

Evaluation of environmental performance improvement strategies for fossil fuel-based power plants using a multi-criteria decision-making approach

Parvin Golfam¹ 

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

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 02 May 2026
Revised 20 Jun 2026
Accepted 29 Jun 2026
Published 30 Jun 2026

Keywords:
Power Generation Plants,
Fossil Fuels,
Environmental Hazards,
Best-Worst Method (BWM),
VIKOR Multi-Criteria Decision-Making Method.

ABSTRACT

Objective: Power generation plants are major drivers of urbanization, economic growth, and commercial development. However, they also contribute significantly to environmental degradation, particularly through their role in global warming and climate change. Mitigating the adverse environmental impacts associated with the operation of fossil fuel-based power plants is therefore an essential step toward protecting vital natural resources. Accordingly, the present study aims to evaluate alternative mitigation strategies and identify the most appropriate option for reducing the adverse environmental impacts of combined-cycle power plants within a multi-criteria decision-making (MCDM) framework.

Method: First, a panel of experts specializing in energy and environmental sciences was established to identify context-specific alternatives and relevant evaluation criteria based on regional conditions. The Best–Worst Method (BWM) was employed to determine the relative weights of the evaluation criteria, while the Vlse Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) method was applied to prioritize the alternatives for mitigating environmental hazards.

Results: The BWM results indicated that the criterion of *impact on greenhouse gas emission reduction* was the most important evaluation criterion, with a weight of 0.50. The VIKOR analysis further demonstrated that the implementation of an intelligent environmental monitoring system at combined-cycle power plants ranked first among the evaluated alternatives, achieving a VIKOR index of 0.

Conclusion: The proposed integrated decision-making framework provides a systematic approach for identifying effective strategies to mitigate the environmental impacts of combined-cycle power plants. Given its flexible structure and reliance on expert-based multi-criteria evaluation, the framework can potentially be extended to other types of power plants. Its application can support the selection of comprehensive mitigation strategies capable of delivering both economic and environmental benefits over the medium and long term.

Cite this article: Golfam P. Evaluation of environmental performance improvement strategies for fossil fuel-based power plants using a multi-criteria decision-making approach. *Water Resources and Climate Change*. (2026); 2(2): 49-58. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.17052.1041>.

Introduction

Electricity is essential for modern societies, economic development, and technological advancement. Although renewable energy is expanding, fossil fuels remain important for electricity generation and contribute to greenhouse gas emissions, air pollution, and water consumption. These impacts are particularly significant in water-stressed regions.

Combined-cycle power plants are generally more efficient than conventional gas-fired plants but still require substantial water for steam generation and cooling. Therefore, improving their environmental performance requires considering emissions, water use, economic costs, and technical feasibility simultaneously.

Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods provide a suitable framework for such problems. The Best–Worst Method (BWM) determines the relative importance of evaluation criteria with fewer comparisons, while the VIKOR method ranks alternatives by identifying the best compromise solution. This study applies a BWM–VIKOR framework to prioritize environmental mitigation strategies for the Qom Combined-Cycle Power Plant in Qom Province, Iran.

Method

i. Study Area and Case Study

The Qom Combined-Cycle Power Plant is located in Qom Province, Iran, and consists of four gas units and two steam units. Natural gas is its primary fuel. The region has an arid climate and limited water resources, making both emissions and water consumption important environmental concerns.

ii. Alternatives and Evaluation Criteria

Experts in energy policy and environmental sciences identified three mitigation alternatives:

1. Low-emission burners
2. Water recycling combined with treated municipal wastewater
3. Smart environmental monitoring system

Five criteria were considered: investment cost, operation and maintenance cost, greenhouse gas emission reduction, water savings, and implementation and operational effectiveness.

iii. Best–Worst Method

BWM was used to determine the weights of the five criteria. Experts identified greenhouse gas emission reduction as the most important criterion and operation and maintenance cost as the least important. The resulting comparisons were used to calculate the optimal criterion weights.

iv. VIKOR Method

VIKOR was applied to rank the three alternatives using the BWM-derived criterion weights. The expert assessment matrix was normalized and weighted, and the VIKOR index was calculated. A lower VIKOR value indicates a more preferable compromise solution.

Results

a. BWM Results

Greenhouse gas emission reduction was the most important criterion, with a weight of 0.50, followed by water consumption at 0.21. Investment cost, implementation and operational effectiveness, and operation and maintenance cost received weights of 0.12, 0.10, and 0.04, respectively.

These results show that environmental factors, particularly emissions and water consumption, were considered substantially more important than direct operating costs.

b. VIKOR Results

The smart environmental monitoring system ranked first with a VIKOR index of 0.000. The low-emission burner ranked second with 0.223, while the water-recycling and treated-wastewater system ranked third with 1.000.

The monitoring system achieved the best overall compromise because it can support continuous monitoring of emissions, water consumption, wastewater quality, and environmental compliance. Although low-emission burners provide important emission reductions, their overall performance across all criteria was lower. The water-recycling alternative, despite its importance in a water-stressed region, performed less favorably when economic, environmental, and technical criteria were considered together.

