های بهترین-بدترین و مارکوس توسعه یافته 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 مگا پروژه‌ها پیاده‌سازی گردید و ۱۷ علت شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگا پروژه‌ها، 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 تامین کنندگان به عنوان علل اصلی شناسایی شده‌اند. تخصیص نادرست منابع، شناسایی نادرست ریسک‌ها و ایجاد گلوگاه‌هایی در اجرای مگا پروژه از جمله پیامدهای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف در مگا پروژه‌ها 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 پایبندی به برنامه‌های زمانی در مگا پروژه‌ها 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 تامین کنندگان، باعث ایجاد اختلال در فرآیندهای تامین و تحویل شده و منجر به کمبود مواد اولیه، تأخیرات و افزایش هزینه‌های غیرمنتظره می‌شود. ایجاد سیستم متمرکز مدیریت زنجیره تامین، توسعه روابط استراتژیک بلندمدت با تامین کنندگان کلیدی بر اساس اهداف مشترک، استفاده از فناوری بلاک‌چین برای ردیابی و افزایش شفافیت در زنجیره تامین و پیاده‌سازی اصول زنجیره تامین 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 رتبه بندی 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:** مگا پروژه‌ها 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 مگا پروژه‌ها بوده است.

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

## ۱. مقدمه

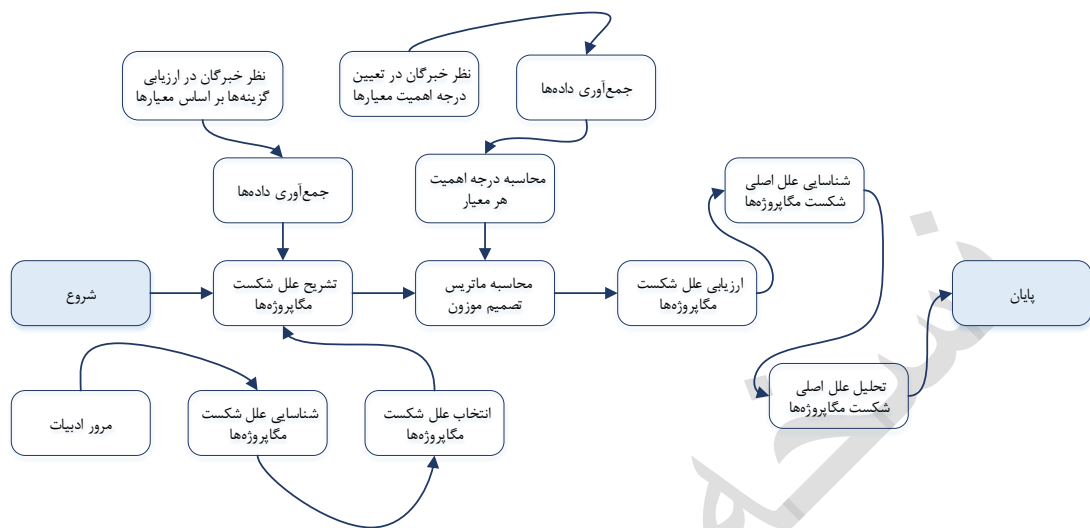
با توسعه سریع اقتصاد جهانی، رونق سرمایه گذاری در پروژه های بزرگ در سراسر جهان در چند دهه گذشته رو به افزایش بوده است [۵۴]. پروژه های که یک میلیارد دلار یا بیش از آن هزینه دارد به عنوان یک مگاپروژه تعریف می شود [۱۷]. این پروژه ها نقش حیاتی در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه ایفا می کنند و بر پویایی های سیاسی، اثرات اجتماعی و نتایج اقتصادی تأثیر می گذارند [۴۷]. مگاپروژه ها به طور ذاتی با رشد، توسعه و رقابت پذیری مرتبط هستند و به عنوان زیرساخت های جهانی شدن عمل می کنند [۱۲]. مگاپروژه ها هزینه زیادی دارند و ریسک های زیادی می توانند باعث تاخیر یا شکست در طول اجرای آن شوند [۳۵، ۵۱]. در عمل، افزایش هزینه نسبت به بودجه برنامه ریزی شده و افزایش زمان نسبت به برنامه زمان بندی، دو مشکل رایج در اجرای مگاپروژه ها هستند [۴، ۱۴]. "قانون آهنین مگاپروژه ها" تمایل مگاپروژه ها به فراتر رفتن از بودجه ها، عدم تحقق زمان بندی ها و ارائه مزایای کمتر از انتظار را نشان می دهد [۱۵]. خانه اپرای سیدنی نمونه ای از یک مگاپروژه است که بیش از بودجه برنامه ریزی شده، هزینه داشت و خارج از برنامه زمان بندی پیشنهادی تکمیل شد. تکمیل این مگاپروژه ده سال بیش از زمان برنامه ریزی شده به طول انجامید و هزینه ساخت آن ۱۴۰۰ درصد بیش از بودجه برنامه ریزی شده بود [۱۷]. تنها خانه اپرای سیدنی نیست و مگاپروژه های بسیاری مگاپروژه ها افزایش هزینه نسبت به بودجه برنامه ریزی شده و افزایش زمان نسبت به برنامه زمان بندی را تجربه می کنند [۱۶]. بنابراین، ارزیابی علل افزایش زمان و هزینه مگاپروژه ها مسئله مهمی در مدیریت این پروژه ها است.

روش  $FMEA^1$  یکی از روش های 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 ریسک ها و عوامل شکست بر اساس شاخص سنتی  $RPN^2$  انجام شده است. این در حالی است که این شاخص دارای کاستی هایی است. مقادیر مختلف معیارهای سه گانه ممکن است منجر به امتیاز یکسان شوند، در حالیکه اولویت های علل کاملاً متفاوت است [۲۵، ۲۹]. عدم نظر گرفتن اهمیت نسبی معیارها در محاسبه امتیاز  $RPN$  نیز از دیگر کاستی های این روش است [۴۳، ۲۱]. همچنین، به دلیل کنشی بودن و تیمی بودن روش  $FMEA$ ، اغلب مقدار عوامل تعیین کننده  $RPN$  را نمی توان به صورت قطعی در نظر گرفت [۱۸]. بنابراین، جهت دستیابی به نتایج قابل اطمینان در برابر نظرات خبرگان، نیاز است تا اولویت بندی گزینه ها با توجه به عدم قطعیت موجود در معیارها انجام شود [۳۰].

