



Evaluation of Sustainable Drinking Water Supply Options in Arid and Semi-Arid Regions Using a Group Multi-Criteria Decision-Making Approach

Soheil Safari¹, Ahmad Sharafati², Mohammad Mosaferi³, Mahdi Zarghami⁴, Neda Gilani⁵

1. PhD. Candidate in Civil Engineering (Environmental Engineering), Dept. of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2. Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
(Corresponding Author) asharafati@iaui.ir

3. Prof., Tabriz Health Services Management Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

4. Prof., Faculty of Governance, University of Tehran, Tehran, Iran

5. Assoc. Prof., Dept. of Statistics and Epidemiology, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.578802.3546>

Original Paper

Abstract

Climate change, the quantitative and qualitative decline of water resources, and the increasing demand for water consumption are among the most significant challenges for sustainable drinking water management, particularly in arid and semi-arid regions. These conditions highlight the urgent need to reconsider conventional approaches to drinking water supply and distribution and to move toward more sustainable solutions. The metropolitan city of Tabriz, due to its semi-arid climate, rapid population growth, and considerable dependence on inter-basin water transfer, has faced serious challenges in ensuring a sustainable drinking water supply in recent years. Accordingly, the present study aims to evaluate and compare alternative drinking water distribution scenarios based on the separation of potable water from domestic (non-potable) water. In this study, five scenarios dual distribution network, local water withdrawal stations, household water treatment systems, bottled water in single-use containers, and bottled water in reusable containers were evaluated using a group multi criteria decision making approach based on the analytic network process and fuzzy decision making within the group fuzzy decision making software. The final ranking of scenarios was performed using the simple additive weighting method. The evaluation was conducted based on five main criteria technical, economic, social, environmental, and political and 18 key sub criteria, including important indicators such as carbon footprint and public acceptance. The required data were collected through expert judgments and the analysis of 659 public questionnaires. The results indicated that the technical (0.1157), economic (0.1089), and social (0.1073) criteria were considered the most important from the decision-makers' perspective, while the political criterion received the lowest weight. Furthermore, the dual distribution network scenario, with a score of 0.8014, was identified as the most sustainable option and demonstrated superior performance compared with other scenarios across most evaluation criteria. The findings of this study indicate that decision making in sustainable drinking water management requires a comprehensive and multidimensional approach combined with stakeholder participation. This study provides a framework based on group multi-criteria decision-making for the simultaneous evaluation of alternative drinking water distribution scenarios, considering a comprehensive set of evaluation criteria in a semi-arid metropolitan area. The proposed framework can serve as a basis for planning and decision making in other regions facing water stress and similar climatic conditions.

Keywords:

Climate Change,
Analytical Network
Process, Water
Resources
Management,
Sustainable Drinking
Water, Multi-Criteria
Group Decision
Making.



Received: July 27, 2025

Revised: Sep. 20, 2025

Accepted: Oct. 6, 2025

To cite this article:

Safari, S., Sharafati, A., Mosaferi, M., Zarghami, M., Gilani, N., 2025. Evaluation of sustainable drinking water supply options in arid and semi-arid regions using a group multi-criteria decision-making approach. *Water and Wastewater*, (In press).
<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.578802.3546>.

Use your device to scan and read the article online



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



1. Introduction

Climate change has intensified precipitation variability, increased evaporation, and degraded water quality, thereby posing serious challenges to the sustainable supply of drinking water (Das et al., 2025; Żywiec et al., 2024). Simultaneously, population growth and rising water demand have further exacerbated pressure on limited water resources (Bojer et al., 2025; Rosa and Sangiorgio, 2025). Iran, as a semi-arid country, has been significantly affected by these trends (El-Rawy et al., 2023; Piri et al., 2025). In this context, the city of Tabriz, facing declining precipitation and a high dependency on inter-basin water transfer from the Zarrineh-Rud system, encounters quantitative, qualitative, and energy-intensive challenges in drinking water supply (Afsari et al., 2024; Feizizadeh et al., 2021). Moreover, although only about 10% of the distributed water is used for drinking purposes, the entire urban supply is treated to potable standards, leading to increased costs and energy consumption.

Previous studies have primarily focused on water supply alternatives using multi-criteria decision analysis¹ methods (Behzadian et al., 2014; Savun-Hekimoğlu et al., 2021; He et al., 2023; Diogo et al., 2021; Hamidifar et al., 2023; Pazouki et al., 2022; Srivastava et al., 2023; Chavoshian et al., 2024), while comprehensive evaluations of innovative drinking water distribution approaches have received less attention.

This study evaluates five alternative drinking water distribution scenarios including a separate distribution network, local water stations, household treatment systems, and bottled water (single-use and reusable) using a multi-criteria decision-making framework based on the Analytic Network Process² and the Fuzzy Simple Additive Weighting³ method. The alternatives were assessed against social, economic, technical, political, and environmental criteria, incorporating 18 key sub-criteria such as energy consumption, carbon footprint, and public acceptance. To address uncertainty and the subjective judgments of experts, fuzzy numbers were applied in the scoring phase of the scenarios. The results provide a practical decision-support framework for selecting sustainable drinking water distribution options in Tabriz and other semi-arid cities facing water stress under climate change.

¹ Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)

² Analytic Network Process (ANP)

³ Simple Additive Weighting (SAW)

2. Methodology

In this study, a group multi-criteria decision-making⁴ framework was employed to evaluate different scenarios for drinking water supply and distribution in the city of Tabriz. The research process included defining the scenarios, identifying the evaluation criteria and sub-criteria, weighting the criteria, and finally ranking the alternatives.

In this study, five scenarios were examined: a separate drinking water distribution network, local drinking water supply stations, household water purification systems, bottled water in single-use containers, and bottled water in reusable containers. To evaluate these scenarios, five main criteria-political, environmental, technical, economic, and social-were considered. These were further divided into 18 sub-criteria, including carbon footprint, energy consumption, water quality, costs, public acceptance, and consumer health.

The weights of the criteria and sub-criteria were determined using the ANP method (Saaty, 2005) and the Super Decisions software, based on the opinions of six experts including managers in the fields of water resources, environmental management, and urban management, as well as university scholars specializing in water resources and economics. Subsequently, the performance of each scenario with respect to the sub-criteria was evaluated according to the nature of each indicator using a combination of technical data, expert judgments, results from 659 questionnaires completed by citizens of Tabriz, and carbon footprint calculations conducted using the SimaPro software.

To account for uncertainty in some estimations, triangular fuzzy numbers were employed, and the final ranking of the scenarios was carried out using the Fuzzy Simple Additive Weighting⁵ method in the Group Fuzzy Decision Making⁶ software. Finally, a sensitivity analysis was performed with respect to each of the main criteria to assess the independent influence of each criterion on the final ranking of the scenarios.

3. Discussion and results

The results of the ANP analysis indicate that among the main criteria, the technical criterion obtained the highest priority weight (0.1157). This was followed by the economic (0.1089) and social (0.1073) criteria, while the environmental

⁴ Group Multi-Criteria Decision-Making (GMCDM)

⁵ Fuzzy Simple Additive Weighting (FSAW)

⁶ Group Fuzzy Decision Making (GFDM)



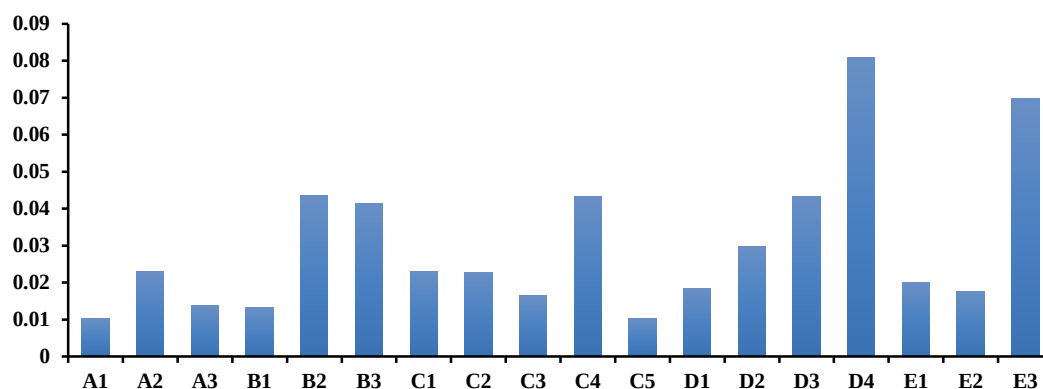


Fig. 1. Final weights of the sub-criteria

and political criteria received comparatively lower weights. These results suggest that technical feasibility and economic sustainability play a more decisive role in evaluating alternative drinking water supply and distribution scenarios.

Among the 18 evaluated sub-criteria, operation and maintenance costs, consumer health protection, and wastewater generation received the highest weights. The prominence of these sub-criteria reflects the importance of long-term economic efficiency, protection of public health, and environmental considerations in the selection of the most suitable alternative. The relative importance weights of all sub-criteria (A1-E3) are presented in Fig. 1.

The final ranking of the scenarios was obtained using the FSAW method implemented in the GFDM software. The results show that the separate (dual) drinking water distribution network (Scenario A) achieved the highest sustainability score (0.8014) and ranked first among all alternatives. This scenario performs better in terms of water quality control, long-term operational reliability, and protection of public health.

The local drinking water station scenario (Scenario B) ranked second, mainly due to its relatively lower infrastructure investment requirements. Household treatment systems (Scenario C) and bottled water options (Scenarios D and E) received lower rankings, primarily due to maintenance uncertainties, environmental concerns associated with plastic waste generation, and logistical challenges related to supply and distribution.

The final sustainability scores and the ranking of the scenarios are presented in Fig. 2.

To examine the stability of the results, a sensitivity analysis was conducted by varying the weights of the main criteria. The findings indicate that Scenario A remained the most robust

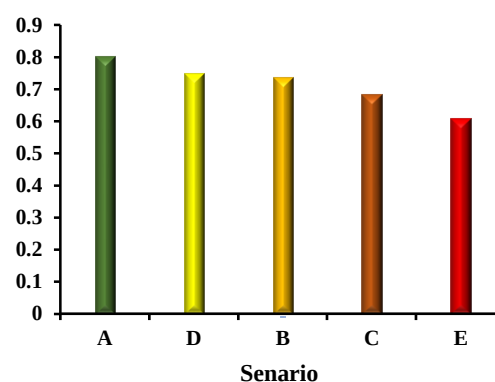


Fig. 2. Ranking of scenarios based on GFDM results

alternative under different weighting conditions. Only under extreme emphasis on short-term economic savings did the bottled water alternatives show improved rankings. These results confirm the overall robustness and sustainability of the dual drinking water distribution network under balanced multi-criteria evaluation conditions.

4. Conclusions

This research indicated that decision-making in the context of sustainable drinking water supply in regions under climate change pressure and water resource reduction, with a long history of using low-cost traditional water supply methods for consumers, requires a multi-criteria, group-based approach that involves stakeholder participation. The weighted results of the criteria revealed that technical sustainability, economic efficiency, and social acceptance are the three main pillars of decision-making, while political factors and environmental dimensions were less significant in practice.

The scenario ranking demonstrated that the isolated drinking water network (Scenario A) is



considered the most sustainable scenario due to its simultaneous superiority in technical, social, and environmental criteria. One reason for this superiority could be its high similarity to the conventional structure of drinking water supply in Tabriz, thus creating a greater sense of connection and acceptance among citizens and officials. However, other options also have relative advantages; particularly single-use bottled water (Scenario D) in terms of economics and domestic treatment systems (Scenario C) in terms of political acceptance, which can be considered in specific situations or in combination with other approaches.

Consequently, to change and replace traditional water supply methods, compromise among multiple criteria and active participation of decision-makers and stakeholders are essential conditions for achieving sustainable and publicly accepted options. This approach not only reduces costs and optimizes resource management but also enhances public health by providing high-quality drinking water. Furthermore, it can be applicable to a wide range of arid and semi-arid cities worldwide facing pressures from climate change and water resource reduction, serving as a framework for designing climate adaptation policies and strengthening urban resilience.