Conclusion

This study developed a BWM–VIKOR framework to prioritize environmental improvement strategies for the Qom Combined-Cycle Power Plant. The BWM results identified greenhouse gas emission reduction as the most important criterion (0.50), followed by water consumption (0.21).

The VIKOR analysis ranked the smart environmental monitoring system first (0.000), followed by low-emission burners (0.223) and water recycling with treated municipal wastewater (1.000).

Overall, the findings indicate that smart environmental monitoring provides the most balanced strategy for improving environmental management, supporting regulatory compliance, and monitoring emissions and water use. The BWM–VIKOR framework can also be adapted to other combined-cycle and fossil-fuel power plants by incorporating their specific environmental, economic, and technical conditions.

Declarations

Ethical Approval

The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have 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 performed the calculations. She approved the analytical methods. She supervised the findings of this work. Parvin Golfam discussed the results, and also contributed to the final version of the paper.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

ارزیابی راه کارهای بهبود عملکرد زیست محیطی نیروگاه های مبتنی بر سوخت فسیلی در چارچوب تصمیم گیری چندشاخصه

پروین گلفام^۱

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

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹ کلیدواژه ها: نیروگاه های تولید برق، سوخت های فسیلی، مخاطرات زیست محیطی، روش وزن دهی BWM، روش تصمیم گیری چندمعیاره VIKOR.	هدف: نیروگاه های تولید برق محرک های اصلی شهرنشینی، رونق اقتصادی و تجاری هستند. اما همچنین نقش بسیار مهمی در مسائل زیست محیطی، به ویژه افزایش گرمایش جهانی و وقوع تغییرات اقلیمی در سراسر جهان ایفا می کنند. کاهش اثرات نامطلوب بهره برداری از نیروگاه هایی که از سوخت های فسیلی به عنوان خوراک استفاده می کنند، گامی اساسی در حفاظت از منابع طبیعی حیاتی است. هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی راه کارها و یافتن بهترین گزینه برای کاهش اثرات نامطلوب زیست محیطی نیروگاه های سیکل ترکیبی در چارچوب روش های تصمیم گیری چندمعیاره است. روش: ابتدا، گروهی از متخصصان در حوزه های انرژی و محیط زیست در یک پنل مشترک شرکت کردند و گزینه هایی متناسب با شرایط منطقه ای و معیارهای ارزیابی آنها ارائه دادند. از روش بهترین-بدترین^۲ (BWM) برای تعیین وزن معیارها و از روش تصمیم گیری چندمعیاره بهینه سازی چندمعیاره و حل سازشی^۳ (VIKOR) برای اولویت بندی گزینه ها برای کاهش خطرات زیست محیطی استفاده شد. یافته ها: نتایج روش وزن دهی BWM نشان می دهد که معیار تأثیر بر کاهش انتشار گازهای گلخانه ای با امتیاز ۰/۵۰ مهم ترین معیار در ارزیابی گزینه ها است. نتایج روش VIKOR نشان می دهد که استقرار سیستم هوشمند پایش محیطی در نیروگاه سیکل ترکیبی با شاخص VIKOR صفر، رتبه اول را کسب کرده است. نتیجه گیری: استفاده از این چارچوب که قابل تعمیم به سایر انواع نیروگاه ها نیز می باشد، منجر به انتخاب یک راه کار جامع می شود که در میان مدت و بلندمدت، مزایای اقتصادی و زیست محیطی را به همراه خواهد داشت.

استناد: گلفام پروین. ارزیابی راه کارهای بهبود عملکرد زیست محیطی نیروگاه های مبتنی بر سوخت فسیلی در چارچوب تصمیم گیری چندشاخصه. منابع

آب و تغییر اقلیم، ۱۴۰۵؛ ۲(۲): ۴۹-۵۸. <http://doi.org/10.22091/wrcc.2026.17052.1041>

^۲- Best-Worst Method

^۳- Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje

۱- مقدمه

بدون تردید اشکال مختلف انرژی و به‌ویژه برق، نقش حیاتی در تأمین نیازهای هر تمدن مدرنی را دارد. این در حالی است که برآورد می‌شود تقاضای انرژی در اثر عوامل مختلفی نظیر افزایش جمعیت، رشد اقتصاد جهانی، توسعه فن‌آوری‌ها تا سال ۲۰۳۵، به‌میزان ۳۶ درصد افزایش یابد [۱]. اما هم‌چنان وابستگی شدیدی به سوخت‌های فسیلی برای تأمین برق وجود دارد [۲].

استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تولید برق منشأ اصلی تولید گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه CO₂ هستند [۳]. گرچه در سال‌های اخیر، اقتصادهای پیشرفته جهانی تلاش کردند انتشار گازهای گلخانه‌ای در صنعت برق را کاهش دهند، اما در اقتصادهای در حال توسعه نظیر ایران، تولید گازهای گلخانه‌ای هم‌چنان روند افزایشی دارد [۴]. کشور ایران از نظر انتشار CO₂ در جایگاه هفتم جهان قرار دارد و صنعت برق، عمده‌ترین بخش انتشار CO₂ است [۵] که منجر به مصرف آب فراوان و انتشار وسیع گازهای گلخانه‌ای شده است [۶].