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی و اولویت بندی علل افزایش زمان و هزینه در مگاپروژه ها با ارائه یک رویکرد جدید جهت پوشش برخی از کاستی های روش  $FMEA$  سنتی می باشد. این رویکرد برای اولین بار بر اساس روش توسعه یافته  $FMEA$  مبتنی بر روش  $Z-BWM$  جهت وزن دهی به شاخص ها و روش  $Z-MARCOS$  جهت اولویت بندی علل ارائه می گردد. 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، اولویت بندی علل افزایش زمان و هزینه در مگاپروژه ها توسط شاخص حاصل از رویکرد ترکیبی  $Z-BWM-MARCOS$  انجام شده و نتایج آن در مقایسه با برخی از روش های سنتی ارائه شده است. مسیر پژوهش در شکل ۱ نمایش داده شده است.

<sup>1</sup> Failure mode and effects analysis

<sup>2</sup> 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-BWM-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 [۴۴، ۵۲]. مگاپروژه‌ها با سرمایه‌گذاری‌های عظیم شناخته می‌شوند، با این حال، راه‌های زیادی برای شناسایی این پروژه‌ها وجود دارد [۴۹]. به عنوان مثال، بوتانگ و چن<sup>۱</sup> (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 سرمایه‌های هم‌هنگ، فناوری‌های پیچیده و نفوذ سیاسی هستند [۳۲]. از نظر واترمیر و فیلیپس<sup>۲</sup> (۲۰۲۰)، مگاپروژه‌ها با عدم قطعیت، فناوری‌های پیچیده، چالش‌های مالی، نفوذ سیاسی و پیچیدگی شناخته می‌شوند [۵۵]. همچنین بر اساس مطالعه آیتن و داس<sup>۳</sup> (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].

مگاپروژه‌ها، اغلب با تاخیر در زمان‌بندی و افزایش هزینه‌ها مواجه می‌شوند. اختلافات بین برآوردهای اولیه هزینه پروژه و هزینه نهایی آن می‌تواند قابل توجه باشد، به طوری که هزینه نهایی اغلب بسیار بیشتر از برآورد اولیه است [۲۷]. بر اساس یک مرور سیستماتیک ۱۸ علت و ۵۴ راه‌حل برای عملکرد ضعیف مگاپروژه‌ها شناسایی شد [۱۳]. در آفریقای جنوبی، مطالعات در زمینه پروژه‌های عظیم انرژی نشان می‌دهند

<sup>1</sup> Boateng & Chen

<sup>2</sup> Watermeyer & Phillips

<sup>3</sup> Aiyetan & Das

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 تأخیر در مگا پروژه‌ها پرداخته است [۴۲]. شرکت مشاوره مدیریت مکنزی<sup>۱</sup> (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 استادיום برای میزبانی جام جهانی فوتبال در مطالعه‌ای مورد بررسی قرار گرفت [۸]. گومز-کابرا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۲۴) عوامل مؤثر بر تأخیرها و افزایش هزینه‌ها را بر اساس مراحل چرخه عمر پروژه گروه‌بندی کردند؛ به طوری که ۱۷ عامل به مرحله برنامه‌ریزی/طراحی، ۴۶ عامل به مرحله ساخت، و ۱۰ عامل به علل خارجی مرتبط هستند [۳۳]. الاتونجی و همکاران<sup>۳</sup> (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]. الحمدي و همکاران<sup>۴</sup> (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]. کستبلانکو و همکاران<sup>۵</sup> 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 قابل توجهی شود. این پروژه‌ها به طراحی‌های پیچیده‌ای وابسته هستند و نبود جزئیات می‌تواند فعالیت‌های حیاتی را متوقف یا با تأخیر مواجه کند.	[۸، ۵۱]
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.	[۴۲، ۵۱]
تأخیر در آموزش	تأخیر در آموزش باعث ناکارآمدی می‌شود، زیرا تیم‌ها ممکن است با اطلاعات ناقص پیش بروند یا مجبور شوند کارهای انجام شده را اصلاح کنند.	[۸، ۵۱]
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.	[۸، ۵۱]
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]
نارضایتی نیروی کار	نارضایتی نیروی کار و اعتصابات، می‌تواند پیشرفت مگا پروژه‌ها را متوقف کند و به افزایش هزینه‌ها و زمان منجر شود.	[۸، ۵۱]
کمبود نیروی انسانی	کمبود نیروی انسانی می‌تواند زمان‌بندی مگا پروژه‌ها را به‌ویژه در مناطق دورافتاده یا کم‌منبع مختل کند.	[۵۱]

1 McKinsey & Company

2 Gómez-Cabrera et al.

3 Olatunji et al.

4 Alhammadi et al.

5 Castelblanco et al.

[۸]	مگا پروژه‌ها اغلب سال‌ها به طول می‌انجامند 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.	افزایش قیمت مواد
[۵۱]	برآورد نادرست از مواد مورد نیاز باعث تأخیر در تأمین و تنظیم بودجه می‌شود و به طور مستقیم بر زمان‌بندی و هزینه پروژه تأثیر می‌گذارد.	برآورد نادرست مواد مورد نیاز
[۳۶، ۵۱]	تأخیر در نهایی کردن و عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان می‌تواند فرایند تأمین را با تأخیر روبه‌رو کند و پیشرفت مگا پروژه را مختل کند.	تأخیر در عقد قرارداد با تأمین‌کنندگان
[۱۰]	انتخاب تأمین‌کنندگانی که ظرفیت و شایستگی لازم برای رفع نیازهای مگا پروژه‌ها را ندارند، می‌تواند منجر به کاهش کیفیت، بهره‌وری و همچنین شکست در برنامه زمان‌بندی مگا پروژه شود.	انتخاب تأمین‌کنندگان نامناسب
[۱۰]	با توجه به طولانی بودن زمان تکمیل مگا پروژه‌ها، شرایط آب‌وهوایی نامطلوب و غیرقابل پیش‌بینی می‌تواند فعالیت‌های مگا پروژه را متوقف کند و باعث تأخیر در پیشرفت مگا پروژه شود.	شرایط آب و هوایی نامطلوب
[۳۷، ۳۶]	پیچیدگی مگا پروژه‌ها باعث می‌شود که آن‌ها به دلیل چالش‌های پیش‌بینی نشده در اجرا با تأخیر مواجه شوند.	پیچیدگی پروژه
[۱۰]	با توجه به پیچیدگی مگا پروژه‌ها و تعدد تأمین‌کنندگان، طراحی ضعیف شبکه همکاری میان آن‌ها منجر به ارتباطات ناکارآمد و تأخیر در تأمین می‌شود.	طراحی ضعیف شبکه همکاری تأمین‌کنندگان
[۸، ۳۶]	تأخیر در تأمین مواد و تجهیزات پیشرفت مگا پروژه را مختل می‌کند و باعث تأخیرهای زنجیره‌ای در زمان‌بندی مگا پروژه‌ها می‌شوند.	تأخیر در تأمین مواد و تجهیزات
[۵۱]	تعدد فعالیت‌ها در فرایند تأیید کار در مگا پروژه‌ها اغلب منجر به تأخیر می‌شود، به‌ویژه زمانی که ذی‌نفعان ترجیحات متضادی دارند.	تأخیر در تأیید کار

**روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و FMEA.** به عنوان یک حوزه شناخته شده از تحقیقات، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره<sup>۱</sup> (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]. خلیلیزاده 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 فراترکیب 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]. معمارپور گیائی و قیدر خلجانی (۲۰۲۴) از مدل ترکیبی FMEA توسعه یافته مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و Bow Tie برای ارزیابی خطرات و ریسک‌های امنیت سایبری در انقلاب صنعتی چهارم استفاده کردند. آن‌ها 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 اولویت‌بندی ریسک‌ها استفاده کردند [۳۸]. به منظور شناسایی و ارزیابی ریسک‌های تأثیرگذار بر پروژه‌های ساختمانی و پوشش برخی کاستی‌های تکنیک FMEA، یک مدل یکپارچه مبتنی بر روش‌های FMEA، SWARA و WASPAS در محیط فازی پیشنهاد شد [۶]. معمارپور

<sup>1</sup> Multi-criteria decision-making



غیاثی و کریمی (۲۰۲۴) از روش‌های توسعه یافته SWARA و MARCOS بر اساس تئوری اعداد Z برای ارزیابی استراتژی‌های مستخرج از روش SWOT برای اجرای واکسیناسیون استفاده کردند [۳۹]. گودرزی و نظری (۲۰۲۴) از یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر دیمتل فازی و سیستم دینامیک برای ارزیابی ریسک‌های بهره‌وری منابع انسانی استفاده کردند [۲۴]. غیاثی و عباسی (۲۰۲۴) از رویکرد ترکیبی FMEA مبتنی بر روش توسعه یافته ARAS بر اساس تئوری اعداد Z برای ارزیابی موانع پیاده‌سازی تکنولوژی بلاکچین در لجستیک بشردوستانه استفاده کردند [۱۹].

**شکاف تحقیقاتی.** در بخش اول مرور ادبیات، برخی از مقالات مرتبط با مگاپروژه‌ها و در بخش دوم، توسعه روش FMEA با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه مقالاتی در حوزه مگاپروژه‌ها منتشر شده است، اما تعداد کمی از آن‌ها بر روی ارزیابی علل افزایش زمان و هزینه در مگاپروژه‌ها با استفاده از مدل‌های 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 می‌شود. در نتیجه، مطالعه حاضر برای اولین بار به ارائه یک رویکرد توسعه یافته FMEA بر اساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره Z-BWM و Z-MARCOS جهت شناسایی و اولویت‌بندی علل افزایش زمان و هزینه در مگاپروژه‌ها می‌پردازد. برخی از نوآوری‌های 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
- پیاده‌سازی 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. روش‌شناسی پژوهش

روش پژوهش حاضر از نوع کیفی - کمی است. در مرحله نخست از جنبه کیفی، علل شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگاپروژه‌ها شناسایی و سپس داده‌های کیفی حاصل از قضاوت‌های تیم FMEA، به صورت متغیرهای زبانی و بر اساس تئوری اعداد Z گردآوری می‌شوند. در ادامه و با ارزیابی علل بر اساس معیارهای سه‌گانه روش FMEA، محاسبه وزن معیارها با استفاده از روش Z-BWM و با استفاده از داده‌های کمی انجام می‌شود. در آخر و با پیاده‌سازی روش Z-MARCOS، علل اولویت‌بندی شده و علل اصلی شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگاپروژه‌ها انتخاب می‌شوند. از نظر میزان کاربرد پژوهشی، پژوهش حاضر کاربردی - توسعه‌ای به شمار می‌رود؛ زیرا به دنبال توسعه رویکردی علمی و نوین از علل شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگاپروژه است. جامعه آماری در مرحله نخست پژوهش شامل کلیه پژوهش‌های منتشر شده در پایگاه‌های علمی معتبر مرتبط با چالش‌های موجود در مگاپروژه‌ها، تا زمان انجام این پژوهش است. با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند، تیم FMEA از ۱۴ خبره دارای تجربه و تخصص در زمینه‌های نقشه‌برداری، مهندسی و مدیریت پروژه تشکیل شده است. در جدول ۲، مشخصات مرتبط با تیم خبره آمده است. این اطلاعات نشان می‌دهد 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

۲	۱	۱	-	۲۱ و بیشتر
۱۴	۵	۶	۳	مجموع پاسخ دهندگان

**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.

$$Prob(X \text{ is } A) \text{ is } B \quad (1)$$

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.

$$R(x): X \text{ is } \rightarrow poss(X = u) = \mu_A(u) \quad (2)$$

در معادله فوق  $\mu_A$  یک تابع عضویت از  $A$  می‌باشد و  $u$  یک مقدار کلی کلی از  $X$  است.  $\mu_A$  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 توزیع 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:

