



A Resilient Urban Planning Framework for Coping with Water Scarcity by Integrating Decision Intelligence, Participatory Governance, and Indigenous Knowledge: A case study of Yazd

Saeedeh Moayedfar¹ , Mojtaba Samadinejad Stahbanati²

1. (Corresponding Author) Department of Geography, Meybod University, Meybod, Iran

Email: moayedfar@meybod.ac.ir

2. Department of Geography, Meybod University, Meybod, Iran

Email: mojtabasamadi82@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:

Research Paper

Article History:

Received:

17 April 2026

Received in revised form:

28 May 2026

Accepted:

10 July 2026

Available online:

14 August 2026

Keywords:

Resilient Urban Planning,
Decision Intelligence,
Indigenous Knowledge,
Grey Multi-Criteria Group
Decision-Making
(GMCDM),
Water Scarcity Risk
Management,
Yazd.

ABSTRACT

Water scarcity management in the Central Plateau of Iran, particularly in the Yazd metropolis, has evolved from a purely hydrological challenge into a systemic crisis with deep socio-ecological, institutional, and historical dimensions. Traditional, linear urban planning approaches have weakened water resilience due to their inability to integrate inherent uncertainties and indigenous knowledge into decision-making processes. Aiming to bridge this theoretical-applied gap, this study develops a resilient urban planning framework based on the integration of three key components: "decision intelligence," "participatory water governance," and "indigenous knowledge." The methodology relies on a four-phase algorithm. First, following a systematic literature review based on the PRISMA 2020 protocol (encompassing 47 articles) and structured Nominal Group Technique (NGT) sessions with 14 experts, 13 initial criteria were identified. Subsequently, criteria screening was performed using Fuzzy Delphi, and group modeling was implemented by combining G-AHP (for criteria weighting) and G-TOPSIS (for strategy ranking) within a grey environment. Qualitative criteria such as "social acceptance of change," "maintainability of qanats," and "institutional transparency" formed the core pillars of the model. The results indicated that the criterion "annual groundwater deficit" holds the highest importance, with a weight of 0.217. Furthermore, the strategy of "education and community-based participation" (S3) was identified as the optimal alternative with a final closeness coefficient of 0.791, while the "rehabilitation of qanats" strategy (S2) ranked third due to operational and severe hydrological constraints. Multivariate sensitivity analysis (Monte Carlo simulation) revealed that the final ranking is highly fragile regarding social and institutional criteria, underscoring the vital necessity of institutionalizing stakeholder participation. The operational framework developed in this study provides a scalable model for resilient planning in other arid-region cities possessing a rich heritage of indigenous knowledge.

Citation: Beheshti Asl, S., & Imani Shamloo, J. (2026). Defining the Dimensions and Influential Components of Smart Cities with an Emphasis on Energy Efficiency. *Journal of Future City, Indigenous Thought*, 2 (1), 179-196. <http://doi.org/10.22034/future.2026.24675.1043>



© The Author(s)

Publisher: Yazd University

Extended Abstract

Introduction

Water scarcity risk management in Iran's Central Plateau, particularly in the Yazd metropolis, has evolved from a merely hydrological challenge into a systemic, multidimensional issue with profound socio-ecological, institutional, and historical dimensions. Yazd, as a historical symbol of adaptation and innovation in water management, faces unique hydro-political challenges where the qanat infrastructure represents a heritage of thousands of years of living experience in a desert environment, forming an integrated socio-economic and institutional system. Traditional risk management approaches and linear urban planning models have lost their effectiveness due to their inability to integrate inherent uncertainties and accumulated indigenous knowledge into decision-making processes, thereby weakening urban water resilience. The concept of urban resilience, as a new paradigm in urban planning, offers significant capacity for redefining the water scarcity problem by focusing on adaptation, learning, and transformation in urban systems rather than traditional crisis control. This research aims to fill this theoretical-practical gap by developing an urban resilient planning framework for water scarcity in Yazd based on the integration of three key components consisting of decision intelligence, participatory water governance, and indigenous knowledge.