ارزیابی گزینه‌های پایدار تأمین آب آشامیدنی در مناطق خشک و نیمه‌خشک با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره گروهی

سهیل صفری^۱، احمد شرافتی^{۲*}، محمد مسافری^۳، مهدی ضرغامی^۴، ندا گیلانی^۵

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران-گرایش مهندسی محیط‌زیست، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) asharafati@iaui.ir

۳- استاد، مرکز تحقیقات مدیریت خدمات بهداشتی درمانی تبریز، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

۴- استاد، دانشکده حکمرانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۵- دانشیار، گروه آمار و اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.578802.3546>

مقاله پژوهشی

چکیده

تغییرات اقلیمی، کاهش کمی و کیفی منابع آب و افزایش تقاضای مصرف، از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت پایدار آب آشامیدنی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌روند. این شرایط ضرورت بازنگری در شیوه‌های متداول تأمین و توزیع آب شرب و حرکت به‌سوی راهکارهای پایدارتر را بیش‌ازپیش آشکار ساخته است. کلان‌شهر تبریز به دلیل اقلیم نیمه‌خشک، رشد جمعیت و وابستگی قابل‌توجه به انتقال بین‌حوزه‌ای آب، در سال‌های اخیر با چالش‌های جدی در تأمین پایدار آب آشامیدنی مواجه بوده است. از این‌رو، این پژوهش باهدف ارزیابی و مقایسه سناریوهای جایگزین توزیع آب آشامیدنی مبتنی بر تفکیک آب شرب از آب بهداشتی انجام شد. در آن پنج سناریوی شبکه توزیع مجزا، ایستگاه‌های محلی برداشت آب، سیستم‌های تصفیه خانگی، آب بسته‌بندی در ظروف یک‌بارمصرف و آب بسته‌بندی در ظروف چندبارمصرف با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره گروهی مبتنی بر مدل تحلیل شبکه‌ای و تصمیم‌گیری فازی در نرم‌افزار GFDM ارزیابی شدند و برای رتبه‌بندی نهایی سناریوها از روش جمع وزنی ساده استفاده شد. ارزیابی سناریوها بر اساس پنج معیار اصلی فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و سیاسی و ۱۸ زیرمعیار کلیدی انجام شد که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شاخص‌هایی مانند ردپای کربن و مقبولیت عمومی اشاره کرد. داده‌های موردنیاز از طریق نظرات خبرگان و تحلیل ۶۵۹ پرسشنامه مردمی گردآوری شد. نتایج نشان داد که معیارهای فنی (۰/۱۱۵۷)، اقتصادی (۰/۱۰۸۹) و اجتماعی (۰/۱۰۷۳) بیشترین اهمیت را از دیدگاه تصمیم‌گیران دارند، درحالی‌که معیار سیاسی کمترین وزن را به خود اختصاص داده است. همچنین، سناریوی شبکه توزیع مجزا با کسب امتیاز ۰/۸۰۱۴ به‌عنوان پایدارترین گزینه شناسایی شد و در اغلب معیارهای ارزیابی عملکرد برتری نسبت به سایر سناریوها داشت. نتایج این پژوهش نشان داد که تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت پایدار آب آشامیدنی نیازمند رویکردی جامع و چندبعدی همراه با مشارکت ذی‌نفعان است. این پژوهش با ارائه چارچوبی مبتنی بر GMCDM برای ارزیابی هم‌زمان سناریوهای مختلف توزیع آب آشامیدنی و با در نظر گرفتن مجموعه‌ای جامع از معیارهای ارزیابی، در یک کلان‌شهر نیمه‌خشک، می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری در سایر مناطق دارای تنش آبی و شرایط اقلیمی مشابه استفاده شود.

واژه‌های کلیدی:

تغییر اقلیم، تحلیل

شبکه‌ای، مدیریت منابع

آب، آب آشامیدنی پایدار،

تصمیم‌گیری چندمعیاره

گروهی



دریافت: ۱۴۰۴/۵/۵

اصلاح: ۱۴۰۴/۷/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۱۴

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

صفری، س.، شرافتی، ا.، مسافری، م.، ضرغامی، م.، گیلانی، ن.، ۱۴۰۴، ارزیابی گزینه‌های پایدار تأمین آب آشامیدنی در مناطق خشک و نیمه‌خشک با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره گروهی. *آب و فاضلاب*. (در حال انتشار)

<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.578802.3546>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی قرن حاضر، نه‌تنها الگوهای آب‌وهوایی را دگرگون ساخته، بلکه به‌طور مستقیم بر کمیت و کیفیت منابع آب اثرگذار بوده و امنیت آبی جوامع انسانی را تهدید کرده و مدیریت منابع آبی را با چالش‌های جدی روبه‌رو ساخته است (Das et al., 2025).

تغییرات اقلیمی با تشدید نوسانات بارش، افزایش تبخیر و افت کیفیت منابع آب، سیستم‌های موجود تأمین آب شرب در جهان را به سامانه‌هایی ناپایدار و پرهزینه تبدیل کرده است؛ از این‌رو، حرکت به‌سوی رویکردهای نوین و پایدار در مدیریت منابع آب برای تأمین پایدار آب شرب، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به‌شمار می‌رود (Zywiec et al., 2024). در کنار تغییر اقلیم و کاهش کمی و کیفی منابع آب، رشد جمعیت و افزایش مصرف، مدیریت منابع آب و تأمین آب شرب را بیش‌ازپیش دشوار می‌سازد (Bojer et al., 2025).

همچنین افزایش دما ناشی از تغییر اقلیم، مصرف آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک را تشدید کرده و محدودیت‌های آبی این مناطق را حادتر می‌کند (Rosa and Sangiorgio, 2025). دسترسی به آب آشامیدنی باکیفیت، نه‌تنها از منظر سلامت عمومی، بلکه برای کاهش بیماری‌ها و ارتقای سطح اجتماعی و اقتصادی جامعه نیز اهمیت فراوانی دارد. از این‌رو، مدیریت مؤثر آب شرب و انتخاب روش‌های مناسب تأمین آن می‌تواند به‌طور مستقیم و ملموس در تحقق توسعه پایدار نقش آفرین باشد (Perveen and Ul-Haque, 2023).

ایران نیز به‌عنوان کشوری با اقلیم نیمه‌خشک (Piri et al., 2025) مشابه بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، با چالش‌های فزاینده‌ای در مدیریت و تأمین منابع آبی ناشی از تغییرات اقلیمی روبه‌رو است (El-rawy et al., 2023). این تغییرات، شهرهای بزرگ ایران را نیز به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. به‌ویژه شهر تبریز با جمعیتی بیش از ۱/۷ میلیون نفر و اقلیمی سرد و نیمه‌خشک که طی سال‌های اخیر با تغییر الگوی بارش و کاهش تعداد روزهای بارانی مواجه بوده که این امر منابع آبی شهر را به‌طور چشمگیری تحت فشار قرار داده است (Afsari et al., 2024).

در شهر تبریز حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد آب آشامیدنی از منابع آب سطحی تأمین می‌شود که بخش اندکی از آن از سد نهند و بخش عمده آن از طریق سامانه انتقال بین‌حوزه‌ای زرينه‌رود با خط پمپاژ به طول ۱۶۹ کیلومتر تأمین می‌شود. مابقی نیاز آبی شهر (حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد) از منابع آب زیرزمینی شامل ۸۶ حلقه چاه و ۱۳ رشته قنات در پیرامون شهر فراهم می‌شود. در ماه‌های گرم سال، به دلیل کاهش ذخایر آب‌های سطحی و افت سطح آب زیرزمینی، وابستگی به سامانه انتقال زرينه‌رود به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (Feizizadeh et al., 2021).

این در حالی است که سامانه انتقال زرينه‌رود، به دلیل مسافت طولانی ۱۶۹ کیلومتری و اختلاف ارتفاع قابل‌توجه تا تبریز، با مصرف زیاد انرژی و هزینه‌های سنگین بهره‌برداری همراه است. از سوی دیگر با توجه به روند افزایش دما، تشدید تبخیر و کاهش بارندگی، سد بوکان به‌عنوان منبع اصلی تغذیه‌کننده خط انتقال زرينه‌رود با کم‌آبی و کاهش ذخایر، به‌ویژه در فصول گرم سال، مواجه شده است. این درحالی‌که است که در شهر تبریز، به دلیل بهره‌برداری از یک شبکه یکپارچه برای تأمین و توزیع آب شرب و مصارف بهداشتی، تنها حدود ۱۰ درصد از آب توزیعی به مصرف آشامیدنی اختصاص می‌یابد، درحالی‌که بخش عمده آن در کاربری‌های بهداشتی استفاده می‌شود. این وضعیت سبب می‌شود تا فرایند تأمین و تصفیه آب در سطحی بسیار پرهزینه و پیچیده انجام شود تا کیفیت کل آب شبکه متناسب با استانداردهای شرب تضمین شود.

در مقابل، جداسازی سامانه‌های تأمین آب شرب و بهداشتی می‌تواند ضمن کاهش قابل‌توجه هزینه‌های تأمین و تصفیه، بهینه‌سازی مصرف انرژی و ارتقای کارایی سیستم، آب آشامیدنی را باکیفیتی بسیار بالا و استاندارد در اختیار مصرف‌کنندگان قرار دهد. علاوه بر این، چنین تفکیکی با ارتقای سطح سلامت عمومی و کاهش مخاطرات بهداشتی همراه بوده و درعین‌حال، راهکاری مؤثر برای ارتقای پایداری سامانه‌های شهری در تأمین آب محسوب می‌شود. بر این اساس، تأمین و تصفیه آب شرب در تبریز با چالش‌های کمی و کیفی قابل‌توجهی روبه‌رو است و ضرورت گذار به رویکردهای نوین و پایدار در مدیریت منابع آب بیش‌ازپیش آشکار می‌شود. از این‌رو انتخاب روش‌های جایگزین تأمین آب شرب در شهر تبریز اهمیت زیادی دارد. با توجه به پیچیدگی عوامل





شد. برای تحلیل داده‌ها، از روش‌های پیشرفته مدل تحلیل شبکه‌ای^۳ و روش جمع وزنی ساده فازی استفاده شد. همچنین مشارکت خبرگان و تصمیم‌گیرندگان کلیدی، شامل مدیران ارشد دارای مسئولیت‌های مدیریتی و سیاسی در سطح شهری، مسئولان عالی بخش مدیریت و تأمین آب و فاضلاب، مدیران حوزه حفاظت محیط‌زیست و اساتید دانشگاهی متخصص، موجب افزایش دقت و اعتبار نتایج این پژوهش شد.

از منظر نوآوری، این پژوهش با ارزیابی ۵ سناریوی مختلف توزیع آب شرب و بهره‌گیری از یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر ANP و SWA فازی، همراه با مشارکت تصمیم‌گیران کلیدی و در نظر گرفتن معیارها و زیرمعیارهای متنوع و کلیدی، نه تنها شکاف موجود در ادبیات علمی مرتبط با ارزیابی جامع گزینه‌های توزیع آب شرب را پوشش می‌دهد، بلکه نتایج آن قابلیت استفاده در سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک مواجه با تنش آبی ناشی از تغییر اقلیم و محدودیت در تأمین آب شرب سالم را نیز دارد.