درک اثرات تولید و مصرف انرژی بر محیط زیست، اقتصاد و جامعه برای ارزیابی منطقی و تدوین راه‌کارهای رشد اقتصادی و امنیت انرژی بسیار ضروری است [۷].

گاتی‌مورالس^۳ و همکاران، اثرات زیست‌محیطی برق حاصل از سوخت‌های فسیلی در شیلی در بازه زمانی (۲۰۱۴-۲۰۰۴) را با استفاده از ارزیابی چرخه عمر بررسی کردند. نتایج نشان دادند که اثرات زیست‌محیطی برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی به‌ویژه افزایش سهم زغال‌سنگ به مرور تشدید شده بود [۸].

گانی^۴، اثر عرضه انرژی از سوخت‌های فسیلی بر کیفیت محیط زیست را با یک مدل تعمیم‌یافته اثرات تصادفی با رگرسیون بر فراوانی جمعیت و فن‌آوری^۵

(STIRPAT) بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده فوریت گذار در کشورهای وابسته به سوخت‌های فسیلی به منابع انرژی پاک‌تر و نیز سیاست‌های کاهش کربن در سمت عرضه انرژی بود [۹].

آکینتایو^۶ و همکاران، با استفاده از ارزیابی چرخه عمر، پیامدهای زیست‌محیطی و قابلیت دوام بلندمدت سامانه‌های مختلف تأمین انرژی را بررسی کردند. نتایج نشان دادند که نیروگاه‌های گازی و زمین‌گرمایش به‌ترتیب، بیشینه و کمینه ارجحیت را داشتند [۱۰].

ژوسیموویچ^۷ و همکاران، بیان کردند که حتی نیروگاه‌های برق مبتنی بر انرژی پاک نظیر انرژی خورشیدی اثرات مثبت و منفی بر محیط زیست دارند و شناخت این اثرات سبب می‌شود که راه‌حل‌های بهینه برای حفاظت از محیط زیست تضمین شوند [۱۱].

با افزایش جمعیت و وقوع تغییر اقلیم، ضرورت استفاده از سامانه‌های انرژی پایدار با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفاظت از منابع طبیعی به‌ویژه منابع آب برای نسل آینده بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در توسعه فنی سامانه‌های انرژی با توجه به گستردگی ابعاد آنها، فرآیند سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی پیچیده است. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، ارزیابی نظام‌مندی از معیارهای متعدد و گاه متناقض میان گزینه‌ها را ارائه می‌دهد [۱۲]. در ادامه برخی از کاربردهای روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در سامانه‌های تولید برق آورده شده‌اند.

روسوسرون^۸ و همکاران، از یک رویکرد تصمیم‌گیری چندهدفه فازی مبتنی بر یک مدل خطی عدد صحیح مختلط برای ارزیابی گزینه‌های پایدار برق در کلمبیا استفاده کردند. نتایج نشان دادند که نیروگاه‌های فسیلی هم‌چنان مهم‌ترین نقش را در تولید برق داشت [۱۳].

^۷- Josimović

^۸- Rosso-Cerón

^۳- Gaete-Morales

^۴- Gani

^۵- Stochastic Impacts by Regression on Population Affluence and Technology

^۶- Akintayo

۲-۱- روش وزن دهی BWM

رضایی روش وزن دهی بهترین-بدترین را برای وزن دهی معیارها ارائه کرد [۱۶]. مهم ترین ویژگی این روش، استفاده از دو بردار مقایسه زوجی است به نحوی که بهترین و بدترین معیار توسط گروه تصمیم گیرندگان تعیین شده و مقایسه های زوجی بر مبنای بهترین و بدترین معیار انجام می شود. این امر سبب می شود که در مسائل پیچیده تعداد مقایسات زوجی کاهش یافته و در مقابل دقت مقایسات افزایش و ناسازگاری میان نظرات گروه کارشناسان کاهش یابد. در ادامه گام های روش وزن دهی BWM آورده شده است.

(الف) تعیین مجموعه معیارها، انتخاب بهترین و بدترین معیار توسط گروه کارشناسان

در این گام، در این گام، ابتدا معیارهای مختلف جهت ارزیابی گزینه ها توسط گروه کارشناسان تعیین می گردد. سپس با اجماع گروه کارشناسان بهترین یا مهم ترین معیار و بدترین یا کم اهمیت ترین معیار تعیین می شود.

(ب) تعیین دو بردار شامل مقایسه بهترین و بدترین معیار با سایر معیارها

در این گام بر مبنای مقایسه عددی از بین اعداد یک تا نه، مقایسه بهترین معیار و بدترین معیار با سایر معیارها انجام می شود. بردار خروجی بهترین و بدترین معیار نسبت به سایر معیارها به ترتیب مطابق روابط (۱) و (۲) به دست می آیند:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (1)$$

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T \quad (2)$$

که در آن، A_B = بردار مقایسه زوجی میان بهترین معیار با سایر معیارها و A_W = بردار مقایسه زوجی میان بدترین معیار با سایر معیارها است.

