

Evaluation of Suppliers in Modular Megaprojects Using LOPCOW-ARTASI in an Uncertain Environment

Ali Memarpour Ghiaci 

Ph.D Student, Industrial Engineering
Department, Malek Ashtar University of
Technology, Tehran 1774-15875, Iran

Morteza Abbasi* 

Assistant Professor, Industrial
Engineering Department, Malek Ashtar
University of Technology, Tehran 1774-
15875, Iran

Jafar Gheidar-Kheljani 

Associate Professor, Industrial
Engineering Department, Malek Ashtar
University of Technology, Tehran 1774-
15875, Iran

Abstract

Suppliers evaluation plays a pivotal role in the success of modular megaprojects, as these projects require capable suppliers due to the necessity for complex coordination among various subsystems and the precise integration of modules. This study proposes an integrated framework for the evaluation of suppliers in modular megaprojects. For the first time, this research applies a novel integrated approach based on the LOPCOW and ARTASI methods, extended using spherical fuzzy sets (SF-LOPCOW and SF-ARTASI) for supplier evaluation. Based on this approach, 31 sustainability-oriented criteria have been identified for evaluating suppliers in modular megaprojects. The criteria are first weighted using the SF-LOPCOW method. Subsequently, in a case study, 12 suppliers identified for a modular

* Corresponding Author: mabbasi@mut.ac.ir

How to Cite: xxxxxxxx

megaproject are evaluated and prioritized using the SF-ARTASI method. A comparison of the SF-ARTASI results with other existing multi-criteria decision-making methods in the literature, along with a sensitivity analysis, demonstrates the effectiveness of the proposed approach and the robustness of its results under different scenarios.

Introduction

With the rapid expansion of the global economy, investment in large-scale projects worldwide has increased markedly over the past few decades. Projects with costs of one billion dollars or more are recognized as megaprojects. Megaprojects are inherently associated with growth, development, and competitiveness, acting as the infrastructure of globalization. Modularization is a key driver for reducing the time and cost of megaprojects. With the modularization of megaprojects, the evaluation and selection of suppliers acquire particular importance. The question therefore arises: how can suppliers for modular megaprojects be evaluated in the long term while concurrently reducing project delays? The present study concentrates on this critical issue, which can assist project and megaproject managers from a sustainable development perspective. First, it is essential to collect core criteria from various dimensions—economic, environmental, and social—to evaluate a sustainable supplier; then, by employing a multi-criteria decision-making (MCDM) method, the relative importance of these criteria is determined and suppliers are subsequently evaluated and prioritized. The supplier evaluation problem is complex and involves uncertainty across all sustainability dimensions (economic, environmental, and social).

The main objective of this study is to evaluate and prioritize suppliers of modular megaprojects by proposing a novel approach under uncertainty. This study intends, for the first time, to apply the developed SF-LOPCOW-ARTASI method to the supplier evaluation problem. This method is capable of handling both uncertainty and group decision-making simultaneously. In this research, the supplier evaluation problem for megaprojects is, for the first time, conducted based on sustainability dimensions within a spherical fuzzy environment. The approach is presented for the first time by using the LOPCOW method developed on the basis of spherical fuzzy sets (SF-LOPCOW) to weight the criteria, and the ARTASI method developed on the basis of spherical fuzzy sets (SF-ARTASI) to prioritize suppliers of modular megaprojects.

Method

The present study employs an integrated approach. In the first stage, supplier evaluation criteria are identified and, after defining the alternatives, data derived from the judgments of the decision-making team are collected as linguistic variables based on spherical fuzzy sets. Subsequently, following the evaluation of suppliers against the identified criteria, the criteria weights are calculated using the SF-LOPCOW method. Finally, by implementing the SF-ARTASI method, suppliers are assessed according to the criteria and prioritized. Using purposive sampling, the decision-making team consisted of eleven experts with experience and specialization in management systems implementation consultancy, engineering, and project and megaproject management. Information on the members indicates that the majority of the expert team have between eight and fourteen years of professional experience.

Discussion and Results

To illustrate the applicability of the proposed approach, suppliers for modular megaprojects were evaluated and prioritized using this approach. In this study, twelve suppliers were assessed and ranked using 31 evaluation criteria. First, each supplier was evaluated by the decision-making team according to the identified criteria using linguistic variables based on spherical fuzzy sets. Given the uncertainty inherent in the evaluation criteria, spherical fuzzy sets were employed to address this uncertainty. The relative importance of the criteria was then determined using the developed LOPCOW method based on spherical fuzzy sets. According to this method, cost, strategy and organization, and the amount of waste generated received the highest importance weights of 0.087, 0.083, and 0.079, respectively. Subsequently, using the proposed approach, suppliers were evaluated and prioritized by applying the developed ARTASI method based on spherical fuzzy sets, taking into account the evaluation criteria and their importance degrees. The results indicate that S3, S9, and S7 ranked first through third, respectively.

Finally, a sensitivity analysis was designed in the form of multiple scenarios to examine the relationship between the outcomes produced by the proposed approach under varying conditions and the study's findings. This analysis investigated the variation in the final utility function and the resulting ranking of alternatives as the values of φ and α changed; in both cases, the ranges of variation were negligible and not statistically significant.

Conclusion

Due to the need for complex coordination among subsystems and precise integration of modules, the success of modular megaprojects largely depends on the evaluation and selection of capable suppliers. The present study introduces an integrated approach for supplier evaluation in modular megaprojects. Accordingly, a comprehensive list of sustainability criteria for evaluating and prioritizing suppliers of modular megaprojects was identified. The relative importance of these criteria was then determined using the SF-LOPCOW method. Subsequently, following the proposed approach, suppliers were evaluated and prioritized according to the criteria and their importance weights by applying the SF-ARTASI method. The limited number of experts in the field of megaproject management, and the absence of weighting expert judgments according to their knowledge and experience, represent limitations of this study. The use of aggregation operators to integrate expert judgments such as the spherical weighted arithmetic mean (SWAM) operator and the development and comparison of multi-criteria decision-making methods in other uncertain environments (e.g., Pythagorean fuzzy, q-rung, and Fermatean fuzzy sets), and comparing their results with the methods developed in the present study, are suggested for future research. Regardless of the case used to implement the proposed approach, the method is applicable to various supplier evaluation and selection scenarios for megaprojects. In future work, we will extend our research to optimize scheduling and reduce the completion time of modular megaprojects through the employment of appropriate suppliers.

Keywords: Megaproject management, Modular megaprojects, Supplier evaluation, Multi-criteria decision-making, ARTASI, LOPCOW, Spherical fuzzy sets.

ارزیابی تامین کنندگان در مگاپروژه‌های ماژولار با استفاده از رویکرد LOPCOW-ARTASI تحت عدم قطعیت

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

علی معمارپور غیاثی 

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

مرتضی عباسی  *

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

جعفر قیدر خلجانی 

چکیده

ارزیابی تامین کنندگان در موفقیت مگاپروژه‌های ماژولار نقشی تعیین کننده دارد؛ زیرا این پروژه‌ها به واسطه‌ی نیاز به هماهنگی پیچیده‌ی زیرسیستم‌های گوناگون و یکپارچگی دقیق ماژول‌ها، مستلزم همکاری با تامین کنندگانی توانمند هستند. هدف این تحقیق ارائه یک چارچوب یکپارچه جهت ارزیابی تامین کنندگان مگاپروژه‌های ماژولار است. در این پژوهش، برای اولین بار جهت ارزیابی تامین کنندگان از رویکرد ترکیبی مبتنی بر روش‌های LOPCOW و ARTASI توسعه یافته بر اساس مجموعه‌های فازی کروی (SF-LOPCOW و SF-ARTASI) استفاده شده است. این رویکرد قادر است هم‌زمان با عدم قطعیت و تصمیم‌گیری گروهی مقابله کند. بر اساس این رویکرد، ۳۱ معیار مبتنی بر ابعاد پایداری برای فرایند ارزیابی تامین کنندگان مگاپروژه‌های ماژولار شناسایی شده است. سپس، با استفاده از روش SF-LOPCOW وزن‌دهی به معیارها انجام می‌شود. بر اساس نتایج این مرحله، هزینه، استراتژی و سازمان‌دهی و میزان پسماند تولیدی به ترتیب با ۰,۰۸۷، ۰,۰۸۳ و ۰,۰۷۹ بیشترین وزن‌ها را به خود اختصاص دادند. در آخر، بر اساس یک مطالعه موردی ۱۲ شرکت تامین کننده تعیین شده برای مسئله ارزیابی تامین کنندگان مگاپروژه‌های ماژولار از طریق روش SF-ARTASI ارزیابی و اولویت‌بندی می‌گردند. مقایسه نتایج SF-ARTASI با سایر

روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره موجود در ادبیات و همچنین تحلیل حساسیت، کارآمدی رویکرد پیشنهادی و پایداری رتبه‌بندی آن را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: مدیریت مگاپروژه، مگاپروژه‌های ماژولار، ارزیابی تامین‌کننده، تصمیم‌گیری چندمعیاره، ARTASI، LOPCOW، مجموعه‌های فازی کروی.

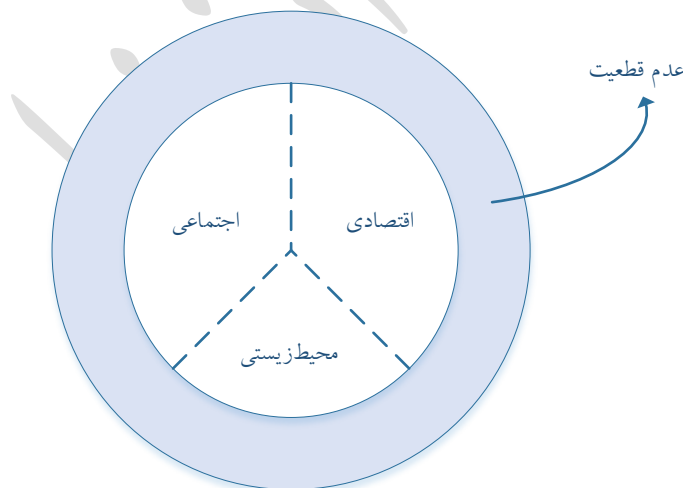
آماده انتشار

مقدمه

با گسترش سریع اقتصاد جهانی، سرمایه‌گذاری در پروژه‌های عظیم در سطح جهان طی چند دهه گذشته به طرز چشمگیری افزایش یافته است (Wang et al., 2024). پروژه‌هایی که هزینه آن‌ها یک میلیارد دلار یا بیشتر است، به عنوان مگاپروژه‌ها شناخته می‌شوند (Flyvbjerg, 2014). این پروژه‌ها نقش حیاتی در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه ایفا می‌کنند و بر پویایی‌های سیاسی، اثرات اجتماعی و نتایج اقتصادی تأثیر می‌گذارند (Rostami & Oduoza, 2017). مگاپروژه‌ها به طور ذاتی با رشد، توسعه و رقابت‌پذیری مرتبط هستند و به‌عنوان زیرساخت‌های جهانی‌شدن عمل می‌کنند (Ashkanani & Franzoi, 2023).

مگاپروژه‌ها هزینه زیادی دارند و ریسک‌های زیادی می‌تواند باعث تاخیر یا شکست در طول اجرای آن شوند (Karamoozian & Wu, 2020; Tshidavhu & Khatleli, 2020). در عمل، افزایش هزینه نسبت به بودجه برنامه‌ریزی شده و افزایش زمان نسبت به برنامه زمان‌بندی، دو مشکل رایج در اجرای مگاپروژه‌ها هستند (Aljohani et al., 2017; Famiyeh et al., 2017). "قانون آهنین مگاپروژه‌ها" تمایل مگاپروژه‌ها به فراتر رفتن از بودجه‌ها، عدم تحقق زمان‌بندی‌ها و ارائه مزایای کمتر از انتظار را نشان می‌دهد (Flyvbjerg, 2021). خانه اپرای سیدنی نمونه‌ای از یک مگاپروژه است که بیش از بودجه برنامه‌ریزی‌شده، هزینه داشت و خارج از برنامه زمان‌بندی پیشنهادی تکمیل شد. تکمیل این مگاپروژه ده سال بیش از زمان برنامه‌ریزی‌شده به طول انجامید و هزینه ساخت آن ۱۴۰۰ درصد بیش از بودجه برنامه‌ریزی‌شده بود (Flyvbjerg, 2014). تنها خانه اپرای سیدنی نیست و مگاپروژه‌های بسیاری مگاپروژه‌ها افزایش هزینه نسبت به بودجه برنامه‌ریزی‌شده و افزایش زمان نسبت به برنامه زمان‌بندی را تجربه می‌کنند (Flyvbjerg, 2021). زمانی که زیرساخت به پایان عمر خود می‌رسد (مثلاً به دلایل اقتصادی، قانونی یا عملکردی)، برخی اجزا هنوز دارای عمر باقی‌مانده‌ای هستند که معمولاً هدر می‌رود. ماژولارسازی می‌تواند با استفاده مجدد از کل ماژول‌ها (یا اجزای آن‌ها) و حفظ کارایی آن‌ها در سایر زیرساخت‌ها، امکان استفاده از این اجزایی که به پایان عمر خود نرسیده‌اند را فراهم آورد (Mignacca & Locatelli, 2021). بنابراین، ماژولارسازی یک محرک کلیدی برای کاهش زمان و هزینه مگاپروژه‌ها است (Flyvbjerg, 2021). با ماژولار شدن مگاپروژه‌ها، ارزیابی و

انتخاب تأمین کنندگان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود. شواهد این مطلب را می‌توان از مطالعه ژائو و همکاران^۱ (۲۰۱۹) استخراج کرد که اظهار داشته‌اند ارزیابی و انتخاب تأمین کننده تأثیر مستقیمی بر عملکرد مگاپروژه‌های ماژولار دارد. حال این سوال مطرح می‌شود که چگونه می‌توان تأمین کنندگان مگاپروژه‌های ماژولار را در بلندمدت و همزمان با کاهش تأخیرات پروژه ارزیابی کرد. مطالعه‌ی حاضر بر این موضوع حیاتی متمرکز شده است که می‌تواند به مدیران پروژه و مگاپروژه با در نظر گرفتن دیدگاه توسعه‌ی پایدار کمک کند. در گام اول، جمع‌آوری معیارهای اساسی از ابعاد مختلف نظیر اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی برای ارزیابی تأمین کننده‌ی پایدار ضروری است و سپس با بهره‌گیری از یک روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) درجه اهمیت این معیارها را تعیین و سپس تأمین کنندگان را ارزیابی و اولویت‌بندی کرد. مسئله ارزیابی تأمین کنندگان از جمله مسائل پیچیده است و در تمامی ابعاد پایداری (اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی) شامل عدم قطعیت است (شکل ۱) (Elkington & Rowlands, 1999; Nadeem et al., 2020).