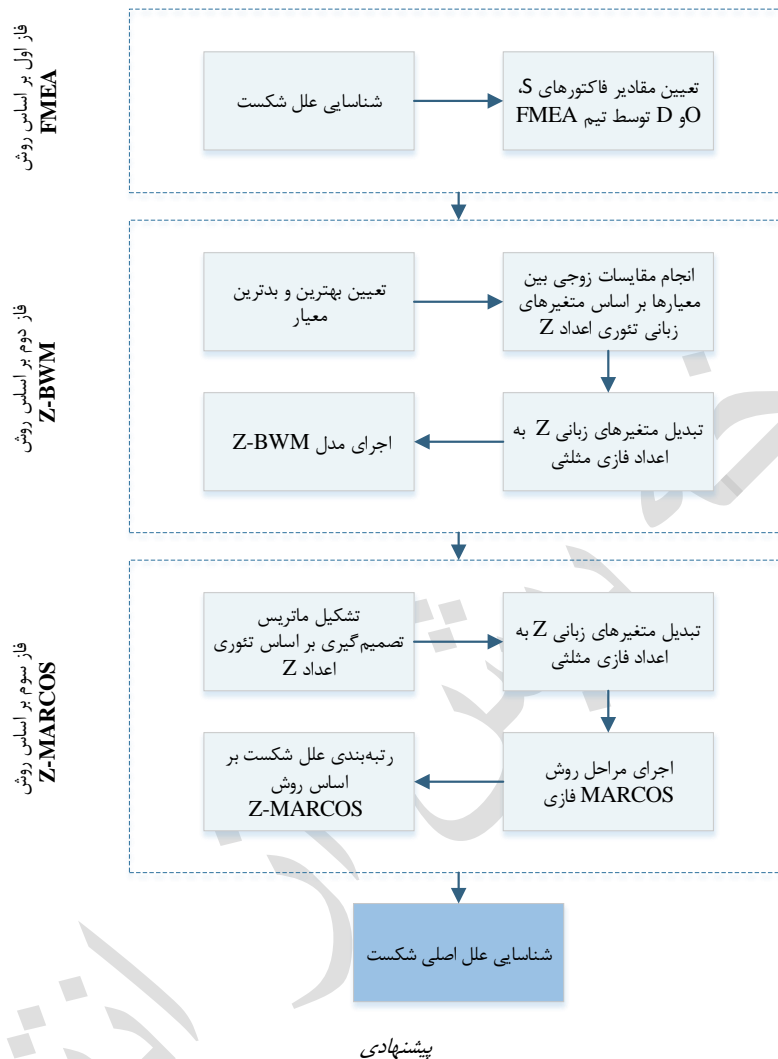
$$R(x): X \text{ is } p \quad (3)$$

$$R(x): X \text{ is } p \rightarrow (u \leq X \leq u + du) = p(u) du \quad (4)$$

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.

<sup>1</sup> Z-number theory



شکل ۲. رویکرد

پیشنهادی

**روش Z-BWM**. رضایی روش بهترین-بدترین<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> (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.

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.

<sup>1</sup> Best-worst method

<sup>2</sup> Guo & Zhao

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.

$$\text{Min } \xi \quad (۷)$$

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

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

$$\sum_{j=1}^n R(\tilde{w}_j) = 1, \quad (۱۰)$$

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

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

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 می آید.

Min  $\xi^*$

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  $\xi^{\theta^*}$  بدست می آید. 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 می شود که در آن  $CR < 0.1$  قابل قبول است [۴۸، ۲۰].

**روش Z-MARCOS.** اندازه‌گیری گزینه‌ها و رتبه‌بندی بر اساس راه حل سازش<sup>۱</sup> (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 [۴۰، ۳۹].

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.

$$\tilde{X} = \begin{matrix} & \tilde{C}_1 & \tilde{C}_2 & \dots & \tilde{C}_n \\ \tilde{A}_1 & \left[ \begin{matrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \end{matrix} \right] \\ \tilde{A}_2 & \left[ \begin{matrix} \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \end{matrix} \right] \\ \dots & \left[ \begin{matrix} \dots & \dots & \dots & \dots \end{matrix} \right] \\ \tilde{A}_m & \left[ \begin{matrix} \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{matrix} \right] \end{matrix} \quad (14)$$

به عنوان مثال:

<sup>1</sup> Measurement of alternatives and ranking according to compromise solution

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

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

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

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.

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

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

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 تصمیم گیری 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 نرمال شده با استفاده از رابطه (۲۰) در وزن معیارها ضرب می شود تا ماتریس نرمال وزن دار شده تشکیل شود.

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

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

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

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

در رابطه بالا  $\tilde{S}_i$  جمع مقادیر هر سطر در ماتریس وزن دار شده می باشد که از رابطه زیر بدست می آید.

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

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

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

در رابطه بالا  $f(K_i^-)$  عملکرد مطلوبیت ضد ایده آل و  $f(K_i^+)$  عملکرد مطلوبیت ایده آل برای هر گزینه می باشد که از رابطه های (۲۵)

و (۲۶) محاسبه می شود. سپس براساس اعداد بدست آمده از  $f(k_i)$  هر گزینه، رتبه بندی به صورت نزولی انجام می شود.

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

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

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

جدول ۵. الگوریتم پیاده سازی رویکرد یکپارچه Z-BWM-MARCOS

ورودی	m: تعداد گزینه‌ها ( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ) n: تعداد معیارها ( $j = 1, 2, 3, \dots, n$ )
خروجی	اولویت بندی گزینه‌ها
شروع	
گام ۱	ارزیابی هر گزینه بر اساس هر یک از معیارهای سه گانه 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 ( $G_B$ ) و بدترین ( $G_W$ ) معیار توسط تیم خبره

تعیین ارجحیت بهترین معیار نسبت به سایر معیارها بر اساس متغیرهای زبانی مربوط به تئوری اعداد $Z$ و تبدیل متغیرها به اعداد فازی مثلثی با استفاده از جدول ۳	گام ۳
تعیین ارجحیت سایر معیارها نسبت به بدترین معیار بر اساس متغیرهای زبانی مربوط به تئوری اعداد $Z$ و تبدیل متغیرها به اعداد فازی مثلثی با استفاده از جدول ۳	گام ۴
حل مدل برنامه‌ریزی ریاضی $Z$ -BWM و تعیین درجه اهمیت (وزن) معیارها	گام ۵
تبدیل ماتریس تصمیم متشکل از متغیرهای زبانی $Z$ به اعداد فازی مثلثی با استفاده از جدول ۴	گام ۶
تعیین مقادیر ایده‌آل $\tilde{A}_{id}$ و ضد ایده‌آل $\tilde{A}_{ai}$ با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۶)	گام ۷
نرمال‌سازی ماتریس تصمیم با استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹)	گام ۸
محاسبه ماتریس نرمال وزن‌دار با استفاده از رابطه (۲۰)	گام ۹
محاسبه مقدار $\tilde{S}_i$ بر اساس ماتریس وزن‌دار شده با استفاده از رابطه (۲۳)	گام ۱۰
محاسبه درجه مطلوبیت ایده‌آل $\tilde{K}_i^+$ و ضد ایده‌آل $\tilde{K}_i^-$ گزینه‌ها با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۱)	گام ۱۱
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 ۱۲
محاسبه عملکرد مطلوب $f(k_i)$ هر گزینه با استفاده از معادله (۲۴)	گام ۱۳
اولویت‌بندی گزینه‌ها بر اساس مقادیر عملکرد مطلوب $f(k_i)$ به صورت نزولی	گام ۱۴
	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 مگا پروژه‌ها با استفاده از این رویکرد صورت پذیرد. فهرست ۱۷ علت شکست شناسایی شده در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶. علل شکست مگا پروژه‌ها

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
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 مگاپروژه‌ها 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 مگاپروژه‌ها در قالب متغیرهای زبانی Z

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

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
بهترین معیار - S	EI,VH	FI,M	VI,M