سلطانی و ایمانی، راه کارهای افزایش پذیرش فن آوری های سازگار با محیط زیست را با ترکیب روش AHP-Fuzzy و شبیه سازی مونت کارلو در ایران بررسی کردند [۱۴].

بوجانی^۹ و همکاران، از سه روش تصمیم گیری چندمعیاره شامل ارزیابی ضریب افزایشی سازگار شده^{۱۰} (ARAS)، شباهت به گزینه ایده آل^{۱۱} (TOPSIS)، و تحلیل رابطه ای خاکستری^{۱۲} (GRA) برای انتخاب سوخت بهینه جایگزین در نیروگاه حرارتی مجیا^{۱۳} در بنگال غربی استفاده کردند [۱۵].

مطالعات پیشین نشان می دهند که اثرات زیست محیطی نیروگاه های برق حاصل از مصرف سوخت های فسیلی با روش های مختلف مورد بررسی قرار گرفته اند. اما آنچه کمتر مورد توجه قرار گرفته است، ارائه راه کارهایی است که بتواند علاوه بر منافع اقتصادی، ابعاد زیست محیطی را نیز پوشش دهد. در پژوهش حاضر، راه کارهای کاهش اثرات زیست محیطی یک نیروگاه تولید برق مبتنی بر سوخت های فسیلی در ایران بررسی و با استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره با در نظر گرفتن معیارهای مختلف رتبه بندی شدند. به کارگیری این رویکرد سبب می شود تعاملات و هم بستگی های پیچیده در اولین فاز توسعه راه کارهای توسعه نیروگاه های تولید برق درک شده و از خطرات بالقوه آتی در زمان انجام فازهای توسعه جلوگیری شود.

۲- مواد و روش ها

در این بخش، ابتدا گام های روش وزن دهی BWM برای تعیین وزن معیارها و سپس روش تصمیم گیری چندمعیاره VIKOR برای اولویت بندی راه کارهای کاهش مخاطرات زیست محیطی ناشی از بهره برداری نیروگاه های مبتنی بر سوخت های فسیلی به تفصیل بیان خواهد شد.

¹²- Grey Relational Analysis

¹³- Mejia

⁹- Bhojane

¹⁰- Additive Ratio Compromise Assessment

¹¹- Technique for Order of Preference by Similarity

از نقطه ایده‌آل و مقدار پشیمانی بیان گر بیشینه پشیمانی گزینه نام از دوری از نقطه ایده‌آل است. در ادامه گام‌های روش VIKOR شرح داده خواهد شد.

(الف) تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری

در این گام، با در نظر گرفتن n معیار و m گزینه ماتریس تصمیم‌گیری براساس ارزیابی عملکرد هر گزینه نسبت به هر معیار مطابق رابطه (۵) تشکیل می‌شود.

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \dots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

که در آن، x_{ij} = درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری، A_i = مجموعه گزینه‌ها و C_j = مجموعه معیارهای ارزیابی هستند.

(ب) نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری به روش خطی

در این گام، ماتریس تصمیم‌گیری براساس رابطه (۶) نرمال‌سازی می‌شود.

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (6)$$

که در آن n_{ij} = درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌سازی شده هستند.

(پ) ماتریس نرمال‌شده موزون

در این مرحله، مقادیر ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌سازی شده برای هر یک از گزینه‌ها در وزن معیارها ضرب می‌شوند.

(ت) محاسبه ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی

در این مرحله برای هر معیار، دو مقدار بهترین و بدترین به ترتیب براساس روابط (۷) و (۸) تعیین می‌شود.

$$f_j^* = \max f_{ij}, \quad j=1,2,\dots,n \quad (7)$$

$$f_j = \min f_{ij}, \quad i=1,2,\dots,m \quad (8)$$

که در آن، f_{ij} = عدد گزینه مورد نظر برای هر معیار در ماتریس نرمال وزنی؛ f_j^* = بهترین مقدار برای معیار نام؛ و f_j

(پ) ایجاد مدل برنامه‌ریزی خطی و تعیین وزن معیارها

در این گام، پس از انجام مقایسات زوجی، از مدل برنامه‌ریزی خطی مطابق رابطه (۳) برای تعیین وزن معیارها استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} \min & \zeta \\ \text{s.t.} & \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \zeta, \quad \text{for all } j \\ & \left| \frac{w_j}{w_w} - a_{jw} \right| \leq \zeta, \quad \text{for all } j \\ & \sum_j w_j = 1 \\ & w_j \geq 0, \quad \text{for all } j \end{aligned} \quad (3)$$

رابطه (۳) بیان گر آن است که وزن هر یک از معیارها به صورت یک متغیر در نظر گرفته شده است به نحوی که مجموعه‌ای از قیدها، میان وزن‌ها و مقایسات کارشناسان ارتباط برقرار می‌کند. برنامه‌ریزی خطی در این روش، به گونه‌ای است که میزان ناسازگاری، کمینه مقدار شود و بدین ترتیب وزن معیارها بیشینه انطباق با ترجیحات کارشناسان را دارا باشد. بدین منظور شاخص نرخ سازگاری از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$CR = \alpha / CI \quad (4)$$

که در آن، CR = نرخ سازگاری، CI = شاخص سازگاری و α = مقدار بهینه بیشینه انحراف از مدل BWM هستند. نرخ ناسازگاری عددی بین صفر و یک است که هر اندازه به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده سازگاری بیش‌تر میان قضاوت کارشناسان است.