شکل ۱. ابعاد پایداری و عدم قطعیت

¹ Zhao et al.

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مجموعه ابزار ارزشمندی را برای ارزیابی تأمین‌کنندگان پروژه در ابعاد مختلف ارائه می‌دهند و با ارزیابی گزینه‌ها، مناسب‌ترین آن‌ها را معرفی می‌کنند. ایچر و پاموکار^۱ (۲۰۲۲) روش LOPCOW را به عنوان یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره جهت وزن‌دهی به معیارها معرفی کردند. در این روش برخلاف روش‌های وزن‌دهی ذهنی (مانند AHP، SWARA، FUCOM و ...)، وزن‌ها صرفاً بر اساس داده‌ها تعیین می‌شوند و احتمال بروز سوگیری‌های شناختی کاهش می‌یابد (Durdu, 2025). همچنین، از آنجا که روش LOPCOW تغییرات درصدی لگاریتمی را در نظر می‌گیرد و نه مقادیر خام داده‌ها، تسلط معیارهایی با دامنه‌های عددی بزرگ و همچنین تأثیر نقاط پرت کاهش یافته و پایایی فرآیند وزن‌دهی افزایش می‌یابد (Ecer et al., 2025). به منظور ارزیابی ریسک‌های بالقوه‌ی مربوط به پروژه‌های تحقیق و توسعه در سیستم‌های برنامه‌نویسی آفلاین برای ربات‌های صنعتی، رونگ و همکاران^۲ (۲۰۲۴) یک رویکرد تصمیم‌گیری مبتنی بر روش‌های LOPCOW و ARAS بر اساس اطلاعات فازی فرماتین با مقادیر بازه‌ای ارائه کردند. گورچان و همکاران^۳ (۲۰۲۴) نیز از روش‌های LOPCOW و MARCOS برای ارزیابی و انتخاب خودروهای یخچال‌دار جاده‌ای دوسندار محیط‌زیست در زنجیره لجستیک مواد غذایی استفاده کردند. هرووا و همکاران^۴ (۲۰۲۵) از رویکرد یکپارچه مبتنی بر روش‌های LOPCOW و COPRAS بر اساس داده‌های فازی q-rung برای انتخاب روش مناسب برای پردازش پسماند غذایی استفاده کردند. روش ARTASI توسط پاموکار و همکاران^۵ (۲۰۲۴) معرفی شد. آن‌ها اولین بار از این روش برای انتخاب بهترین پلتفرم کلان داده استفاده کردند. روش ARTASI به دلیل فرآیند استانداردسازی دومرحله‌ای خود توصیه می‌شود، که منجر به دستیابی به نتایج پایدارتر می‌گردد. با بهره‌گیری از تابع نرمال‌سازی جدید، تکنیک ARTASI مسئله معکوس شدن رتبه در اغلب روش‌های مرسوم MCDM نظیر MABAC، TOPSIS و WASPAS را حل می‌کند. همچنین، روش ARTASI قابلیت توسعه با به کارگیری نظریه‌های عدم قطعیت را داراست (Kara et al., 2025). یالچین و همکاران^۶ (۲۰۲۵) از رویکرد یکپارچه SF-LODECI-ARTASI برای

¹ Ecer and Pamucar

² Rong et al.

³ Görçün et al.

⁴ Dhruva et al.

⁵ Pamucar et al.

⁶ Yalçın et al.

مسئله انتخاب بیمه تجاری استفاده کردند. چوبانوگولاری و همکاران^۱ (۲۰۲۵) از ترکیب روش‌های وزن‌دهی عینی آنتروپی و CRITIC با روش ARTASI جهت اولویت‌بندی کشورها بر اساس شاخص‌های مختلف نظیر خروجی‌های دانش و فناوری استفاده کرد. پاموکار و همکاران^۲ (۲۰۲۵) رویکرد یکپارچه WENSLO-ARTASI را جهت ارزیابی و اولویت‌بندی فرودگاه‌ها بر اساس کارایی معرفی کردند.

نظریه‌ی مجموعه‌های فازی توسط لطفی (۱۹۶۵) معرفی شد تا ابهام و عدم قطعیت را در مسائل پیچیده برطرف سازد. از آن زمان تاکنون، مجموعه‌های فازی در بسیاری از حوزه‌های پژوهشی کاربرد یافته‌اند (Hosseini et al., 2021; Memarpour Ghiaci et al., 2025) و این نظریه برای ارائه‌ی نتایجی قابل اعتمادتر گسترش یافته است. در مطالعه‌ی دیگر، زاده (۱۹۷۵) مجموعه‌های فازی نوع ۲ را معرفی کرد؛ در مقایسه با تابع عضویت مجموعه‌های فازی نوع ۱ که دو بعدی و ثابت است، مجموعه‌های فازی نوع ۲ دارای تابع عضویت سه‌بعدی فازی هستند که آزادی بیشتری را به تصمیم‌گیرندگان در فرایند تصمیم‌گیری می‌بخشند (Memarpour Ghiaci et al., 2024). مجموعه‌های فازی شهودی ساختاری دوبعدی است که هم درجه‌ی عضویت و هم درجه‌ی عدم عضویت را تعریف می‌کند. آتاناسوف و آتاناسوف^۳ (۱۹۹۹) با معرفی نماگرهای درجه‌ی عضویت $(\mu(x))$ و درجه‌ی عدم عضویت $(v(x))$ ، مجموعه‌های فازی شهودی را توسعه داد، به‌طوری که $0 \leq \mu(x) + v(x) \leq 1$ برقرار باشد. یاگر^۴ (۲۰۱۳) مجموعه‌های فازی فیثاغورسی را توسعه داد به گونه‌ای که $0 \leq \mu^2(x) + v^2(x) \leq 1$ برقرار باشد؛ این مجموعه تعمیمی بر مجموعه‌های فازی شهودی است (Ghiaci & Ghoushchi, 2023; Keshavarz- Ghorabae, 2024). در نهایت، مجموعه‌ی فازی کروی توسط کوتلو گوندوخلو و کهرمان^۵ (۲۰۱۹) پیشنهاد شد که شکل تعمیم‌یافته‌ی مجموعه‌های فازی نوتروسوفیک و فیثاغورسی است (Jafarzadeh Ghoushchi et al., 2022; Memarpour Ghiaci et al., 2022).

^۱ Çobanoğulları et al.

^۲ Pamucar et al.

^۳ Atanassov and Atanassov

^۴ Yager

^۵ Kutlu Gündoğdu and Kahraman

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی و اولویت‌بندی تامین‌کنندگان مگاپروژه‌های ماژولار با ارائه یک رویکرد جدید تحت عدم قطعیت است. این رویکرد برای اولین بار با استفاده از روش LOPCOW توسعه‌یافته بر اساس مجموعه‌های فازی کروی (SF-LOPCOW) جهت وزن‌دهی به شاخص‌ها و روش ARTASI توسعه‌یافته بر اساس مجموعه‌های فازی کروی (SF-ARTASI) جهت اولویت‌بندی تامین‌کنندگان مگاپروژه‌های ماژولار ارائه می‌گردد. برخی از نوآوری‌های مطالعه حاضر عبارتند از:

- ارائه یک چارچوب یکپارچه LOPCOW-ARTASI بر اساس مجموعه‌های فازی کروی
- در نظر گرفتن معیارهای مرتبط با پایداری در ارزیابی تامین‌کنندگان مگاپروژه‌های ماژولار
- پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی در مسئله ارزیابی تامین‌کنندگان مگاپروژه‌های ماژولار
- مطالعه موردی جهت نشان دادن کارایی و قابلیت مدل
- مقایسه رویکرد توسعه‌یافته با برخی رویکردهای موجود در ادبیات جهت اعتبارسنجی مدل

پیشینه پژوهش

یکی از بخش‌یکی از مهم‌ترین مسائل در مدیریت مگاپروژه‌ها، توسعه روش‌هایی برای ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان است. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره کاربرد گسترده‌ای در مسائل مربوط به ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان که شامل معیارهای چندگانه و اغلب متضاد هستند، دارند (Memari et al., 2019).

امین‌دوست و همکاران (۲۰۱۲) با بهره‌گیری از نظریه مجموعه‌های فازی، به مسئله انتخاب تامین‌کننده پایدار پرداختند و روش رتبه‌بندی نوینی مبتنی بر سیستم استنتاج فازی ارائه کردند. مانی و همکاران^۱ (۲۰۱۴) بر ابعاد اجتماعی پایداری در مسئله انتخاب تامین‌کننده پایدار تمرکز کردند و با استفاده از روش AHP تامین‌کننده مناسب را در میان گروهی از تامین‌کنندگان شناسایی نمودند؛ این رویکرد در صنایع مختلف همچون سیمان، برق و خودرو به کار گرفته شد. لوترا و همکاران^۲ (۲۰۱۷) مدلی یکپارچه در سه بعد اساسی پایداری (اقتصادی، محیط‌زیستی، اجتماعی) ارائه کردند و با ترکیب روش‌های AHP و VIKOR

¹ Mani et al.

² Luthra et al.

بهترین تأمین کننده را بر اساس ۲۲ معیار برگزیدند. جواهر و پنت^۱ (۲۰۱۷) رویکردی مبتنی بر تحلیل پوششی داده‌ها (DEA) برای مسئله انتخاب تأمین کننده پایدار پیشنهاد کردند. ژو و می^۲ (۲۰۱۷) مرور جامعی بر پایداری اجتماعی در مگاپروژه‌ها انجام دادند و توصیه‌هایی برای پژوهشگران علاقه‌مند به مسئولیت اجتماعی در این حوزه ارائه کردند. چراغعلی پور و فرساد (۲۰۱۸) روش بهترین-بدترین (BWM) را برای وزن‌دهی معیارها مناسب دانستند و سپس با مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) تلاش کردند امتیاز کل تأمین کنندگان را بیشینه و هزینه کل را بر اساس رویکرد پایداری کمینه نمایند. خان و همکاران^۳ (۲۰۱۸) روشی مبتنی بر چشم‌اندازهای پایداری ارائه کردند؛ آن‌ها با استفاده از روش آنتروپی شانون وزن معیارها را تعیین و با سیستم استنتاج فازی تأمین کنندگان را رتبه‌بندی کردند. رشیدی و کولینان^۴ (۲۰۱۹) روش‌های TOPSIS فازی و DEA فازی را در زمینه انتخاب تأمین کننده پایدار مقایسه نمودند. لیو و همکاران^۵ (۲۰۱۹) یک مدل یکپارچه مبتنی بر BWM در محیط فازی شهودی بازه‌ای ارائه دادند. یاداوالی و همکاران^۶ (۲۰۱۹) با به‌کارگیری تئوری اعداد Z، روش TOPSIS توسعه‌یافته را برای حل مسئله سنتی انتخاب تأمین کننده به‌کار گرفتند و همچنین مدلی دودسته‌ای را با برنامه‌ریزی آرمانی حل کردند تا موازنه میان حداکثرسازی پایداری و کمینه‌سازی هزینه‌ها را برقرار سازند. یو و همکاران^۷ (۲۰۱۹) چارچوب نوینی مبتنی بر تصمیم‌گیری گروهی ارائه کردند؛ آن‌ها از گروه TOPSIS برای تصمیم‌گیری جمعی و از رویکرد فازی فیثاغورسی برای مدیریت عدم قطعیت بهره‌جستند. زو و همکاران^۸ (۲۰۱۹) از روش AHP در محیط فازی نوع-۲ بازه‌ای استفاده کردند و آن را در مطالعه موردی انتخاب تأمین کننده مواد پایدار آزمودند. معماری و همکاران (۲۰۱۹) با در نظر گرفتن ۹ معیار و ۳۰ زیرمعیار، از TOPSIS فازی شهودی برای رتبه‌بندی تأمین کنندگان بر اساس شاخص‌های پایداری استفاده کردند. هی و همکاران^۹ (۲۰۱۹) رابطه میان عملکرد پروژه و مسئولیت اجتماعی در مگاپروژه‌ها را بررسی کردند و

¹ Jauhar and Pant

² Zhou and Mi

³ Khan et al.