Methodology

This research is applied-developmental in terms of objective and mixed quantitative-qualitative in terms of data nature, utilizing grey group multi-criteria decision-making methods within a descriptive-analytical structure based on a four-phase algorithm. In the first phase, the problem was structured using expert-purposive sampling to form a balanced, multi-stakeholder decision-making group of fourteen experts categorized into four specialized sub-groups including five hydrology specialists, three government managers and urban planners, four traditional farmers and qanat

custodians, and two environmental and cultural heritage experts. In the second phase, a systematic literature review based on the PRISMA 2020 protocol was conducted across Scopus, Web of Science, and Science Direct databases, capturing forty-seven final qualified articles covering both local Yazd-centric and global arid-region contexts, which was followed by two structured Nominal Group Technique sessions facilitated by the corresponding author to mitigate the dominance effect among participants. This combined phase yielded thirteen initial criteria across six dimensions including hydrological, economic, social, technical, institutional-governance, and indigenous knowledge, which were screened via a two-round Fuzzy Delphi method to retain seven final criteria. In the third phase, experts independently completed pairwise comparison matrices to eliminate relational biases, and grey numbers were utilized to capture epistemic uncertainties where weighting was performed via Grey Analytic Hierarchy Process and the ranking of four alternative strategies was executed through Grey Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution, evaluating quantitative criteria through operationalized empirical units and qualitative criteria via five-point Likert scales. In the fourth phase, the structural stability of the ranking was evaluated using one-way sensitivity analysis and a multivariate Monte Carlo simulation with one thousand iterations.

Results and discussion

The weight calculations indicated that the criterion of annual groundwater deficit held the highest importance with a weight of 0.217, measured empirically in million cubic meters per year, whereas the land subsidence rate measured in centimeters per year held the lowest weight of 0.093. The total weight of non-technical criteria including social, institutional, and indigenous knowledge equaled 0.345, demonstrating the panel's prioritization of socio-institutional dimensions in the water scarcity problem of Yazd. Through the grey ranking process, the strategy of education and participation of local communities was identified as the optimal alternative with a

closeness coefficient of 0.791, followed by wastewater recycling in second place with a coefficient of 0.555, revitalization of qanats in third place with a coefficient of 0.441, and modern smart irrigation technologies in fourth place with a coefficient of 0.142. Crucially, the third-place ranking of qanat revitalization, despite its high theoretical value in the literature, reveals a critical reality captured by the grey model, as the experts penalized this strategy due to substantial annual maintenance costs, an acute shortage of specialized indigenous technicians, urban property-right conflicts, and the severe drawdown of the water table which renders rapid qanat recovery less realistic compared to the immediate, high-volume yields of wastewater recycling. The multivariate sensitivity analysis demonstrated that the supremacy of the community-based strategy is highly stable, retaining the top rank in 94.2 percent of Monte Carlo runs, though the overall model showed fragility regarding changes in the weights of social acceptance of change and institutional transparency, which underscores that institutionalizing public participation is an absolute necessity for water resilience in Yazd, aligning with integrated governance concepts and echoing severe hydro-bankruptcy warnings from previous regional studies.

Conclusion

This research, by reviving the traditional governance principles of Yazd's qanats including transparency, participation, and openness in a structured modern format via the Nominal Group Technique, demonstrates that dynamic tradition can provide an effective response to today's hydro-political challenges. However, the operational reality of the model indicates that indigenous, eco-centric infrastructures cannot solve modern metropolitan crises in isolation and must be integrated into complementary policy packages alongside modern technical solutions like wastewater recycling, proving that grey decision intelligence can successfully bridge the gap between hard empirical data and soft qualitative indigenous insights under high-uncertainty environments. The developed

framework provides an operational, scalable model for urban resilient planning across other arid and semi-arid regions globally, despite its limitations which include the reliance on aggregated basin-level hydrological data rather than neighborhood-specific metrics, logistical hurdles in bridging communication gaps between traditional farmers and state officials, and the exclusion of direct predictive climate change scenarios. Future research directions should focus on integrating grey multi-criteria methods with system dynamics modeling to simulate long-term feedback loops, conducting a localized post-implementation pilot evaluation of the community-participation strategy within Yazd's historic core, incorporating stochastic uncertainty parameters and international climate change scenarios up to the horizon of 2050, and designing a web-based, intelligent decision support system tailored for municipal water authorities.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

چارچوب برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری در مواجهه با کم‌آبی با تلفیق هوش تصمیم‌گیری، حکمروایی مشارکتی و دانش بومی، مطالعه موردی: شهر یزد