۲- روش پژوهش

۲-۱- چارچوب پژوهش

با توجه به تغییرات اقلیمی، کاهش کمی و کیفی منابع آبی و چالش‌های روزافزون در تأمین پایدار آب شرب در کلان‌شهر تبریز با جمعیت ۱/۷ میلیون نفر و آب‌وهوای سرد و خشک که وابستگی بالایی به انتقال بین‌حوزه‌ای دارد ضرورت بازنگری در شیوه‌های تأمین و توزیع آب بیش‌ازپیش احساس می‌شود. ازجمله این چالش‌ها می‌توان به هزینه‌های زیاد تصفیه کامل آب برای تمام مصارف، فشار بر منابع محدود و پیامدهای زیست‌محیطی اشاره کرد. این در حالی است که تنها حدود ۱۰ درصد از آب مصرفی شبکه آبرسانی به‌طور مستقیم صرف شرب می‌شود و بخش عمده آن نیازی به تصفیه در حد استاندارد آب آشامیدنی ندارد.

در چنین شرایطی، بررسی و ارزیابی سناریوهای جایگزین برای شبکه فعلی آبرسانی شهری به‌عنوان یک راهبرد اساسی مطرح می‌شود. با توجه به اینکه دهه‌ها است شبکه آبرسانی پیوسته با هزینه نسبتاً کم در اختیار مصرف‌کنندگان در تبریز قرار داشته است،

مؤثر و تنوع پارامترهای مؤثر در این فرایند، بهره‌گیری از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره گروهی^۱ می‌تواند ابزاری کارآمد برای انتخاب گزینه‌های بهینه باشد.

پژوهش‌های متعددی در سال‌های اخیر با بهره‌گیری از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره^۲ به ارزیابی گزینه‌های مختلف تأمین آب پرداخته‌اند. به‌عنوان نمونه، در ملبورن استرالیا سیستم‌های هیبریدی ترکیب بازچرخانی و برداشت آب باران به‌عنوان پایدارترین گزینه شناسایی شد (Behzadian et al., 2014) درحالی‌که در شهرهای استانبول و دنور، بازچرخانی فاضلاب در کنار مدیریت تقاضا برترین جایگاه را کسب کرد (He et al., 2023, Savun-Hekimoğlu et al., 2021).

در مناطق روستایی نیز مطالعاتی در کشورهای ایران و کیپ‌ورده نشان داده‌اند که روش‌هایی همچون انحراف آب از رودخانه، احداث سدهای موقت یا ترکیب بازچرخانی و آب‌شیرین‌کنی می‌توانند گزینه‌های مناسبی باشند (Diogo et al., 2023, Hamidifar et al., 2021). همچنین، برخی پژوهش‌ها بر ارزیابی فناوری‌های نوین تصفیه مانند UF-RO، (Pazouki et al., 2022) و ارزیابی عملکرد شرکت‌های آبرسانی شهری (Srivastava et al., 2023) و تأمین آب اضطراری (Chavoshian et al., 2024) متمرکز بوده‌اند.

پژوهش‌های گذشته عمدتاً بر تأمین منابع آب تمرکز داشته‌اند و بررسی‌های جامع درباره گزینه‌های نوین و متنوع توزیع آب شرب کمتر موردتوجه قرار گرفته است. این پژوهش با ارزیابی پنج رویکرد جایگزین برای شبکه توزیع موجود شامل شبکه توزیع مجزا، ایستگاه‌های محلی، سیستم‌های تصفیه خانگی، آب بسته‌بندی یک‌بارمصرف و چندبارمصرف در کلان‌شهری نیمه‌خشک مانند تبریز با وابستگی بالا به انتقال بین‌حوزه‌ای برای تأمین آب شرب، با در نظر گرفتن تلاشی نوین برای ارائه تحلیلی جامع در حوزه روش‌های توزیع آب شرب باهدف سازگاری با تغییر اقلیم و مدیریت کاهش منابع آب داد.

در این پژوهش، مجموعه‌ای از معیارهای اجتماعی، اقتصادی، سیاسی، فنی و زیست‌محیطی به همراه ۱۸ زیرمعیار کلیدی نظیر ردپای کربن، مصرف انرژی و میزان مقبولیت عمومی به کار گرفته

³ Analytic Network Process (ANP)

¹ Group Multi-Criteria Decision-Making (GMCDM)

² Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)



انتخاب هرگونه جایگزین برای این سیستم با پیچیدگی‌های فراوانی همراه خواهد بود. از این رو، تصمیم‌گیری در این زمینه مستلزم توجه هم‌زمان به معیارهای اجتماعی، اقتصادی، سیاسی، فنی و زیست‌محیطی است؛ معیارهایی که شامل زیرمعیارهای مهمی همچون مقبولیت عمومی و سیاسی، ردپای کربن، مصرف انرژی و هزینه‌های اقتصادی می‌شوند. علاوه بر این، به‌منظور افزایش اعتبار و مقبولیت نتایج، لازم است فرایند تصمیم‌گیری با مشارکت گروهی از تصمیم‌گیران شامل مسئولان ارشد شهری و متخصصان دانشگاهی انجام شود. بر این اساس، در این پژوهش از روش‌های GMCDM برای تحلیل و مقایسه سناریوهای جایگزین تأمین و توزیع آب شرب استفاده شد.

۲-۲- سناریوها

در این پژوهش با توجه به شرایط اجتماعی و زیرساختی موجود در شهر تبریز، ۵ سناریوی جایگزینی برای شبکه آب‌رسانی فعلی در راستای تفکیک آب شرب از آب مصرفی بهداشتی طراحی شد: شبکه توزیع مجزا (سناریو A): در این سناریو آب شرب با کیفیت بالا از طریق شبکه‌ای جداگانه تا منازل و محل مصرف منتقل می‌شود و در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌دهد.

ایستگاه‌های محلی (سناریو B): در این سناریو ایستگاه‌های محلی تأمین آب شرب با کیفیت بالا در محله‌ها با توجه به جمعیت هر منطقه ایجاد شده و شهروندان با پر کردن ظرف‌های خود، آب شرب موردنیاز را دریافت می‌کنند.

سیستم‌های تصفیه خانگی (سناریو C): در این سناریو، آب شبکه آب‌رسانی موجود به‌صورت اولیه تصفیه می‌شود تا سطح ایمنی و بهداشت موردنیاز برای مصارف بهداشتی تأمین شود و نیاز به پیش‌تصفیه قبل از ورود به دستگاه‌های تصفیه خانگی نباشد. شهروندان با استفاده از این دستگاه‌ها، آب شرب باکیفیت مطلوب خود را تأمین می‌کنند و بنابراین نیازی به ایجاد شبکه جدید نیست.

آب بسته‌بندی در ظروف یک‌بارمصرف (سناریو D): در این سناریو، با توسعه کارخانه‌های تولید آب بسته‌بندی در ظرفیت‌های مختلف و توزیع آن در فروشگاه‌های سطح شهر تبریز، شهروندان

امکان خرید و تأمین آب شرب باکیفیت بالا را خواهند داشت.

آب بسته‌بندی در ظروف چندبارمصرف (سناریو E): در این سناریو، با گسترش کارخانه‌های آب بسته‌بندی و تولید ظروف چندبارمصرف، آب شرب باکیفیت بالا در ظرفیت‌های مختلف تولید و در فروشگاه‌های سطح شهر توزیع می‌شود. پس از استفاده و اتمام آب، شهروندان ظروف خالی را به فروشنده تحویل می‌دهند تا پس از شستشو و ضدعفونی توسط کارخانه، مجدداً استفاده شوند.

در مجموع، در سناریوی تصفیه خانگی، شبکه آب‌رسانی موجود همچنان برای انتقال آب شرب به کار می‌رود، درحالی‌که در سایر سناریوها، شبکه فعلی بیشتر به مصارف بهداشتی و غیرشرب اختصاص یافته و آب آشامیدنی باکیفیت بالا از طریق روش‌های جایگزین تأمین می‌شود.

۲-۳- انتخاب معیارها

در این پژوهش برای رتبه‌بندی سناریوهای مختلف تأمین آب شرب، از پنج معیار اصلی و ۱۸ زیرمعیار استفاده شد. با توجه به پیچیدگی و اهمیت زیاد موضوع، انتخاب این معیارها به‌گونه‌ای انجام شد که ضمن پوشش جنبه‌های فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی، سیاسی و اجتماعی، امکان ارزیابی دقیق و انتخاب سناریوی دارای بیشترین قابلیت اجرا در شرایط واقعی فراهم شود.

معیار سیاسی (A) شامل سه زیرمعیار شامل میزان پذیرش نزد سیاستمداران (A_1)، وجود زیرساخت‌های فنی و اجرایی (A_2) و میزان نیاز به تغییرات قانونی (A_3) است.

معیار محیط‌زیستی (B) شامل سه زیرمعیار ردپای کربن (B_1)، میزان تولید پساب (B_2) و میزان تولید پسماند (B_3) هستند.

معیار فنی (C) دارای پنج زیرمعیار شامل پایداری و ضریب اطمینان سیستم (C_1)، میزان مصرف انرژی (C_2)، معیار سازگاری با منابع و شرایط منطقه (C_3)، کیفیت آب تولیدی (C_4) و نیاز به تکنسین ماهر برای راهبری (C_5) است.

معیار اقتصادی (D) دارای چهار زیرمعیار شامل هزینه برای دولت (D_1)، هزینه برای مصرف‌کننده (D_2)، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (D_3) و هزینه نگهداری و راهبری (D_4) است.



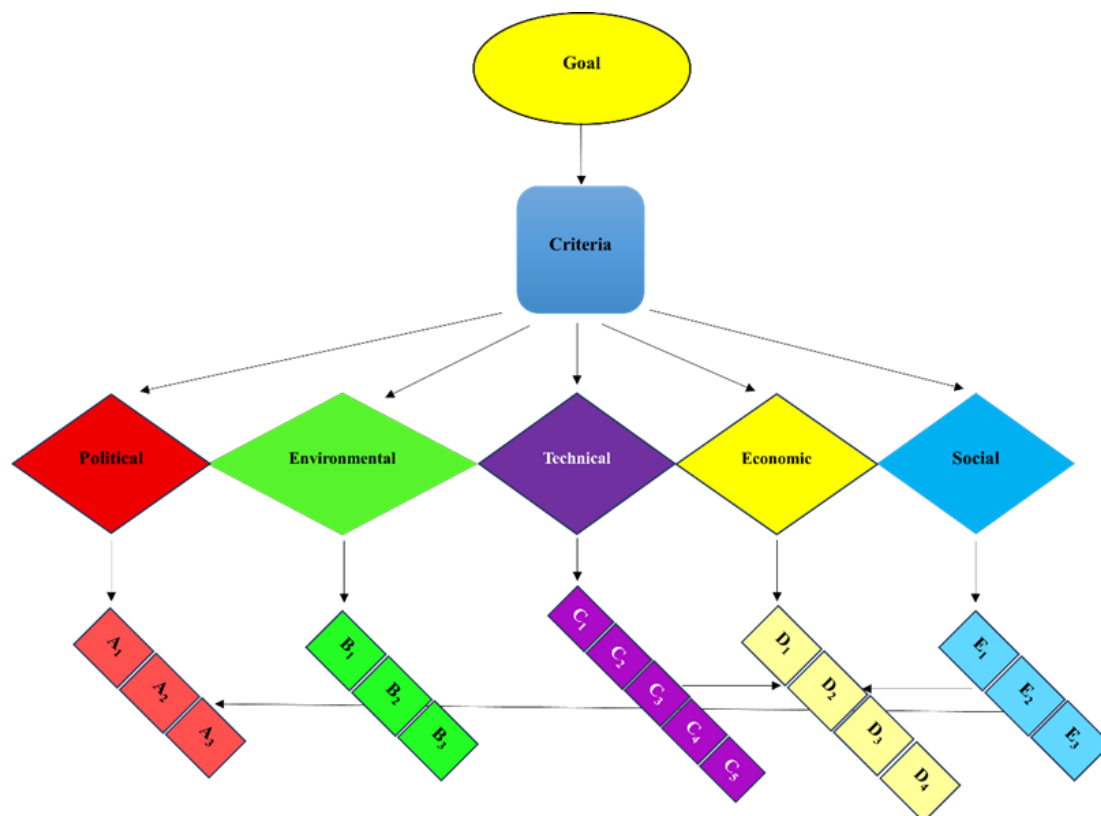


Fig. 1. Conceptual structure of criteria and sub-criteria in Super Decisions Software
 شکل ۱- ساختار مفهومی معیارها و زیرمعیارها در نرم افزار Super Decisions

دانشگاهی متخصص در حوزه های اقتصاد، اقتصاد محیط زیست و مدیریت منابع آب بود. انتخاب این افراد بر اساس جایگاه مدیریتی، تخصص علمی، تجربه حرفه ای و مرتبه دانشگاهی انجام شد تا ترکیبی متوازن از دیدگاه های اجرایی و دانشگاهی فراهم شود. همچنین، به منظور واقعی سازی فرایند تصمیم گیری و اتکای نتایج به قضاوت تصمیم سازان و تصمیم گیران مؤثر، خبرگان منتخب از میان افرادی انتخاب شدند که نقش مستقیم و تعیین کننده ای در تصمیم سازی و تصمیم گیری در حوزه مدیریت آب دارند. این ترکیب باهدف پوشش ابعاد فنی، اقتصادی، اجتماعی، محیط زیستی و سیاسی در نظر گرفته شد تا فرایند ارزیابی و رتبه بندی سناریوها جامعیت و اعتبار بیشتری داشته باشد.