⁴ Rashidi and Cullinane

⁵ Liu et al.

⁶ Yadavalli et al.

⁷ Yu et al.

⁸ Xu et al.

⁹ He et al.

نشان دادند مسئولیت اجتماعی می‌تواند عملکرد پروژه را مستقیماً تحت تأثیر قرار دهد. تیرکلانی و همکاران (۲۰۲۰) به ترتیب از ANP فازی برای رتبه‌بندی معیارها، DEMATEL فازی برای شناسایی روابط میان معیارها و TOPSIS فازی برای رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان بهره بردند. هندیانی و همکاران^۱ (۲۰۲۰) چارچوب سلسله‌مراتبی تصمیم‌گیری برای انتخاب تأمین‌کننده پایدار پیشنهاد کردند و از BWM فازی با توابع عضویت دوزنقه‌ای استفاده کردند. محمودی و همکاران (۲۰۲۱) از رویکرد توسعه یافته OPA برای انتخاب تأمین‌کننده پایدار در مگاپروژه‌ها استفاده کردند. فلاح‌پور و همکاران (۲۰۲۱) با توسعه یک مدل ترکیبی شامل روش‌های FANP، FBWM، FDEMATEL و FIS به مسئله ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان بر اساس ۳۰ معیار در سه بعد عمومی، پایداری و تاب‌آوری پرداختند. حسینی و همکاران (۲۰۲۱) از مدل ترکیبی روش BWM فازی و سیستم استنتاج فازی برای انتخاب تأمین‌کننده پایدار استفاده بهره بردند. در فاز نخست، پس از تعیین ۱۹ معیار، وزن نهایی معیارها استفاده از رویکرد BWM فازی محاسبه می‌شود. در فاز دوم، با اجرای سیستم استنتاج فازی موزون، پایدارترین تأمین‌کننده انتخاب شده است. اوناو و تمور^۲ (۲۰۲۱) از روش AHP توسعه‌یافته بر اساس مجموعه‌های فازی گروهی برای ارزیابی چهار معیار اقتصادی، کیفیت، اجتماعی و زیست‌محیطی در مسئله انتخاب تأمین‌کننده پایدار استفاده کردند. شانل و همکاران^۳ (۲۰۲۲) از روش ترکیبی BWM، آنتروپی شانون فازی و MULTIMOORA فازی برای انتخاب تأمین‌کننده پایدار استفاده کردند. آن‌ها وزن معیارها را با استفاده از روش‌های BWM، آنتروپی شانون فازی محاسبه کرده و پس از ترکیب وزن‌های بدست آمده از این دو روش، تأمین‌کنندگان را با استفاده از روش MULTIMOORA ارزیابی و اولویت‌بندی کردند. سو و همکاران^۴ (۲۰۲۲) با استفاده از روش آنتروپی وزن معیارهای ارزیابی تأمین‌کنندگان را تعیین و سپس با استفاده از روش TODIM تأمین‌کنندگان امنیت سامانه‌های صنعتی را ارزیابی و اولویت‌بندی کردند. لیانگ و همکاران^۵ (۲۰۲۳) از تکنیک TOPSIS فازی مجدد در مسئله ارزیابی و انتخاب تأمین‌کنندگان پایدار قطعات پیش‌ساخته استفاده کردند. حاجی‌آقایی

¹ Hendiani et al.

² Unal and Temur

³ Shang et al.

⁴ Su et al.

⁵ Liang et al.

کشتلی و همکاران (۲۰۲۳) از روش TOPSIS توسعه یافته بر اساس مجموعه های فازی فیثاغورثی برای ارزیابی و انتخاب تامین کننده در صنعت غذا استفاده کردند. لین و همکاران^۱ (۲۰۲۴) از رویکرد ترکیبی مبتنی بر روش های تصمیم گیری چندمعیاره برای ارزیابی تامین کنندگان خانه های پیش ساخته استفاده کردند. آنها با استفاده از روش آنتروپی ۱۹ شاخص ارزیابی را وزن دهی و سپس به ارزیابی تامین کنندگان با روش VIKOR پرداختند. دنگ و همکاران^۲ (۲۰۲۴) از یک چارچوب تصمیم گیری ترکیبی بهبود یافته مبتنی بر اصول ناب، AHP و VIKOR برای انتخاب تامین کننده برای خطوط تولید قطعات پیش ساخته استفاده کردند. هلاک^۳ (۲۰۲۴) در مسئله ارزیابی و انتخاب تامین کننده برای مگا پروژه های ساخت و ساز در مناطق آسیب دیده از بحران های انسانی و طبیعی از رویکرد مبتنی بر AHP فازی استفاده کردند. کریستانتو و همکاران^۴ (۲۰۲۵) از روش های MOORA فازی و VIKOR فازی برای ارزیابی و انتخاب تامین کننده استفاده کردند. موروگان و ونگ^۵ (۲۰۲۵) از روش BWM توسعه یافته در محیط فازی برای ارزیابی و انتخاب تامین کننده پایدار بهره بردند. آنها از روش BWM فازی برای وزن دهی به معیارهای ارزیابی و همچنین اولویت بندی تامین کنندگان برچسب بطری استفاده کردند.

کاربردهای روش های LOPCOW و ARTASI در مسائل مختلف تصمیم گیری توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. نیسل و نیسل^۶ (۲۰۲۴) از یک رویکرد یکپارچه مبتنی بر روش های LOPCOW و COCOSO برای ارزیابی و اولویت بندی کشورها بر اساس سطح نوآوری استفاده کردند. دوند^۷ (۲۰۲۴) از رویکرد یکپارچه LOPCOW-CRADIS جهت ارزیابی دانشگاه ها استفاده کرد. در این پژوهش، عملکرد ۲۰۰ دانشگاه دولتی و غیردولتی فعال در کشور ترکیه از نظر ظرفیت های اجرای پروژه های پژوهشی مورد ارزیابی قرار گرفته است و دانشگاه ها بر این اساس اولویت بندی شدند. کارا و همکاران^۸ (۲۰۲۴) برای انتخاب فرد مناسب که شایستگی هایش با شرح شغل همخوانی دارد، از رویکرد

¹ Lin et al.

² Dang et al.

³ Hallak

⁴ Christanto et al.

⁵ Murugan and Wong

⁶ Nişel and Nişel

⁷ Dündar

⁸ Kara et al.

یکپارچه PFS-CIMAS-ARTASI استفاده کردند. شارما و همکاران^۱ (۲۰۲۵) از رویکرد یکپارچه LOPCOW-DOBI برای انتخاب تامین کننده پایدار استفاده کردند. کلش و کاوچی^۲ (۲۰۲۵) کشورها را بر اساس شاخص عملکرد لجستیک با استفاده از رویکرد یکپارچه WENSLO-ARTASI ارزیابی و اولویت بندی کردند. تاتار و همکاران^۳ (۲۰۲۵) از رویکرد یکپارچه FUCOM-ARTASI بر اساس مجموعه های گروهی جهت ارزیابی ریسک ارگونومی برای کارکنان در عملیات بندری دریایی استفاده کردند. در سال های اخیر، توسعه روش های تصمیم گیری چند معیاره بر اساس مجموعه های فازی گروهی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. گائو و یو^۴ (۲۰۲۵) از روش WASPAS توسعه یافته بر اساس مجموعه های فازی گروهی جهت اولویت بندی عوامل مؤثر بر بهبود اثربخشی تدریس در کلاس های آموزش تربیت بدنی استفاده کرد. رادوانویچ و همکاران^۵ (۲۰۲۵) از مدل تصمیم گیری چند معیاره AHP فازی گروهی و MARCOS خاکستری جهت ارزیابی اساتید دانشگاه استفاده کردند. کو و همکاران^۶ (۲۰۲۵) از یک چارچوب تصمیم گیری جدید مبتنی بر MEREC-ARAS فازی گروهی برای بهینه سازی راهبردهای سرمایه گذاری در سامانه های انرژی استفاده کردند. سهین و منکسه^۷ (۲۰۲۵) از رویکرد یکپارچه CRITIC-EDAS بر اساس مجموعه های فازی گروهی با مقادیر بازه ای برای ارزیابی ریسک کنترل داخلی استفاده کردند.

در بخش مرور ادبیات، برخی از مقالات مرتبط با مسئله ارزیابی و اولویت بندی تامین کنندگان و همچنین اهمیت این مسئله در مدیریت مگاپروژه ها مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، ادبیات مربوط به روش های LOPCOW و ARTASI و همچنین رویکردهای توسعه یافته تصمیم گیری در محیط فازی گروهی بررسی شد. پژوهش حاضر قصد دارد برای نخستین بار از روش توسعه یافته SF-LOPCOW-ARTASI را در مسئله ی ارزیابی تامین کنندگان به کار گیرد. این روش قادر است همزمان با عدم قطعیت و تصمیم گیری گروهی مقابله کند. در این پژوهش برای اولین بار مسئله ارزیابی تامین کنندگان

¹ Sharma et al.

² Keleş and Kahveci

³ Tatar et al.

⁴ Gao and Yu

⁵ Radovanović et al.

⁶ Kou et al.

⁷ Sahin and Menekse

مگا پروژه بر اساس ابعاد پایداری در محیط فازی کروی انجام می‌شود. مجموعه‌های فازی کروی بر خلاف مجموعه‌های فازی فیثاغورسی، درجه تردید را به عنوان یک مولفه مستقل در نظر می‌گیرد و آزادی بیشتری به تصمیم‌گیرندگان در فرآیند تصمیم‌گیری می‌بخشد (Ghoushchi et al., 2024).

روش

روش پژوهش حاضر از نوع کمی است. در مرحله نخست، معیارهای ارزیابی تامین‌کنندگان شناسایی و پس از تعیین گزینه‌ها، داده‌های حاصل از قضاوت‌های تیم تصمیم‌گیری به صورت متغیرهای زبانی و بر اساس مجموعه‌های فازی کروی گردآوری می‌شوند. در ادامه و با ارزیابی تامین‌کنندگان بر اساس معیارهای شناسایی شده، محاسبه وزن معیارها با استفاده از روش SF-LOPCOW انجام می‌شود. در آخر و با پیاده‌سازی روش SF-ARTASI، ارزیابی تامین‌کنندگان بر اساس معیارها انجام شده و تامین‌کنندگان اولویت‌بندی می‌شوند. از نظر میزان کاربرد پژوهشی، پژوهش حاضر کاربردی - توسعه‌ای به شمار می‌رود؛ زیرا به دنبال توسعه رویکردی علمی و نوین از ارزیابی تامین‌کنندگان در مگا پروژه‌های ماژولار است. جامعه آماری در مرحله نخست پژوهش شامل کلیه پژوهش‌های منتشر شده در پایگاه‌های علمی معتبر مرتبط با مسئله ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان، تا زمان انجام این پژوهش است. با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند، تیم تصمیم‌گیری از ۱۱ خبره دارای تجربه و تخصص در زمینه‌های مشاور پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت، مهندسی و مدیریت پروژه و مگا پروژه تشکیل شده است. اطلاعات مربوط به اعضا نشان می‌دهد اکثریت تیم خبره بین ۸ تا ۱۴ سال سابقه کار دارند.

مقدمه‌ای بر مجموعه‌های فازی کروی

مفهوم مجموعه فازی کروی یکی از جدیدترین محیط‌های عدم قطعیت است که توسط کوتلو گوندوغللو و کهرمان^۱ (۲۰۱۹) پیشنهاد شده است. این بخش برخی از ویژگی‌ها و عملیات حسابی مجموعه‌های فازی کروی را ارائه می‌دهد.

