

Analyzing power plant capacity expansion alternatives with multi-criteria decision-making methods

Parvin Golfam¹ 

1. Corresponding author, Ph.D., Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: P.Golfam@stu.qom.ac.ir

(Received 18 May 2025, Revised 8 Jun 2025, Accepted 15 Jun 2025, Published online 26 Jun 2025) - Research Article

Extended Abstract

Background and Objective

Energy supply, especially electricity for various consumption sectors such as household, commercial, and agricultural electricity, is of great importance as one of the goals of sustainable development. Therefore, monitoring and updating electricity generation technology in power plants to meet electricity demand, considering its various dimensions, is one of the most important measures to achieve sustainable development.

Methodology

The present study used the multi-criteria decision-making method of multi-interval assessment (TRUST) to prioritize expanding electricity generation capacity in the Marun basin. For this purpose, first, considering the conditions of the Marun hydropower plant and also investigation the field conditions, three alternatives were proposed by experts, including: (1) adding a solar power plant to the hydropower plant, (2) adding a combined cycle power plant to the hydropower plant, and (3) combining three hydropower, solar and combined cycle power plants to increase electricity generation capacity. To evaluate the alternatives, a set of main criteria, including economic, environmental, technical, and energy security criteria, and 10 related sub-criteria, was determined. In the next step, the questionnaire related to the criterion importance method based on the internal correlation of criteria (Critic) was provided to the experts for weighting the criteria and sub-criteria and the TRUST ranking method. In the final step, the final weight of the sub-criteria and prioritization of the alternatives for increasing electricity generation were extracted.

Findings

The results of the Critic method show that the economic criterion with a weight of 0.340 and the greenhouse gas emission sub-criterion with a weight of 0.156 are the most important criteria and sub-criteria, respectively. The results of the TRUST method also show that combining three hydroelectric, solar, and combined cycle power plants with a score of 0.047 is the best alternative for increasing the electricity generation capacity at the Marun power plant.

Conclusion

The Currently, the water and electricity consuming sectors, including the domestic, agricultural, and environmental sectors in the Marun Basin, are facing numerous challenges in meeting demand. Continuing the current energy management trend could lead to more severe crises in this region. The



results of the present study can be the basis for electricity supply policies in the coming years in the Maroon Basin, in a way that ensures the security of electricity supply.

Keywords: TRUST multi-criteria decision-making method, Multiple normalization, Critic weighting method, Combined cycle gas power plant, Solar power plant.

Cite this article: Golfam Parvin. Analyzing power plant capacity expansion alternatives with multi-criteria decision-making methods. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(2): 57-70. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.12973.1015>



تحلیل گزینه‌های توسعه ظرفیت نیروگاه تولید برق با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

پروین گل‌فام^۱

۱. نویسنده مسئول، دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: P.Golfam@stu.qom.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵، تاریخ انتشار برخط: ۱۴۰۴/۰۴/۰۵ - مقاله پژوهشی

چکیده

سد و نیروگاه برق‌آبی مارون واقع در استان خوزستان به‌عنوان تنها منبع تأمین‌کننده برق بخش‌های خانگی و کشاورزی در حوضه آبریز مارون با چالش‌های فراوانی ناشی از افزایش جمعیت، رشد شهرنشینی و اثرات پدیده تغییر اقلیم در سال‌های اخیر روبه‌رو است. هدف از انجام پژوهش حاضر، اولویت‌بندی گزینه‌های توسعه ظرفیت تولید برق در حوضه آبریز مارون با به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ارزیابی چندفاصله‌ای چندمعیاره^۲ (TRUST) است. بدین‌منظور ابتدا، با توجه به وضعیت نیروگاه برق‌آبی مارون و نیز بررسی شرایط میدانی، سه گزینه شامل: (۱) افزودن نیروگاه تولید برق خورشیدی به نیروگاه برق‌آبی، (۲) افزودن نیروگاه سیکل ترکیبی به نیروگاه برق‌آبی و (۳) ترکیب سه نیروگاه برق‌آبی، خورشیدی و سیکل ترکیبی برای افزایش ظرفیت تولید برق توسط کارشناسان پیشنهاد شد. به‌منظور ارزیابی گزینه‌ها، مجموعه معیارهای اصلی شامل معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی، فنی و امنیت تأمین انرژی و ۱۰ زیرمعیار مربوط به آنها تعیین شدند. در گام بعدی، پرسش‌نامه مربوط به روش اهمیت معیارها مبتنی بر هم‌بستگی درونی معیارها (Critic) برای وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها و روش رتبه‌بندی TRUST در اختیار کارشناسان قرار گرفت. در گام نهایی، وزن نهایی زیرمعیارها و اولویت‌بندی گزینه‌های افزایش تولید برق استخراج شدند. نتایج روش Critic نشان می‌دهند که معیار اقتصادی با وزن ۰/۳۴۰ و زیرمعیار انتشار گازهای گلخانه‌ای با وزن ۰/۱۵۶ به‌ترتیب مهم‌ترین معیار و زیرمعیار هستند. هم‌چنین نتایج روش TRUST نشان می‌دهند که گزینه ترکیب سه نیروگاه برق‌آبی، خورشیدی و سیکل ترکیبی با امتیاز ۰/۰۴۷ بهترین گزینه برای افزایش ظرفیت تولید برق در نیروگاه مارون است.

کلیدواژه‌ها: روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TRUST، نرمال‌سازی چندگانه، روش وزن‌دهی Critic، نیروگاه گازی سیکل ترکیبی، نیروگاه برق خورشیدی.

استناد: گل‌فام پروین. تحلیل گزینه‌های توسعه ظرفیت تولید برق با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره. *منابع آب و تغییر اقلیم*. ۱۴۰۴؛ (۲): ۵۷-۷۰.

<https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.12973.1015>

²- A multi-noRmalization multi-distance assessment



۱- مقدمه

تصمیم‌گیری شفاف در انتخاب گزینه‌های انرژی کمک می‌کند [۵]. تاکنون روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره متعددی در زمینه برنامه‌ریزی ترکیب نیروگاه‌های تولید برق به کار رفته است که در ادامه برخی از آنها آورده می‌شود.

شولاک^۲ و کایا^۳ از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تحلیل سلسله مراتبی^۴ (AHP) مبتنی بر مجموعه‌های فازی نوع-۲ بازه‌ای^۵ و روش شباهت به گزینه ایده‌آل^۶ (TOPSIS) فازی^۷ برای اولویت‌بندی گزینه‌های انرژی تجدیدپذیر در ترکیه استفاده کردند [۶]. علی^۸ و همکاران فن‌آوری‌های تولید برق با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بهترین-بدترین^۹ (BWM) و روش ارزیابی براساس فاصله از میانگین راه‌حل^{۱۰} (EDAS) را در بنگلادش رتبه‌بندی کردند. نتایج نشان دادند که در میان فن‌آوری‌های تولید برق، فن‌آوری خورشیدی بهترین گزینه در میان فن‌آوری‌های پاک بود و در مجموع، فن‌آوری گازی بهترین و فن‌آوری بادی بدترین بودند [۷].

رمضان‌زاده و همکاران، به منظور انتخاب بهترین پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر از یک چارچوب تصمیم‌گیری ترکیبی شامل روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر تحلیل نسبت^{۱۱} (MOORA)، روش بهینه‌سازی چندمعیاره و حل سازشی^{۱۲} (VIKOR)، EDAS و ارزیابی نسبت جمعی^{۱۳} (ARAS) در محیط فازی برای استان خراسان شمالی در ایران استفاده کردند. معیارهای اصلی در این پژوهش شامل معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و فنی بودند که با روش آنتروپی شانون وزن‌دهی شدند. نتایج نشان دادند که زیرمعیار پذیرش اجتماعی با وزن ۰/۱۱۰۵ مهم‌ترین معیار و انرژی خورشیدی با امتیاز ۰/۲۲ بهترین گزینه بودند [۸].