در این پژوهش از روش ANP برای تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها استفاده شد. این روش که نخستین بار توسط ساعتی (Saaty, 2005) معرفی شد، یکی از ابزارهای کارآمد تصمیم گیری چندمعیاره است که امکان مدل سازی وابستگی ها و تأثیرات متقابل میان معیارها و زیرمعیارها را فراهم می کند.

معیار اجتماعی (E) شامل سه زیر معیار میزان مقبولیت عمومی (E_1)، سهولت دسترسی برای عموم (E_2) و حفظ سلامت مصرف کننده (E_3) است.

برای نمایش بهتر ساختار معیارها و زیرمعیارها، مدل طراحی شده در نرم افزار Super Decisions در شکل ۱ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، پنج معیار اصلی (سیاسی، محیط زیستی، فنی، اقتصادی و اجتماعی) و ۱۸ زیرمعیار متناظر آن ها در قالب یک مدل مفهومی سازمان دهی شده اند که مبنای ANP قرار گرفت.

۲-۴- انتخاب گروه تصمیم گیر

با توجه به اهمیت و چندبعدی بودن موضوع، در این پژوهش از نظرات یک گروه شش نفره از خبرگان و تصمیم گیرندگان بهره گرفته شد. این گروه شامل مدیران ارشد دارای مسئولیت های مدیریتی و سیاست گذاری در سطح شهری، مسئولان عالی در حوزه مدیریت و تأمین آب و فاضلاب، مدیران حوزه حفاظت محیط زیست و اساتید



تشکیل شد که مبنای محاسبات و ساخت سوپرماتریس در این روش است. این فرایند مطابق معادله ۱ انجام شد

$$1, 2, \dots, n = i, j, \quad \frac{w_i}{w_j} = a_{ij}, (a_{ij}) = A \quad (1)$$

که در آن

w_i و w_j به ترتیب وزن نسبی معیارهای i و j بوده و a_{ij} میزان ارجحیت عنصر i نسبت به عنصر j را نشان می‌دهد.

در ماتریس‌های مقایسه زوجی، عناصر قطر اصلی برابر با ۱ بوده و عناصر متقابل به صورت معکوس یکدیگر تعریف شدند. پس از تشکیل ماتریس‌ها، وزن نسبی معیارها و زیرمعیارها از طریق محاسبه بردار ویژه نرمال شده استخراج شد.

وزن‌های نسبی از بردار ویژه نرمال شده معادله ۲ به دست آمد

$$\lambda_{\max} w = Aw \quad (2)$$

که در آن

A ماتریس مقایسه زوجی، w بردار وزن‌های نسبی و $\lambda_{\max}$ بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس است.

به منظور بررسی میزان سازگاری قضاوت‌های خبرگان، نرخ ناسازگاری (CR) برای تمامی ماتریس‌های مقایسه زوجی محاسبه شد. ابتدا شاخص ناسازگاری (CI) از معادله ۳ به دست آمد

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

سپس نرخ ناسازگاری از معادله ۴ زیر محاسبه شد

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

که در آن

n تعداد عناصر مورد مقایسه و RI شاخص تصادفی است. در این پژوهش، مقدار $CR \geq 1$ به عنوان سطح قابل قبول سازگاری در نظر گرفته شد. محاسبه شاخص‌های سازگاری و کنترل ناسازگاری قضاوت‌ها در محیط نرم افزار Super Decisions انجام شد.

برخلاف روش تحلیل سلسله مراتبی^۱ که بر ساختاری خطی و سلسله مراتبی استوار است، ANP قادر است روابط غیرخطی و بازخورد میان معیارها را نیز در نظر بگیرد. از این رو، با توجه به پیچیدگی فرایند تصمیم‌گیری و لزوم محاسبه تأثیرات بازخوردی بین معیارها، در این پژوهش از روش ANP استفاده شد.

در گام نخست، ساختار شبکه‌ای مدل در نرم افزار Super Decisions طراحی شد. این ساختار شامل هدف اصلی تصمیم‌گیری، پنج خوشه اصلی معیارها شامل معیارهای فنی، اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و محیط‌زیستی و همچنین زیرمعیارهای مرتبط با هر خوشه بود. سپس روابط وابستگی درونی و بیرونی میان معیارها و زیرمعیارها بر اساس نظر خبرگان و مبانی نظری پژوهش تعریف شد تا اثرات متقابل و بازخورد میان عناصر مختلف شبکه در مدل لحاظ شود. به این ترتیب، ساختار نهایی ANP قادر بود تعاملات میان معیارها و زیرمعیارها را به صورت هم‌زمان مدل‌سازی کند.

در این پژوهش، با بهره‌گیری از ANP، وزن معیارهای فنی، اقتصادی، اجتماعی، سیاسی و محیط‌زیستی و زیرمعیارهای مرتبط به گونه‌ای تعیین شد که تعاملات متقابل میان آن‌ها لحاظ شود و در نتیجه، دقت و جامعیت رتبه‌بندی نهایی سناریوها ارتقا یابد.

برای گردآوری داده‌ها، پرسش‌نامه‌ای مبتنی بر مقایسات زوجی در اختیار گروهی از خبرگان و تصمیم‌گیران قرار گرفت. در این فرایند، خبرگان میزان برتری هر عنصر نسبت به عنصر دیگر را با استفاده از یک مقیاس ترجیح پنج سطحی شامل «مساوی»، «کمی ارجح»، «نسبتاً ارجح»، «خیلی ارجح» و «کاملاً ارجح» تعیین کردند. تلاش شد تا هر یک از خبرگان متناسب با حوزه تخصصی خود، تنها به معیارها و زیرمعیارهای مرتبط پاسخ دهند تا دقت ارزیابی افزایش یابد. پس از جمع‌آوری داده‌ها، با بهره‌گیری از رویکرد اجماع خبرگان و تحلیل نتایج در نرم افزار Super Decisions، وزن هر یک از زیرمعیارها استخراج و در فرایند رتبه‌بندی نهایی سناریوها به کار گرفته شد.

روش ANP بر این اصل استوار است که اهمیت نسبی هر معیار یا زیرمعیار از طریق مقایسات زوجی مشخص می‌شود. بنابراین، در گام نخست ماتریس مقایسات زوجی میان معیارها و زیرمعیارها

¹ Analytic Hierarchy Process (AHP)



سپس با بهره‌گیری از نرم‌افزار SimaPro ارزیابی دقیق انجام شد (Safari et al., 2026).

به منظور افزایش دقت و اعتبار در مواردی که برآورد عدد قطعی امکان‌پذیر نبود، از اعداد فازی مثلثی برای امتیازدهی به برخی از زیرمعیارها استفاده شد. همچنین زیرمعیارهایی که تأثیر منفی بر ارزیابی دارند، در جدول ۱ با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. تأثیر منفی به این معنی است که افزایش مقدار آن‌ها سبب کاهش مطلوبیت آن معیار می‌شود. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار GFDM^۱ امتیاز هر سناریو محاسبه و رتبه‌بندی آن‌ها انجام شد.

۲-۷- مراحل اجرایی پیاده‌سازی مدل در نرم‌افزار GFDM

پس از گردآوری داده‌ها و تعیین روش‌های امتیازدهی، مراحل اجرایی پیاده‌سازی مدل در نرم‌افزار GFDM به صورت یک روند یکپارچه و ساختارمند انجام شد. ابتدا ساختار مسئله در محیط نرم‌افزار تعریف شد؛ به این صورت که ۵ سناریو به عنوان گزینه‌های تصمیم^۲ و ۱۸ زیرمعیار به عنوان شاخص‌های ارزیابی^۳ وارد شدند و برای هر معیار، مشخصات شناسنامه‌ای شامل نام و کد اختصاری ثبت شد. سپس ماهیت هر زیرمعیار از نظر جهت اثرگذاری بر مطلوبیت سیستم تعیین شد؛ معیارهایی که افزایش مقدار آن‌ها موجب بهبود عملکرد و افزایش مطلوبیت می‌شود در گروه سود^۴ و ردپای کربن و هزینه‌های اجرایی^۵ در گروه هزینه طبقه‌بندی شدند (در جدول ۱ معیارهای هزینه با رنگ قرمز مشخص شده‌اند). هم‌زمان، وزن‌های نهایی زیرمعیارها که از مدل ANP و خروجی نرم‌افزار Super Decisions استخراج شده بود، در GFDM وارد شد تا اهمیت نسبی معیارها در محاسبات نهایی لحاظ شود.

در گام بعد، داده‌های عملکردی هر سناریو نسبت به هر زیرمعیار در نرم‌افزار ثبت و به منظور انعکاس عدم قطعیت‌های موجود در برآوردها، فرایند فازی‌سازی انجام شد؛ به این معنا که قضاوت‌های کیفی و مقدار مبتنی بر نظر خبرگان به صورت اعداد فازی مثلثی وارد شد و در نتیجه، ماتریس تصمیم‌گیری فازی

سپس وزن‌های حاصل در سوپرماتریس اولیه قرار داده شدند. در ادامه، با اعمال وزن خوشه‌ها، سوپرماتریس اولیه به سوپرماتریس وزنی تبدیل شد تا مجموع عناصر هر ستون برابر ۱ شد. سپس با به توان رساندن مکرر سوپرماتریس وزنی، سوپرماتریس حدی به دست آمد که بیانگر وزن نهایی و پایدار معیارها و زیرمعیارها است. با نرمال‌سازی و به توان رساندن سوپرماتریس، در نهایت سوپرماتریس حدی و وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها از معادله ۵ به دست آمد

$$\lim_{k \rightarrow \infty} W_k = W_{\infty} \quad (5)$$

که در آن

W_{∞} بیانگر سوپرماتریس حدی و وزن نهایی معیارها و زیرمعیارها است (Saaty and Vargas, 2013).

در نهایت، وزن‌های استخراج شده از سوپرماتریس حدی برای رتبه‌بندی نهایی معیارها، زیرمعیارها و سناریوهای موردبررسی استفاده شد. تمامی مراحل شامل طراحی ساختار شبکه، ورود مقایسات زوجی، محاسبه بردار ویژه، بررسی نرخ ناسازگاری، تشکیل سوپرماتریس و استخراج وزن نهایی در نرم‌افزار Super Decisions انجام شد.