¹ Kutlu Gündoğdu and Kahraman

تعریف ۱: مجموعه فازی کروی $\tilde{S}$ در فضای X به صورت رابطه (۱) نمایش داده می‌شود (Kutlu Gündoğdu & Kahraman, 2019).

$$\tilde{S} = \left[\left(x, (\mu_{\tilde{S}}(x), v_{\tilde{S}}(x), \pi_{\tilde{S}}(x)) \right) \mid x \in X \right] \quad (۱)$$

که در آن؛

$$\mu_{\tilde{S}}: X \rightarrow [0, 1], v_{\tilde{S}}: X \rightarrow [0, 1], \pi_{\tilde{S}}: X \rightarrow [0, 1]$$

برای هر x ، اعداد $\mu_{\tilde{S}}$ ، $v_{\tilde{S}}$ و $\pi_{\tilde{S}}$ به ترتیب نشان‌دهنده درجه عضویت، درجه عدم عضویت و درجه تردید است. همچنین رابطه (۲) همواره برقرار است.

$$0 \leq (\mu_{\tilde{S}}(x))^2 + (v_{\tilde{S}}(x))^2 + (\pi_{\tilde{S}}(x))^2 \leq 1 \quad (۲)$$

تعریف ۲: اگر $\tilde{A}_S = [\mu_{\tilde{A}_S}, v_{\tilde{A}_S}, \pi_{\tilde{A}_S}]$ و $\tilde{B}_S = [\mu_{\tilde{B}_S}, v_{\tilde{B}_S}, \pi_{\tilde{B}_S}]$ دو فازی کروی باشند و k یک عدد ثابت بزرگتر از ۰ باشد، عملیات ریاضی به صورت روابط (۳-۶) می‌شود (Kutlu Gündoğdu & Kahraman, 2019).

$$\tilde{A}_S \oplus \tilde{B}_S = \left[\sqrt{\mu_{\tilde{A}_S}^2 + \mu_{\tilde{B}_S}^2 - \mu_{\tilde{A}_S}^2 \mu_{\tilde{B}_S}^2}, v_{\tilde{A}_S} v_{\tilde{B}_S}, \sqrt{(1 - \mu_{\tilde{B}_S}^2) \pi_{\tilde{A}_S} + (1 - \mu_{\tilde{A}_S}^2) \pi_{\tilde{B}_S} - \pi_{\tilde{A}_S} \pi_{\tilde{B}_S}} \right] \quad (۳)$$

$$\tilde{A}_S \otimes \tilde{B}_S = \left[\mu_{\tilde{A}_S} \mu_{\tilde{B}_S}, \sqrt{v_{\tilde{A}_S}^2 + v_{\tilde{B}_S}^2 - v_{\tilde{A}_S}^2 v_{\tilde{B}_S}^2}, \sqrt{(1 - v_{\tilde{B}_S}^2) \pi_{\tilde{A}_S}^2 + (1 - v_{\tilde{A}_S}^2) \pi_{\tilde{B}_S}^2 - \pi_{\tilde{A}_S}^2 \pi_{\tilde{B}_S}^2} \right] \quad (۴)$$

$$k\tilde{S} = \left[\sqrt{1 - (1 - \mu_{\tilde{S}}^2)^k}, v_{\tilde{S}}^k, \sqrt{(1 - \mu_{\tilde{S}}^2)^k - (1 - \mu_{\tilde{S}}^2 - \pi_{\tilde{S}}^2)^k} \right] \quad (۵)$$

$$\tilde{S}^k = \mu_{\tilde{S}}^k, \sqrt{1 - (1 - v_{\tilde{S}}^2)^k}, \sqrt{(1 - v_{\tilde{S}}^2)^k - (1 - v_{\tilde{S}}^2 - \pi_{\tilde{S}}^2)^k} \quad (۶)$$

تعریف ۳: مقدار امتیاز و تابع دقت عدد $\tilde{S} = [\mu_{\tilde{S}}, v_{\tilde{S}}, \pi_{\tilde{S}}]$ به ترتیب با استفاده از روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شود (Kutlu Gündoğdu & Kahraman, 2019).

$$Score(\tilde{S}) = (\mu_{\tilde{S}} - \pi_{\tilde{S}})^2 - (v_{\tilde{S}} - \pi_{\tilde{S}})^2 \quad (۷)$$

$$Accuracy(\tilde{S}) = \mu_{\tilde{S}}^2 + v_{\tilde{S}}^2 + \pi_{\tilde{S}}^2 \quad (۸)$$

بر این اساس، $\tilde{A}_S < \tilde{B}_S$ اگر و تنها اگر؛

$$Score(\tilde{A}_S) < Score(\tilde{B}_S)$$

or

$$Score(\tilde{A}_S) = Score(\tilde{B}_S) \text{ and } Accuracy(\tilde{A}_S) < Accuracy(\tilde{B}_S)$$

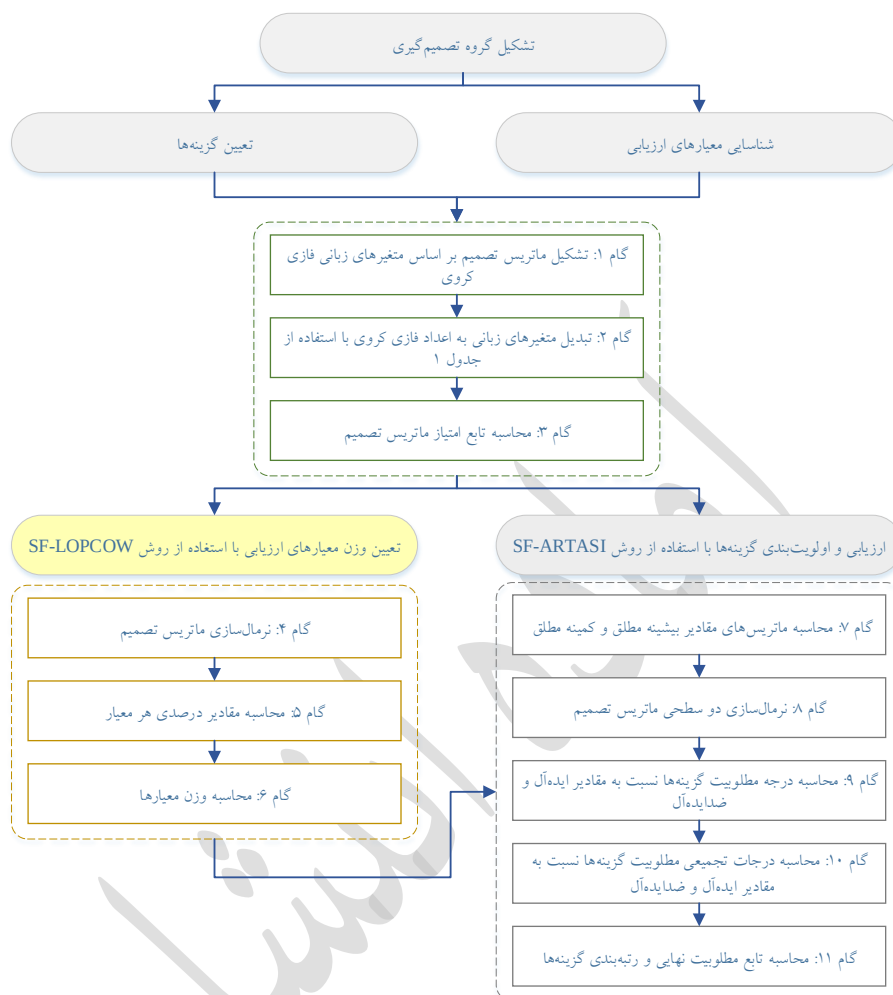
تعریف ۴: میانگین حسابی کروی وزن دار (SWAM) با توجه به $w = (w_1, w_2, \dots, w_n), w_i \in [0, 1]; \sum_{i=1}^n w_i = 1$ ، با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (Kutlu Gündoğdu & Kahraman, 2019).

$$SWAM_w(\tilde{S}_1, \tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_n) = w_1 \tilde{S}_1 + w_2 \tilde{S}_2 + \dots + w_n \tilde{S}_n$$

$$= \left\{ \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{S}}^2)^{w_i} \right]^{\frac{1}{2}}, \prod_{i=1}^n v_{\tilde{S}}^{w_i}, \left[\prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{S}}^2)^{w_i} - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{\tilde{S}}^2 - \pi_{\tilde{S}}^2)^{w_i} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (9)$$

رویکرد یکپارچه SF-LOPCOW-ARTASI

در این بخش، رویکرد پیشنهادی این تحقیق با بهره‌گیری از روش‌های SF-LOPCOW و SF-ARTASI جهت ارزیابی تامین کنندگان مگا پروژه‌های مازولار ارائه می‌گردد. رویکرد پیشنهادی پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس رویکرد پیشنهادی ابتدا گروه تصمیم‌گیری تشکیل، سپس معیارهای ارزیابی شناسایی و گزینه‌های ارزیابی تعیین می‌شوند. گام‌های رویکرد پیشنهادی در ادامه آمده است.



شکل ۲. رویکرد پیشنهادی

گام ۱: در گام نخست، ماتریس تصمیم با استفاده از n معیار به ارزیابی m گزینه تشکیل می‌شود و هرگزینه براساس هر معیار بر اساس متغیرهای زبانی فازی کروی ارائه شده در جدول ۱ ارزیابی می‌شود.

جدول ۱. تبدیل متغیرهای زبانی به اعداد فازی کروی (Jafarzadeh Ghouschi et al., 2022)

متغیر زبانی	عدد فازی کروی
-------------	---------------

	μ	v	π
AMI	0.90	0.10	0.1
VHI	0.80	0.20	0.2
HI	0.70	0.30	0.3
SMI	0.60	0.40	0.4
EI	0.50	0.50	0.5
SLI	0.40	0.60	0.4
LI	0.30	0.70	0.3
VLI	0.20	8.00	0.2
ALI	0.10	0.90	0.1

گام ۲: با توجه به ماتریس تصمیم تشکیل شده در گام اول درایه‌های ماتریس با استفاده از جدول ۱ به اعداد فازی کروی تبدیل شده و ماتریس تصمیم رابطه (۱۰) با درایه‌های اعداد فازی کروی بدست می‌آید.

$$\tilde{A} = (\tilde{\zeta}_{ij}) = \begin{bmatrix} (\mu_{11}, v_{11}, \pi_{11}) & \cdots & (\mu_{1n}, v_{1n}, \pi_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mu_{m1}, v_{m1}, \pi_{m1}) & \cdots & (\mu_{mn}, v_{mn}, \pi_{mn}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

گام ۳: در این گام، تابع امتیاز ماتریس تصمیم با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$Sc(\tilde{\zeta}_{ij}) = \mu_{ij} \times (1 - v_{ij}) \times (1 - \pi_{ij}) \quad (11)$$

در ادامه، وزن معیارها با استفاده از روش توسعه یافته LOPCOW بر اساس مجموعه‌های فازی کروی (SF-LOPCOW) انجام می‌شود. روش LOPCOW از جمله روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره جهت وزن‌دهی به معیارها است را در سال ۲۰۲۲ معرفی کرد (Ecer & Pamucar, 2022). گام‌های روش SF-LOPCOW در ادامه آمده است.

گام ۴: در این گام، ماتریس تصمیم با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۳) به ترتیب برای معیارهای از جنس سود و هزینه نرمال‌سازی می‌شود.

$$r_{ij} = \frac{\zeta_{ij} - \zeta_{\min}}{\zeta_{\max} - \zeta_{\min}}, \text{ if } j \in \text{Benefit} \quad (12)$$

$$r_{ij} = \frac{\zeta_{\max} - \zeta_{ij}}{\zeta_{\max} - \zeta_{\min}}, \text{ if } j \in \text{Cost} \quad (13)$$

گام ۵: مقادیر درصدی هر معیار (pv_j) با استفاده از رابطه (۱۴) تعیین می‌شود.

$$pv_j = \ln \left| \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m r_{ij}^2}{m}}}{\sigma} \right| \times 100 \quad (14)$$

که در آن σ انحراف معیار و m تعداد جایگزین‌ها را نشان می‌دهد.
گام ۶: وزن هر معیار با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود.

$$w_j = \frac{pv_j}{\sum_{j=1}^n pv_j} \quad (15)$$

در این مرحله، اولویت‌بندی گزینه‌ها بر اساس روش توسعه‌یافته ARTASI بر اساس مجموعه‌های فازی کروی (SF-ARTASI) انجام می‌شود. ARTASI یکی از جدیدترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که در سال ۲۰۲۴ معرفی شد (Pamucar et al., 2024). گام‌های روش SF-ARTASI در ادامه آمده است.
گام ۷: در این گام، ماتریس‌های مقادیر بیشینه مطلق و کمینه مطلق به ترتیب با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شوند.

$$\zeta_j^{max} = \max_{1 \leq i \leq m} (\zeta_{ij}) + \left(\max_{1 \leq i \leq m} (\zeta_{ij}) \right)^{1/m} \quad (16)$$

$$\zeta_j^{min} = \min_{1 \leq i \leq m} (\zeta_{ij}) - \left(\min_{1 \leq i \leq m} (\zeta_{ij}) \right)^{1/m} \quad (17)$$

گام ۸: در این گام، نرمال‌سازی ماتریس تصمیم در دو سطح انجام می‌شود:
ماتریس تصمیم نرمال شده سطح اول با استفاده از رابطه (۱۸) بدست می‌آید.
که در آن $\Psi^{(l)}$ و $\Psi^{(u)}$ به ترتیب حداکثر و حداقل بازه استاندارد را نشان می‌دهند.
نرمال‌سازی در سطح دوم با استفاده از روابط (۱۹) و (۲۰) انجام می‌شود.

$$\zeta_{ij} = \phi_{ij}, \text{ if } j \in \text{Benefit} \quad (19)$$

$$\zeta_{ij} = -\phi_{ij} + \max_{1 \leq i \leq m} (\phi_{ij}) + \min_{1 \leq i \leq m} (\phi_{ij}), \text{ if } j \in \text{Cost} \quad (20)$$

گام ۹: درجه مطلوبیت گزینه‌ها نسبت به مقدار ایده‌آل با استفاده از رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$\vartheta_{ij}^+ = \frac{\zeta_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} (\zeta_{ij})} \cdot w_j \cdot \Psi^{(u)} \quad (21)$$

همچنین درجه مطلوبیت گزینه‌ها نسبت به مقدار ضدایده‌آل با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۳) تعیین می‌شود.

$$\vartheta_{ij} = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} (\zeta_{ij})}{\zeta_{ij}} \cdot w_j \cdot \Psi^{(u)} \quad (22)$$

$$\vartheta_{ij}^- = -\vartheta_{ij} + \max_{1 \leq i \leq m} (\vartheta_{ij}) + \min_{1 \leq i \leq m} (\vartheta_{ij}) \quad (23)$$

که در آن $\Psi^{(u)}$ برابر با ۱۰۰ و w_j وزن معیارها را نشان می‌دهند. گام ۱۰: درجات تجمیعی مطلوبیت گزینه‌ها نسبت به مقادیر ایده‌آل و ضدایده‌آل به ترتیب با استفاده از روابط (۲۴) و (۲۵) محاسبه می‌شود.