انرژی پایه و اساس توسعه پایدار در هر کشوری است. زیرا از یک سو، نقش مهمی در دستیابی به هدف کاهش ۱/۵ درجه سانتی‌گراد در توافق‌نامه پاریس دارد و از سوی دیگر تأمین انرژی برای اطمینان از دسترسی مردم به آب آشامیدنی سالم و مراقبت‌های بهداشتی ضروری است [۱]. بسیاری از کشورها برای تأمین انرژی مورد نیاز خود هم‌چنان به منابع سوخت‌های فسیلی وابسته هستند. این در حالی است که منابع سوخت‌های فسیلی محدود بوده و انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از آنها، یکی از مهم‌ترین دلایل وقوع تغییرات اقلیمی هستند. این امر به‌ویژه در مناطق شهری به دلیل رشد جمعیت و فشار فزاینده بر منابع انرژی برای تأمین آب و غذا اهمیت ویژه‌ای دارد [۲]. بنابراین توسعه فن‌آوری‌های تولید برق از منابع انرژی تجدیدپذیر با هدف غلبه بر چالش‌های جهانی انرژی اهمیت بسیار زیادی دارد. گرچه به دلیل ماهیت ناپایدار منابع انرژی تجدیدپذیر، چالش‌های متعددی در استفاده دائمی از آنها وجود دارد.

بسیاری از کشورها تنوع‌بخشی به سبد انرژی و ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر را به عنوان یک راه‌کار برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار انتخاب کردند [۳]. اما انتخاب بهترین ترکیب فن‌آوری‌های تولید برق با در نظر گرفتن ویژگی‌های مختلف هر یک از نیروگاه‌های تولید برق با چالش‌های فراوانی مواجه است [۴]. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، مدل‌های مبتنی بر پژوهش در عملیات هستند، به‌ویژه هنگامی که اهداف و معیارهای متعدد و گاه متضاد در یک مسأله تصمیم‌گیری وجود دارند. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با ساختاری نظام‌مند و دقیق برای ارزیابی گزینه‌ها براساس هر معیار، به

^۹- Best-Worst Method

^{۱۰}- Evaluation Based on Distance from Average Solution

^{۱۱}- Multi-Objective Optimization Based on Ratio Analysis

^{۱۲}- Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje

^{۱۳}- Additive Ratio Assessment

^۲- Çolak

^۳- Kaya

^۴- Analytic Hierarchy Process

^۵- Interval Type-2 Fuzzy Sets

^۶- Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

^۷- Hesitant Fuzzy TOPSIS

^۸- Ali

گوپتا^{۲۵} و همکاران با استفاده از روش تصمیم‌گیری Fuzzy-TOPSIS، منابع تجدیدپذیر در هند را رتبه‌بندی کردند. بدین‌منظور، ابتدا با سه روش وزن‌دهی شامل AHP، آزمایشگاه آزمون و ارزیابی تصمیم‌گیری^{۲۶} (DEMATEL) و Fuzzy-AHP معیارها را وزن‌دهی کردند. نتایج روش Fuzzy-TOPSIS نشان دادند که انرژی خورشیدی بهترین منبع انرژی بود و انرژی‌های بادی، برق‌آبی و زیست‌توده در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند [۱۳].

دش^{۲۷} و همکاران از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تمام رتبه‌بندی‌های جفتی نهان از همه گزینه‌های ممکن^{۲۸} (PAPRIKA) برای ارزیابی اولویت‌بندی گزینه‌های مختلف انرژی بادی براساس معیارهایی نظیر ضریب ظرفیت و اثرات زیست‌محیطی در مناطق روستایی استفاده کردند. نتایج نشان دادند که توربین‌های بادی ساحلی در رتبه اول و توربین‌های بادی محور عمودی و سامانه‌های بادی هیبریدی در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند [۱۴].

شمسی‌پور^{۲۹} و همکاران، به‌منظور ارزیابی فن‌آوری‌های انرژی تجدیدپذیر در اصفهان از ادغام فرآیند تحلیل شبکه‌ای فازی مبتنی بر DEMATEL (FDANP) و روش Fuzzy-MULTIMOORA استفاده کردند. نتایج نشان دادند که سامانه‌های فتوولتائیک خورشیدی، انرژی خورشیدی متمرکز، انرژی بادی به‌ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم قرار داشتند [۱۵].

در پژوهش حاضر، برای نخستین‌بار روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TRUST برای تحلیل گزینه‌های توسعه ظرفیت نیروگاه برق با در مقیاس حوضه آبریز توسعه داده خواهد شد. مهم‌ترین ویژگی روش TRUST، استفاده از یک نرمال‌سازی چندگانه با هدف ایجاد یک مقیاس قابل مقایسه برای امتیازدهی عملکرد گزینه‌ها براساس

سارکودی^{۱۴} و همکاران پنج منبع انرژی تجدیدپذیر را با سه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS، MOORA و ارزیابی تناسبی پیچیده^{۱۵} (COPRAS) در غنا ارزیابی کردند. بدین‌منظور، ۱۳ معیار با روش Critic وزن‌دهی شدند. نتایج نشان دادند که اولویت نیروگاه‌ها به‌ترتیب شامل نیروگاه برق‌آبی، زیست‌توده، خورشیدی، بادی و حرارتی بودند [۹].

اسدی و همکاران، به‌منظور انتخاب بهینه منابع انرژی تجدیدپذیر در ایران از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ارزیابی هم‌زمان معیارها و گزینه‌ها^{۱۶} (SECA) در صنعت برق ایران استفاده کردند. هم‌چنین در این پژوهش، برای استخراج معیارهای ارزیابی، روش دلفی مبتنی بر فازی دو مرحله‌ای^{۱۷} به‌کار گرفته شد. نتایج نشان دادند که منابع انرژی خورشیدی، بادی، زیست‌توده، برق‌آبی، هیدروژنی، زمین‌گرمایش و حاصل از امواج در اولویت اول تا هفتم بودند [۱۰].

آکپاهو^{۱۸} و اودویو-یورک^{۱۹} از روش Critic و آنترپی^{۲۰} برای تعیین وزن معیارها و از EDAS برای اولویت‌بندی منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید برق پایدار در بنین^{۲۱} استفاده کردند. نتایج نشان دادند که نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی در رتبه نخست و پس از آن، نیروگاه‌های بادی، خورشیدی متمرکز، برق‌آبی و زیست‌توده در رتبه‌های بعدی قرار داشتند [۱۱].

آکینتایو^{۲۲} و همکاران از دو روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ARAS و COPRAS برای رتبه‌بندی گزینه‌های انرژی براساس عملکرد زیست‌محیطی آنها استفاده کردند. نتایج نشان دادند که بیشینه و کمینه ترجیح برای گزینه‌های انرژی به‌ترتیب نیروگاه گازسوز^{۲۳} و نیروگاه زمین‌گرمایش^{۲۴} بودند [۱۲].

22- Akintayo

23- Gas-Powered

24- Geothermal

25- Gupta

26- Decision making trial and evaluation laboratory

27- Dash

28- Potentially All Pairwise Rankings of All Possible Alternatives

29- Shamsipour

14- Sarkodie

15- Complex Proportional Assessment

16- Simultaneous Evaluation of Criteria and Alternatives

17- Two-Round Fuzzy-Based Delphi Technique

18- Akpahou

19- Odoi-Yorke

20- Entropy

21- Benin

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ A_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ A_2 & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{matrix} \quad (1)$$

که در آن، X = ماتریس تصمیم‌گیری؛ x_{ij} = درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری؛ n = تعداد معیارها، و m = تعداد گزینه‌ها هستند.