۲-۶- امتیاز سناریوها

پس از محاسبه وزن زیرمعیارها، امتیاز هر یک از سناریوها نسبت به زیرمعیارهای مربوطه تعیین شد. با توجه به ماهیت متفاوت هر معیار، روش محاسبه امتیازها نیز متنوع بود. در این راستا، برای معیارهایی که نیازمند تحلیل تخصصی بودند، از ترکیبی از منابع علمی معتبر و نظرات خبرگان و اساتید دانشگاهی استفاده شد. در مواردی با ماهیت اجتماعی، مانند مقبولیت عمومی هر سناریو، داده‌ها از طریق تکمیل ۶۵۹ پرسش‌نامه در مناطق مختلف شهر تبریز گردآوری و با نرم‌افزار Stata ورژن ۱۷ و Amos ورژن ۲۴ تحلیل شد. همچنین، برای زیرمعیار ردپای کربن، بر اساس میزان مصرف انرژی، مواد مصرفی و حمل‌ونقل مرتبط محاسبه شد و

¹ Group Fuzzy Decision Making (GFDM)

² Alternatives

³ Criteria

⁴ Benefit

⁵ Cost



جدول ۱- ماتریس تصمیم‌گیری چندمعیاره سناریوها

Table 1. Multi-criteria decision-making (MCDM) matrix of scenarios

Indicator name	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃	C ₁	C ₂	C ₃
Indicator data type	Triangular fuzzy	Triangular fuzzy	Triangular fuzzy	Crisp	Triangular fuzzy	Triangular fuzzy	Triangular fuzzy	Crisp	Triangular fuzzy
Indicator weight	W:0.0103	W:0.023	W:0.0138	W:0.0132	W:0.0435	W:0.0415	W:0.0231	W:0.0227	W:0.0165
Scenario A	m:5a:4.5 b:5.5	m:1 a:0.5 b:1.5	m:5 a:4.5 b:5.5	m:0.799	m:1.5 a:1 b:2	m:1 a:0.75 b:1.25	m:5 a:4.5 b:5.5	m:1.553	m:5 a:4.5 b:5.5
Scenario B	m:4.5 a:4 b:5	m:2 a:1.5 b:2.5	m:4.5 a:4 b:5	m:0.757	m:1.5 a:1 b:2	m:1.5 a:1 b:2	m:4 a:3 b:5	m:1.473	m:4.5 a:4 b:5
Scenario C	m:4 a:3.5 b:4.5	m:5 a:4.5 b:5.5	m:3.5 a:3 b:4	m:10.8	m:5 a:4 b:6	m:2 a:1.5 b:2.5	m:3.5 a:3 b:4	m:20.9	m:4.5 a:4 b:5
Scenario D	m:3 a:2.5 b:3.5	m:3 a:2.5 b:3.5	m:2.5 a:2 b:3	m:109	m:1 a:0.75 b:1.25	m:5 a:4 b:6	m:3.5 a:2.5 b:4.5	m:694.5	m:3.5 a:3 b:4
Scenario E	m:3.5 a:3 b:4	m:2.5 a:2 b:3	m:2 a:1.5 b:2.5	m:74.6	m:2 a:1.5 b:2.5	m:3 a:2 b:4	m:3 a:2 b:4	m:348.38	m:3 a:2.5 b:3.5

ادامه جدول ۱- ماتریس تصمیم‌گیری چندمعیاره سناریوها

Count. Table 1. Multi-criteria decision-making (MCDM) matrix of scenarios

Indicator name	C ₄	C ₅	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	E ₁	E ₂	E ₃
Indicator data type	Triangular fuzzy	Triangular fuzzy	Triangular fuzzy	Triangular fuzzy	Triangular fuzzy	Triangular fuzzy	Crisp	Triangular fuzzy	Triangular fuzzy
Indicator weight	W:0.0432	W:0.0103	W:0.0184	W:0.0297	W:0.0433	W:0.0807	W:0.0199	W:0.0176	W:0.0698
Scenario A	m:5 a:4.5 b:5.5	m:5 a:4.5 b:5.5	m:5 a:4.5 b:5.5	m:1.5 a:1 b:2	m:5 a:4.5 b:5.5	m:5 a:4.5 b:5.5	m:0.742	m:5 a:4.5 b:5.5	m:5 a:4.5 b:5.5
Scenario B	m:4.5 a:4 b:5	m:4 a:3.5 b:4.5	m:4.5 a:4 b:5	m:2 a:1.5 b:2.5	m:4.5 a:4 b:5	m:4.5 a:4 b:5	m:0.382	m:4 a:3.75 b:4.25	m:4.5 a:4 b:5
Scenario C	m:4 a:3 b:5	m:3.5 a:3 b:4	m:3 a:2.5 b:3.5	m:4.5 a:4 b:5	m:4 a:3.5 b:4.5	m:3 a:2.5 b:3.5	m:0.76	m:54.5a:4.25b:4.75	m:3.5 a:3 b:4
Scenario D	m:4.75 a:4 b:5	m:2 a:1.5 b:2.5	m:3.5 a:3 b:4	m:5 a:4.5 b:5.5	m:2.5 a:2 b:3	m:3.5 a:3 b:4	m:0.556	m:4.25 a:4 b:4.5	m:4.75 a:4 b:5.5
Scenario E	m:4.25 a:3.75 b:4.75	m:3 a:2.5 b:3.5	m:3.25 a:2.5 b:4	m:4 a:3.5 b:4.5	m:3.25 a:2.75 b:3.75	m:4 a:3.5 b:4.5	m:0.428	m:3.5a:3.25 b:3.75	m:3 a:2.5 b:3.5

بی‌مقیاس‌سازی شدند. در این مرحله، با توجه به نوع معیار، برای معیارهای سود و هزینه از روابط متفاوت استفاده شد تا مقدار در بازه [۰،۱] تبدیل شوند (Safari et al., 2023).

(جدول ۱) به‌عنوان مبنای تحلیل شکل گرفت. پس از تشکیل ماتریس تصمیم، برای امکان مقایسه‌پذیری معیارهایی با مقیاس‌ها و واحدهای متفاوت، داده‌ها با استفاده از معادله ۶ نرمال‌سازی و



عملکرد سناریوها در هر معیار را فراهم می‌سازد و به بررسی میزان پایداری رتبه‌بندی‌ها در فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره کمک می‌کند (Demir et al., 2024, Hani et al., 2023).

۳- نتایج

۳-۱- وزن معیارها و زیرمعیارها

وزن نهایی معیارها و زیرمعیارهای تصمیم‌گیری با بهره‌گیری از روش ANP و با استفاده از نرم‌افزار Super Decisions محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است. این وزن‌ها بیانگر اهمیت نسبی هر یک از معیارها در فرایند انتخاب سناریوی بهینه تأمین آب هستند.

بر اساس نتایج به‌دست آمده، در میان معیارهای اصلی، معیار فنی با وزن ۰/۱۱۵۷ بیشترین اهمیت را به خود اختصاص داده است. پس از آن، معیارهای اقتصادی (۰/۱۰۸۹)، اجتماعی (۰/۱۰۷۳) و محیط‌زیستی (۰/۰۹۸۲) در رتبه‌های بعدی قرار دارند، در حالی که معیار سیاسی با وزن ۰/۰۲۹۵ کمترین اهمیت را از دیدگاه تصمیم‌گیران کسب کرده است. سهم نسبی هر یک از معیارها در فرایند تصمیم‌گیری در شکل ۲ نمایش داده شده است.

در سطح زیرمعیارها نیز با توجه به شکل ۳، نتایج نشان می‌دهد که هزینه نگهداری و راهبری (D₄) با وزن ۰/۰۸۰۷، حفظ سلامت مصرف‌کننده (E₃) با وزن ۰/۰۶۹۸ و میزان تولید پساب (B₂) با وزن ۰/۰۴۳۵ بیشترین وزن‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. این موضوع بیانگر آن است که علاوه بر ملاحظات اقتصادی، توجه به سلامت عمومی و پیامدهای زیست‌محیطی نیز در فرایند تصمیم‌گیری اهمیت زیادی دارد.

در مجموع، تحلیل نتایج نشان می‌دهد که در ارزیابی سناریوهای تأمین آب، کارایی فنی و پایداری اقتصادی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مورد توجه تصمیم‌گیران قرار گرفته‌اند و در کنار آن، ابعاد اجتماعی به‌ویژه سلامت و پذیرش عمومی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. در مقابل، ملاحظات سیاسی نسبت به سایر معیارها سهم محدودتری در فرایند تصمیم‌گیری داشته‌اند. به‌طور کلی، این نتایج نشان می‌دهد که انتخاب سناریوی بهینه مستلزم توجه هم‌زمان به پایداری اقتصادی، ارتقای سلامت عمومی و کاهش اثرات زیست‌محیطی است.

$$(6) \quad \begin{cases} r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} & \text{برای معیار مثبت} \\ r_{ij} = \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}} & \text{برای معیار منفی} \end{cases}$$

پس از نرمال‌سازی، نرم‌افزار GFDM مطابق منطق داخلی خود، روش رتبه‌بندی را به‌طور خودکار از میان دو رویکرد روش جمع وزنی ساده^۱ و TOPSIS^۲ انتخاب می‌کند. بر اساس قاعده پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار، اگر تعداد گزینه‌ها کمتر از نصف تعداد معیارها باشد، به دلیل کارایی بیشتر، روش SAW و در غیر این صورت روش TOPSIS به کار گرفته می‌شود (Zarghaami et al., 2007). در این پژوهش، با توجه به وجود ۵ گزینه و ۱۸ معیار، شرط مذکور برقرار بوده و نرم‌افزار روش SAW را انتخاب کرد. در SAW، امتیاز هر سناریو از ترکیب مقدار نرمال شده با وزن معیارها (به صورت جمع وزنی) محاسبه می‌شود و بدین ترتیب، امتیاز نهایی هر گزینه به دست می‌آید. در گام پایانی، مقدار فازی حاصل از محاسبات با انجام فرایند غیر فازی‌سازی^۳ به مقدار قطعی تبدیل شد. سپس نرم‌افزار GFDM با اتکا به امتیاز نهایی هر سناریو، گزینه‌ها را رتبه‌بندی کرد و سناریویی که بالاترین امتیاز قطعی را به دست آورد، به عنوان گزینه برتر معرفی شد.

۲-۸- تحلیل حساسیت

به منظور ارزیابی حساسیت سناریوها نسبت به معیارهای فنی، اقتصادی، محیط‌زیستی، اجتماعی و سیاسی، تحلیل حساسیت انجام شد. وزن زیرمعیارها پیش‌تر با استفاده از نرم‌افزار Super Decisions محاسبه شده بود و این مقدار به عنوان وزن زیرمعیارها در نرم‌افزار GFDM وارد شدند. همچنین، مقدار عملکرد هر سناریو نسبت به زیرمعیارها در ماتریس تصمیم‌گیری ثبت شد. به منظور سنجش اثر هر معیار به صورت مستقل، در هر مرحله تنها امتیاز زیرمعیارهای مرتبط با همان معیار حفظ شد و مقدار مربوط به سایر زیرمعیارها صفر در نظر گرفته شد. سپس امتیاز نهایی سناریوها مجدداً محاسبه و مقایسه شد. این روش امکان ارزیابی مستقل

¹ Simple Additive Weighting (SAW)

² Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

³ Defuzzification



جدول ۲- وزن‌های نهایی معیارها و زیرمعیارها (نتایج خروجی نرم‌افزار Super Decisions به روش ANP)

Table 2. Final weights of criteria and sub-criteria (ANP results from Super Decisions)

Criterion	Sub-criterion	Sub-criterion final weight (Limiting)	Criterion final weight (Limiting)
Political (A)	Acceptance by policymakers (A ₁)	0.010266	0.029469
	Availability of infrastructure (A ₂)	0.023036	
	Need for legal adjustments (A ₃)	0.013792	
Environmental (B)	Carbon footprint (B ₁)	0.013175	0.098205
	Wastewater generation (B ₂)	0.043531	
	Solid waste generation (B ₃)	0.041500	
Technical (C)	System reliability & stability (C ₁)	0.023082	0.115746
	Energy consumption (C ₂)	0.022648	
	Regional compatibility (C ₃)	0.016531	
	Quality of produced water (C ₄)	0.043175	
	Skilled operator requirement (C ₅)	0.010310	
Economic (D)	Government expenditure (D ₁)	0.018352	0.108919
	Consumer expenditure (D ₂)	0.029650	
	Initial investment cost (D ₃)	0.043292	
	Operation & maintenance cost (D ₄)	0.080715	
Social (E)	Public acceptance (E ₁)	0.019916	0.107302
	Accessibility for general public (E ₂)	0.017626	
	Protection of consumer health (E ₃)	0.069761	