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \xi \\
 & s. t. \\
 & l_2 - 1.07u_1 \leq \xi u_1; \quad l_2 - 1.07u_1 \geq -\xi u_1; \\
 & m_2 - 1.42m_1 \leq \xi m_1; \quad m_2 - 1.42m_1 \geq -\xi m_1; \\
 & u_2 - 1.78l_1 \leq \xi l_1; \quad u_2 - 1.78l_1 \geq -\xi l_1; \\
 & l_2 - 1.78u_3 \leq \xi u_3; \quad l_2 - 1.78u_3 \geq -\xi u_3; \\
 & m_2 - 2.13m_3 \leq \xi m_3; \quad m_2 - 2.13m_3 \geq -\xi m_3; \\
 & u_2 - 2.49l_3 \leq \xi l_3; \quad u_2 - 2.49l_3 \geq -\xi l_3; \\
 & l_1 - 0.56u_3 \leq \xi u_3; \quad l_1 - 0.56u_3 \geq -\xi u_3; \\
 & m_1 - 0.84m_3 \leq \xi m_3; \quad m_1 - 0.84m_3 \geq -\xi m_3; \\
 & u_1 - 1.26l_3 \leq \xi l_3; \quad u_1 - 1.26l_3 \geq -\xi l_3; \\
 & l_1 + 4m_1 + u_1 + l_2 + 4m_2 + u_2 + l_3 + 4m_3 + u_3 = 6; \\
 & l_1 \leq m_1; \quad l_2 \leq m_2; \quad l_3 \leq m_3; \\
 & m_1 \leq u_1; \quad m_2 \leq u_2; \quad m_3 \leq u_3; \\
 & l_1 > 0; \quad l_2 > 0; \quad l_3 > 0; \\
 & \xi \geq 0
 \end{aligned} \tag{۲۷}$$

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، ۰.۲۳۲، 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
C2	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۵.۸۶	۷.۵۳	۸.۳۷	۲.۵۱	۴.۲۸	۵.۸۶
C3	۲.۱۲	۳.۵۴	۴.۹۵	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۷.۵۳	۸.۳۷	۸.۳۷
C4	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۲.۱۲	۳.۵۴	۴.۹۵	۰	۰	۰.۸۴
C5	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۸.۵۴	۹.۴۹	۹.۴۹
C6	۰.۸۴	۲.۵۱	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳	۹.۳۷	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳
C7	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۰.۳۲	۰.۹۵	۱.۵۸
C8	۷.۵۳	۸.۳۷	۸.۳۷	۲.۷۴	۳.۸۴	۴.۹۳	۰	۰.۸۴	۲.۵۱
C9	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳	۰	۰.۳۲	۰.۹۵	۲.۷۴	۳.۸۴	۴.۹۳
C10	۰.۳۲	۰.۹۵	۱.۵۸	۰.۷۱	۲.۱۲	۳.۵۴	۳.۸۴	۴.۹۳	۵.۴۸
C11	۲.۲۱	۲.۸۵	۳.۱۶	۲.۵۱	۴.۲۸	۵.۸۶	۰	۰	۰.۹۵
C12	۳.۸۴	۴.۹۳	۵.۴۸	۰.۷۱	۲.۱۲	۳.۵۴	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵
C13	۱.۵۸	۲.۲۱	۲.۸۵	۰.۹۵	۱.۵۸	۲.۲۱	۰	۰.۳۲	۰.۹۵
C14	۷.۵۳	۸.۳۷	۸.۳۷	۲.۷۴	۳.۸۴	۴.۹۳	۴.۱۸	۸.۸۶	۷.۵۳
C15	۰.۳۲	۰.۹۵	۱.۵۸	۴.۱۸	۵.۸۶	۷.۵۳	۲.۵۱	۴.۲۸	۵.۸۶
C16	۲.۵۱	۴.۲۸	۵.۸۶	۵.۸۶	۷.۵۳	۸.۳۷	۰	۰.۸۴	۲.۵۱
C17	۲.۷۴	۳.۸۴	۴.۹۳	۰.۳۲	۰.۹۵	۱.۵۸	۶.۳۶	۷.۰۷	۷.۰۷

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	0.028	0.028	0.042	0.000	0.028	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	0.028	0.028	0.042	0.327	0.459	0.589	0.000	0.089	0.264
C9	0.042	0.055	0.077	0.000	0.028	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	0.028	0.028	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	0.028	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	0.028	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
C4	0.024	0.037	0.057	0.059	0.119	0.189	0.000	0.000	0.042

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

در ادامه، مراحل روش MARCOS فازی اجرا شده و علل شکست بر اساس امتیاز  $f(k_i)$  بدست آمده با استفاده از رابطه (۲۴)، به صورت نزولی اولویت بندی می شود. نتیجه پیاده سازی رویکرد پیشنهادی و اولویت بندی علل شکست مگاپروژه ها در جدول ۱۵ آمده است. به عنوان مثال، مقدار  $f(k_1)$  به صورت زیر محاسبه می شود.