سعیده مؤیدفر^۱ ✉، مجتبی صمدی نژاد اصطهباناتی^۲

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه میبد، میبد، ایران. رایانامه: moayedfar@meybod.ac.ir

۲- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه میبد، میبد، ایران. رایانامه: mojtabasamadi82@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۱/۲۸

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۴/۱۹

تاریخ چاپ:

۱۴۰۵/۰۵/۲۳

واژگان کلیدی:

برنامه‌ریزی تاب‌آور
شهری، هوش
تصمیم‌گیری،
تصمیم‌گیری چندمعیاره
گروهی،
دانش بومی،
مدیریت ریسک کم‌آبی،
یزد.

مدیریت ریسک کم‌آبی در فلات مرکزی ایران، به‌ویژه در شهر یزد، از یک چالش صرفاً هیدرولوژیک به مسئله‌ای سیستمی با ابعاد عمیق اجتماعی-اکولوژیک، نهادی و تاریخی تبدیل شده است. رویکردهای سنتی و خطی برنامه‌ریزی شهری به دلیل ناتوانی در ادغام عدم قطعیت‌های ذاتی و دانش بومی در فرایندهای تصمیم‌گیری، تاب‌آوری آبی را تضعیف کرده‌اند. این پژوهش با هدف تدوین چارچوب برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری، به تلفیق سه مؤلفه «هوش تصمیم‌گیری»، «حکمروایی مشارکتی آب» و «دانش بومی» می‌پردازد. روش‌شناسی پژوهش متکی بر یک الگوریتم چهار فاز است؛ ابتدا پس از مرور نظام‌مند ادبیات مبتنی بر استاندارد PRISMA (شامل ۴۷ مقاله) و جلسات ساختاریافته گروه اسمی (NGT) با ۱۴ خبره، ۱۳ معیار اولیه شناسایی شد. سپس غربالگری معیارها با دلفی فازي انجام و مدل‌سازی گروهی با تلفیق روش‌های G-AHP (برای وزن دهی) و G-TOPSIS (برای رتبه‌بندی ۴ استراتژی) در محیط خاکستری پیاده‌سازی گردید. معیارهای کیفی نظیر «پذیرش اجتماعی تغییر»، «قابلیت نگهداری قنات‌ها» و «شفافیت نهادی» ارکان کلیدی مدل را تشکیل دادند. نتایج نشان داد معیار کسری تراز سالانه آب زیرزمینی با وزن ۰٫۲۱۷، بیشترین اهمیت را دارد. همچنین، استراتژی «آموزش و مشارکت جوامع محلی» با ضریب نزدیکی ۰٫۷۹۱، به‌عنوان بهینه‌ترین گزینه شناسایی شد، درحالی‌که استراتژی احیای قنات‌ها، به دلیل چالش‌های عملیاتی و هیدرولوژیکی در رتبه سوم قرار گرفت. تحلیل حساسیت چندمتغیره (مونت کارلو) حاکی از شکنندگی رتبه‌بندی نسبت به معیارهای اجتماعی و نهادی است که تأکید مضاعف بر ضرورت نهادینه‌سازی مشارکت ذی‌نفعان دارد. چارچوب عملیاتی این پژوهش، الگویی کاربردی برای برنامه‌ریزی تاب‌آور در سایر شهرهای مناطق خشک با پیشینه دانش بومی فراهم می‌سازد.

استناد: مؤیدفر، سعیده و صمدی نژاد اصطهباناتی، مجتبی. (۱۴۰۵). چارچوب برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری در مواجهه با کم‌آبی با تلفیق هوش تصمیم‌گیری، حکمروایی مشارکتی و دانش بومی، مطالعه موردی: شهر یزد. *دو فصلنامه شهر آینده، اندیشه بومی*، ۲ (۱)، ۱۷۹-۱۹۶.