۲-۲- روش تصمیم‌گیری چندمعیاره VIKOR

اپروویچ^{۱۴}، روش VIKOR را با هدف حل مسائل در فضای گسسته بر مبنای گروه‌بندی و انتخاب از مجموعه‌ای از گزینه‌ها ارائه کرد [۱۷]. در این روش پاسخ سازشی، نزدیک‌ترین پاسخ به پاسخ ایده‌آل بوده و براساس توافق میان مجموعه معیارها به دست می‌آید. دو مفهوم اساسی در تعیین رتبه‌بندی گزینه‌ها، سودمندی و پشیمانی است به طوری که مقدار سودمندی بیان گر فاصله نسبی گزینه نام

✓ شرط مزیت قابل قبول: اگر در میان گزینه‌ها، A_1 و A_2 رتبه‌های اول و دوم را به خود اختصاص داده باشند، رابطه (۱۲) برقرار باشد.

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{m-1} \quad (12)$$

که در آن، $Q(A_2)$ = گزینه A_2 با رتبه دوم در فهرست شاخص VIKOR؛ $Q(A_1)$ = گزینه A_1 با رتبه اول در فهرست شاخص VIKOR است.

✓ شرط ثبات قابل قبول در تصمیم‌گیری:

گزینه A_1 حداقل باید دارای بالاترین رتبه در لیست رتبه‌بندی شاخص‌های سودمندی و پشیمانی باشد.

در صورت برقرار نبودن این دو شرط، هر دو گزینه بهترین هستند.

۳- مورد مطالعاتی

مورد مطالعاتی در پژوهش حاضر، نیروگاه سیکل ترکیبی قم واقع در جنوب شرقی شهرستان قم، استان قم قرار دارد. این نیروگاه، دومین نیروگاه سیکل ترکیبی در ایران است که به دلیل موقعیت جغرافیایی، شرایط اقلیمی و نقش آن در تأمین برق شبکه سراسری، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. این نیروگاه، شامل چهار واحد گازی و دو واحد بخار است و عمدتاً از گاز طبیعی به عنوان سوخت اصلی استفاده می‌شود و با استفاده از فن‌آوری سیکل ترکیبی، بازده بالاتری نسبت به سایر نیروگاه‌های متداول گازی دارد.

استان قم با اقلیم خشک و منابع محدود آب سطحی و زیرزمینی، افزایش سطح صنعتی‌سازی و رشد مهاجرت، با فشار فزاینده تقاضای منابع آب و برق روبه‌رو شده است. از این‌رو هرگونه سیاست‌گذاری کنونی در حوزه‌های تأمین برق و آب باید براساس واقعیت‌های میدانی و در نظر گرفتن شرایط در حال تغییر باشد. در ادامه مجموعه‌ای از گزینه‌ها و معیارها برای کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از

= بدترین مقدار برای معیار نام؛ هستند. در رابطه‌های (۶) و (۷) مجموع f_j^* = ترکیب بهینه یعنی بیش‌ترین امتیاز (ایده‌آل مثبت) و مجموع f_j^- = بدترین امتیاز (ایده‌آل منفی) را به دست می‌دهد.

(ث) تعیین شاخص‌های سودمندی و پشیمانی برای معیارها

در این مرحله، شاخص‌های سود و پشیمانی به ترتیب از روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شوند:

$$S_i = \sum_{j=1}^n W_j \times \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (9)$$

$$R_i = \max \left[W_j \times \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right] \quad (10)$$

که در آن، S_i = فاصله نسبی گزینه نام از ایده‌آل مثبت و R_i = فاصله گزینه نام از ایده‌آل منفی، هستند.

(ج) محاسبه شاخص VIKOR

شاخص VIKOR از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$Q_i = \theta \left[\frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} \right] + (1-\theta) \left[\frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \right] \quad (11)$$

که در آن، S^* = کمینه فاصله گزینه نام از سودمندی؛ S^- = بیشینه فاصله گزینه نام از سودمندی؛ R^* = کمینه فاصله از پشیمانی، R^- = بیشینه فاصله از پشیمانی؛ و θ = وزن برای بیشینه مطلوبیت گروهی (عددی بین صفر تا یک) هستند. مقدار θ در پژوهش حاضر برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است. هر اندازه مقدار شاخص VIKOR کمتر باشد، آن گزینه دارای اولویت بالاتری نسبت به سایر گزینه‌ها است.