$$\Omega_i^+ = \sum_{j=1}^n \vartheta_{ij}^+ \quad (24)$$

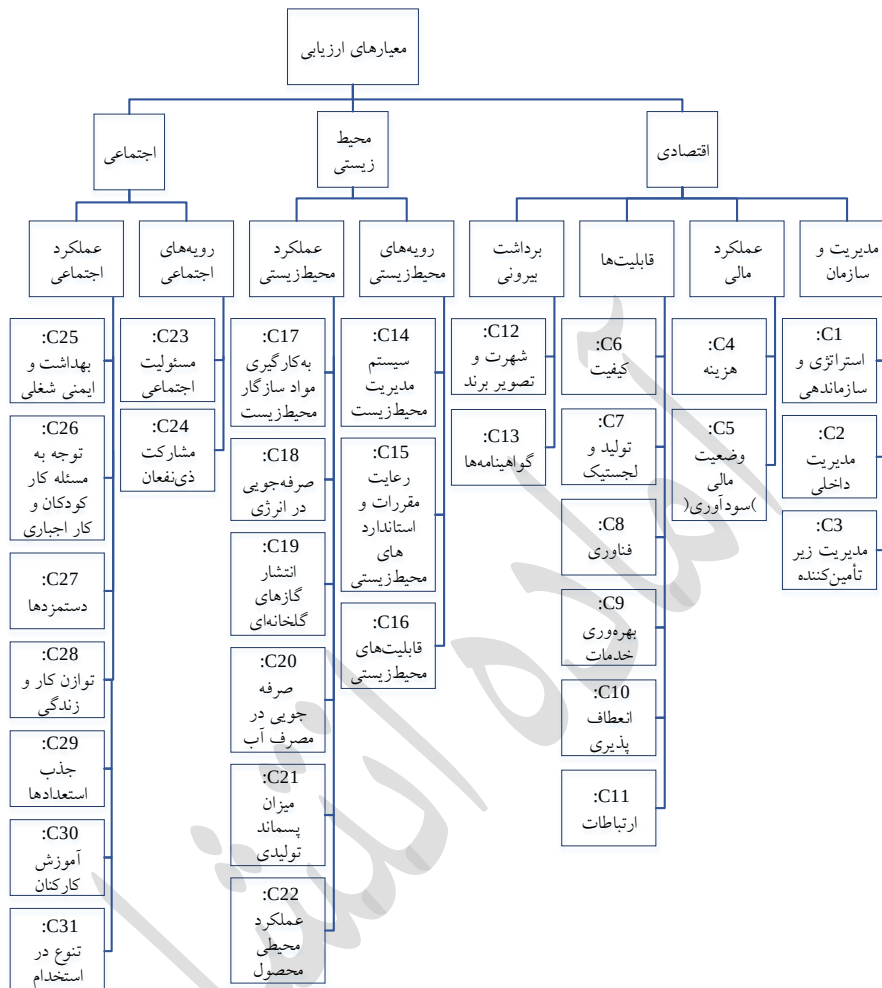
$$\Omega_i^- = \sum_{j=1}^n \vartheta_{ij}^- \quad (25)$$

گام ۱۱: در گام آخر، تابع مطلوبیت نهایی هر گزینه با استفاده از رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود و گزینه‌ها بر اساس این مقدار، به صورت نزولی رتبه بندی می‌شوند.

$$\Omega_i = (\Omega_i^+ + \Omega_i^-) (\alpha \cdot f(\Omega_i^+)^\varphi + (1 - \alpha) \cdot f(\Omega_i^-)^\varphi)^{1/\varphi}; \quad \varphi \in [1, +\infty); \alpha \in [0, 1] \quad (26)$$

یافته‌ها

در راستای بررسی قابلیت رویکرد پیشنهادی در این تحقیق، سعی بر آن است تا ارزیابی و اولویت‌بندی تامین‌کنندگان مگاپروژه‌های ماژولار با استفاده از این رویکرد صورت پذیرد. در این مطالعه ۱۲ تامین‌کننده با استفاده از ۳۱ معیار ارزیابی و اولویت‌بندی می‌شوند. معیارهای ارزیابی تامین‌کنندگان بر اساس ابعاد پایداری در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. معیارهای ارزیابی تأمین‌کنندگان در مگاپروژه‌های ماژولار

در این بخش نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی در مسئله ارزیابی و اولویت‌بندی تأمین‌کنندگان مگاپروژه‌های ماژولار بررسی می‌شود. ابتدا بر اساس معیارهای شناسایی‌شده، ارزیابی هر تأمین‌کننده توسط تیم تصمیم‌گیری و بر اساس متغیرهای زبانی فازی کروی انجام می‌شود. با توجه به وجود عدم قطعیت در معیارهای ارزیابی مسئله، از مجموعه‌های فازی کروی برای مقابله با عدم قطعیت استفاده شده است. مقادیر متغیرهای زبانی معیارهای ارزیابی به ازای تأمین‌کنندگان با توجه به نظرات تیم تصمیم‌گیری در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مقادیر معیارها به ازای تامین کنندگان در قالب متغیرهای زبانی فازی کروی

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
C1	HI	VLI	HI	EI	VHI	EI
C2	VHI	VHI	HI	SMI	SLI	SLI
C3	HI	EI	HI	VLI	SLI	SMI
C4	SMI	SLI	EI	SLI	HI	SLI
C5	SMI	VHI	LI	HI	SMI	SLI
C6	HI	HI	VHI	EI	HI	EI
C7	LI	EI	HI	SMI	EI	SLI
C8	LI	LI	SMI	HI	LI	SMI
C9	EI	LI	SMI	EI	HI	SLI
C10	HI	VHI	SLI	VHI	SMI	SLI
C11	LI	EI	HI	SMI	VHI	SLI
C12	EI	SLI	VHI	SMI	EI	EI
C13	SLI	HI	HI	LI	SMI	SLI
C14	SLI	VLI	SMI	VHI	LI	LI
C15	LI	LI	VLI	SLI	EI	SLI
C16	VHI	VHI	EI	EI	SLI	LI
C17	VHI	SMI	HI	HI	VHI	VLI
C18	EI	VHI	VLI	HI	LI	SMI
C19	VHI	VHI	EI	VHI	VLI	HI
C20	EI	VLI	HI	EI	VHI	EI
C21	HI	EI	LI	LI	VHI	EI
C22	EI	LI	EI	EI	VLI	VLI
C23	VHI	LI	EI	LI	SLI	VHI
C24	VHI	LI	SLI	SLI	VLI	LI
C25	VLI	LI	VHI	LI	VHI	SMI
C26	SLI	LI	SLI	EI	VHI	EI
C27	HI	HI	HI	EI	SMI	VHI
C28	SMI	EI	VLI	VHI	VLI	EI
C29	VLI	VLI	SMI	HI	VLI	EI
C30	LI	VLI	VLI	HI	EI	HI
C31	SLI	SLI	VLI	EI	SLI	SLI
	S7	S8	S9	S10	S11	S12
C1	HI	VLI	HI	SMI	VHI	HI
C2	VLI	HI	HI	SMI	SLI	SMI
C3	HI	HI	SMI	SMI	SMI	LI
C4	EI	EI	SLI	VHI	VHI	SMI
C5	EI	HI	VLI	SMI	SMI	SMI
C6	SMI	VLI	EI	VLI	LI	SLI
C7	EI	SMI	HI	VLI	LI	LI
C8	SMI	LI	VHI	SMI	VHI	SMI
C9	EI	HI	SMI	SMI	VLI	LI
C10	VHI	VLI	SMI	SMI	EI	SMI
C11	SMI	SMI	EI	LI	VLI	VHI
C12	SMI	LI	SMI	VHI	SMI	VLI
C13	HI	LI	HI	SMI	EI	VHI

C14	HI	LI	LI	VHI	VHI	HI
C15	LI	LI	HI	HI	VHI	EI
C16	SMI	HI	EI	LI	EI	SLI
C17	HI	VHI	SLI	HI	VLI	SLI
C18	SLI	VLI	SLI	SMI	VHI	HI
C19	SMI	HI	SLI	EI	VLI	SMI
C20	SMI	VLI	SMI	VLI	VHI	HI
C21	EI	SLI	LI	SLI	HI	VHI
C22	EI	LI	SLI	VLI	HI	HI
C23	SMI	SMI	VHI	LI	VLI	VLI
C24	LI	VHI	SLI	LI	LI	LI
C25	VLI	VHI	HI	LI	VLI	VLI
C26	SLI	VHI	SLI	SLI	EI	VHI
C27	SLI	VLI	EI	VLI	LI	SLI
C28	LI	VLI	HI	VHI	EI	HI
C29	VLI	SLI	VHI	HI	LI	EI
C30	SMI	VHI	EI	LI	VLI	VHI
C31	VHI	SLI	VLI	SLI	LI	SMI

سپس، این مقادیر با استفاده از جدول ۱ به اعداد فازی کروی تبدیل می‌شوند. ماتریس تصمیم‌گیری تبدیل‌شده به اعداد فازی کروی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. ماتریس تصمیم‌گیری بر اساس اعداد فازی کروی

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
C1	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)
C2	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.4)
C3	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.4)
C4	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.4, 0.6, 0.4)
C5	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.4)
C6	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)
C7	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.4, 0.6, 0.4)
C8	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)
C9	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.4, 0.6, 0.4)
C10	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.4)
C11	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)
C12	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.5, 0.5, 0.5)
C13	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.4)
C14	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)
C15	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.4, 0.6, 0.4)
C16	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.3, 0.7, 0.3)
C17	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.2, 0.8, 0.2)
C18	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)
C19	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)
C20	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)
C21	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)
C22	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.2, 0.8, 0.2)

C23	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)
C24	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)
C25	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)
C26	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)
C27	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)
C28	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)
C29	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)
C30	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.7, 0.3, 0.3)
C31	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.4)
	S7	S8	S9	S10	S11	S12
C1	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)
C2	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.4)
C3	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.3, 0.7, 0.3)
C4	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)
C5	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.4)
C6	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.4, 0.6, 0.4)
C7	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)
C8	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)
C9	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)
C10	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.6, 0.4, 0.4)
C11	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.8, 0.2, 0.2)
C12	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)
C13	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.8, 0.2, 0.2)
C14	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)
C15	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)
C16	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.4, 0.6, 0.4)
C17	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)
C18	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)
C19	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)
C20	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)
C21	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)
C22	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.7, 0.3, 0.3)
C23	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.2, 0.8, 0.2)
C24	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)
C25	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.2, 0.8, 0.2)
C26	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.8, 0.2, 0.2)
C27	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.4, 0.6, 0.4)
C28	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.7, 0.3, 0.3)
C29	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.7, 0.3, 0.3)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.5, 0.5, 0.5)
C30	(0.6, 0.4, 0.4)	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.5, 0.5, 0.5)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.8, 0.2, 0.2)
C31	(0.8, 0.2, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.2, 0.8, 0.2)	(0.4, 0.6, 0.4)	(0.3, 0.7, 0.3)	(0.6, 0.4, 0.4)

در ادامه، وزن معیارهای ارزیابی با استفاده از روش SF-LOPCOW تعیین می گردد.

در این راستا، پس از نرمال سازی ماتریس تصمیم با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۳)، مقادیر

pv_j با استفاده از رابطه (۱۴) بدست می آید. سپس وزن هر معیار با استفاده از رابطه (۱۵)

تعیین می‌شود. اطلاعات مرتبط با مراحل محاسبه وزن معیارها با استفاده از روش SF-LOPCOW در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴. محاسبه وزن شاخص‌ها با استفاده از روش SF-LOPCOW

	$\sum_{i=1}^m r_{ij}^2$	σ	pv_j	Weight
C1	4.321	0.345	55.300	0.083
C2	3.754	0.336	33.676	0.051
C3	5.542	0.368	43.837	0.066
C4	7.774	0.379	57.851	0.087
C5	2.634	0.281	33.776	0.051
C6	2.541	0.321	18.494	0.028
C7	3.040	0.342	21.162	0.032
C8	2.969	0.358	15.511	0.023
C9	3.381	0.335	28.686	0.043
C10	4.081	0.360	30.723	0.046
C11	2.962	0.346	18.902	0.028
C12	2.722	0.326	20.350	0.031
C13	2.818	0.325	22.640	0.034
C14	4.021	0.413	16.294	0.025
C15	1.967	0.318	6.879	0.010
C16	2.592	0.366	6.474	0.010
C17	4.862	0.383	33.332	0.050
C18	3.211	0.364	17.741	0.027
C19	5.060	0.385	34.915	0.053
C20	3.246	0.363	18.561	0.028
C21	7.229	0.386	52.492	0.079
C22	2.420	0.349	7.819	0.012
C23	3.362	0.408	8.646	0.013
C24	2.078	0.361	3.100	0.005
C25	3.579	0.436	5.093	0.008
C26	3.084	0.415	2.656	0.004
C27	2.521	0.324	17.175	0.026
C28	3.103	0.375	13.122	0.020
C29	2.084	0.330	6.012	0.009

C30	3.070	0.382	10.727	0.016
C31	1.295	0.269	2.422	0.004

در آخر، مراحل روش SF-ARTASI اجرا شده و تامین کنندگان بر اساس امتیاز Ω_i بدست آمده با استفاده از رابطه (۲۶)، به صورت نزولی اولویت بندی می شود. نتیجه پیاده سازی رویکرد پیشنهادی و اولویت بندی تامین کنندگان در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵. محاسبات و نتایج روش SF-ARTASI