<http://doi.org/10.22034/future.2026.24675.1043>

مقدمه

فلات مرکزی ایران با اقلیمی ذاتاً خشک و شکننده، همواره عرصه منازعه میان نیازهای توسعه و محدودیت‌های منابع طبیعی بوده است. در این میان، شهر یزد به‌عنوان نمادی از مقاومت و نوآوری در مدیریت آب، با چالش‌های منحصربه‌فردی روبرو است. زیرساخت قنات‌ها، که میراث هزاران سال تجربه زیسته در محیط بیابانی است، نه‌تنها یک دستاورد مهندسی، بلکه نظامی اجتماعی-اقتصادی و نهادی کاملاً یکپارچه را شکل داده است (مسعودی و برزگر، ۱۳۹۴: ۸۷). این شبکه پیچیده که بر پایه توزیع عادلانه، شفافیت در بهره‌برداری و ذخیره‌سازی هوشمندانه آب بنا شده، اکنون تحت تأثیر تغییر اقلیم و تحول الگوی مصرف شهری و صنعتی، بار دیگر موردتوجه قرار گرفته است (Saatsaz, 2020). آنچه تمدن یزد را در طول تاریخ متمایز ساخته، نه صرفاً توانمندی‌های مهندسی، بلکه «نظام حکمرانی آب» مبتنی بر سه عنصر شفافیت، مشارکت عمومی و گشودگی بوده است؛ عناصری که ساختار اجتماعی-حقوقی مقسم‌های آب، میراب‌ها و شوراهای سنتی قنات را هدایت می‌کرده است (زاهدی، ۱۳۸۶: ۵۶). این نظام سنتی دقیقاً با اصول کلیدی حکمروایی خوب شهری در نظریات معاصر همخوانی دارد.

علی‌رغم سرمایه‌گذاری‌های گسترده در زیرساخت‌های نوین آبی نظیر سدسازی و انتقال آب، آسیب‌پذیری سیستم تأمین، توزیع و مصرف آب در یزد نه‌تنها کاهش نیافته، بلکه به دلیل تشدید وابستگی به منابع بیرونی، ماهیتی پیچیده‌تر و شکننده‌تر یافته است. بررسی‌های هیدرولوژیکی و ارزیابی‌های بیلان آب نشان می‌دهد که دشت یزد-اردکان به‌عنوان زون اصلی تمرکز جمعیت و صنعت استان، طبق گزارش سال ۱۴۰۳ با کسری مخزن سالانه موازنه آب بالغ بر ۲۴۴ میلیون مترمکعب مواجه بوده است؛ این در حالی است که در سالیان گذشته کسری مخزن تجمعی سفره‌های زیرزمینی استان ۹ میلیارد و ۸۷۵ میلیون مترمکعب بوده که این یک هشدار جدی است (شرکت آب منطقه‌ای یزد، ۱۴۰۳)؛ امری که منجر به افت مستمر و سالانه سطح آب‌های زیرزمینی به میزان متوسط ۵۰ تا ۷۰ سانتی‌متر (و در برخی کانون‌های بحرانی و متراکم تا بیش از ۱ متر) شده است (Dehghan Dehnavi & Khani, 2025). این تخلیه شدید سفره‌های آب زیرزمینی، پیشران اصلی وقوع پدیده مخاطره‌آمیز فرونشست زمین و ایجاد شکاف‌های طولی در حریم و محدوده قانونی شهر یزد بوده است. از سوی دیگر، رویکردهای مدیریت مدرن و توسعه کالبدی شتابان در نیم‌قرن اخیر، به قیمت رهاسدگی و تخریب حریم بیش از ۷۵ درصد از رشته قنات‌های حیاتی درون‌شهری یزد تمام‌شده است (سمسار یزدی و لباف خانیکی، ۱۳۹۰). در غیاب این نظام‌های پایدار سنتی، بار تکلفی تأمین نیازها بر دوش حفر چاه‌های عمیق افتاده، به‌طوری‌که تخمین‌زده می‌شود در حال حاضر بیش از ۳۸۰ حلقه چاه غیرمجاز در محدوده و حریم شهر یزد فعال هستند (مرکز توسعه فناوری آب، ۱۴۰۵). این واقعیت‌های کمی نشان می‌دهند که مدل‌های مدیریتی رایج که بر مفروضات خطی بودن فرایندها استوارند، در درک دینامیک‌های غیرخطی و نقش عامل انسانی در مدیریت بحران ناکارآمد بوده‌اند. شکست این مدل‌ها در تخصیص منابع آب به‌گونه‌ای که موردپذیرش کشاورزان سنتی قرار گیرد، به تشدید اختلافات اجتماعی، رها شدن اراضی کشاورزی و تضعیف ساختار قنات‌ها انجامیده است. این امر بیانگر تناقضی اساسی است: راه‌حل‌های نوین فنی بدون در نظر گرفتن دانش بومی که ریشه در بقای صدها ساله دارد، از پایداری کمتری برخوردارند (Loucks, 2000).