(چ) تعیین گزینه برتر

گزینه‌ها براساس مقادیر شاخص‌های سودمندی، پشیمانی و VIKOR، در سه گروه و به صورت نزولی مرتب می‌شوند. بهترین رتبه‌بندی از طریق راه‌حل توافقی است به‌طوری‌که شاخص VIKOR کمینه شود و دو شرط زیر برقرار باشد:

۴-۱-۱- انتخاب بهترین و بدترین معیار

با اجماع نظر کارشناسان، بهترین معیار، معیار کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. زیرا مهم‌ترین اثر منفی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، انتشار مقادیر فراوان دی‌اکسید کربن و دی‌اکسید نیتروژن است و انتشار آنها اثر مستقیم و پرهزینه بر سلامت جامعه دارد. بنابراین، کاهش آلاینده‌های جوی، به‌طور مستقیم بر سلامت انسان، کیفیت هوا و حتی زیست‌بوم‌های آبی و خاکی اثر گذار است.

بدترین معیار از نظر گروه کارشناسان، معیار هزینه بهره‌برداری و نگهداری است. طبق نظر کارشناسان، هزینه‌های بهره‌برداری نسبت به اثربخشی زیست‌محیطی راه‌کارهای پیشنهادی از اولویت کمتری برخوردار است.

۴-۱-۲- مقایسه بهترین و بدترین معیار نسبت به سایر

معیارها

در این گام، با اجماع نظر کارشناسان مقایسه عددی میان بهترین و بدترین معیار انجام شده که نتیجه آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مقایسه بین بهترین و بدترین معیار با سایر معیارها

Table 1. Comparison among the best and worst criteria with the other criteria

	Criteria set				
BO	C1	C2 (Worst criteria)	C3	C4	C5
C3 (Best criteria)	5	8	1	3	6
C1		3			
C2		1			
C3		8			
C4		7			
C5		3			
C1 = Investment cost, C2 = Maintenance and operation costs, C3 = Effect on greenhouse gas emissions, C4 = Water Savings, C5 = Implementation and Operational Effectiveness					

۴-۱-۳- وزن نهایی معیارها

در پژوهش حاضر، از نرم‌افزار Excel برای محاسبه وزن نهایی معیارها استفاده شده است که نتایج آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

بهره‌برداری از نیروگاه سیکل ترکیبی قم توسط گروه کارشناسان آورده شده است.

۳-۱- مجموعه گزینه‌ها و معیارهای ارزیابی

گروه کارشناسان شامل یک کارشناس در زمینه سیاست‌گذاری‌های انرژی و یک کارشناس محیط زیست در پژوهش حاضر به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی حاصل از بهره‌برداری از نیروگاه سیکل ترکیبی قم، سه گزینه را براساس مطالعات میدانی به‌صورت زیر پیشنهاد دادند:

(الف) استفاده از مشعل‌های کم‌انتشار

(ب) توسعه سامانه بازچرخانی آب و استفاده از پساب

تصفیه‌شده شهری

(پ) به‌کارگیری سامانه پایش هوشمند

زیست‌محیطی

هم‌چنین به‌منظور ارزیابی گزینه‌های پیشنهادی، پنج معیار مختلف شامل دو معیار اقتصادی هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه بهره‌برداری و نگهداری، دو معیار زیست‌محیطی شامل میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان صرفه‌جویی در مصرف آب و یک معیار فنی شامل قابلیت اجرا و اثربخشی بهره‌برداری ارائه شدند.

در پژوهش حاضر، معیارهای هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه بهره‌برداری و نگهداری از نوع هزینه و سایر معیارها از نوع سود هستند.

۴- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، در این بخش، نخست نتایج حاصل از روش وزن‌دهی BWM شرح داده خواهد شد. سپس راه‌کارهای کاهش مخاطرات ناشی از بهره‌برداری از نیروگاه تولید برق براساس نتایج روش VIKOR مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۱- نتایج روش BWM

در این بخش، نتایج هریک از مراحل روش BWM آورده خواهد شد.

جدول ۲- ماتریس تصمیم گیری

Table 2. The decision-making matrix			
Criteria set	Alternatives		
	A1	A2	A3
C1	95.5	70	89
C2	80	73.5	86.5
C3	97.6	61	88.5
C4	48.5	99.5	93.5
C5	93	80	93.5

A1 = Using of low emission burners, A2 = Development of a water recycling system and using the treated urban wastewater, A3 = Implementing a smart environmental monitoring system.

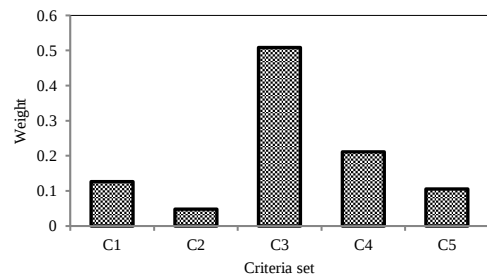


Figure 1. The weight of criteria

شکل ۱- وزن معیارها

۴-۲-۲- ماتریس تصمیم گیری نرمال سازی شده

ماتریس تصمیم گیری نرمال سازی شده در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- ماتریس نرمال سازی شده

Table 3. The normalized decision-making matrix			
Criteria set	Alternatives		
	A1	A2	A3
C1	0.644	0.472	0.600
C2	0.576	0.529	0.622
C3	0.672	0.420	0.609
C4	0.334	0.686	0.645
C5	0.602	0.518	0.606

۴-۲-۳- ماتریس تصمیم گیری نرمال سازی شده موزون

ماتریس تصمیم گیری نرمال سازی شده موزون در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- ماتریس نرمال سازی شده موزون

Table 4. The normalized weighted decision-making matrix			
Criteria set	Alternatives		
	A1	A2	A3
C1	0.081	0.059	0.076
C2	0.027	0.025	0.029
C3	0.341	0.213	0.310
C4	0.070	0.145	0.136
C5	0.063	0.054	0.064

۴-۲-۴- ایده آل مثبت و ایده آل منفی

مقادیر ایده آل مثبت و منفی در جدول ۵ آورده شده است.