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

جدول ۱۵. محاسبات و نتایج روش Z-MARCOS

	$\tilde{f}(K+)$			$\tilde{f}(K-)$			fK+	fK-	K+	K-	f(K <sub>i</sub> )	Rank
	l	m	u	l	m	u						
C1	۰.۰۴۹	۰.۴۵۳	۱.۹۲۹	۰.۰۰۴	۰.۰۱۱	۰.۰۲۷	۰.۶۳۲	۰.۰۱۳	۰.۴۸۸	۲۴.۱۷۴	۰.۳۱۲	۸
C2	۰.۰۸۷	۰.۶۴۳	۲.۱۳۹	۰.۰۰۷	۰.۰۱۶	۰.۰۳۰	۰.۸۰۰	۰.۰۱۷	۰.۶۴۹	۳۰.۶۰۹	۰.۵۲۸	۴
C3	۰.۱۱۴	۰.۶۵۸	۱.۸۲۳	۰.۰۱۰	۰.۰۱۷	۰.۰۲۵	۰.۷۶۲	۰.۰۱۷	۰.۶۴۶	۲۹.۱۶۱	۰.۵۰۰	۵
C4	۰.۰۲۴	۰.۱۹۹	۰.۹۱۹	۰.۰۰۲	۰.۰۰۵	۰.۰۱۳	۰.۲۹۰	۰.۰۰۶	۰.۲۲۲	۱۱.۰۸۹	۰.۰۶۵	۱۵
C5	۰.۱۳۰	۰.۷۴۷	۲.۰۴۹	۰.۰۱۱	۰.۰۱۹	۰.۰۲۸	۰.۸۶۲	۰.۰۱۹	۰.۷۳۱	۳۲.۹۷۹	۰.۶۴۲	۲
C6	۰.۱۰۶	۰.۷۳۸	۲.۵۶۸	۰.۰۰۹	۰.۰۱۹	۰.۰۳۶	۰.۹۳۸	۰.۰۲۰	۰.۷۵۸	۳۵.۸۹۵	۰.۷۲۵	۱
C7	۰.۰۱۹	۰.۱۷۳	۰.۶۶۹	۰.۰۰۲	۰.۰۰۴	۰.۰۰۹	۰.۲۳۰	۰.۰۰۵	۰.۱۸۱	۸.۸۰۸	۰.۰۴۲	۱۶
C8	۰.۰۲۴	۰.۲۳۱	۱.۰۴۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۶	۰.۰۱۴	۰.۳۳۱	۰.۰۰۷	۰.۲۵۳	۱۲.۶۷۷	۰.۰۸۴	۱۳
C9	۰.۰۳۸	۰.۲۷۷	۰.۹۷۴	۰.۰۰۳	۰.۰۰۷	۰.۰۱۴	۰.۳۵۳	۰.۰۰۷	۰.۲۸۵	۱۳.۵۱۵	۰.۱۰۱	۱۱
C10	۰.۰۶۸	۰.۵۱۵	۲.۲۰۹	۰.۰۰۶	۰.۰۱۳	۰.۰۳۱	۰.۷۲۳	۰.۰۱۵	۰.۵۶۳	۲۷.۶۶۵	۰.۴۱۳	۶
C11	۰.۰۲۶	۰.۲۲۰	۰.۹۹۶	۰.۰۰۲	۰.۰۰۶	۰.۰۱۴	۰.۳۱۷	۰.۰۰۶	۰.۲۴۴	۱۳.۱۳۳	۰.۰۷۸	۱۴
C12	۰.۰۳۰	۰.۲۵۳	۰.۹۶۲	۰.۰۰۳	۰.۰۰۶	۰.۰۱۳	۰.۳۳۴	۰.۰۰۷	۰.۲۶۴	۱۲.۷۸۶	۰.۰۸۹	۱۲
C13	۰.۰۱۵	۰.۱۳۵	۰.۶۰۳	۰.۰۰۱	۰.۰۰۳	۰.۰۰۸	۰.۱۹۳	۰.۰۰۴	۰.۱۴۸	۷.۳۹۲	۰.۰۲۹	۱۷
C14	۰.۰۷۹	۰.۵۵۱	۱.۸۴۴	۰.۰۰۷	۰.۰۱۴	۰.۰۲۶	۰.۶۸۸	۰.۰۱۵	۰.۵۵۹	۲۶.۳۲۹	۰.۳۹۰	۷
C15	۰.۰۷۹	۰.۶۳۴	۲.۷۵۵	۰.۰۰۷	۰.۰۱۶	۰.۰۲۸	۰.۸۹۵	۰.۰۱۸	۰.۶۹۳	۳۴.۲۵۱	۰.۶۳۲	۳
C16	۰.۰۵۰	۰.۴۰۱	۱.۵۳۵	۰.۰۰۴	۰.۰۱۰	۰.۰۲۱	۰.۵۳۱	۰.۰۱۱	۰.۴۲۰	۲۰.۳۴۲	۰.۲۲۶	۱۰

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).

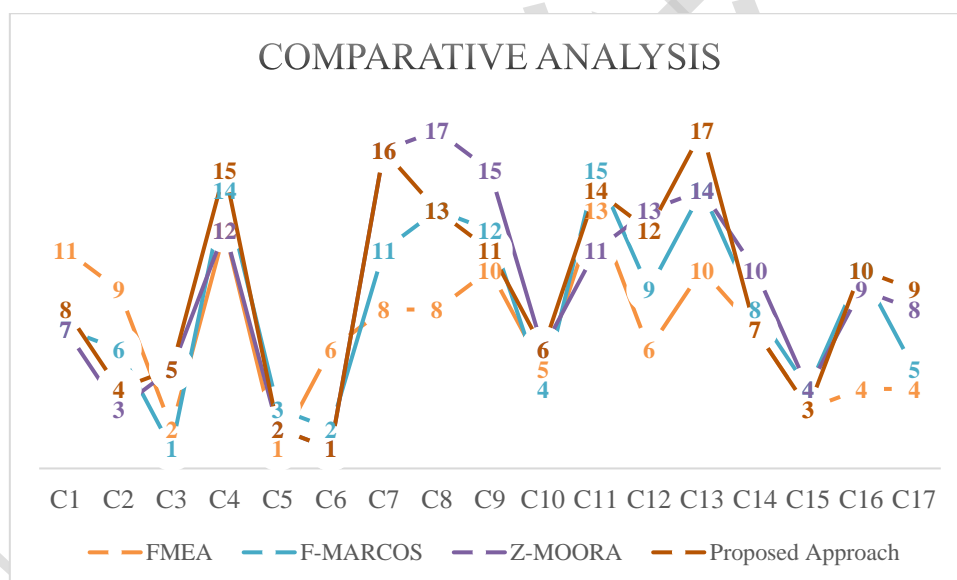
جدول ۱۶. مقایسه اولویت‌بندی حاصل از رویکرد پیشنهادی (Z-BWM-MARCOS) و روش‌های مرسوم

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

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 (تاخیر در تامین مواد و تجهیزات) و C17 (تاخیر 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 تصمیم‌گیرندگان 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 تامین‌کنندگان) به طور مشترک در جایگاه چهارم و همچنین C4 (تاخیر 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 مگاپروژه‌ها بر اساس رویکردهای Z-BWM-MARCOS (رویکرد پیشنهادی پژوهش)، Z-MOORA، MARCOS فازی 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 مگاپروژه‌ها ارائه می‌شود. بر اساس نتایج این پژوهش، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف، کمبود نیروی کار ماهر و طراحی ضعیف شبکه همکاری تامین‌کنندگان به عنوان علل اصلی شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگاپروژه‌ها انتخاب شدند. در ادامه، پیامدها و استراتژی‌های مقابله با این علل تشریح می‌گردد.

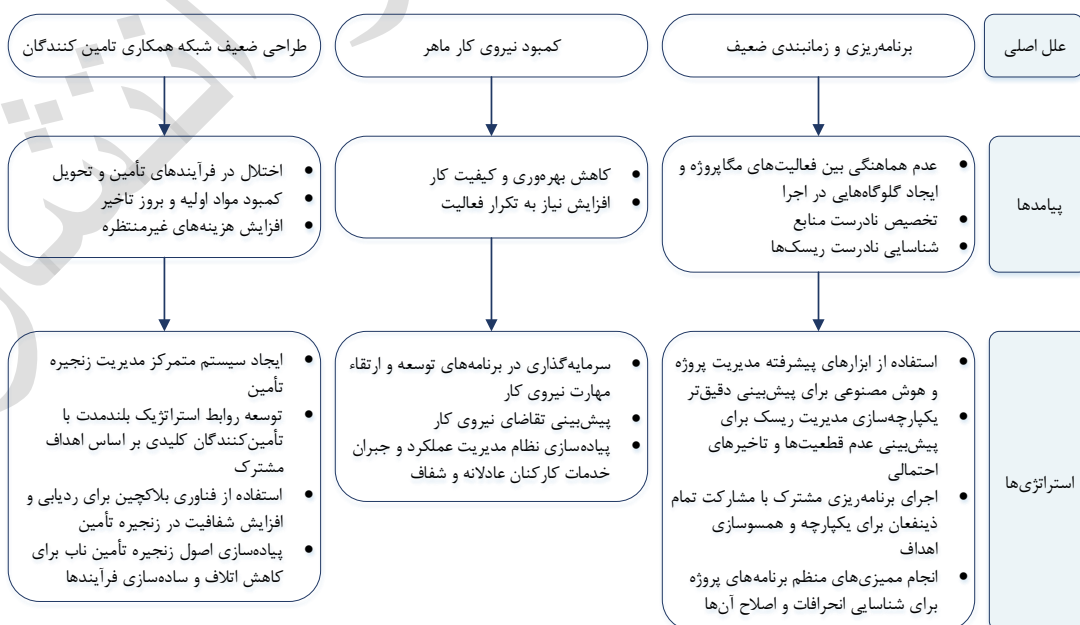
در این پژوهش، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف به عنوان مهم‌ترین علت شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگاپروژه‌ها انتخاب شده است. برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ضعیف اغلب منجر به تخصیص نادرست منابع، شناسایی نادرست ریسک‌ها و ایجاد گلوگاه‌هایی