	Ω_i^+	Ω_i^-	$f(\Omega_i^+)$	$f(\Omega_i^-)$	Ω_i	Rank
S1	81.077	83.252	0.493	0.507	82.165	5
S2	80.797	82.037	0.496	0.504	81.417	7
S3	85.997	87.969	0.494	0.506	86.983	1
S4	81.563	83.581	0.494	0.506	82.572	4
S5	80.656	82.361	0.495	0.505	81.509	6
S6	76.900	79.078	0.493	0.507	77.989	12
S7	82.851	85.301	0.493	0.507	84.076	3
S8	80.453	81.641	0.496	0.504	81.047	8
S9	83.792	86.004	0.493	0.507	84.898	2
S10	79.389	81.600	0.493	0.507	80.495	9
S11	78.457	79.857	0.496	0.504	79.157	11
S12	78.861	81.258	0.493	0.507	80.059	10

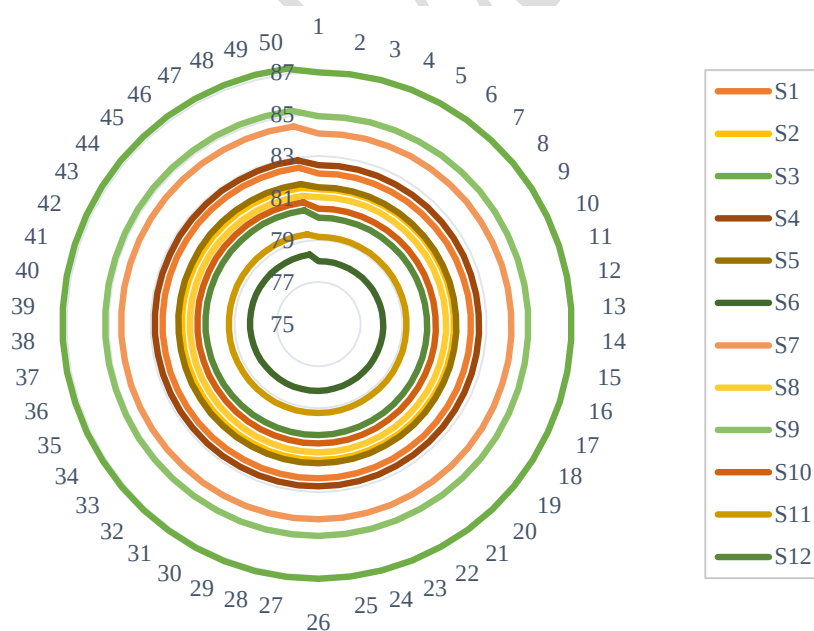
با توجه به جدول ۵ مشاهده می شود که بر اساس رویکرد SF-ARTASI تامین کنندگان S3، S9 و S7 به ترتیب با امتیازهای ۸۶,۹۸۳، ۸۴,۸۹۸ و ۸۴,۰۷۶ در اولویت های اول الی سوم قرار گرفته اند. همچنین با توجه به این نتایج رویکرد پیشنهادی، مشاهده می شود که تامین کننده S6 با امتیاز ۷۷,۹۸۹ در اولویت آخر قرار گرفته و در حال حاضر در اولویت همکاری در مگا پروژه قرار ندارد.

تجزیه و تحلیل یافته ها

برای سنجش پایداری روش پیشنهادی، تحلیل حساسیت در قالب چند سناریو طراحی شد. این سناریوها به بررسی رابطه بین نتایج حاصل از پیاده سازی رویکرد پیشنهادی در شرایط متفاوت و یافته های تحقیق می پردازند. در این تحلیل روند تغییرات تابع کارایی نهایی گزینه ها

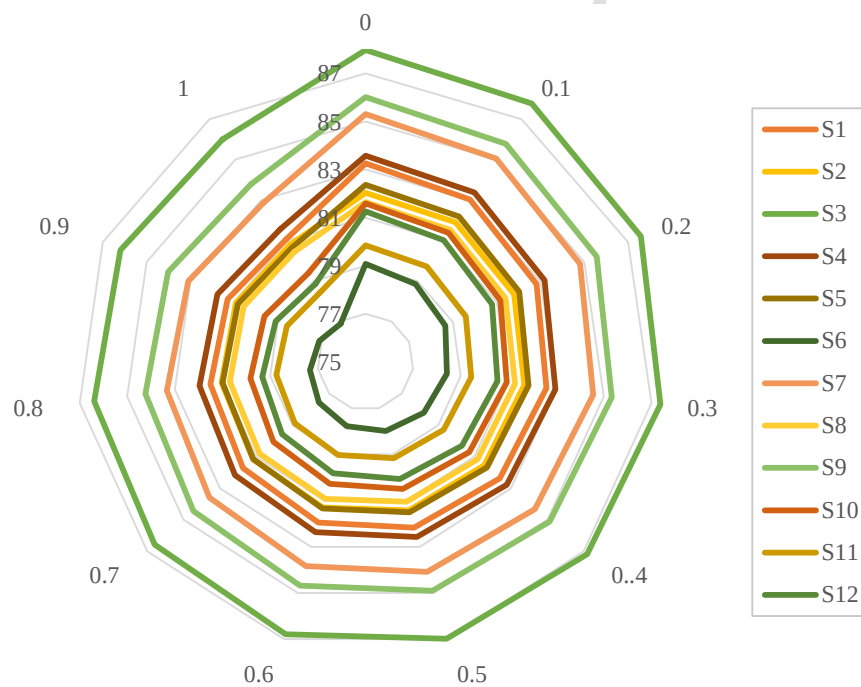
با تغییر مقدار φ و همچنین ترتیب ترجیح گزینه‌ها با تغییر در سطح اهمیت راه‌حل‌های ایده‌آل و ضدایده‌آل (α) هنگام تعیین توابع کارایی نهایی مورد بررسی قرار می‌گیرد (Pamucar et al., 2024).

در این راستا، پنجاه سناریو در نظر گرفته شد که در آن‌ها تغییرات پارامتر φ در تابع کارایی مورد بررسی قرار گرفت. در سناریوی اول مقدار φ برابر با ۱ و در هر سناریوی بعدی، مقدار آن یک واحد و تا عدد ۵۰ افزایش یافت. این تغییرات در مقادیر نهایی توابع کارایی هر گزینه اثر گذاشت. شکل ۴ وابستگی بین پارامتر φ و توابع کارایی گزینه‌ها در مقایسه با یکدیگر را نشان می‌دهد؛ یعنی تغییرات مقدار φ در بازه $\varphi \in [1, +\infty)$ باعث رشد توابع کارایی می‌شود. با این حال تغییری در اولویت‌بندی گزینه‌ها دیده نشد و رتبه هر تامین‌کننده در هر ۵۰ سناریو ثابت باقی ماند. علاوه بر این، هرچند تغییرات پارامتر φ سبب تغییر در برخی توابع کارایی می‌شود، اما از نظر آماری معنادار نیستند؛ زیرا دامنه تغییرات بسیار ناچیز است.



شکل ۴. تغییرات توابع کارایی گزینه‌ها بر اساس مقادیر مختلف پارامتر φ

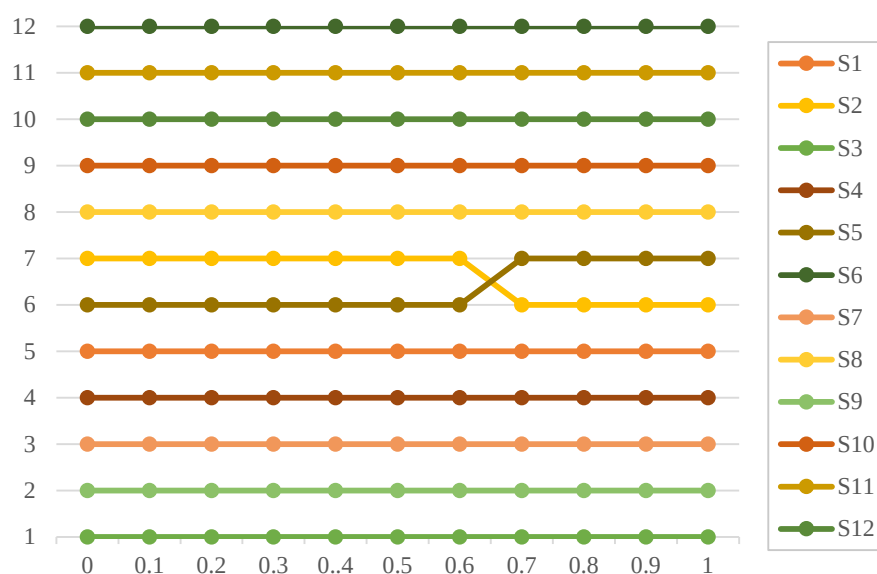
در بخش دوم از تجزیه و تحلیل نتایج، حساسیت مدل SF-ARTASI نسبت به تغییر پارامتر α مورد بررسی قرار می‌گیرد. یازده سناریو تعریف شد که در آن‌ها تغییرات توابع کارایی در اثر تغییرات α رصد می‌شود. در این سناریوها، α مقداری بین ۰ تا ۱ گرفت و در هر سناریو، مقدار آن ۰,۱ واحد افزایش یافت. شکل ۵ وابستگی بین پارامتر α و توابع کارایی گزینه‌ها در مقایسه با یکدیگر را طی یازده سناریو بر حسب تغییرات پارامتر α نشان می‌دهد.



شکل ۵. تغییرات توابع کارایی گزینه‌ها بر اساس مقادیر مختلف پارامتر α

شکل ۶ تغییرات در اولویت‌بندی گزینه‌ها نسبت به مقادیر مختلف را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، مدل SF-ARTASI نسبت به تغییر پارامتر α حساس است. همچنین، تغییرات α بر جابجایی رتبه گزینه‌ها تأثیر دارد و از سناریو هشتم ($\alpha = ۰.۷$)، گزینه‌های مربوط به رتبه‌های ششم و هفتم جابجا شده و S2 در اولویت ششم قرار گرفت. علت جابجایی گزینه‌ها و تغییر در اولویت‌بندی آن‌ها، تغییر در سطح اهمیت راه‌حل‌های ایده‌آل و ضدایده‌آل در زمان

محاسبه توابع کارایی نهایی است. با این حال، این تغییرات از نظر آماری معنادار نبوده و موجب تغییر بهترین گزینه نمی‌شوند. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که انحراف قابل توجهی در رتبه‌بندی گزینه‌ها رخ نمی‌دهد. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت، رویکرد پیشنهادی نسبت به تغییرات در پارامترهای α و φ پایدار است.



شکل ۶. تغییرات اولویت‌بندی گزینه‌ها بر اساس مقادیر مختلف پارامتر α

در این بخش، تحلیل‌های مقایسه‌ای ارائه می‌شود تا یافته‌های رویکرد پیشنهادی با سایر روش‌های موجود در ادبیات مقایسه گردد. جدول ۶ نتایج پیاده‌سازی روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی و اولویت‌بندی تامین‌کنندگان مگا پروژه‌های ماژولار را نشان می‌دهد. نتایج روش SF-ARTASI در کنار SF-MARCOS، SF-MOORA و SF-TOPSIS مورد ارزیابی قرار گرفته و رتبه‌بندی گزینه‌ها ارائه شده است. در روش SF-ARTASI، که توسعه‌ای از روش ARTASI بر اساس مجموعه‌های فازی کروی است، نتایج براساس مقدار Ω_i (تابع کارایی) به دست می‌آید. نتایج حاکی از آن است که تامین‌کننده S3 بهترین عملکرد را بر اساس تمامی روش‌های مورد بررسی دارد. به‌طور مشابه، S9 بر اساس نتایج پیاده‌سازی تمامی روش‌های مورد بررسی در جایگاه دوم قرار گرفته

است (شکل ۷). نزدیکی نتایج SF-ARTASI با روش‌های شناخته‌شده، کاربردپذیری و اثربخشی آن را در مسأله‌های پیچیده تصمیم‌گیری مانند ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان مگا پروژه‌های مازولار تأیید می‌کند.