مطابق شکل ۱، معیار اثر بر کاهش انتشار گازهای گلخانه ای با وزن ۰/۵۱ در جایگاه اول قرار دارد. این امر نشان دهنده اهمیت انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از مصرف سوخت های فسیلی برای تولید برق در نیروگاه ها است. پس از آن، معیار اثر بر مصرف آب با وزن ۰/۲۱ در جایگاه دوم قرار دارد. بخش بخار نیروگاه سیکل ترکیبی برای خنک کاری و تولید بخار نیازمند آب است. این مسأله در استان قم، که دارای اقلیم خشک و منابع محدود آب است، می تواند فشار مضاعفی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی وارد سازد. معیار هزینه سرمایه گذاری با وزن ۰/۱۲، قابلیت اجرا و توان فنی با وزن ۰/۱۰ و معیار هزینه بهره برداری و نگهداری با وزن ۰/۰۴ در جایگاه های سوم تا پنجم قرار دارند.

هم چنین پس از انجام مراحل فوق، مقدار نرخ سازگاری برای مطالعه حاضر، برابر با ۰/۱۲ به دست آمد که نشان دهنده سازگاری بالا میان قضاوت کارشناسان است.

۴-۲-۴- نتایج روش VIKOR

در این بخش نتایج حاصل از روش VIKOR ارائه خواهد شد.

۴-۲-۴-۱- ماتریس تصمیم گیری

در این گام ماتریس تصمیم گیری با نظر کارشناسان تکمیل و با میانگین گیری از نظرات کارشناسان، ماتریس نهایی تصمیم گیری تشکیل شد که در جدول ۲ آورده شده است.

علاوه بر آن، پایش مستمر عملکرد تجهیزات می‌تواند از افت بازده، افزایش مصرف سوخت و بروز خرابی‌های ناگهانی جلوگیری کرده و در بازه زمانی بلندمدت منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از نیروگاه گردد.

۵- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین چالش پایداری که بشر با آن روبه‌رو است، تغییرات اقلیمی و انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوخت‌های فسیلی زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی به‌ویژه در نیروگاه‌های تولید برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی است. راه‌کارهای کاهش اثرات نامطلوب استفاده از سوخت‌های فسیلی در سمت عرضه شامل افزایش بهره‌وری در سمت تولید انرژی و جایگزین کردن سوخت‌های فسیلی با منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر است.

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر علی‌رغم همه ویژگی‌های مثبت آن، ویژگی‌های نامطلوب نظیر دائمی نبودن، هزینه زیاد سرمایه‌گذاری اولیه، محدودیت اجرای آنها به‌ویژه در مناطقی که محدودیت ارضی و تغییر کاربری اراضی را دارند. بنابراین، ارائه راه‌کارهایی که بتوانند با تکیه بر منابع موجود، وضعیت فعلی را بهبود ببخشند در اولویت قرار می‌گیرند. در صورتی چنین راه‌کارهای دارای اثر بلندمدت هستند که از نظر فنی و اقتصادی و زیست‌محیطی امکان‌پذیر و باثبات و انعطاف‌پذیر باشند.

پژوهش حاضر، راه‌کارهای کاهش اثرات زیست‌محیطی نیروگاه سیکل ترکیبی را با در نظر گرفتن همه عوامل اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی در چارچوب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد بررسی قرار داد. استفاده از این چارچوب که قابل تعمیم به سایر انواع نیروگاه‌های تولید برق نیز هست، سبب انتخاب راه‌حلی جامع می‌شود که در میان‌مدت و بلندمدت منافع اقتصادی و زیست‌محیطی به همراه خواهد داشت.

جدول ۵- ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی

Table 5. Positive and negative ideal

Kind of ideal	Criteria set				
	C1	C2	C3	C4	C5
Positive ideal	0.059	0.025	0.341	0.145	0.064
Negative ideal	0.081	0.029	0.213	0.707	0.054

۴-۲-۵- رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس شاخص‌های سودمندی

و پشیمانی و شاخص VIKOR

در این گام، شاخص سودمندی، پشیمانی و ویکور در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶- شاخص‌های سودمندی، پشیمانی و VIKOR

Table 6. Utility, regret, and VIKOR indexes

Alternatives	Indexes		
	Utility	Regret	VIKOR
A1	0.365	0.211	0.223
A2	0.614	0.508	1
A3	0.293	0.126	0

مطابق جدول ۶، گزینه سوم یعنی استقرار سامانه پایش هوشمند زیست‌محیطی در نیروگاه سیکل ترکیبی قم با کسب کمینه مقدار برای هر سه شاخص سودمندی، پشیمانی و VIKOR در جایگاه نخست قرار گرفت.