در این میان، مفهوم «تاب‌آوری شهری» به‌عنوان پارادایمی نوین در برنامه‌ریزی شهری، ظرفیت بالایی برای بازتعریف مسئله کم‌آبی دارد. بر خلاف رویکردهای سنتی که بر «کنترل» و «مقابله» با بحران تأکید دارند، رویکرد تاب‌آوری بر «انطباق»، «یادگیری» و «تحول» در سیستم‌های شهری تمرکز می‌کند (Wang et al., 2024; Ekman, 2023). تاب‌آوری شهری در مواجهه با کم‌آبی به معنای توانایی شهر در حفظ عملکردهای اساسی خود در شرایط تنش آبی،

انطباق با شرایط جدید و تحول در ساختارها و فرایندها به‌گونه‌ای است که برای بحران‌های آینده آمادگی بیشتری داشته باشد (Okpa et al., 2024).

پژوهش‌های بین‌المللی اخیراً گام‌های مهمی را در زمینه بازتعریف تاب‌آوری شهری در مواجهه با مخاطرات اقلیمی برداشته‌اند. در این راستا، برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری از یک رویکرد واکنش محور و منفعلانه به سمت رویکردهای پیش‌بینانه و انطباقی متمایل شده است (Perney., 2025). توسعه سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری پیشرفته و سامانه‌های هوش تصمیم‌گیری، نقشی کلیدی در ارتقای تاب‌آوری شهری در برابر مخاطرات مرتبط با آب ایفا می‌کنند (Chang et al., 2025; Wang et al., 2024). باین‌حال، ادبیات نوظهور این حوزه تأکید می‌کند که این سیستم‌های هوشمند مدرن، زمانی به کارایی بهینه و اثربخش واقعی می‌رسند که با دانش بومی و ساختارهای محلی حکمرانی تلفیق شده و عدم قطعیت‌های رفتاری و نهادی را پوشش دهند (Naah et al., 2025; Kharmylliem, 2025). در همین راستا، مطالعات تجربی نشان داده‌اند که نهادهای جمعی بومی با بهره‌گیری از یادگیری بین نسلی و مشاهده مستمر محیطی (نفرزادگان و همکاران، ۱۳۹۸)، ظرفیت‌های تطبیقی ارزشمندی ایجاد می‌کنند که می‌تواند سیستم‌های هشدار زود هنگام مدرن را تکمیل و غنی سازد (Ekman, 2023).

دانش بومی، برخلاف تصور رایج که آن را دانشی ایستا می‌پندارند، پویا است و از تعامل مستمر انسان با طبیعت در چارچوب نهادهای جمعی محلی شکل می‌گیرد. قربانی و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای بر دشت گزیر در استان هرمزگان نشان داده‌اند که نهادهای جمعی بومی، بستری برای نوآوری‌های تطبیقی در مدیریت منابع آب ایجاد کرده‌اند. در این منطقه، شش ابتکار محلی در قالب سازه‌های سنتی، شناسایی شده که هر یک راهکاری بومی برای مهار رواناب‌های سطحی و سازگاری با کم‌آبی به شمار می‌روند. این مطالعه تأکید می‌کند که ادغام دانش بومی و دانش رسمی علمی، برنامه‌های مدیریت پایدار منابع آب را با موفقیت بیشتری همراه می‌سازد و مشارکت نخبگان محلی با سیاست‌گذاران، موفقیت حکمروایی مشارکتی آب را افزایش می‌دهد.

دهقان دهنوی و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای بر دشت یزد- اردکان، چارچوب جامعی برای ارزیابی تاب‌آوری آبی با تأکید بر ابعاد مختلف توسعه شهری و کارکردهای شهر ارائه داده‌اند. یافته‌های ایشان نشان می‌دهد که برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در این منطقه، تاب‌آوری آبی را به شدت تضعیف کرده است. از سوی دیگر، پریور و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از روش دینامیک سیستم و چارچوب DPSIR، اثرات توسعه ناپایدار شهری بر ورشکستگی آبی در یزد را مدل‌سازی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ادامه روند توسعه شهری و صنعتی با افزایش ۱۸ درصدی وابستگی به آب، باعث تشدید کم‌آبی تا ۵۰ درصد و ورشکستگی آبی تا ۹۰ درصد تا سال ۲۰۳۰ خواهد شد. این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که همسوسازی برنامه‌ریزی کاربری ارضی با محدودیت‌های منابع آبی در مناطق خشک، ضرورتی انکارناپذیر است.