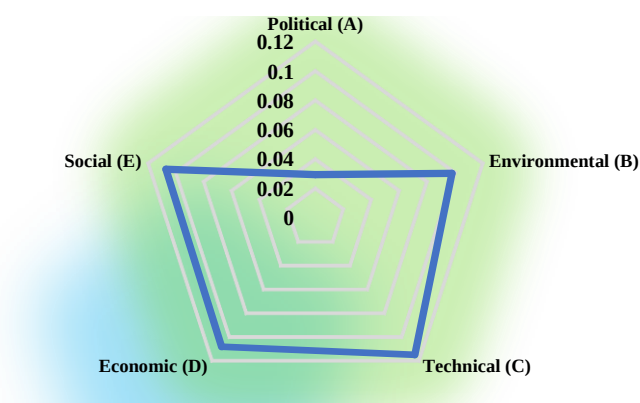


Fig. 2. Final weights of the evaluation criteria

شکل ۲- وزن نهایی هریک از معیارها

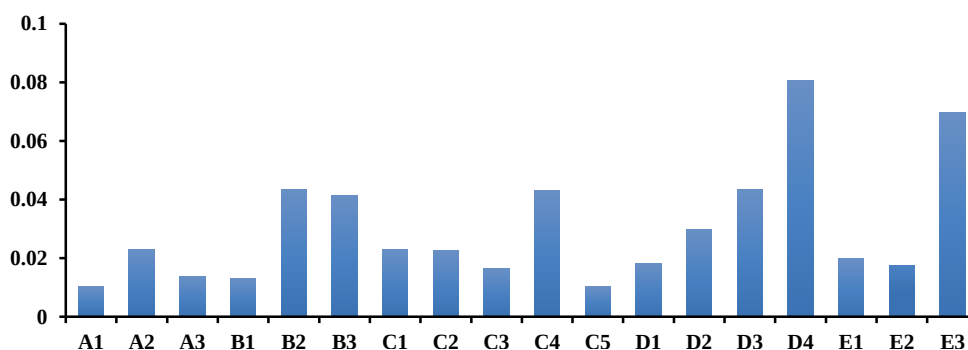


Fig. 3. Final weights of the sub-criteria

شکل ۳- وزن هریک از زیرمعیارها



و آب بسته‌بندی در ظروف چندبار مصرف (سناریو E) در رتبه‌های بعدی جای گرفته‌اند.

این نتایج نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن هم‌زمان معیارهای فنی، اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی و سیاسی، سناریوی شبکه توزیع مجزا به‌عنوان گزینه‌ای کارآمدتر، توانسته بیشترین امتیاز را به خود اختصاص دهد. این برتری را می‌توان به عواملی نظیر کارایی بیشتر در تأمین پایدار آب، کاهش وابستگی به فرایندهای پرمصرف و همچنین مقبولیت نسبی در میان مصرف‌کنندگان نسبت داد.

در مقابل، سناریوی استفاده از آب بسته‌بندی در ظروف چندبار مصرف (سناریو E)، علی‌رغم داشتن برخی مزایای زیست‌محیطی در مقایسه با ظروف یک‌بار مصرف، به دلیل چالش‌هایی نظیر نیاز به زیرساخت‌های جمع‌آوری، شست‌وشو و توزیع مجدد و همچنین هزینه‌های مرتبط، امتیاز کمتری کسب کرده و در رتبه آخر قرار گرفته است.

همچنین، میزان اختلاف امتیاز میان سناریوها که در شکل ۴ ارائه شده، بیانگر فاصله معنادار بین گزینه‌های مختلف بوده و برتری نسبی سناریو A نسبت به سایر گزینه‌ها را به‌خوبی نشان می‌دهد.

جدول ۴- رتبه‌بندی سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب بر اساس

نتایج نرم‌افزار GFDM

Table 4. Ranking of alternative drinking-water supply scenarios based on the results of the GFDM software

Rank	Score	Scenario
1	0.8014	A
2	0.7476	D
3	0.7381	B
4	0.6852	C
5	0.6082	E

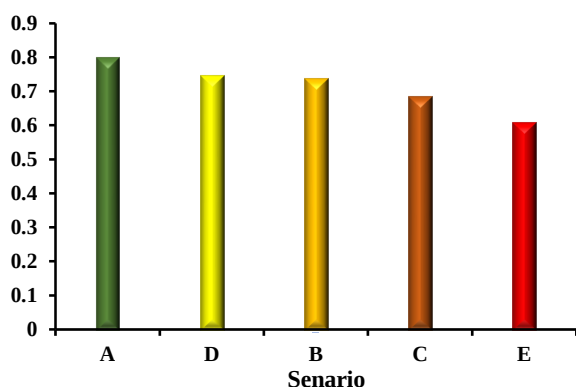


Fig. 4. Ranking of scenarios based on GFDM results
شکل ۴- رتبه‌بندی سناریوها بر اساس نتایج GFDM

۳-۲- نتایج بررسی نرخ ناسازگاری (CR)

در این پژوهش، به‌منظور بررسی میزان سازگاری قضاوت‌های خبرگان در مقایسات زوجی، نرخ ناسازگاری (CR) برای تمامی ماتریس‌ها با استفاده از نرم‌افزار Super Decisions محاسبه شد. مطابق جدول ۳ نتایج نشان داد که مقدار نرخ ناسازگاری برای معیارهای اصلی برابر با صفر و برای زیرمعیارهای اقتصادی، محیط‌زیستی و اجتماعی به ترتیب برابر با ۰/۰۶۸، ۰/۰۶۸ و ۰/۰۶۸ به دست آمده است که همگی در محدوده مطلوب قرار دارند. همچنین مقدار نرخ ناسازگاری برای زیرمعیارهای فنی و سیاسی به ترتیب ۰/۱۶۵ و ۰/۱۶۵ محاسبه شد که با توجه به پیچیدگی روابط در ساختار شبکه و تعداد مقایسات انجام شده، در محدوده قابل قبول برای روش ANP قرار می‌گیرد. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که قضاوت‌های خبرگان، سطح سازگاری مناسبی داشته و وزن‌های حاصل از تحلیل ANP دارای اعتبار لازم برای ادامه تحلیل هستند.

جدول ۳- نتایج بررسی نرخ ناسازگاری (CR) برای معیارها و زیرمعیارها

Table 3. Results of the consistency ratio (CR) assessment for criteria and sub-criteria

Cluster / Criteria	Inconsistency ratio (CR)	Consistency status
Main criteria	0.000	Desirable
Economic sub-criteria	0.068	Desirable
Environmental sub-criteria	0.002	Desirable
Social sub-criteria	0.068	Desirable
Technical sub-criteria	0.165	Within acceptable range
Political sub-criteria	0.165	Within acceptable range

۳-۳- نتایج رتبه‌بندی سناریوها جایگزین تأمین آب

مطابق نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار GFDM و بر اساس جدول ۴، سناریوی شبکه توزیع مجزای آب شرب (سناریو A) با کسب بیشترین امتیاز در رتبه نخست قرار گرفته است. پس از آن، سناریوی آب بسته‌بندی در ظروف یک‌بار مصرف (سناریو D) در جایگاه دوم قرار دارد و به ترتیب سناریوهای ایستگاه‌های محلی تأمین آب (سناریو B)، سیستم‌های تصفیه آب خانگی (سناریو E)



به‌منظور بررسی دقیق‌تر رفتار سناریوها، تحلیل حساسیت با تمرکز بر معیار محیط‌زیستی انجام شد که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است.

بر اساس این نتایج، سناریوی شبکه توزیع مجزای آب شرب (سناریو A) با کسب بالاترین امتیاز (۸۳/۳۹) در رتبه نخست قرار گرفته است. در مقابل، سناریوی سیستم‌های تصفیه آب خانگی (سناریو C) با امتیاز (۳۱/۱۵) پایین‌ترین جایگاه را به خود اختصاص داده است. همچنین، سناریوهای ایستگاه‌های محلی تأمین آب شرب (سناریو B)، آب بسته‌بندی در ظروف یک‌بارمصرف (سناریو D) و آب بسته‌بندی در ظروف چندبارمصرف (سناریو E) به ترتیب در رتبه‌های ۲ تا ۴ قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهد که سناریو A به دلیل بهره‌گیری از زیرساخت‌های متمرکز، کاهش نیاز به بسته‌بندی و حمل‌ونقل و در نتیجه کاهش مصرف منابع و تولید پسماند، از منظر محیط‌زیستی عملکرد بهتری دارد. در مقابل، سناریو C به دلیل مصرف انرژی در مقیاس خانگی و کارایی پایین‌تر در مدیریت منابع، امتیاز کمتری کسب کرده است. سناریوهای مبتنی بر آب بسته‌بندی نیز، به‌ویژه به دلیل مصرف مواد پلاستیکی و فرایندهای تولید و توزیع، در رتبه‌های میانی قرار گرفته‌اند. برای درک بهتر میزان اختلاف امتیاز میان سناریوها، نتایج به‌صورت گرافیکی شکل ۶ نیز ارائه شده است که تفاوت عملکرد گزینه‌ها را از منظر محیط‌زیستی به‌خوبی نشان می‌دهد.

جدول ۶- نتایج تحلیل حساسیت سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب

نسبت به معیار محیط‌زیستی

Table 6. Sensitivity analysis results for alternative drinking-water supply scenarios with respect to the environmental criterion

Environmental (B)		
Rank	Scenario	Point
1	A	83.39
2	B	68.93
3	D	53.08
4	E	35.85
5	C	31.15

۳-۴-۳- بررسی حساسیت سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب نسبت به معیار فنی

به‌منظور بررسی دقیق‌تر رفتار سناریوها، تحلیل حساسیت با تمرکز بر معیار فنی انجام شد که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است.