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 ممیزی‌های 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 پایبندی 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 تأمین کنندگان، فرآیندهای تأمین 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 تأمین تمرکز کنند که هماهنگی لحظه‌ای میان تمامی تأمین‌کنندگان 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 تأمین‌کنندگان کلیدی، بر اساس اهداف مشترک و انگیزه‌های عملکردی، یک زنجیره تأمین قابل اعتمادتر و پاسخگوتر را تقویت می‌کند. اجرای اصول زنجیره تأمین ناب، اتلاف را به حداقل رسانده و فعالیت‌های مربوط به تأمین را ساده می‌کند. توسعه ارتباطات و همکاری‌ها نیز تضمین می‌کند که تأمین‌کنندگان، 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 مگاپروژه‌ها کمک کند و احتمال موفقیت مگاپروژه‌ها را افزایش دهد.

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

اهمیت مگاپروژه‌ها در دنیای امروز قابل چشم‌پوشی نیست. مگاپروژه‌ها برای پاسخ به نیازهای زیرساختی جهانی، پیشبرد توسعه اقتصادی و شکل‌دهی به آینده جوامع ضروری هستند. با این حال، اکثر مگاپروژه‌ها با شکست مواجه می‌شوند. پیچیدگی و مقیاس ذاتی مگاپروژه‌ها 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 مگاپروژه‌ها هستند. بنابراین، ارزیابی علل شکست در برنامه زمان‌بندی و افزایش هزینه در مگاپروژه‌ها از جمله مسائل مهم در مدیریت مگاپروژه‌ها است. این مطالعه بر اهمیت پرداختن به علل تأخیرها و افزایش هزینه‌ها در مگاپروژه‌ها 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 مگاپروژه‌ها انتخاب شده و در اولویت توجه و رسیدگی می‌باشند. از طرفی، " شرایط آب و هوایی نامطلوب" به عنوان اولویت آخر انتخاب شده و در حال حاضر نیازمند اقدامات پیشگیرانه نمی‌باشد. شیداوو و ختلی<sup>۱</sup> (۲۰۲۰) در پژوهش خود، به ارزیابی علل افزایش زمان و هزینه در مگاپروژه‌ها 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 توسعه‌یافته منجر به رفع برخی نواقص روش FMEA مرسوم مانند عدم ارائه رتبه‌بندی کامل گزینه‌ها و عدم در نظر گرفتن وزن برای معیارها شده است. تعداد محدود خبرگان در حوزه مدیریت مگاپروژه‌ها 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 تامین کنندگان"، ما در آینده به بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی و کاهش زمان اتمام مگاپروژه‌ها با استفاده از ماژولارسازی آن‌ها و همچنین طراحی شبکه تامین کنندگان با توسعه مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی گسترش خواهیم داد.

<sup>1</sup> Tshidavhu & Khatleli

**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 شاهدهی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافی ندارند.

## منابع

1. Aboutorab, H., et al., ZBWM: The Z-number extension of Best Worst Method and its application for supplier development. *Expert Systems with Applications*, 2018. 107: p. 115-125.
2. Aiyetan, A.O. and D.K. Das, Factors and strategies for improving construction management on sites in mega-projects in South Africa: An explorative survey. *Infrastructures*, 2022. 7(2): p. 19.
3. Alhammedi, Y., Mohammad S. Al-Mohammad, and Rahimi A. Rahman. "Modeling the Causes and Mitigation Measures for Cost Overruns in Building Construction: The Case of Higher Education Projects." *Buildings* 14.2 (2024): 487.
4. Aljohani, A., D. Ahiaga-Dagbui, and D. Moore, Construction projects cost overrun: What does the literature tell us? *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 2017. 8(2): p. 137.
5. AlKhatib, M., and S. Altarazi. "A customized root cause analysis approach for cost overruns and schedule slippage in paper-machine-building projects." *Management and Production Engineering Review* (2019).
6. Alvand, A., et al., 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*, 2021: p. 1-23.
7. Amini, A., A. Alinezhad, and D. Gharakhani. "A New Rough BWM Approach for Evaluating and Selecting a Sustainable Supplier in Supply Chain Management." *Journal of Industrial Management Perspective* 13.3 (2023): 9-38. (In Persian)
8. Baloyi, L. and M. Bekker, 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*, 2011. 18(1): p. 51-67.
9. Boateng, P., Z. Chen, and S.O. Ogunlana, An Analytical Network Process model for risks prioritisation in megaprojects. *International journal of project management*, 2015. 33(8): p. 1795-1811.
10. Castelblanco, G., et al., Combining stakeholder and risk management: Multilayer network analysis for complex megaprojects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2024. 150(2): p. 04023161.
11. Corrente, S., S. Greco, and J. Rezaei. "Better decisions with less cognitive load: The Parsimonious BWM." *Omega* 126 (2024): 103075.
12. Del Cerro Santamaria G. Megaprojects, development and competitiveness: Building the infrastructure for globalization and neoliberalism. *Athens journal of social sciences*. 2019;6(4):263-90.
۱۳. Denicol, J., A. Davies, and I. Krystallis. "What are the causes and cures of poor megaproject performance? A systematic literature review and research agenda." *Project management journal* 51.3 (2020): 328-345.
14. Famiyeh, S., et al., Major causes of construction time and cost overruns: A case of selected educational sector projects in Ghana. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2017. 15(2): p. 181-198.
15. Flyvbjerg B. Introduction: The iron law of megaproject management. *Bent Flyvbjerg*. 2017 Apr:1-8.
16. Flyvbjerg, B., Make megaprojects more modular. *Harvard Business Review*, 2021: p. 58-63.
17. Flyvbjerg, B., What you should know about megaprojects and why: An overview. *Project management journal*, 2014. 45(2): p. 6-19.
18. Ghiaci, A.M. and S.J. Ghoushchi, Assessment of barriers to IoT-enabled circular economy using an extended decision-making-based FMEA model under uncertain environment. *Internet of Things*, 2023: p. 100719.
19. Ghiaci, A.M., et al., Barriers to Blockchain Adoption in Humanitarian Logistics in an Uncertain Environment. 2024. (In Persian)
20. Ghoushchi, S.J., S. Yousefi, and M. Khazaeili, An extended FMEA approach based on the Z-MOORA and fuzzy BWM for prioritization of failures. *Applied soft computing*, 2019. 81: p. 105505.
21. Ghoushchi, S., et al. "Evaluation of wind turbine failure modes using the developed SWARA-CoCoSo methods based on the spherical fuzzy environment." *IEEE Access* 10 (2022): 86750-86764.
22. Ghoushchi, S., et al. "Landfill site selection for medical waste using an integrated SWARA-WASPAS framework based on spherical fuzzy set." *Sustainability* 13.24 (2021): 13950. (In Persian)