(ب) نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری

در این گام، درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری براساس رابطه (۲) نرمال‌سازی می‌شوند.

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (2)$$

که در آن، b_{ij} = درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌شده؛ x_j^{\min} = کمینه مقدار درایه هر ستون ماتریس تصمیم‌گیری، و x_j^{\max} = بیشینه مقدار درایه هر ستون ماتریس تصمیم‌گیری، هستند.

(پ) محاسبه انحراف استاندارد

در گام سوم، مقدار انحراف استاندارد برای هر معیار از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$ST = \left(\frac{\sum [x_i - \bar{x}]^2}{n-1} \right)^{0.5} \quad (3)$$

که در آن، ST = انحراف استاندارد، و \bar{x} = میانگین درایه‌ها، هستند. انحراف استاندارد میزان انحراف مقادیر گزینه‌ها از مقدار میانگین برای یک معیار مشخص را نشان می‌دهد.

(ت) تشکیل ماتریس متقارن^{۳۴} و محاسبه هم‌بستگی معیارها

به‌منظور محاسبه هم‌بستگی معیارها، ابتدا ماتریس متقارن با ابعاد $m \times m$ تشکیل می‌شود. سطرها و ستون‌های ماتریس متقارن معیارها هستند و هر درایه آن، براساس هم‌بستگی خطی میان معیارها به‌دست می‌آید.

معیارهای متعدد با مقیاس‌های مختلف است. در این روش از نرمال‌سازی مبتنی بر هدف استفاده می‌شود که از یک مقدار هدف برای نرمال‌سازی درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری براساس ترجیح تصمیم‌گیرندگان یا استانداردهای زندگی واقعی استفاده می‌شود. همچنین پژوهش حاضر، جزو نخستین مطالعاتی است که توسعه ظرفیت تولید برق نیروگاه را در مقیاس یک حوضه آبریز بررسی می‌کند. مطالعات منطقه‌ای به سیاست‌گذاران کمک می‌کند که سیاست‌گذاری متناسب با شرایط هر منطقه صورت گرفته و در نتیجه سیاست‌گذاری منطقه‌ای و در نهایت کشوری دقیق‌تر و پایدارتر باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، گام‌های روش وزن‌دهی Critic برای وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TRUST برای اولویت‌بندی گزینه‌ها شرح داده خواهد شد.

۲-۱- روش وزن‌دهی Critic

روش وزن‌دهی Critic توسط دیاکولاکی^{۳۰} و همکاران براساس شدت تعارض^{۳۱} و تضاد^{۳۲} معیارها با استفاده از مفاهیم آماری، شامل هم‌بستگی و انحراف استاندارد ارائه شد [۱۶]. در این روش، وزن نهایی معیارها از روش خطی^{۳۳} برای ترکیب دو پارامتر هم‌بستگی و انحراف استاندارد به‌دست می‌آید. در ادامه گام‌های روش Critic به‌طور مفصل شرح داده خواهند شد.

(الف) تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری

درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری، براساس عمل‌کرد هر گزینه با در نظر گرفتن هر معیار تشکیل می‌شود. اگر مسأله، دارای m گزینه و n معیار باشد، ماتریس تصمیم‌گیری به‌صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

³³- Linear Method

³⁴- Symmetric Matrix

³⁰- Diakoulaki

³¹- Conflict

³²- Contrast

آن، نرمال سازی می کند [۱۸]. در نرمال سازی مبتنی بر محدودیت، هدف محاسبه درجه رضایت^{۳۷} برای امتیاز عملکرد هر گزینه با توجه به هر معیار است. امتیاز نهایی گزینه ها براساس فاصله گزینه ها از راه حل ایده آل منفی براساس معیارهای فاصله اقلیدسی^{۳۸}، منهن^{۳۹}، لورنتزیان^{۴۰} و پیرسون^{۴۱} محاسبه می شود. گام های روش TRUST به شرح زیر هستند:

(الف) تشکیل ماتریس تصمیم گیری اولیه

در این گام، ماتریس تصمیم گیری اولیه براساس ارزیابی عملکرد هر گزینه براساس هر معیار توسط کارشناسان براساس رابطه (۶) تشکیل می گردد:

$$A = [a_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن، $A =$ ماتریس تصمیم گیری اولیه و a_{ij} = درایه های ماتریس تصمیم گیری براساس امتیاز هر گزینه با توجه به هر معیار است.

(ب) نرمال سازی ماتریس تصمیم گیری اولیه

در این گام، ماتریس تصمیم گیری اولیه با چهار روش به طور جداگانه نرمال سازی می شوند.

(ب-۱) نرمال سازی نوع یک: ماتریس تصمیم گیری اولیه براساس نسبت خطی^{۴۲} [۱۹] براساس رابطه (۷) نرمال سازی می شود:

$$a_{ij}^l = \frac{a_{ij}}{\max_i a_{ij}} \quad \text{if } j \in B$$

$$a_{ij}^l = \frac{\min_i a_{ij}}{a_{ij}} \quad \text{if } j \in C \quad (7)$$

که در آن، a_{ij}^l = درایه های ماتریس تصمیم گیری نرمال شده براساس نرمال سازی نوع یک هستند. $B =$ معیارهای سود و $C =$ معیارهای هزینه هستند.

(ث) محاسبه مقدار تعارض معیارها

در این گام، تعارض میان یک معیار و سایر معیارها با رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$\delta = \sum_{j=1}^m (1 - b_{ij}) \quad (4)$$

که در آن، $\delta =$ مجموع تعارض میان یک معیار و سایر معیارها، $b_{ij} =$ درایه های ماتریس متقارن هستند.

(ج) تعیین وزن معیارها

در این گام، مقدار انحراف استاندارد هر معیار در مقدار تعارض آن معیار ضرب و در نهایت وزن معیارها محاسبه می شود. وزن معیارها از روابط (۵) حاصل می شود.

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{i=1}^m C_j} \quad (5)$$

$$C_{ij} = ST \sum_{i=1}^m (1 - b_{ij})$$

که در آن، $W_j =$ وزن معیار، و $C_j =$ اطلاعات معیار در مورد معیار j با ترکیب انحراف استاندارد و ضریب هم بستگی، هستند.

۲-۲- روش تصمیم گیری چندمعیاره TRUST

تورکایش^{۳۵} و دوسی^{۳۶} روش تصمیم گیری چندمعیاره چندمعیاره TRUST را بر مبنای ارزیابی چندفاصله ای ارائه دادند [۱۷]. مهم ترین ویژگی این روش، استفاده از یک روش نرمال سازی چندگانه با استفاده از سه روش نرمال سازی خطی، نرمال سازی لگاریتمی و نرمال سازی مبتنی بر محدودیت است که از طریق یک عملگر تجمیع ادغام می شوند. این ویژگی سبب می شود قضاوت های ذهنی در داده های نرمال سازی شده کمینه شود. در نرمال سازی مبتنی بر محدودیت، از یک پارامتر محدودیت بازه برای نرمال سازی درایه های ماتریس تصمیم گیری استفاده می شود. به بیان دیگر، از یک مقدار کم تر و بیش تر برای هر معیار استفاده می کند و ماتریس تصمیم گیری را براساس

⁴⁰- Lorentzian

⁴¹- Pearson

⁴²- Linear Ratio

³⁵- Torkayesh

³⁶- Deveci

³⁷- Satisfaction Degree

³⁸- Euclidean

³⁹- Manhattan

$$g_{ij} = \beta_1 a_{ij}^1 + \beta_2 a_{ij}^2 + \beta_3 a_{ij}^3 + \beta_4 a_{ij}^4 \quad (11)$$

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 = 1$$

مقادیر β با توجه به ویژگی معیارها و تجربه کارشناسان تعیین می‌شود. در پژوهش حاضر، براساس نظر کارشناسان مقدار β برای هر چهار نوع روش نرمال‌سازی برابر با ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است.