خانی و همکاران (۲۰۲۳) شش معیار کلیدی دانش بومی شامل «حفاظت و پایداری»، «مدیریت یکپارچه»، «رویکرد کل‌نگر»، «مقرون‌به‌صرفه بودن»، «سازگاری» و «پویایی» را برای مدیریت منابع آب در استان یزد شناسایی و وزن دهی کرده‌اند که در این میان «مدیریت یکپارچه» بالاترین وزن را به خود اختصاص داده است. این یافته به‌روشنی نشان می‌دهد که رویکردهای بخشی و جزیره‌ای در مدیریت آب محکوم به شکست هستند. پژوهش‌های دیگری نیز به ادغام دانش بومی با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته‌اند. برای نمونه، مطالعه‌ای در تانزانیا نشان داده که دانش بومی کشاورزان درباره الگوهای رواناب و مکان‌های مناسب برای استحصال آب، می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای پشتیبانی تصمیم‌گیری عمل کرده و با استفاده از GIS مقیاس‌گذاری شود (Mbilyini et al., 2005). همچنین، آل شباب و

همکاران (۲۰۲۲) در اردن رویکردی ترکیبی از دانش بومی و تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA) را برای تعیین مکان‌های بهینه استحصال آب باران ارائه داده‌اند. این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری از دانش بومی، فرایند انتخاب مکان‌های مناسب را طولانی اما ضروری می‌سازد و ۶۶٫۵۳ درصد از حوضه مورد مطالعه دارای پتانسیل بالا تا بسیار بالا برای استحصال آب است (Al- Shabeeb et al., 2022).

با توجه به مطالعات صورت گرفته، ضرورت پژوهش حاضر در کاربست «هوش تصمیم‌گیری» در فرایند برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری نهفته است. با به‌کارگیری ابزارهای تحلیلی پیشرفته نظیر تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره گروهی (GMCDM) می‌توان به‌طور هم‌زمان به وزن دهی دقیق عوامل فنی- اقتصادی و عوامل کیفی اجتماعی- نهادی دست‌یافت (دبیری و همکاران، ۱۴۰۲). هدف این مقاله، فراتر از رتبه‌بندی صرف استراتژی‌ها، ارائه چارچوبی برای برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری است که در آن سه مؤلفه «هوش تصمیم‌گیری»، «حکمرانی مشارکتی آب» و «دانش بومی» به‌صورت یکپارچه تلفیق شوند. رویکرد مشارکتی اتخاذشده - که گروه تصمیم‌گیری آن متشکل از نمایندگان شهرداری، شرکت آب و فاضلاب، کشاورزان، شوراهای محلی و متولیان قنات‌ها است - تضمین می‌کند که استراتژی منتخب از مشروعیت اجتماعی و نهادی کافی برای اجرای پایدار برخوردار باشد (مغرب و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۴۶). این پژوهش با بهره‌گیری از چارچوب چهار فازی شامل G-AHP برای وزن دهی معیارها و G-TOPSIS برای رتبه‌بندی نهایی، نشان خواهد داد که چگونه ادغام هوشمندانه داده‌های سخت (فنی- اقتصادی) و دانش نرم (اجتماعی- بومی- نهادی) می‌تواند به تدوین سیاست‌های تاب‌آورتر در برابر بحران کم‌آبی در کلان‌شهر یزد و دیگر شهرهای مناطق خشک منجر شود.

به‌منظور تبیین دقیق‌تر جایگاه پژوهش حاضر در میان ادبیات علمی موجود و آشکارسازی شکاف‌های نظری و روش‌شناختی، مهم‌ترین پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی مرتبط با مدیریت منابع آب، دانش بومی و تاب‌آوری شهری در جدول ۱ خلاصه‌شده است.