گزینه استفاده از مشعل‌های کم‌انتشار با شاخص VIKOR برابر با ۰/۲۲۳ در جایگاه دوم و گزینه توسعه سامانه بازچرخانی آب و استفاده از پساب تصفیه‌شده شهری با شاخص VIKOR برابر با یک، در جایگاه سوم قرار گرفت. استقرار سامان پایش هوشمند زیست‌محیطی در نیروگاه سیکل ترکیبی با خوراک گاز طبیعی، نقش کلیدی در افزایش بهره‌وری بهره‌برداری از نیروگاه و ارتقاء مدیریت زیست‌محیطی نیروگاه دارد. این سامانه با پایش مستمر و دائمی شاخص‌های زیست‌محیطی نظیر انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان مصرف آب، پایش کیفیت پساب خروجی و امکان شناسایی سریع عبور از میزان مجاز آلاینده‌ها، سبب افزایش شفافیت اطلاعات و بهبود انطباق با استانداردها و الزامات زیست‌محیطی و گذار به سمت بهره‌برداری پایدار از نیروگاه برق خواهد شد.

ملاحظات اخلاقی

تعارض منافع

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

بنا بر اظهار نویسنده این مقاله تعارض منافع ندارد.

نویسنده اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید ایشان است.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک هزینه خاصی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

سپاسگزاری

پروین گلفام محاسبات را انجام داد و روش‌های تحلیلی را تأیید کرد. ایشان بر یافته‌های این پژوهش نظارت داشت و نتایج را بحث نمود.

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

- [1] Kahraman C, Kaya İ. A fuzzy multicriteria methodology for selection among energy alternatives. *Expert Systems with Applications*. 2010 Sep 20; 6270-6281; 37(9). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.095>.
- [2] Gómez-Navarro T, Ribó-Pérez D. Assessing the obstacles to the participation of renewable energy sources in the electricity market of Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018 Jul 30; 90: 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.015>.
- [3] Garber L, M. A. Maréchal F. Environomic optimal configurations of geothermal energy conversion systems: Application to the future construction of Enhanced Geothermal Systems in Switzerland. *Energy*. 2012 Sep; 45(1): 908-923. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.068>.
- [4] Hanna K, McGuigan E, Noble B, Parkins J. An analysis of the state of impact assessment research for low carbon power production: Building a better understanding of information and knowledge gaps. *Energy Research & Social Science*. 2019 Apr; 50: 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.10.017>.
- [5] Cui X, Hong J, Gao M. Environmental impact assessment of three coal-based electricity generation scenarios in China. *Energy*. 2012 Sep; 45(1): 952-959. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.063>.
- [6] Hosseini SM, Aslani A, Kasaeian A. Energy, water, and environmental impacts assessment of electricity generation in Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022 Sep; 52: 102-193. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102193>.
- [7] Mubarak FA, Rezaee R, Wood DA. Economic, societal, and environmental impacts of available energy sources: A review. *Eng*. 2024 Jun 28; 5(3): 1232-1265. <https://doi.org/10.3390/eng5030067>.
- [8] Gaete-Morales C, Gallego-Schmid A, Stamford L, Azapagic A. Life cycle environmental impacts of electricity from fossil fuels in Chile over a ten-year period. *Journal of Cleaner Production*. 2019 Sep 20; 232: 1499-1512. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.374>.
- [9] Gani A. Fossil fuel energy and environmental performance in an extended STIRPAT model. *Journal of Cleaner Production*. 2021 May 15; 297: 126526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126526>.
- [10] 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 20; 16(18): 6722. <https://doi.org/10.3390/en16186722>.
- [11] Josimović B, Manić B, Niković A. Environmental protection in the planning of large solar power plants. *Applied Science*. 2024 Jul 11; 14(14): 6034. <https://doi.org/10.3390/app14146043>.
- [12] Abdulvahitoğlu A. A symmetry-based spherical fuzzy MCDM approach for the strategic assessment of alternative fuels toward sustainable energy policies. *Symmetry*. 2025 Jul 8; 17(7): 1089. <https://doi.org/10.3390/sym17071089>.

- [13] Rosso-Cerón AM, Kafarov V, Latorre-Bayona G, Quijano-Hurtado R. A novel hybrid approach based on fuzzy multi-criteria decision-making tools for assessing sustainable alternatives of power generation in San Andrés Island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019 May 2; 110: 159-173. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.053>.
- [14] Soltani A, Imani MA. Overcoming implementation barriers to renewable energy in developing nations: A case study of Iran using MCDM techniques and monte carlo simulation. *Results in Engineering*. 2024 Dec; 24: 103213. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103213>.
- [15] Bhojane MS, Chandra Murmu S, Chattopadhyay H, Dutta A. Application of MCDM technique for selection of fuel in power plant. *Materials Today: Proceedings*. 2026 Nov 10; 126: 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.159>.
- [16] Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*. 2015 Dec 3; 53: 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>.
- [17] Opricovic S, Tzeng GH. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*. 2004 July; 156(2): 445-455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1).