(پ) تشکیل ماتریس درجه رضایت‌مندی^{۴۶}

در این گام، ماتریس درجه رضایت‌مندی براساس ماتریس تصمیم‌گیری اولیه [۲۳] تشکیل می‌شود. بدین‌منظور ابتدا مقادیر قیدها برای هر معیار توسط کارشناسان براساس تجربه آنها تعیین شده و به‌صورت یک بازه عددی به‌صورت رابطه (۱۲) نشان داده می‌شود.

$$[LB_j, UB_j] \subseteq [a_j^{min}, a_j^{max}] \quad (12)$$

که در آن، $LB_j =$ حد پایین^{۴۷} مقدار قید برای یک معیار و $UB_j =$ حد بالای^{۴۸} مقدار قید برای یک معیار هستند. درجه رضایت‌مندی از ماتریس تصمیم‌گیری اولیه براساس مقادیر قیدها محاسبه می‌شود. درایه‌های ماتریس درجه رضایت‌مندی برای معیارهای سود براساس رابطه (۱۳) محاسبه می‌شوند:

$$f_{ij} = 1, \quad \text{if } a_{ij} \in [LB_i, UB_i]$$

$$f_{ij} = 1 - \frac{LB_j - a_{ij}}{\text{Max}(LB_j - a_j^{min}, a_j^{max} - UB_j) + 1}, \quad \text{if } a_{ij} \in [a_j^{min}, LB_j]$$

$$f_{ij} = 1 - \frac{1 - UB_j + a_{ij}}{\text{Max}(LB_j - a_j^{min}, a_j^{max} - UB_j) + 1}, \quad \text{if } a_{ij} \in [UB_j, a_j^{max}] \quad (13)$$

درایه‌های ماتریس درجه رضایت‌مندی برای معیارهای سود براساس رابطه (۱۴) محاسبه می‌شوند:

(ب-۲) نرمال‌سازی نوع دو: ماتریس تصمیم‌گیری اولیه براساس روش مبتنی بر جمع خطی^{۴۳} [۲۰] براساس رابطه (۸) نرمال‌سازی می‌شود:

$$a_{ij}^2 = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad \text{if } j \in B$$

$$a_{ij}^2 = \frac{1/a_{ij}}{\sum_{i=1}^m 1/a_{ij}} \quad \text{if } j \in C \quad (8)$$

که در آن، $a_{ij}^2 =$ درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌شده براساس نرمال‌سازی نوع دو هستند.

(ب-۳) نرمال‌سازی نوع سه: ماتریس تصمیم‌گیری اولیه براساس روش کمینه-بیشینه^{۴۴} [۲۱] طبق رابطه (۹) نرمال‌سازی می‌شود:

$$a_{ij}^3 = \frac{(a_{ij} - \min_i a_{ij})}{\max_i a_{ij} - \min_i a_{ij}} \quad \text{if } j \in B$$

$$a_{ij}^3 = \frac{(\min_i a_{ij} - a_{ij})}{\max_i a_{ij} - \min_i a_{ij}} \quad \text{if } j \in C \quad (9)$$

که در آن، $a_{ij}^3 =$ درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌شده براساس نرمال‌سازی نوع سه هستند.

(ب-۴) نرمال‌سازی نوع چهار: ماتریس تصمیم‌گیری اولیه براساس روش الگوریتمی [۲۲] طبق رابطه (۱۰) نرمال‌سازی می‌شود:

$$a_{ij}^4 = \frac{\log(a_{ij})}{\log(\prod_{i=1}^m a_{ij})} \quad (10)$$

که در آن، $a_{ij}^4 =$ درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌شده براساس نرمال‌سازی نوع چهار هستند.

(ب-۵) تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌شده تجمیعی^{۴۵}: با استفاده از چهار پارامتر α و یک پارامتر β براساس رابطه (۱۱) ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌شده تشکیل می‌شود:

46- Satisfaction Degree Matrix

47- Lower Bound

48- Upper Bound

43- Linear Sum-Based

44- Linear Max-Min

45- Aggregated Normalized Decision Matrix

(چ) اعمال عملگر دومرحله‌ای برای محاسبه فواصل گزینه‌ها از راه‌حل ایده‌آل منفی

در این گام، فواصل اقلیدسی و منتهن و خطای لورنتزیان و پیرسون [۲۴] محاسبه می‌شوند. فواصل اقلیدسی و منتهن به ترتیب از روابط (۱۸) و (۱۹) و خطاهای لورنتزیان و پیرسون به ترتیب از روابط (۲۰) و (۲۱) محاسبه می‌شوند:

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (H_{ij} - \lambda_j)^2} \quad (18)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^m |H_{ij} - \lambda_j| \quad (19)$$

$$L_i = \sum_{j=1}^m \log(1 + |H_{ij} - \lambda_j|) \quad (20)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^m \frac{(H_{ij} - \lambda_j)^2}{\lambda_j} \quad (21)$$

که در آن، E_i = فاصله اقلیدسی و T_i = فاصله منتهن، L_i = خطای لورنتزیان و P_i = خطای پیرسون هستند.

(ح) تشکیل ماتریس‌های ارزیابی فاصله نسبی^{۵۲}

در این گام ماتریس ارزیابی فاصله نسبی براساس روابط (۲۲) و (۲۳) محاسبه می‌شود:

$$\omega_{ik} = (E_i - E_k) + ((E_i - E_k) * (T_i - T_k)) \quad (22)$$

$$\tau_{ik} = (L_i - L_k) + ((L_i - L_k) * (P_i - P_k)) \quad (23)$$

که در آن، ω_{ik} = درایه‌های ماتریس ارزیابی فاصله نسبی براساس فواصل اقلیدسی و منتهن و τ_{ik} = درایه‌های ماتریس ارزیابی فاصله نسبی براساس خطای لورنتزیان و پیرسون هستند.

(خ) محاسبه امتیاز ارزیابی فاصله ترکیبی^{۵۳}

در این گام، امتیاز ارزیابی فاصله ترکیبی از راه‌حل ضد ایده‌آل براساس رابطه (۲۴) محاسبه و در نهایت رتبه‌بندی گزینه‌ها به دست خواهد آمد.

$$\Omega_i = \mu \sum_{k=1}^n \omega_{ik} + (1 - \mu) \sum_{k=1}^n \tau_{ik} \quad (24)$$

$$f_{ij} = \frac{1}{\text{Max}(LB_j - a_j^{\min}, a_i^{\max} - UB_j) + 1}, \quad \text{if } a_{ij} \in [LB_{ij}, UB_{ij}]$$

$$f_{ij} = \frac{LB_j - a_{ij}}{\text{Max}(LB_j - a_j^{\min}, a_i^{\max} - UB_j)}, \quad \text{if } a_{ij} \in [a_i^{\min}, LB_j]$$

$$f_{ij} = \frac{a_{ij} - UB_j}{\text{Max}(LB_j - a_j^{\min}, a_i^{\max} - UB_j)}, \quad \text{if } a_{ij} \in [UB_j, a_i^{\max}] \quad (14)$$

(ت) تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌سازی شده تجمیعی مقیدشده^{۴۹}

در این گام، ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌سازی شده تجمیعی مقیدشده براساس رابطه (۱۵) تشکیل می‌شود:

$$S_{ij} = f_{ij} g_{ij} \quad (15)$$

که در آن، S_{ij} = درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌سازی تجمیعی مقیدشده هستند.