23. Gómez-Cabrera, A., L. Gutierrez-Bucheli, and S. Muñoz. "Causes of time and cost overruns in construction projects: a scoping review." *International Journal of Construction Management* 24.10 (2024): 1107-1125.
24. Goodarzi, N., and A. Nazari. "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 (2024): 141-168. (In Persian)
25. Gul, M., and M. Fatih Ak. "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 (2021): 6157-6178.
26. Guo, S. and H. Zhao, Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. *Knowledge-based systems*, 2017. 121: p. 23-31.
27. Hamad, S.. "Cause of delay and cost overrun in infrastructure projects." *Journal of Global Economics and Business* 4.15 (2023): 11-24.
28. Jafarzadeh Ghouschi, S., et al., Road safety assessment and risks prioritization using an integrated SWARA and MARCOS approach under spherical fuzzy environment. *Neural Computing and Applications*, 2022: p. 1-19.
29. Jafarzadeh Ghouschi, S., et al. "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 (2022): 79735-79753.
30. Jafarzadeh Ghouschi, S., S. Rahnamay Bonab, and A. Memarpour Ghiaci. "A decision-making framework for COVID-19 infodemic management strategies evaluation in spherical fuzzy environment." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 37.4 (2023): 1635-1648.
31. Karamoozian, A. and D. Wu, A hybrid risk prioritization approach in construction projects using failure mode and effective analysis. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2020. 27(9): p. 2661-2686.
32. Kardes, I., et al., Managing global megaprojects: Complexity and risk management. *International business review*, 2013. 22(6): p. 905-917.
33. Khalilzadeh, M., et al., 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*, 2021.
34. Kiani, M., et al. "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 (2023): 9-45. (In Persian)
35. Ma, H., et al., The societal governance of megaproject social responsibility. *International Journal of Project Management*, 2017. 35(7): p. 1365-1377.
36. Mabaso, M., Risk identification in megaprojects and its impacts on project management constraints in civil engineering and construction companies. 2022, Cape Peninsula University of Technology.
37. McKinsey&Company. Increasing transparency in megaproject execution. 2023; Available from: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/increasing-transparency-in-megaproject-execution>.
38. Memarpour Ghiaci, A. and J. Gheidar-Kheljani, 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*, 2024. 9(2): p. 149-176. (In Persian)
- 39.1. Memarpour Ghiaci A, Karimi Gavarehshki MH. An integrated Z-SWARA-MARCOS approach based on SWOT analysis to select infectious disease vaccination strategies. *Modern Research in Decision Making*. 2024 Jul 10;9(2):130-62. (In Persian)
40. Memarpour Ghiaci, A., H. Garg, and S. Jafarzadeh Ghouschi, Improving emergency departments during COVID-19 pandemic: a simulation and MCDM approach with MARCOS methodology in an uncertain environment. *Computational and Applied Mathematics*, 2022. 41(8): p. 1-23.
41. Olatunji, O., et al. "Causal relationship between project financing and overruns in major dam projects in Africa." *Engineering, Construction and Architectural Management* (2024).
42. Oyegoke, A.S. and N. Al Kiyumi, The causes, impacts and mitigations of delay in megaprojects in the Sultanate of Oman. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 2017. 22(3): p. 286-302.
43. Park, J., C. Park, and Suneung Ahn. "Assessment of structural risks using the fuzzy weighted Euclidean FMEA and block diagram analysis." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 99 (2018): 2071-2080.
44. Platoni S, Timpano F. The economics of mega-projects. *Megaproject Management: A Multidisciplinary Approach to Embrace Complexity and Sustainability*. 2020:43-54.
45. Rezaei, J., A. Arab, and M. Mehregan, Analyzing anchoring bias in attribute weight elicitation of SMART, Swing, and best-worst method. *International Transactions in Operational Research*, 2024. 31(2): p. 918-948.
46. Rezaei, J., Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 2015. 53: p. 49-57.
47. Rostami, A. and C.F. Oduoza, Key risks in construction projects in Italy: contractors' perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2017. 24(3): p. 451-462.

48. Saaty, T.L., Analytic hierarchy process. Encyclopedia of operations research and management science. Encyclopedia of Operations Research and Management Science, US: Springer, 2013: p. 52-64.
49. Söderlund, J., S. Sankaran, and C. Biesenthal, The past and present of megaprojects. 2017, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA. p. 5-16.
50. Stević, Ž., et al., Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COMpromise solution (MARCOS). Computers & Industrial Engineering, 2020. 140: p. 106231.
51. Tshidavhu, F. and N. Khatleli, 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, 2020. 27(1): p. 119-143.
52. Van Marrewijk, A., et al., Managing public–private megaprojects: Paradoxes, complexity, and project design. International journal of project management, 2008. 26(6): p. 591-600.
53. Walsh, A., P. Walker, and M. Ellis, The Underestimation of Cultural Risk in the Execution of Megaprojects. International Journal of Civil and Environmental Engineering, 2014. 15(1): p. 33-40.
54. Wang, S., H.-Y. Chong, and W. Zhang, The impact of BIM-based integration management on megaproject performance in China. Alexandria Engineering Journal, 2024. 94: p. 34-43.
55. Watermeyer, R. and S. Phillips, Public infrastructure delivery and construction sector dynamism in the South African economy. Background Paper. NPC's Economy Series. Pretoria: NPC, 2020.
56. Zadeh, L.A., A note on Z-numbers. Information sciences, 2011. 181(14): p. 2923-2932.