جدول ۶. نتایج اولویت‌بندی تامین‌کنندگان بر اساس روش‌های SF-MARCOS، SF-ARTASI، SF-TOPSIS و SF-MOORA

	SF-ARTASI		SF-MARCOS		SF-MOORA		SF-TOPSIS	
	Ω_i	Rank	$f(k_i)$	Rank	$Score_i$	Rank	Cl_i	Rank
S1	82.165	5	0.537	7	0.134	7	0.511	7
S2	81.417	7	0.540	6	0.138	5	0.531	5
S3	86.983	1	0.689	1	0.206	1	0.631	1
S4	82.572	4	0.595	3	0.147	4	0.532	4
S5	81.509	6	0.553	5	0.126	8	0.478	8
S6	77.989	12	0.419	12	0.087	12	0.461	9
S7	84.076	3	0.564	4	0.158	3	0.572	3
S8	81.047	8	0.526	8	0.134	6	0.524	6
S9	84.898	2	0.640	2	0.177	2	0.586	2
S10	80.495	9	0.483	10	0.112	9	0.458	10
S11	79.157	11	0.488	9	0.098	11	0.433	11
S12	80.059	10	0.456	11	0.107	10	0.431	12

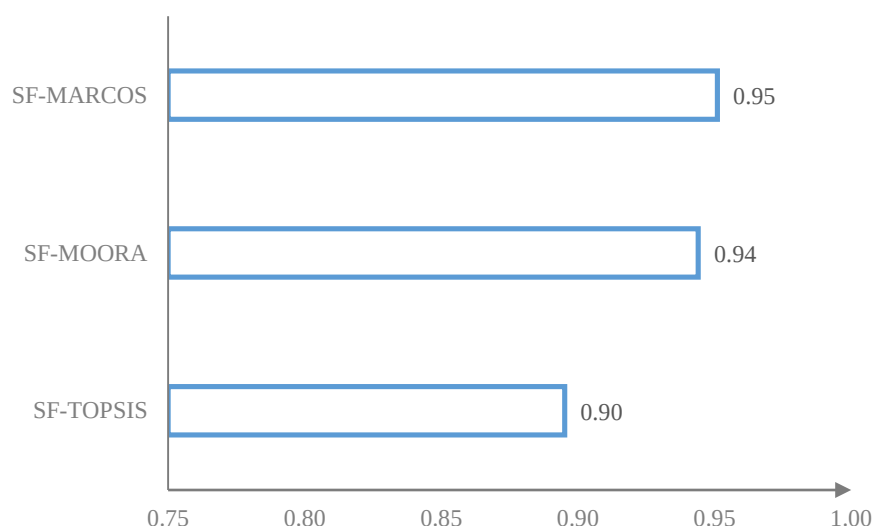
در ادامه، درجه همبستگی میان رتبه‌های بدست آمده از پیاده‌سازی روش‌های مختلف بر اساس روش اسپیرمن و با استفاده از رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود (Li et al., 2022).

$$R_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (27)$$

که در آن d_i اختلاف رتبه‌ها بر اساس دو روش مختلف است و n تعداد گزینه‌ها را نشان می‌دهد.

مقادیر مرجع محاسبه درجه همبستگی، رتبه گزینه‌ها در نتایج بدست آمده از روش‌ها بر اساس جدول ۶ است. شکل ۷ درجه همبستگی میان روش پیشنهادی SF-ARTASI و سه روش SF-MARCOS، SF-MOORA و SF-TOPSIS را نشان می‌دهد. نتایج روش‌های مختلف تمامی همبستگی‌ها در بازه‌ای بالا قرار دارند که همگرایی قوی در رتبه‌بندی‌های ارائه‌شده توسط این روش‌ها را منعکس می‌کند. بیشترین درجه همبستگی بین

رویکرد پیشنهادی و SF-MARCOS با مقدار ۰,۹۵ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تشابه بالای نتایج آن‌هاست، در حالی که کمترین درجه همبستگی با روش SF-TOPSIS و مقدار ۰,۹۰ است، اما همچنان تشابه بالایی را نشان می‌دهد. بنابراین، SF-ARTASI همواره همگرایی قوی با سایر روش‌ها را حفظ کرده و اعتبار و قابلیت اعتماد آن را در سناریوهای پیچیده تصمیم‌گیری تقویت می‌کند.



شکل ۷. همبستگی نتایج روش SF-ARTASI با روش‌های SF-MARCOS, SF-MOORA و SF-TOPSIS

بینش‌های عملیاتی و مدیریتی

انتخاب تأمین‌کننده مناسب در مگاپروژه‌های ماژولار یک تصمیم استراتژیک با تأثیرات کلان است. مدیر مگاپروژه باید به همسویی اهداف کلان پروژه و فرایند ارزیابی تأمین‌کنندگان پردازد و در قراردادها، به شاخص‌های کلیدی عملکرد نظیر تحویل به‌موقع و مدیریت پسماند تولیدی اشاره کند. جایگاه بالای معیار میزان پسماند تولیدی در نتایج حاصل از وزن‌دهی به معیارها بر اساس روش SF-LOPCOW در این پژوهش، نیاز به تمرکز

مدیریتی ویژه بر اقدامات مرتبط با پایداری را نشان می‌دهد. مدیر مگاپروژه باید برنامه‌های مشترک کاهش ضایعات با تأمین کنندگان را توسعه دهد، اهداف واضحی در قراردادها تعیین کند و از نوآوری در بهره‌وری مواد و پیاده‌سازی اصول اقتصاد پرختی حمایت کند. در آخر بازیابی دوره‌ای معیارها و محاسبه وزن معیارها با داده‌ها و نظرات جدید و همچنین ارزیابی دوره‌ای تأمین کنندگان با استفاده از رویکردهایی نظیر SF-ARTASI تضمین می‌کند که شبکه تأمین کنندگان همواره با اهداف مگاپروژه همگام باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

در عصر حاضر نمی‌توان از اهمیت مگاپروژه‌ها چشم‌پوشی کرد؛ این پروژه‌ها برای تأمین نیازهای زیرساختی جهان، تسریع رشد اقتصادی و شکل‌دادن به چشم‌انداز آینده جوامع حیاتی‌اند. پیچیدگی و مقیاس ذاتی مگاپروژه‌ها آن‌ها را در برابر چالش‌های متعددی، به‌ویژه تأخیرهای زمانی و افزایش هزینه‌ها، آسیب‌پذیر می‌سازد. ماژولارسازی مگاپروژه‌ها یکی از راه‌حل‌های موفقیت مگاپروژه‌ها است. با این حال، به دلیل نیاز این پروژه‌ها به هماهنگی پیچیده زیرسیستم‌های مختلف و ادغام دقیق ماژول‌ها، موفقیت مگاپروژه‌های ماژولار تا حد زیادی به ارزیابی و انتخاب تأمین کنندگانی توانمند بستگی دارد. پژوهش حاضر به منظور ارزیابی تأمین کنندگان در مگاپروژه‌های ماژولار، رویکرد یکپارچه‌ای را معرفی کرده‌است. از این‌رو، فهرست جامعی از معیارهای پایداری برای ارزیابی و اولویت‌بندی تأمین کنندگان مگاپروژه‌های ماژولار شناسایی شده است. سپس درجه اهمیت این معیارها با استفاده از روش توسعه‌یافته LOPCOW بر اساس مجموعه‌های فازی کروی تعیین شده‌اند. بر این اساس نتایج این روش هزینه، استراتژی و سازماندهی و میزان پسماند تولیدی با وزن‌های ۰,۰۸۷، ۰,۰۸۳ و ۰,۰۷۹ به ترتیب دارای بیشترین درجه اهمیت میان معیارهای ارزیابی هستند. در ادامه و بر اساس رویکرد پیشنهادی، تأمین کنندگان بر اساس معیارهای ارزیابی و درجه اهمیت هر معیار، با استفاده از روش توسعه‌یافته ARTASI بر اساس مجموعه‌های فازی کروی ارزیابی و اولویت‌بندی شده‌اند. بر اساس نتایج بدست‌آمده S3، S9 و S7 به ترتیب در اولویت‌های اول تا سوم قرار گرفتند. 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. استفاده از عملگرهای تجمیعی

جهت یکپارچه‌سازی قضاوت‌های خبرگان نظیر میانگین حسابی وزن‌دار کروی (SWAM) که امکان تخصیص وزن‌های مختلف به قضاوت‌های خبرگان را نیز داراست، توسعه و مقایسه روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط‌های عدم قطعیت نظیر فازی فیناگورثی، Q -rung و فازی فرماتین و مقایسه نتایج آن با روش‌های توسعه‌یافته در پژوهش حاضر 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 ارزیابی و انتخاب تامین‌کنندگان مگاپروژه قابل اجرا خواهد بود. ما در آینده تحقیقات خود را در راستای بهینه‌سازی برنامه زمان‌بندی و کاهش زمان اتمام مگاپروژه‌های ماژولار با به کارگیری تامین‌کنندگان مناسب گسترش خواهیم داد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد.

سپاسگزاری

این پژوهش فارغ از حمایت مادی و معنوی نهادها انجام شده است.

ORCID

Ali Memarpour Ghiaci  <https://orcid.org/0000-0001-5370-7630>
 Morteza Abbasi  <https://orcid.org/0000-0002-0926-6644>
 Jafar Gheidar-Kheljani  <https://orcid.org/0000-0002-9382-007X>

منابع داخلی

۱. کشاورز قراپائی، مهدی. (۱۴۰۳). یک مدل چندهدفه مبتنی بر تصمیم‌گیری گروهی و مجموعه‌های فازی فیثاغورثی بازه‌ای-مقدار برای مسئله انتخاب تامین‌کننده و تخصیص سفارش. *مطالعات مدیریت صنعتی*، ۲۲(۷۴)، ۴۹-۱.
<https://doi.org/10.22054/jims.2024.80903.2926>
۲. معمارپور غیاثی، علی، عباسی، مرتضی و قیدرخلجانی، جعفر. (۱۴۰۴). 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. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۱۵(۱)، ۷۳-۱۰۰.
<https://doi.org/10.48308/jimp.15.1.73>
۳. معمارپور غیاثی، علی، عباسی، مرتضی، پیری، مرتضی و اخوان، پیمان. (۱۴۰۳). موانع پیاده‌سازی تکنولوژی بلاکچین در لجستیک بشردوستانه در شرایط عدم قطعیت. *مطالعات مدیریت کسب و کار هوشمند*، ۱۲(۴۷)، ۱۵۳-۱۸۴.
<https://doi.org/10.22054/ims.2023.72916.2304>

References

1. 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.
<https://doi.org/10.18178/ijimt.2017.8.2.717>
2. Amindoust, A., Ahmed, S., Saghafeinia, A., & Bahreininejad, A. (2012). Sustainable supplier selection: A ranking model based on fuzzy inference system. *Applied Soft Computing*, 12(6), 1668-1677.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.01.023>
3. Ashkanani, S., & Franzoi, R. (2023). Gaps in megaproject management system literature: a systematic overview. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 30(3), 1300-1318.
<https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2021-1113>
4. Atanassov, K. T., & Atanassov, K. T. (1999). Intuitionistic fuzzy sets. *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1870-3_1
5. Cheraghalipour, A., & Farsad, S. (2018). A bi-objective sustainable supplier selection and order allocation considering quantity discounts under

disruption risks: A case study in plastic industry. *Computers & Industrial Engineering*, 118, 237-250.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.02.04>

6. Christanto, S., Runtuk, J. K., & Ng, P. K. (2025). Optimizing Supplier Selection: A Comparative Study of Fuzzy Vikor and Fuzzy Moora for Performance-Based Decision Making. *IEEE Access*.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3525362>
7. Çobanoğulları, G., Daldıran, K., & Daldıran, B. (2026). Analysis of Innovation Performance of South-Eastern European Countries in Transition Economies: An Application of the Entropy-Based ARTASI Method. *Spectrum of Operational Research*, 193-214.
<https://doi.org/10.31181/sor31202642>
8. Dang, P., Gao, H., Niu, Z., Geng, L., Hui, F. K. P., & Sun, C. (2024). The Supplier Selection of Prefabricated Component Production Line: A Lean-Based AHP-Improved VIKOR Framework. *Buildings*, 14(12), 4018. <https://doi.org/10.3390/buildings14124018>
9. Dhruva, S., Krishankumar, R., Ravichandran, K. S., Kaklauskas, A., Zavadskas, E. K., & Gupta, P. (2025). Selection of waste treatment methods for food sources: an integrated decision model using q-rung fuzzy data, LOPCOW, and COPRAS techniques. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03160-6>
10. Durdu, D. (2025). Evaluating Financial Performance with SPC-LOPCOW-AROMAN Hybrid Methodology: A Case Study for Firms Listed in BIST Sustainability Index. *Knowledge and Decision Systems with Applications*, 1, 92-111. <https://doi.org/10.59543/kadsa.v1i.13879>
11. Dündar, S. (2024). Project performance analysis of Turkish universities by LOPCOW-CRADIS methods. *Journal of Turkish Operations Management*, 8(2), 409-425. <https://doi.org/10.56554/jtom.1336202>
12. Ecer, F., & Pamucar, D. (2022). A novel LOPCOW-DOBI multi-criteria sustainability performance assessment methodology: An application in developing country banking sector. *Omega*, 112, 102690. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102690>
13. Ecer, F., Tanrıverdi, G., Yaşar, M., & Görçün, Ö. F. (2025). Sustainable aviation fuel supplier evaluation for airlines through LOPCOW and MARCOS approaches with interval-valued fuzzy neutrosophic information. *Journal of Air Transport Management*, 123, 102705. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102705>
14. Elkington, J., & Rowlands, I. H. (1999). Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. *Alternatives Journal*, 25(4), 42.
15. Fallahpour, A., Nayeri, S., Sheikhalishahi, M., Wong, K. Y., Tian, G., & Fathollahi-Fard, A. M. (2021). A hyper-hybrid fuzzy decision-making framework for the sustainable-resilient supplier selection problem: a case study of Malaysian Palm oil industry. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12491-y>
16. 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. <https://doi.org/10.1108/JEDT-11-2015-0075>
17. Flyvbjerg, B. (2014). What you should know about megaprojects and why: An overview. *Project management journal*, 45(2), 6-19. <https://doi.org/10.1002/pmj.21409>
 18. Flyvbjerg, B. (2021). Make megaprojects more modular. *Harvard Business Review*, 58-63
 19. Gao, Y., & Yu, A. (2025). A spherical fuzzy WASPAS approach to prioritize the factors enhancing the effectiveness of physical education classroom teaching. *Scientific Reports*, 15(1), 20875. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05273-w>
 20. Ghiaci, A. M., & Ghoushchi, 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*, 100719. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100719>
 21. Ghoushchi, S. J., Bonab, S. R., Ghiaci, A. M., Haseli, G., Tomaskova, H., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). Landfill site selection for medical waste using an integrated SWARA-WASPAS framework based on spherical fuzzy set. *Sustainability*, 13(24), 13950. <https://doi.org/10.3390/su132413950>
 22. Görçün, Ö. F., Tirkolaei, E. B., Küçükönder, H., & Garg, C. P. (2024). Assessing and selecting sustainable refrigerated road vehicles in food logistics using a novel multi-criteria group decision-making model. *Information Sciences*, 661, 120161. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.120161>
 23. Hajiaghaei-Keshteli, M., Cenk, Z., Erdebili, B., Özdemir, Y. S., & Gholian-Jouybari, F. (2023). Pythagorean fuzzy TOPSIS method for green supplier selection in the food industry. *Expert Systems with applications*, 224, 120036. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120036>
 24. Hallak, J. (2024). Optimizing construction supplier selection in conflict-affected regions: a hybrid multi-criteria framework. *Operations Management Research*, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s12063-024-00505-0>
 25. He, Q., Chen, X., Wang, G., Zhu, J., Yang, D., Liu, X., & Li, Y. (2019). Managing social responsibility for sustainability in megaprojects: An innovation transitions perspective on success. *Journal of cleaner production*, 241, 118395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118395>
 26. Hendiani, S., Mahmoudi, A., & Liao, H. (2020). A multi-stage multi-criteria hierarchical decision-making approach for sustainable supplier selection. *Applied Soft Computing*, 94, 106456. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106456>
 27. Hoseini, S. A., Fallahpour, A., Wong, K. Y., Mahdiyar, A., Saberi, M., & Durdiev, S. (2021). Sustainable supplier selection in construction industry through hybrid fuzzy-based approaches. *Sustainability*, 13(3), 1413. <https://doi.org/10.3390/su13031413>