(ث) تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌سازی شده تجمیعی مقیدشده موزون^{۵۰}

در این گام، ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌سازی شده تجمیعی مقیدشده موزون براساس رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود:

$$H_{ij} = s_{ij} w_{ij} \quad (16)$$

که در آن، H_{ij} = ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌سازی تجمیعی مقیدشده موزون و w_{ij} = بردار وزن معیارها هستند.

(ج) راه‌حل ایده‌آل منفی^{۵۱} از ماتریس موزون

در این گام، راه‌حل ایده‌آل منفی از ماتریس موزون براساس رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\lambda_j = \min_i H_{ij} \quad (17)$$

که در آن، λ_j = راه‌حل ایده‌آل منفی از ماتریس موزون است.

⁵²- Relative Distance Assessment Matrices

⁵³- Combined Distance Assessment Score

⁴⁹- Constrained Aggregated Normalized Decision Matrix

⁵⁰- Weight Constrained Aggregated Normalized Matrix

⁵¹- Negative-Ideal Solution

این گزینه با توجه به موقعیت جغرافیایی استان خوزستان و میزان تابش خورشیدی و ساعات آفتابی طولانی انتخاب شده است.

(ب) افزودن نیروگاه سیکل ترکیبی به نیروگاه برق‌آبی این گزینه با توجه به وجود منابع غنی نفت و گاز و سوخت‌های فسیلی در استان خوزستان انتخاب شده است.
(پ) ترکیب سه نیروگاه برق‌آبی، خورشیدی و سیکل ترکیبی

۳-۲- مجموعه معیارهای اصلی و زیرمعیارها

معیارهای اصلی شامل معیارهای اقتصادی، زیست‌محیطی، فنی و تأمین عرضه انرژی هستند. هزینه سرمایه‌گذاری، اشتغال‌زایی و هزینه سوخت زیرمعیارهای معیار اقتصادی هستند. انتشار گازهای گلخانه‌ای و تناسب گزینه با شرایط اقلیمی منطقه زیرمعیارهای معیار زیست‌محیطی، سهولت دسترسی به فن‌آوری تولید برق، سهولت استقرار تجهیزات نیروگاهی و قابلیت تغییر در سطح تولید برق زیرمعیارهای معیار فنی و تأمین سوخت خوراک نیروگاه و حفظ و صرفه‌جویی در مصرف منابع تجدیدناپذیر زیرمعیارهای معیار تأمین عرضه انرژی در نظر گرفته شدند.
در پژوهش حاضر، زیرمعیارهای هزینه سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای از نوع منفی و سایر زیرمعیارها از نوع مثبت هستند.

۴- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از روش وزن‌دهی Critic و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TRUST برای مجموعه معیارها و زیرمعیارها و نیز گزینه‌ها در حوضه آبریز مارون شرح داده خواهد شد.

که در آن، $\Omega_r =$ امتیاز ارزیابی فاصله ترکیبی از راه‌حل ضداپده‌آل برای هر گزینه، $\mu =$ پارامتر غیرمنفی کوچک‌تر از یک است که به‌طور معمول برابر با $0/5$ در نظر گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر نیز مقدار آن $0/5$ در نظر گرفته شده است. هراندازه مقدار Ω_r برای هر گزینه بیش‌تر باشد، رتبه آن بهتر خواهد بود.

۳- مورد مطالعاتی

مورد مطالعاتی در پژوهش حاضر، حوضه آبریز مارون واقع در استان خوزستان در جنوب غرب کشور ایران است. حوضه آبریز مارون با مساحت ۳۸۰۱ مترمربع، از زیرحوضه‌های عمان-خلیج فارس به‌شمار می‌آید. سد و نیروگاه برق‌آبی مارون با هدف تأمین آب اراضی کشاورزی، تأمین برق خانگی و کشاورزی و جلوگیری از وقوع سیلاب است [۲۵]. نیروگاه برق‌آبی مارون تأمین‌کننده برق خانگی در شهرهای بهبهان، هفتکل، رامهرمز، شادگان و باغ‌ملک و رامشیر است. در سال‌های اخیر به‌دلیل افزایش جمعیت و کاهش بارندگی، چالش‌های بسیار شدیدی در تأمین آب و برق ساکنین حوضه آبریز مارون رخ داده است [۲۶ و ۲۷]. یکی از راه‌کارهای کاهش تنش برای تأمین برق خانگی، توسعه ظرفیت تولید برق نیروگاه با توجه به ظرفیت‌های حوضه آبریز مارون است. در ادامه گزینه‌ها و مجموعه معیارهای اصلی و زیرمعیارهای مرتبط با هریک از آنها براساس نظرات کارشناسان آورده شده است.

۳-۱- گزینه‌های پیشنهادی

کارشناسان براساس شرایط میدانی حوضه آبریز مارون و پتانسیل نهان توسعه ظرفیت نیروگاه برق‌آبی مارون، سه گزینه زیر را پیشنهاد دادند. در پژوهش حاضر، از دو کارشناس برنامه‌ریزی سامانه‌های انرژی و یک کارشناس مهندسی محیط زیست برای تعیین گزینه‌ها و مجموعه معیارها و زیرمعیارها استفاده شده است.
(الف) افزودن نیروگاه تولید برق خورشیدی به نیروگاه برق‌آبی

جدول ۳- ماتریس تعارض معیارهای اصلی

Table 3. Matrix of conflict of the main criteria

	A	B	C	D	Sum
A	0	1.0012	1.3836	0.0831	2.4707
B	1.0012	0	1.9218	1.4003	4.3235
C	1.3836	1.9218	0	0.9860	4.2941
D	0.0831	1.4003	0.9860	0	2.4694

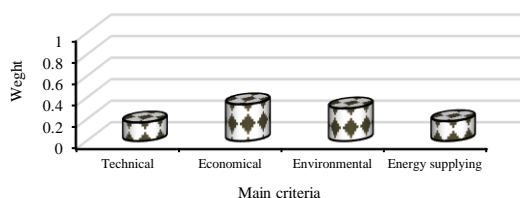


Figure 1. The final weight of main criteria

شکل ۱- وزن نهایی معیارهای اصلی

مطابق شکل ۱، معیار اقتصادی با وزن ۰/۳۴۰ دارای بیشینه وزن در میان سایر معیارها است. معیار اقتصادی که در برگیرنده هزینه‌ها و منافع طرح توسعه نیروگاه برق آبی مارون است از نظر کارشناسان مهم‌ترین معیار است، زیرا تا زمانی که هزینه‌های توسعه برآورد و تأمین آن امکان‌سنجی نشود، توسعه نیروگاه با ابهام مواجه است. پس از معیار اقتصادی، به ترتیب معیارهای زیست‌محیطی، تأمین عرضه انرژی و فنی با وزن‌های ۰/۳۰۲، ۰/۱۸۴ و ۰/۱۷۲ در رتبه‌های دوم و چهارم قرار دارند.

براساس گام‌های فوق، وزن زیرمعیارها نیز محاسبه شدند که به دلیل تعداد زیاد زیرمعیارها و طولانی بودن روند محاسبات، جزئیات مراحل محاسبات ارائه نشده است. به منظور در نظرگیری اثر وزن معیارهای اصلی، وزن هریک از زیرمعیارها در وزن معیار اصلی مربوط به آن ضرب شد. وزن نهایی زیرمعیارها در شکل ۲ آورده شده است.