۳-۴-۴- آنالیز حساسیت سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب نسبت به معیارهای تصمیم‌گیری

۳-۴-۱- بررسی حساسیت سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب نسبت به معیار سیاسی

به‌منظور بررسی دقیق‌تر رفتار سناریوها و ارائه بینشی جامع برای تصمیم‌گیران، تحلیل حساسیت با تمرکز بر معیار سیاسی انجام شد. نتایج این تحلیل در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، از منظر معیار سیاسی، سناریو C با بالاترین امتیاز (۸۴/۲۳) در رتبه نخست قرار دارد و پس از آن سناریوهای D و E به ترتیب جایگاه‌های دوم و سوم را به خود اختصاص داده‌اند. در مقابل، سناریو A کمترین امتیاز را در این معیار کسب کرده است. برای درک بهتر اختلاف امتیاز بین سناریوها، نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- نتایج تحلیل حساسیت سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب

نسبت به معیار سیاسی

Table 5. Sensitivity analysis results based on the political criterion

Political (A)		
Rank	Scenario	Point
1	C	84.23
2	E	70.62
3	D	67.92
4	B	54.79
5	A	43.22

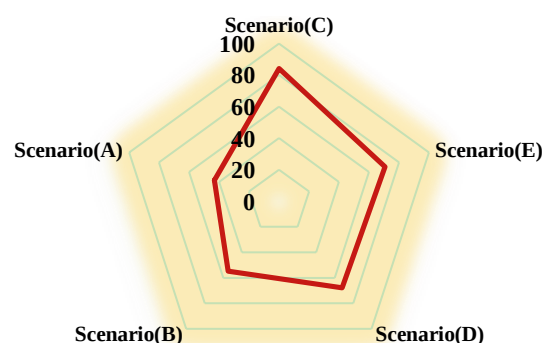


Fig. 5. Scenario scores based on sensitivity analysis of the political criterion

شکل ۵- امتیاز سناریوها بر اساس تحلیل حساسیت معیار سیاسی

۳-۴-۲- بررسی حساسیت سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب نسبت به معیار محیط‌زیستی



جدول ۷- نتایج تحلیل حساسیت سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب

نسبت به معیار فنی

Table 7. Sensitivity analysis results for alternative drinking-water supply scenarios with respect to the technical criterion

Technical (C)		
Rank	Scenario	Point
1	A	93.93
2	B	88.21
3	D	69.03
4	E	66.12
5	C	59.52

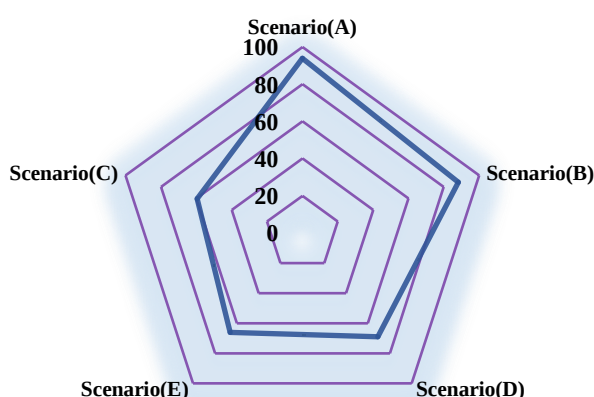


Fig. 7. Scenario scores based on sensitivity analysis of the technical criterion

شکل ۷- نتایج تحلیل حساسیت بر اساس معیار فنی

۳-۴-۴- بررسی حساسیت سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب نسبت به معیار اقتصادی

به منظور بررسی دقیق تر رفتار سناریوها، تحلیل حساسیت با تمرکز بر معیار اقتصادی انجام شد که نتایج آن در جدول ۸ ارائه شده است. ایستگاههای محلی تأمین آب شرب (سناریو B) و شبکه توزیع مجزای آب شرب (سناریو A) به ترتیب در رتبه های سوم تا پنجم قرار گرفته اند.

این نتایج نشان می دهد که سناریوهای D و E به دلیل عدم نیاز به سرمایه گذاری گسترده در زیرساخت های جدید توزیع و بهره گیری از ساختارهای موجود یا بازار محور، از نظر اقتصادی عملکرد بهتری دارند. در مقابل، سناریو A به دلیل نیاز به توسعه شبکه مجزا، هزینه های سرمایه گذاری اولیه و هزینه های نگهداری و بهره برداری بالاتر، کمترین امتیاز را در این معیار کسب کرده است.

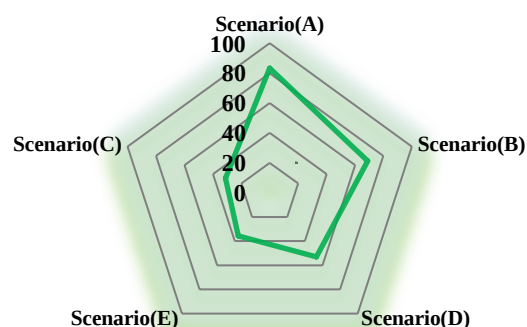


Fig. 6. Scenario scores based on sensitivity analysis of the environmental criterion

شکل ۶- نتایج تحلیل حساسیت بر اساس معیار محیط زیست

بر اساس این نتایج، سناریوی شبکه توزیع مجزای آب شرب (سناریو A) با کسب امتیاز ۹۳/۹۳ و با اختلافی قابل توجه نسبت به سایر گزینه ها، در رتبه نخست قرار گرفته است. پس از آن، سناریوی ایستگاه های محلی تأمین آب شرب (سناریو B) با امتیاز ۸۸/۲۱ در جایگاه دوم قرار دارد. همچنین، سناریوهای آب بسته بندی در ظروف یک بار مصرف (سناریو D)، آب بسته بندی در ظروف چند بار مصرف (سناریو E) و سیستم های تصفیه آب خانگی (سناریو C) به ترتیب در رتبه های سوم تا پنجم قرار گرفته اند.

این نتایج نشان می دهد که سناریوهای A و B از نظر شاخص های فنی، از جمله پایداری سیستم، کیفیت آب تولیدی و قابلیت اطمینان، عملکرد مطلوب تری نسبت به سایر گزینه ها دارند. در مقابل، سناریو C به دلیل وابستگی به عملکرد تجهیزات خانگی و محدودیت های بهره برداری، کمترین امتیاز را در این معیار کسب کرده است.

برای درک بهتر میزان اختلاف امتیاز میان سناریوها، نتایج به صورت گرافیکی در شکل ۷ نیز ارائه شده است که به خوبی برتری نسبی سناریوهای برتر را نشان می دهد.

بر اساس این نتایج، سناریوی آب بسته بندی در ظروف یک بار مصرف (سناریو D) با کسب امتیاز ۸۰/۹۳ در رتبه نخست قرار گرفته است. پس از آن، سناریوی سیستم های تصفیه آب خانگی (سناریو C) با امتیاز ۸۰/۳۴ در جایگاه دوم قرار دارد. همچنین، سناریوهای آب بسته بندی در ظروف چند بار مصرف (سناریو E)،



همچنین، سناریوهای سیستم‌های تصفیه آب خانگی (سناریو C) و آب بسته‌بندی در ظروف چندبار مصرف (سناریو C) در رتبه‌های چهارم و پنجم قرار گرفتند.

این نتایج بیانگر آن است که سناریو A به دلیل دسترسی آسان، تأمین پیوسته آب باکیفیت مطلوب و عدم نیاز به تغییر الگوی مصرف، بالاترین سطح مقبولیت و پذیرش اجتماعی را دارد. در مقابل، سناریو E به دلیل وابستگی به فرایند بازگشت ظروف، نیاز به مشارکت فعال مصرف‌کنندگان و محدودیت‌های اجرایی، کمترین امتیاز را در این معیار کسب کرده است. سناریوهای D و B نیز به دلیل سهولت نسبی دسترسی و آشنایی بیشتر کاربران با این روش‌ها، در رتبه‌های میانی قرار گرفتند.

برای درک بهتر میزان اختلاف امتیاز میان سناریوها، نتایج به صورت گرافیکی در شکل ۹ نیز ارائه شده است که تفاوت عملکرد گزینه‌ها را از منظر اجتماعی به خوبی نشان می‌دهد.

جدول ۹- نتایج تحلیل حساسیت سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب

نسبت به معیار اجتماعی

Table 9. Sensitivity analysis results for alternative drinking-water supply scenarios with respect to the social criterion

Social (E)		
Rank	Scenario	Point
1	A	99.56
2	D	90.87
3	B	81.06
4	C	79.53
5	E	62.15

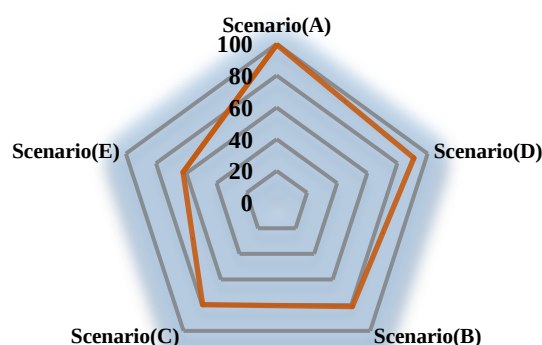


Fig. 9. Scenario scores based on sensitivity analysis of the social criterion

شکل ۹- نتایج تحلیل حساسیت بر اساس معیار اجتماعی

برای درک بهتر میزان اختلاف امتیاز میان سناریوها، نتایج به صورت گرافیکی در شکل ۸ نیز ارائه شده است که تفاوت عملکرد گزینه‌ها را از منظر اقتصادی به خوبی نشان می‌دهد.

۳-۴-۵- بررسی حساسیت سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب نسبت به معیار اجتماعی

به منظور تکمیل فرایند ارزیابی، تحلیل حساسیت با تمرکز بر معیار اجتماعی انجام شد که نتایج آن در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۸- نتایج تحلیل حساسیت سناریوهای جایگزین تأمین آب شرب نسبت به معیار اقتصادی

Table 8. Sensitivity analysis results for alternative drinking-water supply scenarios with respect to the economic criterion

Economic (D)		
Rank	Scenario	Point
1	D	80.93
2	C	80.34
3	E	72.46
4	B	67.58
5	A	66.24

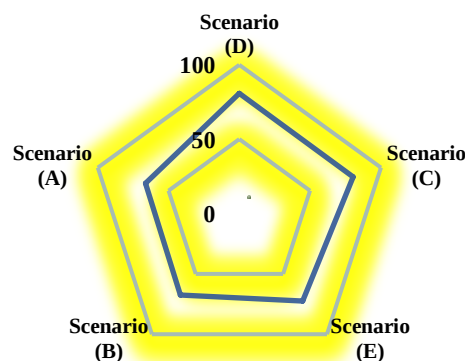


Fig. 8. Scenario scores based on sensitivity analysis of the economic criterion

شکل ۸- نتایج تحلیل حساسیت بر اساس معیار اقتصادی

بر اساس این نتایج، سناریوی شبکه توزیع مجزای آب شرب (سناریو A) با کسب امتیاز بسیار بالا (۹۹/۵۶) در رتبه نخست قرار گرفت. پس از آن، سناریوهای آب بسته‌بندی در ظروف یکبار مصرف (سناریو D) و ایستگاه‌های محلی تأمین آب شرب (سناریو B) به ترتیب در جایگاه‌های دوم و سوم قرار دارند.

۴- بحث

یافته‌های این پژوهش نشان داد که تصمیم‌گیری در مورد روش‌های جایگزین تأمین آب شرب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، فرایندی پیچیده و چندبعدی است. بخشی از این پیچیدگی به پیشینه طولانی استفاده از روش‌های سنتی تأمین آب با هزینه کم برای مصرف‌کنندگان باز می‌شود؛ موضوعی که به شکل‌گیری عادات و ترجیحات اجتماعی منجر شده است. علاوه بر این، رویکردها و سیاست‌های مدیریتی مسئولان و میزان سازگاری زیرساخت‌های موجود با روش‌های نوین نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. از این رو، دستیابی به یک راهکار پایدار و موردقبول برای عموم نیازمند در نظر گرفتن هم‌زمان ابعاد فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و سیاسی است. نتایج وزنی معیارها بیانگر آن است که ابعاد فنی (۰/۱۱۵۷)، اقتصادی (۰/۱۰۸۹) و اجتماعی (۰/۱۰۷۳) بیشترین اولویت را از دیدگاه تصمیم‌گیران داشته‌اند، در حالی که ابعاد زیست‌محیطی (۰/۰۹۸۲) و سیاسی (۰/۰۲۹۵) اهمیت نسبی کمتری یافته‌اند. این الگو نشان‌دهنده آن است که در شرایطی که منابع آب تحت فشار تغییر اقلیم قرار دارند، پایداری عملیاتی، مدیریت هزینه‌ها و پذیرش اجتماعی بیش از ملاحظات سیاسی یا حتی زیست‌محیطی در تصمیم‌گیری‌ها تعیین‌کننده هستند.

در سطح زیرمعیارها، هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری (۰/۰۸۰۷)، سلامت مصرف‌کننده (۰/۰۶۹۸) و تولید پساب (۰/۰۴۳۵) بیشترین وزن را به خود اختصاص دادند. این نتایج بیانگر آن است که تصمیم‌گیران علاوه بر مدیریت مالی، نگرانی قابل توجهی نسبت به سلامت عمومی و اثرات زیست‌محیطی دارند. در مقابل، معیارهایی مانند پذیرش سیاست‌گذاران (۰/۰۱۰۲) و نیاز به نیروی متخصص (۰/۰۱۰۳) کمترین اهمیت را داشتند که نشان می‌دهد تصمیم‌گیران بیشتر به پایداری اقتصادی-اجتماعی و اعتماد عمومی توجه دارند تا به پیچیدگی‌های نهادی یا فنی.