28. Hosseini, S. M., Paydar, M. M., & Hajiaghaei-Keshteli, M. (2021). Recovery solutions for ecotourism centers during the Covid-19 pandemic: Utilizing Fuzzy DEMATEL and Fuzzy VIKOR methods. *Expert Systems with applications*, 185, 115594. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115594>
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. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19018-z>
30. Jafarzadeh Ghouschi, S., Shaffiee Haghshenas, S., Memarpour Ghiaci, A., Guido, G., & Vitale, A. (2022). Road safety assessment and risks prioritization using an integrated SWARA and MARCOS approach under spherical fuzzy environment. *Neural Computing and Applications*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07929-4>
31. Jauhar, S. K., & Pant, M. (2017). Integrating DEA with DE and MODE for sustainable supplier selection. *Journal of computational science*, 21, 299-306. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.02.011>
32. Kara, K., Yalçın, G. C., Kaygısız, E. G., Simic, V., Örnek, A. Ş., & Pamucar, D. (2024). A picture fuzzy CIMAS-ARTASI model for website performance analysis in human resource management. *Applied Soft Computing*, 162, 111826. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111826>
33. 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. <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2019-0535>
34. Keleş, N., & Kahveci, A. (2025). EVALUATING THE LOGISTICS PERFORMANCE OF THE EU CANDIDATE AND MEMBER COUNTRIES USING THE WENSLO AND ARTASI METHODS. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (68), 43-66. <https://doi.org/10.30794/pausbed.1594714>
35. Khan, S. A., Kusi-Sarpong, S., Arhin, F. K., & Kusi-Sarpong, H. (2018). Supplier sustainability performance evaluation and selection: A framework and methodology. *Journal of cleaner production*, 205, 964-979. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.144>
36. Kou, G., Aydın, F. B., Eti, S., Yüksel, S., & Dinçer, H. (2025). A novel Spherical fuzzy MEREC-ARAS decision framework for optimizing innovation-driven investment strategies in energy systems. *Energy Strategy Reviews*, 59, 101771. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101771>
37. Kutlu Gündoğdu, F., & Kahraman, C. (2019). Spherical fuzzy sets and spherical fuzzy TOPSIS method. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 36(1), 337-352. <https://doi.org/10.3233/JIFS-181401>
38. Li, H., Cao, Y., & Su, L. (2022). Pythagorean fuzzy multi-criteria decision-making approach based on Spearman rank correlation

- coefficient. *Soft Computing*, 26(6), 3001-3012. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06615-2>
39. Liang, R., Li, R., Yan, X., Xue, Z., & Wei, X. (2023). Evaluating and selecting the supplier in prefabricated megaprojects using extended fuzzy TOPSIS under hesitant environment: A case study from China. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 30(5), 1902-1931. <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2021-0793>
 40. Lin, C., Chen, J., Feng, C., & Li, X. (2024). Optimizing supplier selection for prefabricated components: a comprehensive evaluation. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2024-1230>
 41. Liu, H.-C., Quan, M.-Y., Li, Z., & Wang, Z.-L. (2019). A new integrated MCDM model for sustainable supplier selection under interval-valued intuitionistic uncertain linguistic environment. *Information sciences*, 486, 254-270. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.02.056>
 42. Lotfi, Z. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
 43. Luthra, S., Govindan, K., Kannan, D., Mangla, S. K., & Garg, C. P. (2017). An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains. *Journal of cleaner production*, 140, 1686-1698. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.078>
 44. Mahmoudi, A., Deng, X., Javed, S. A., & Zhang, N. (2021). Sustainable supplier selection in megaprojects: grey ordinal priority approach. *Business Strategy and the Environment*, 30(1), 318-339. <https://doi.org/10.1002/bse.2623>
 45. Mani, V., Agrawal, R., & Sharma, V. (2014). Supplier selection using social sustainability: AHP based approach in India. *International strategic management review*, 2(2), 98-112. <https://doi.org/10.1016/j.ism.2014.10.003>
 46. Memari, A., Dargi, A., Jokar, M. R. A., Ahmad, R., & Rahim, A. R. A. (2019). Sustainable supplier selection: A multi-criteria intuitionistic fuzzy TOPSIS method. *Journal of manufacturing systems*, 50, 9-24. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.11.002>
 47. 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), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s40314-022-02080-1>
 48. Mignacca, B., & Locatelli, G. (2021). Modular circular economy in energy infrastructure projects: Enabling factors and barriers. *Journal of Management in Engineering*, 37(5), 04021053. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000949](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000949)
 49. Murugan, R. B., & Wong, K. Y. (2025). Sustainable Supplier Selection for Labelling Materials Used in a Herbicide Manufacturing Company. In *Green Finance and Energy Transition: Innovation, Legal Frameworks and Regulation* (pp. 147-158). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75960-4_15

50. Nadeem, M., Gyapong, E., & Ahmed, A. (2020). Board gender diversity and environmental, social, and economic value creation: Does family ownership matter? *Business Strategy and the Environment*, 29(3), 1268-1284. <https://doi.org/10.1002/bse.2432>
51. Nişel, R., & Nişel, S. (2024). Advancing Global Innovation Metrics: A Comprehensive Country Ranking Using the Novel LOPCOW-CoCoSo Model. In *Ethics and Sustainability in Accounting and Finance*, Volume IV (pp. 99-118). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4351-3_7
52. Pamucar, D., Özçalıcı, M., & Gurler, H. E. (2025). Evaluation of the efficiency of world airports using WENSLO-ARTASI and Monte-Carlo simulation. *Journal of Air Transport Management*, 124, 102749. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102749>
53. Pamucar, D., Simic, V., Görçün, Ö. F., & Küçükönder, H. (2024). Selection of the best Big Data platform using COBRAC-ARTASI methodology with adaptive standardized intervals. *Expert Systems with applications*, 239, 122312. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122312>
54. Radovanović, M., Jovčić, S., Petrovski, A., & Cirkin, E. (2025). Evaluation of university professors using the spherical fuzzy AHP and grey MARCOS multi-criteria decision-making model: A case study. *Spectrum of decision making and applications*, 2(1), 198-218. <https://doi.org/10.31181/sdmap21202518>
55. Rashidi, K., & Cullinane, K. (2019). A comparison of fuzzy DEA and fuzzy TOPSIS in sustainable supplier selection: Implications for sourcing strategy. *Expert Systems with applications*, 121, 266-281. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.12.025>
56. Rong, Y., Yu, L., Liu, Y., Simic, V., & Garg, H. (2024). The FMEA model based on LOPCOW-ARAS methods with interval-valued Fermatean fuzzy information for risk assessment of R&D projects in industrial robot offline programming systems. *Computational and Applied Mathematics*, 43(1), 25. <https://doi.org/10.1007/s40314-023-02532-2>
57. Rostami, A., & Oduoza, C. F. (2017). Key risks in construction projects in Italy: contractors' perspective. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 24(3), 451-462. <https://doi.org/10.1108/ECAM-09-2015-0142>
58. Sahin, F., & Menekse, A. (2025). Internal control risk assessment using interval valued spherical fuzzy CRITIC EDAS. *Scientific Reports*, 15(1), 21505. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07852-3>
59. Shang, Z., Yang, X., Barnes, D., & Wu, C. (2022). Supplier selection in sustainable supply chains: Using the integrated BWM, fuzzy Shannon entropy, and fuzzy MULTIMOORA methods. *Expert Systems with applications*, 195, 116567. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116567>
60. Sharma, P., Nila, B., Pamucar, D., & Roy, J. (2025). Integrating LOPCOW-DOBI method and possibilistic programming for two-stage decision making in resilient food supply chain network. *Journal of*

- Industrial Information Integration*, 100847.
<https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100847>
۴۳. Su, Y., Zhao, M., Wei, C., & Chen, X. (2022). PT-TODIM method for probabilistic linguistic MAGDM and application to industrial control system security supplier selection. *International Journal of Fuzzy Systems*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s40815-021-01125-7>
61. Tatar, V., Ayyaz, B., & Pamucar, D. (2025). A quantitative ergonomic risk assessment model of maritime port operations: An integrated spherical fuzzy-FUCOM-ARTASI approach. *Ocean & Coastal Management*, 267, 107710. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107710>
62. Tirkolaee, E. B., Mardani, A., Dashtian, Z., Soltani, M., & Weber, G.-W. (2020). A novel hybrid method using fuzzy decision making and multi-objective programming for sustainable-reliable supplier selection in two-echelon supply chain design. *Journal of cleaner production*, 250, 119517. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119517>
63. 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.
64. Unal, Y., & Temur, G. T. (2021). Sustainable supplier selection by using spherical fuzzy AHP. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 42(1), 593-603. <https://doi.org/10.3233/JIFS-219214>
65. 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. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.03.036>
66. Xu, Z., Qin, J., Liu, J., & Martínez, L. (2019). Sustainable supplier selection based on AHPSort II in interval type-2 fuzzy environment. *Information sciences*, 483, 273-293. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.01.013>
67. Yadavalli, V. S., Darbari, J. D., Bhayana, N., Jha, P., & Agarwal, V. (2019). An integrated optimization model for selection of sustainable suppliers based on customers' expectations. *Operations Research Perspectives*, 6, 100113. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2019.100113>
68. Yager, R. R. (2013). Pythagorean fuzzy subsets. 2013 joint IFSA world congress and NAFIPS annual meeting (IFSA/NAFIPS). <https://doi.org/10.1109/IFSA-NAFIPS.2013.6608375>
69. Yalçın, G. C., Kara, K., & Senapati, T. (2024). A hybrid spherical fuzzy logarithmic decomposition of criteria importance and alternative ranking technique based on Adaptive Standardized Intervals model with application. *Decision Analytics Journal*, 11, 100441. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100441>
70. Yu, C., Shao, Y., Wang, K., & Zhang, L. (2019). A group decision making sustainable supplier selection approach using extended TOPSIS under interval-valued Pythagorean fuzzy environment. *Expert Systems with applications*, 121, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.12.010>

71. Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 8(3), 199-249. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90017-1](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90017-1)
72. Zhao, L., Liu, Z., & Mbachu, J. (2019). Optimization of the supplier selection process in prefabrication using BIM. *Buildings*, 9(10), 222. <https://doi.org/10.3390/buildings9100222>
73. Zhou, Z., & Mi, C. (2017). Social responsibility research within the context of megaproject management: Trends, gaps and opportunities. *International journal of project management*, 35(7), 1378-1390. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.02.017>

References [In Persian]

1. Keshavarz-Ghorabae, M. (2024). A multi-objective model based on group decision-making and interval-valued Pythagorean fuzzy sets for the supplier selection and order allocation problem. *Industrial Management Studies*, 22(74), 1-49. <https://doi.org/10.22054/jims.2024.80903.2926> [In Persian]
2. Memarpour Ghiaci, A., Abbasi, M., & Gheidar-Kheljani, J. (2025). An assessment of the causes of schedule and cost overruns in megaprojects using Z-BWM-MARCOS integrated method. *Journal of Industrial Management Perspective*. <https://doi.org/10.48308/jimp.15.1.73> [In Persian]
3. 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. <https://doi.org/10.22054/ims.2023.72916.2304> [In Persian]

استناد به این مقاله: نام خانوادگی نویسنده اول، نام. (سال). عنوان مقاله. عنوان نشریه (ایتالیک)، سال (شماره)، ص آغاز-ص پایان.



Name of Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.