۱-۴- نتایج روش Critic

ماتریس تصمیم‌گیری اولیه و ماتریس نرمال‌سازی شده براساس تجمیع نظرات کارشناسان و انحراف استاندارد در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- ماتریس تصمیم‌گیری اولیه، ماتریس نرمال‌سازی شده، و انحراف استاندارد

Table 1. Initial decision-matrix, normalized matrix, and standard deviation

(a) Initial decision-matrix				
Alternatives	Main criteria			
	A	B	C	D
S1	86.7	56	76.7	85.3
S2	60.3	57.7	78.3	68.6
S3	72.7	18.7	81.3	82.6
(b) Normalized matrix				
Alternatives	Main criteria			
	A	B	C	D
S1	1	0.95	0	1
S2	0	1	0.35	0
S3	0.46	0	1	0.84
(c) Standard deviation				
Standard deviation	Main criteria			
	A	B	C	D
	0.50	0.56	0.50	0.53

S1 = adding a solar power plant to the hydropower plant, S2 = adding a combined cycle power plant to the hydropower plant, S3 = combining three hydropower, solar, and combined cycle power plants, A = Technical criteria, B = Economic criteria, C = Environmental criteria, D = Energy supply criteria

مطابق جدول ۱، انحراف استاندارد برای معیار اقتصادی بیشینه مقدار را دارد. این امر بیان‌گر آن است که نظرات کارشناسان در ارزیابی عملکرد گزینه‌ها نسبت به معیار اقتصادی، دارای بیشینه پراکندگی بوده است. ماتریس متقارن و ماتریس تعارضات برای معیارهای اصلی در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- ماتریس متقارن معیارهای اصلی

Table 2. Symmetric matrix of main criteria

	A	B	C	D
A	1	-0.0012	-0.3863	0.9168
B	-0.0012	1	-0.9218	-0.4002
C	-0.3863	-0.9218	1	0.0139
D	0.9168	-0.4002	0.0139	1

ماتریس مقدار تعارض معیارهای اصلی در جدول ۳

آورده شده است. وزن نهایی معیارها نیز در شکل ۱ ارائه شده است.

هم‌چنین، ماتریس‌های نرمال‌شده براساس چهار نوع نرمال‌سازی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- ماتریس نرمال‌سازی شده

Table 5. Normalized matrix

(a) Type-1 normalized matrix			
Sub-criteria	S1	S2	S3
C1	1	0.75	0.70
C2	0.94	1	0.77
C3	0.82	1	0.80
C4	1	0.97	0.90
C5	0.42	0.30	1
C6	0.71	1	0.94
C7	0.99	0.75	1
C8	0.83	0.94	1
C9	0.67	0.63	1
C10	0.59	0.69	1
(b) Type-2 normalized matrix			
Sub-criteria	S1	S2	S3
C1	0.40	0.30	0.28
C2	0.34	0.36	0.28
C3	0.31	0.37	0.30
C4	0.34	0.33	0.31
C5	0.24	0.17	0.57
C6	0.26	0.37	0.35
C7	0.36	0.27	0.36
C8	0.30	0.33	0.35
C9	0.29	0.27	0.43
C10	0.26	0.30	0.44
(c) Type-3 normalized matrix			
Sub-criteria	S1	S2	S3
C1	1	0.16	0
C2	0.76	1	0
C3	0.13	1	0
C4	1	0.80	0
C5	0.40	0	1
C6	0	1	0.80
C7	0.97	0	1
C8	0	0.65	1
C9	0.09	0	1
C10	0	0.23	1
(d) Type-4 normalized matrix			
Sub-criteria	S1	S2	S3
C1	0.35	0.33	0.32
C2	0.33	0.34	0.32
C3	0.34	0.32	0.33
C4	0.32	0.33	0.33
C5	0.34	0.38	0.26
C6	0.31	0.34	0.33
C7	0.34	0.31	0.34
C8	0.32	0.33	0.34
C9	0.32	0.31	0.35
C10	0.31	0.32	0.35

پس از محاسبه ماتریس‌های تصمیم‌گیری نرمال‌سازی‌شده، ماتریس نرمال‌سازی‌شده تجمیعی محاسبه شد که در جدول ۶ آورده شده است.

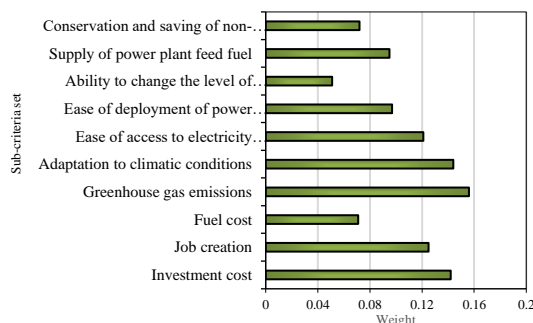


Figure 2. The final weight of sub-criteria

شکل ۲- وزن نهایی زیرمعیارها

مطابق شکل ۲، از میان زیرمعیارهای مختلف، زیرمعیار انتشار گازهای گلخانه‌ای با وزن ۰/۱۵۶ مهم‌ترین زیرمعیار است، زیرا انتشار گازهای گلخانه‌ای هزینه‌های آشکار و نهان زیادی را برای جامعه ایجاد می‌کند. زیرمعیار تناسب با شرایط اقلیمی منطقه با وزن ۰/۱۴۴ جایگاه دوم را دارد. تناسب با شرایط اقلیمی منطقه یکی از مهم‌ترین ابعاد طرح‌های توسعه انرژی است، زیرا در صورت عدم تناسب با شرایط اقلیمی منطقه هزینه‌های اقتصادی زیادی نظیر واردات سوخت خوراک برای نیروگاه ایجاد می‌شود.

۴-۲ نتایج روش TRUST

ماتریس تصمیم‌گیری اولیه تجمیعی در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- ماتریس تصمیم‌گیری اولیه تجمیعی

Table 4. Aggregated initial decision-making matrix

Sub-criteria	Alternatives		
	S1	S2	S3
C1	74.6	56	52.3
C2	53	56	43.3
C3	65.3	54	67
C4	60	61.3	66.6
C5	41.3	57.6	17.6
C6	52	72.3	68.3
C7	78.3	59.3	79
C8	50.3	56.6	60
C9	53.6	51	80
C10	48.3	56	80.6

C1 = Investment cost, C2 = Job creation, C3 = Cost of power plant feed fuel, C4 = Greenhouse gas emissions, C5 = Adaptation with climate change, C6 = Ease of access to electricity generation technology, C7 = Ease of deployment of power plant equipment, C8 = Ability to change the level of electricity generation, C9 = Supply of power plant feed fuel, C10 = Conservation and saving in the consumption of non-renewable resources.

جدول ۹- ماتریس نرمال سازی شده تجمیعی مقید شده وزن دهی شده

Table 9. Weighted constrained aggregated normalized matrix

Sub-criteria	Alternatives		
	S1	S2	S3
C1	0.09	0.05	0.04
C2	0.07	0.08	0.04
C3	0.02	0.03	0.02
C4	0.10	0.09	0.06
C5	0.05	0.03	0.10
C6	0.03	0.08	0.07
C7	0.06	0.03	0.06
C8	0.01	0.02	0.03
C9	0.03	0.02	0.06
C10	0.02	0.02	0.05

راه حل ایده آل منفی برای هر یک از معیارها در شکل ۳ نشان داده شده است.

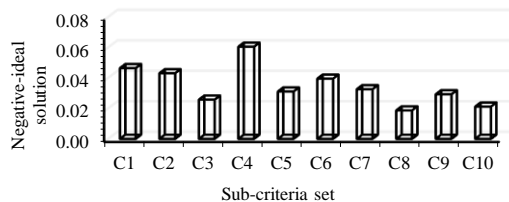


Figure 3. Negative-ideal solution

شکل ۳- راه حل ایده آل منفی

مقادیر پارامترهای روش TRUST در جدول آورده شده است. رتبه بندی نهایی گزینه ها نیز در شکل ۴ آورده شده است.