از نظر رتبه‌بندی کلی، شبکه توزیع مجزا (سناریو A) با امتیاز ۰/۸۰۱۴ در رتبه نخست قرار گرفت و هم‌زمان در معیارهای فنی (۹۳/۹۳)، اجتماعی (۹۹/۵۶) و زیست‌محیطی (۸۳/۳۹) نیز عملکرد برتر داشت. این نتیجه نشان می‌دهد که ایجاد شبکه‌های مستقل شرب می‌تواند هم‌زمان کیفیت آب، اعتماد عمومی و سازگاری با تغییر اقلیم را تضمین کند. در مقابل، آب بسته‌بندی

یک بار مصرف (سناریو D) با امتیاز ۰/۷۴۷۶ دوم شد، اما در معیار اقتصادی (۸۰/۹۳) رتبه نخست را داشت. سیستم‌های تصفیه خانگی (سناریو C) اگرچه در رتبه چهارم قرار گرفتند (۰/۶۸۵۲)، ولی از نظر سیاسی (۸۴/۲۳) بالاترین امتیاز را کسب کردند. این ناهمگونی بیانگر آن است که هیچ گزینه‌ای، برتری مطلق ندارد و انتخاب نهایی وابسته به مصالحه میان معیارها است.

پژوهش‌های انجام شده در کشورهای مختلف نشان داده‌اند که روش‌های نوین و جایگزین در مقایسه با رویکردهای سنتی و متعارف با در نظر گرفتن معیارهای فنی، اقتصادی و اجتماعی می‌توانند کارایی، تاب‌آوری و پایداری بیشتری در تأمین آب شهری ایجاد کنند (Behzadian et al., 2014, He et al., 2023). Savun- Hekimoğlu et al., 2021 نتایج این پژوهش نیز تأکید می‌کند که ارتقای سیستم‌های موجود از طریق رویکردهای نوین می‌تواند مسیر مؤثری برای دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب با بهره‌گیری از GMCDM باشد (Armas Vargas et al., 2023). Lee et al., 2023

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که تصمیم‌گیری در زمینه تأمین پایدار آب شرب در مناطق تحت فشار تغییر اقلیم و کاهش منابع آب که پیشینه طولانی استفاده از روش‌های سنتی تأمین آب با هزینه پایین برای مصرف‌کنندگان دارند، نیازمند رویکردی چندمعیاره، گروهی و مبتنی بر مشارکت ذی‌نفعان است. نتایج وزنی معیارها آشکار کرد که پایداری فنی، کارایی اقتصادی و پذیرش اجتماعی سه ستون اصلی تصمیم‌گیری هستند، در حالی که عوامل سیاسی و ابعاد زیست‌محیطی در عمل اهمیت کمتری یافته‌اند.

رتبه‌بندی سناریوها بیانگر آن است که شبکه مجزای شرب (سناریو A)، به دلیل برتری هم‌زمان در معیارهای فنی، اجتماعی و زیست‌محیطی، پایدارترین سناریو محسوب می‌شود. یکی از دلایل این برتری می‌تواند شباهت بالای آن با ساختار متعارف تأمین آب شرب در شهر تبریز و در نتیجه ایجاد احساس پیوند و مقبولیت بیشتر در میان شهروندان و مسئولان باشد. با این حال، سایر گزینه‌ها نیز دارای مزایای نسبی هستند؛ به‌ویژه آب بسته‌بندی یک بار مصرف (سناریو D) از نظر اقتصادی و سیستم‌های تصفیه خانگی (سناریو C)



هستند، کاربرد داشته باشد و به‌عنوان چارچوبی برای طراحی سیاست‌های سازگاری با اقلیم و تقویت تاب‌آوری شهری استفاده شود.

۶-ق‌ردانی

به این‌وسيله نويسندگان از تمامی افرادی که در انجام و تکمیل این پژوهش یاری کردند، صمیمانه قدردانی می‌کنند. راهنمایی‌های ارزشمند، نظرات سازنده و حمایت‌های مداوم آنان نقش به‌سزایی در ارتقای کیفیت این پژوهش داشته است.

از نظر پذیرش سیاسی که می‌توانند در شرایط خاص یا در ترکیب با سایر رویکردها مورد توجه قرار گیرند.

در نتیجه، برای تغییر و جایگزینی روش‌های سنتی تأمین آب، مصالحه میان معیارهای چندگانه و مشارکت فعال تصمیم‌گیران و ذی‌نفعان، شرط اساسی دستیابی به گزینه‌های پایدار و مورد پذیرش عموم است. این رویکرد نه تنها موجب کاهش هزینه‌ها و مدیریت بهینه منابع می‌شود، بلکه با تأمین آب باکیفیت بالا برای شرب، ارتقای سلامت عمومی را نیز به همراه دارد. علاوه بر این، می‌تواند برای طیف گسترده‌ای از شهرهای خشک و نیمه‌خشک در سطح جهان که با فشارهای ناشی از تغییر اقلیم و کاهش منابع آب مواجه

References

- Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A. and Karakouzian, M., 2024. Projected climate change impacts on the number of dry and very heavy precipitation days by Century's End: a case study of Iran's Metropolises. *Water*, 16(16), 2226. <https://doi.org/10.3390/w16162226>.
- Armas Vargas, F., Nava, L. F., Gómez Reyes, E., Olea-Olea, S., Rojas Serna, C., Sandoval Solís, S. et al., 2023. Water and environmental resources: a multi-criteria assessment of management approaches. *Water*, 15(16), 2991. <https://doi.org/10.3390/w15162991>.
- Behzadian, K., Kapelan, Z., Venkatesh, G., Brattebø, H. and Sægrov, S., 2014. WaterMet: a tool for integrated analysis of sustainability-based performance of urban water systems. *Drinking Water Engineering and Science Discussions*, 7, 1–26. <https://doi.org/10.5194/dwesd-7-1-2014>.
- Bojer, A. K., Abshare, M. W. and Nadarajah, S., 2025. Evaluating the effect of climate change and fast population growth on water supply and demand in Jimma town, Ethiopia, using the WEAP modeling tool. *Journal of Water and Climate Change*, 16(4), 1586–1617. <https://doi.org/10.2166/wcc.2025.751>.
- Chavoshian, A., Hashemi, H., Hosseinzadeh, F. and Zamani Sabzi, H., 2024. Emergency water supply during disasters in Iran: a multi-criteria group decision analysis. *AQUA–Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(11), 2212–2228. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.229>.
- Das, J., Umamahesh, N. V., Pu, J. H. and Pandey, M., 2025. *Climate Change Impact on Water Resources*. Vol. 561. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-97-9180-4>.
- Demir, G., Chatterjee, P. and Pamucar, D., 2024. Sensitivity analysis in multi-criteria decision making: a state-of-the-art research perspective using bibliometric analysis. *Expert Systems with Applications*, 237, 121660. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121660>.
- Diogo, A. F., Resende, R. A. and Oliveira, A. L., 2021. Optimised selection of water supply and irrigation sources—a case study on surface and underground water, desalination, and wastewater reuse in a sahelian coastal arid region. *Sustainability*, 13(22), 12696. <https://doi.org/10.3390/su132212696>.
- El-Rawy, M., Batelaan, O., Al-Arifi, N., Alotaibi, A., Abdalla, F. and Gabr, M. E., 2023. Climate change impacts on water resources in arid and semi-arid regions: a case study in Saudi Arabia. *Water*, 15(3), 606. <https://doi.org/10.3390/w15030606>.



- Feizizadeh, B., Omarzadeh, D., Ronagh, Z., Sharifi, A., Blaschke, T. and Lakes, T., 2021. A scenario-based approach for urban water management in the context of the COVID-19 pandemic and a case study for the Tabriz metropolitan area, Iran. *Science of The Total Environment*, 790, 148272. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148272>.
- Hamidifar, H., Ghorbani, M. K., Bakhshandeh, M. A. and Gholami, S., 2023. A multi-criteria multidimensional model for optimal selection of rural water supply systems. *AQUA–Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(6), 1042–1056. <https://doi.org/10.2166/aqua.2023.028>.
- Hani, H. M., Nour El Din, M. M., Khalifa, A. and Elalfy, E., 2023. Sensitivity analysis for multi-criteria decision analysis framework for site selection of aquifer recharge with reclaimed water. *Sustainability*, 15(6), 5399. <https://doi.org/10.3390/su15065399>.
- He, B., Zheng, H. and Guan, Q., 2023. Evaluation of future-integrated urban water management using a risk and decision analysis framework: a case study in denver–colorado metro area (DCMA). *Water*, 15(22), 4020. <https://doi.org/10.3390/w15224020>.
- Lee, Y. C., Leite, F. and Lieberknecht, K., 2023. Prioritizing selection criteria of distributed circular water systems: a fuzzy based multi-criteria decision-making approach. *Journal of Cleaner Production*, 417, 138073. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138073>.
- Pazouki, P., Teshnizi, E. S., Bertone, E., Helfer, F. and Stewart, R. A., 2022. Multi-criteria decision making for a holistic assessment of sustainable alternatives in SWRO desalination: a case study. *Desalination*, 544, 116127. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116127>.
- Perveen, Sh. and Ul-Haque, A., 2023. Drinking water quality monitoring, assessment and management in Pakistan: a review. *Heliyon*, 9(3), e13872. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13872>.
- Piri, J., Haji, Gh., Sharifnejad, M. and Kiani Hekmat, R., 2025. Investigation of parameters affecting the economic approach and the costs of virtual water imports in Iran for key agricultural products. *Journal of Water and Wastewater*, 36(2), 107–127. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.551827.3519>.
- Rosa, L. and Sangiorgio, M., 2025. Global water gaps under future warming levels. *Nature Communications*, 16, 1192. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56517-2>.
- Saaty, T. L., 2005. Making and validating complex decisions with the AHP/ANP. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 14, 1–36. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0179-6>.
- Saaty, T. L. and Vargas, L. G., 2013. *Decision Making with the Analytic Network Process*. Vol. 195. Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7279-7>.
- Safari, S., Sharafati, A., Mosaferi, M., Zarghami, M. and Gilani, N., 2026. Alternative urban drinking water supply scenarios under climate change: evaluation of carbon footprint and energy demands. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 24, 10. <https://doi.org/10.1007/s40201-026-00977-1>.
- Safari, S., Mosaferi, M., Javadi, S., Zarghami, M. and Jahangiri, M., 2023. Multi-criteria assessment of urban water supply network vulnerability to biological attacks. *Journal of Water and Wastewater*, 34(1), 110–127. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2022.351591.3276>.
- Savun-Hekimoğlu, B., Erbay, B., Hekimoğlu, M. and Burak, S., 2021. Evaluation of water supply alternatives for Istanbul using forecasting and multi-criteria decision making methods. *Journal of Cleaner Production*, 287, 125080. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125080>.
- Srivastava, A., Parmar, D. and Pamucar, D., 2023. Comparing multi-criteria models for ranking the performance of India's water supply utilities. *Utilities Policy*, 84, 101652. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101652>.
- Zarghaami, M., Ardakanian, R. and Memariani, A., 2007. Fuzzy multiple attribute decision making on water resources projects case study: ranking water transfers to Zayanderud Basin in Iran. *Water International*, 32(2), 280–293. <https://doi.org/10.1080/02508060708692207>.



Żywiec, J., Szpak, D., Wartalska, K. and Grzegorzek, M., 2024. The Impact of climate change on the failure of water supply infrastructure: a bibliometric analysis of the current state of knowledge. *Water*, 16(7), 1043. <https://doi.org/10.3390/w16071043>.