جدول ۱۰- پارامترهای روش TRUST

Parameters	Alternatives		
	S1	S2	S3
E_i	0.083	0.071	0.099
T_i	0.184	0.156	0.220
L_i	0.078	0.067	0.093
P_i	0.157	0.121	0.093
ω_{ik}	-0.0022	-0.0374	0.0449
τ_{ik}	-0.0002	-0.0326	0.0496

جدول ۶- ماتریس تصمیم گیری نرمال سازی شده تجمیعی

Table 6. Aggregated normalized matrix

Sub-criteria	Alternatives		
	S1	S2	S3
C1	0.68	0.38	0.32
C2	0.59	0.67	0.34
C3	0.40	0.67	0.36
C4	0.66	0.61	0.38
C5	0.35	0.21	0.71
C6	0.32	0.67	0.61
C7	0.66	0.33	0.67
C8	0.36	0.56	0.67
C9	0.34	0.30	0.69
C10	0.29	0.39	0.69

درجه رضایت از ماتریس تصمیم گیری اولیه در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- ماتریس درجه رضایت مندی

Table 7. Satisfaction degree matrix

Sub-criteria	Alternatives		
	S1	S2	S3
C1	1	1	1
C2	1	1	1
C3	0.97	0.78	1
C4	1	1	1
C5	1	1	1
C6	1	1	1
C7	1	1	1
C8	1	1	1
C9	1	1	1
C10	1	1	1

ماتریس نرمال سازی شده تجمیعی مقید شده در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸- ماتریس نرمال سازی شده تجمیعی مقید شده

Table 8. Constrained aggregated normalized matrix

Sub-criteria	Alternatives		
	S1	S2	S3
C1	0.68	0.38	0.32
C2	0.59	0.67	0.34
C3	0.39	0.52	0.36
C4	0.66	0.61	0.38
C5	0.35	0.21	0.71
C6	0.32	0.67	0.61
C7	0.66	0.33	0.67
C8	0.36	0.56	0.67
C9	0.34	0.30	0.69
C10	0.29	0.39	0.69

ماتریس نرمال سازی شده تجمیعی مقید شده وزن دهی شده در جدول ۹ آورده شده است.

هستند که علاوه بر گرمایش جهانی، هزینه‌های اجتماعی زیادی نیز بر جامعه تحمیل خواهد کرد. در گزینه S3، با توجه به عدم اطمینان از وجود رواناب کافی برای تأمین برق توسط نیروگاه برق‌آبی و هزینه‌های اجتماعی نیروگاه سیکل ترکیبی، نیروگاه خورشیدی در نظر گرفته شده است. این امر سبب می‌شود که در روزهای آفتابی در فصول گرم سال، درصد برق تولیدشده از نیروگاه سیکل ترکیبی کاهش یافته و در نتیجه مصرف سوخت فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش یابد. بدین ترتیب از انتشار گازهای آلاینده و مسائل زیست‌محیطی ناشی از آنها تا حد قابل توجهی پیشگیری گردد.

۵- نتیجه‌گیری

تأمین انرژی به‌ویژه تأمین برق به‌عنوان یکی از خدمات زیربنایی برای پیشرفت هر کشوری ضروری است. دسترسی امن، پایدار و اقتصادی به انرژی یکی از اهداف توسعه پایدار است و اختلال در آن، می‌تواند منجر به آسیب‌پذیری در سایر بخش‌های حیاتی نظیر دسترسی به آب کافی و حتی زنجیره تأمین مواد غذایی گردد. از این‌رو، سیاست‌گذاری‌های بخش انرژی نقش کلیدی در پیشگیری از وقوع بحران‌های اجتماعی-اقتصادی و فجایع زیست‌محیطی دارند. برنامه‌ریزی عرضه انرژی با توجه به گستردگی دامنه زمانی برای ساخت و بهره‌برداری از تجهیزات آن، وسعت جغرافیایی تحت پوشش و نیز ارتباط تنگاتنگ با مسائل اقتصادی و گاه سیاست داخلی و خارجی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو، تعیین مناسب‌ترین فن‌آوری‌های تولید انرژی در نیروگاه‌های تولید برق، اثر مستقیم بر کیفیت زندگی افراد یک کشور در زمان حال و آینده دارد. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، یکی از پرکاربردترین ابزارهای انتخاب برای حل مسائل بهینه‌سازی گسسته هستند، زیرا بر مبنای تجمیع نظرات کارشناسان برای دستیابی به یک راه‌حل جامع و فراگیر استوار است.

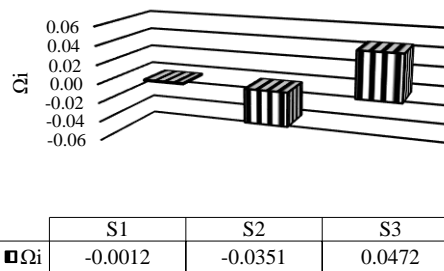


Figure 4. Final ranking of the alternatives

شکل ۴- رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

مطابق شکل ۴، مقدار Q_i برای گزینه S1 کم‌ترین مقدار و برای گزینه S3 بیش‌ترین مقدار است. بنابراین گزینه S3 یعنی توسعه ظرفیت تولید برق از طریق نیروگاه برق‌آبی با نیروگاه خورشیدی و سیکل ترکیبی در رتبه اول قرار دارد. گزینه S3 ترکیبی از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر است که این امر سبب می‌شود که در صورت مدیریت صحیح نیروگاه، امنیت انرژی در تمام طول سال تأمین گردد.

یکی از عوامل مهم در توسعه ظرفیت تولید نیروگاه، اطمینان از تأمین سوخت خوراک نیروگاه در بازه زمانی بهره‌برداری است. با اجرای گزینه S3، در صورت کاهش رواناب ورودی به سد مارون و به‌دنبال آن کاهش ظرفیت تولید برق به‌ویژه در فصل‌های گرم سال که تبخیر از سطح دریاچه سد به‌شدت افزایش می‌یابد، نیروگاه گازی سیکل ترکیبی می‌تواند برق مورد نیاز را تأمین کند، زیرا سوخت خوراک نیروگاه سیکل ترکیبی گاز طبیعی است. استان خوزستان منابع عظیمی از نفت و گاز دارا می‌باشد که علاوه بر تضمین تأمین سوخت خوراک به‌ویژه در بازه‌های زمانی اوج مصرف برق، هزینه تأمین سوخت خوراک را نیز به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد. هزینه تأمین سوخت خوراک یکی از پارامترهای مهم در تعیین هزینه سرمایه‌گذاری توسعه ظرفیت تولید برق در نیروگاه است.

اما یکی از معایب توسعه نیروگاه‌های گازی سیکل ترکیبی، انتشار گازهای گلخانه‌ای است. انتشار گازهای گلخانه‌ای یکی از مهم‌ترین علل وقوع پدیده تغییر اقلیم

قرار گرفت. در حال حاضر، بخش‌های مصرف‌کننده آب و برق شامل بخش خانگی، کشاورزی و زیست‌محیطی در حوضه آبریز مارون با چالش‌های متعددی در تأمین تقاضا مواجه هستند. ادامه روند مدیریت فعلی انرژی، می‌تواند زمینه‌ساز بروز بحران‌های شدیدتر در این منطقه باشد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر، می‌تواند مبنای سیاست‌گذاری‌های تأمین برق در سال‌های آینده در حوضه آبریز مارون باشد، به‌نحوی که با اجرای آن، امنیت تأمین برق تضمین گردد.

در پژوهش حاضر برای اولویت‌بندی و انتخاب بهترین گزینه در توسعه ظرفیت تولید برق نیروگاه برق‌آبی مارون، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TRUST به‌کار گرفته شد. بدین‌منظور، ابتدا معیارهای اصلی و زیرمعیارهای آنها توسط گروه کارشناسان تعیین و با روش Critic وزن‌دهی شدند. نتایج روش Critic نشان دادند که مهم‌ترین معیار، معیار اقتصادی با وزن ۰/۳۴۰ بود. هم‌چنین نتایج حاصل از روش TRUST نشان دادند که گزینه توسعه ظرفیت تولید برق از طریق احداث نیروگاه خورشیدی و سیکل ترکیبی در نیروگاه برق‌آبی مارون، با امتیاز ۰/۰۴۷ در اولویت نخست

Declarations

- **Ethical Approval**

■ The paper is not currently being considered for publication elsewhere. The author has been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

- **Competing interests**

■ Conflict of Interest - None

- **Availability of data and materials**

■ Data will be made available on the request.

- **Authors Contributions**

Parvin Golfam developed the theory, performed the computations, and verified the analytical methods. Also supervised the findings of this work. Parvin Golfam wrote the manuscript.

References

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA). The Renewable Energy Transition in Africa Powering Access, Resilience and Prosperity. Available at: www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/March/Renewable_Energy_Transition_Africa_2021.
- [2] Moradi MA, Golfam P. Approaches and challenges of quantifying water-energy-food security nexus in urban areas. *Water Resources and Climate Change*. 2025 Mar 25; 1 (1): 18-27. doi: **10.22091/wrcc.2024.11329.1004**.
- [3] IEA. (2021). Global energy review, assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO2 emissions in 2021. *Global Energy Review*. doi: **10.1787/90c8c125-en**.
- [4] Yazdani M, Torkayesh AE, Santibanez-Gonzalez ED, Otahsara SK. Evaluation of renewable energy resources using integrated Shannon Entropy—EDAS model. *Sustainable Operations and Computers*. 2020 Dec 01; 1: 35–42. doi: **10.1016/j.susoc.2020.12.002**.
- [5] Golfam P, Ashofteh PS, Loáiciga HA. Integration of gray system theory with AHP decision-making for wastewater reuse decision-making. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. 2021 Apr 28; 25 (3). doi: **10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000619**.
- [6] Çolak M, Kaya İ. Prioritization of renewable energy alternatives by using an integrated fuzzy MCDM model: A real case application for Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017 Jun 2; 80: 840-853. doi: **10.1016/j.rser.2017.05.194**.
- [7] Ali T, Chiu YR, Aghaloo K, Nahian AJ, Ma H. Prioritizing the existing power generation technologies in Bangladesh's clean energy scheme using a hybrid multi-criteria decision-making model. *Journal of Cleaner Production*. 2020 Sep 10; 267: 121901. doi: **10.1016/j.jclepro.2020.121901**.
- [8] Ramezanzade M, Karimi H, Almutairi Kh, Xuan HA, Saebi J, Mostafaeipour A, Techato K. Implementing MCDM techniques for ranking renewable energy projects under fuzzy environment: A case study. *Sustainability*. 2021 Oct 2; 13 (22). doi: **10.3390/su132212858**.

- [9] Sarkodie WO, Ofori EA, Ampimah BCh. Decision optimization techniques for evaluating renewable energy resources for power generation in Ghana: MCDM approach. *Energy Reports*. 2022 Nov; 8: 13504-13513. doi: **10.1016/j.egy.2022.10.120**.
- [10] Assadi MR, Ataebi M, Ataebi ES, Hasani A. Prioritization of renewable energy resources based on sustainable management approach using simultaneous evaluation of criteria and alternatives: A case study on Iran's electricity industry. *Renewable Energy*. 2022 Jan; 181: 820-832. doi: **10.1016/j.renene.2021.09.065**.
- [11] Akpahou R, Odoi-Yorke F. A multicriteria decision-making approach for prioritizing renewable energy resources for sustainable electricity generation in Benin. *Cogent Engineering*. 2023 Apr 23; 10 (1). doi: **10.1080/23311916.2023.2204553**.
- [12] Akintayo BD, Ige OE, Babatunde OM, Olanrewaju OA. Evaluation and prioritization of power-generating systems using a life cycle assessment and a multicriteria decision-making approach. *Energies*. 2023 Sep 7; 16 (18): 6722. doi: **10.3390/en16186722**.
- [13] Gupta S, Kumar R, Kumar A. Green hydrogen in India: Prioritization of its potential and viable renewable source. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024 Jan 2; 50: 226-238. doi: **10.1016/j.ijhydene.2023.08.166**.
- [14] Dash S, Chakravarty S, Chandra Giri N, Khargotra R. Evaluating sustainable wind energy sources with multiple criteria decision-making (MCDM) techniques. *Computers and Electrical Engineering*. 2025 Mar 31; 123: 110285. doi: **10.1016/j.compeleceng.2025.110285**.
- [15] Shamsipour R, Nohegar A, Ehsani AH, Daryabeigi Zand A. A comprehensive assessing of renewable energy sources ranking by Fuzzy DANP and Fuzzy MULTIMOORA (Case Study Isfahan Province, IRAN). *International Journal of Environmental Research*. 2025 May 26; 19(137). doi: **10.1007/s41742-025-00763-1**.
- [16] Diakoulaki D, Mavrotas G, Papayannakis L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. *Computers and Operations Research*, 1995 Aug; 22(7): 763-770, doi: **10.1016/0305-0548(94)00059-H**.
- [17] Torkayesh AE, Deveci MA. Multi-normalization multi-distance assessment (TRUST) approach for locating a battery swapping station for electric scooters. *Sustainable Cities and Society*. 2021 Nov; 74: 103243. doi: **10.1016/j.scs.2021.103243**.
- [18] Abdelli A, Hammal Y, Mokdad L. ISOCOV: A new MCDM method to handle value constraints in web service selection. symposium on computers and communications. 2019 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Barcelona, Spain. 29 June 2019-03 July 2019. Pp. 1022–1027. doi: **10.1109/ISCC47284.2019.8969589**.
- [19] Keshavarz Ghorabae M, Zavadskas EK, Turskis Z, Antucheviciene J. A new combinative distance-based assessment (CODAS) method for multi-criteria decision-making. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 2016; 50(3): 25-44.
- [20] Wen Z, Liao H, Zavadskas EK. MACONT: Mixed aggregation by comprehensive normalization technique for multi-criteria analysis. *Informatica*. 2020 Nov; 31(4): 857-880.
- [21] Yazdani M, Zarate P, Zavadskas EK, Turskis Z. A Combined Compromise Solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. *Management Decision*. 2018 Nov; 57(3). doi: **10.1108/MD-05-2017-0458**.
- [22] Zolfani SH, Yazdani M, Pamucar D, Zarate P. A VIKOR and TOPSIS focused reanalysis of the MADM methods based on logarithmic normalization. 2020 Jun. 18(3). doi: **10.22190/FUME191129016Z**.
- [23] Abdelli A, Mokdad L, Hammal Y. Dealing with value constraints in decision making using MCDM methods. *Journal of Computational Science*. 2020 Jul; 44: 101154. doi: **10.1016/j.jocs.2020.101154**.
- [24] Cha SH. Taxonomy of nominal type histogram distance measures. *MATH'08: Proceedings of the American Conference on Applied Mathematics*. Harvard, Massachusetts, USA. 2008 Mar 24-26; 1(2): 325-330.
- [25] Iran Water Resources Management Company Website, 2016.
- [26] Golfam P, Ashofteh PS. Performance indexes analysis of the reservoir-hydropower plant system affected by climate change. *Water Resources Management*. 2022 Sep 5; 36: 5127-5162. doi: **10.1007/s11269-022-03295-x**.
- [27] Golfam P, Ashofteh PS, Loáiciga HA. Forecasting long-term energy demand and reductions in GHG emissions. *Energy Efficiency*. 2024 Mar 5; 17(19). doi: **10.1007/s12053-024-10203-2**.