جدول ۱. بررسی تعدادی از پیشینه‌های پژوهش داخلی و بین‌المللی

نویسنده و سال	محدوده مورد مطالعه	مؤلفه‌های کلیدی	روش‌شناسی	یافته‌های اصلی	محدودیت و گپ پژوهش (مبنای نوآوری پژوهش حاضر)
Mbilinyi et al. (۲۰۰۵)	تانزانیا	دانش بومی، استحصال آب باران	سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)	امکان مقیاس‌گذاری دانش بومی کشاورزان با ابزارهای مکانی	عدم توجه به ساختارهای حکمرانی شهری و ابزارهای هوش تصمیم‌گیری کمی
Al-Shabeeb et al. (۲۰۲۲)	اردن	دانش بومی، مکان‌یابی پتانسیل آب	تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDA)	افزایش پایداری و دقت مدل در صورت تلفیق با تجارب بومی	تمرکز صرف بر ابعاد هیدروژئومورفولوژیک و غفلت از تاب‌آوری اجتماعی-نهادی
پریور و همکاران (۲۰۲۳)	دشت یزد	توسعه ناپایدار، ورشکستگی آبی	دینامیک سیستم‌ها، مدل DPSIR	پیش‌بینی ورشکستگی ۹۰ درصدی آب یزد تا سال ۲۰۳۰	رویکرد کلان‌نگر و شبیه‌سازی سیستم بدون ارائه چارچوب تصمیم‌گیری عملیاتی و مشارکتی
خانی و همکاران (۲۰۲۳)	استان یزد	دانش بومی، مدیریت یکپارچه آب	تکنیک‌های وزن دهی معیارهای بومی	تأیید بالاترین وزن برای معیار «مدیریت یکپارچه»	صرفاً به شناسایی و وزن دهی معیارهای بومی پرداخته و چارچوب برنامه‌ریزی شهری ارائه نداده است
دهقان دهنوی و همکاران (۲۰۲۵)	دشت یزد- اردکان	تاب‌آوری آبی، توسعه شهری	چارچوب ارزیابی ابعادی	تضعیف شدید تاب‌آوری آبی در اثر برداشت بی‌رویه	عدم استفاده از ابزارهای هوش تصمیم‌گیری گروهی (GMCDM) برای تلفیق نظرات ذی‌نفعان محلی
قربانی و همکاران (۲۰۲۵)	دشت گزیر، هرمزگان	نهادهای جمعی بومی، سازگاری	تحلیل کیفی ابتکارات محلی	اثبات نقش نوآوری‌های بومی در مهار رواناب‌ها	تمرکز بر مناطق روستایی و کشاورزی و عدم تعمیم دهی به بافت و حکمرانی

پیشیده شهری	ایران	دانش بومی، معیشت وابسته به آب، مشارکت	مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و آن‌تروپی شانون	دانش بومی در مدیریت آب بالاترین وزن را داشته است.	تمرکز صرف بر اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها بدون ارائه چارچوب عملیاتی برای مدیریت شهری؛ عدم تلفیق با هوش تصمیم‌گیری و حکمروایی شهری
-------------	-------	---	--	---	---

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، گپ پژوهشی آشکاری در زمینه «تلفیق هم‌زمان هوش تصمیم‌گیری گروهی با سرمایه‌های نرم (دانش بومی و حکمروایی آب) در قالب یک چارچوب عملیاتی برای برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری» وجود دارد. پژوهش حاضر دقیقاً با هدف پر کردن این خلاء، پویایی‌های کیفی دانش بومی را به مدل‌های سخت کمی متصل می‌کند.

مبانی نظری

در دهه‌های اخیر، مفهوم «تاب‌آوری شهری» به‌عنوان پارادایمی نوین در برنامه‌ریزی شهری، ظرفیت بالایی برای بازتعریف این مسئله ارائه داده است. تاب‌آوری شهری به توانایی یک سیستم شهری برای جذب شوک‌ها و تنش‌ها، بازیابی عملکردهای اساسی، انطباق با شرایط جدید و تحول در ساختارهای خود به‌گونه‌ای که برای بحران‌های آینده آمادگی بیشتری داشته باشد، تعریف می‌شود (Khani et al., 2023; Parivar et al., 2023). در زمینه مدیریت منابع آب، مفهوم تاب‌آوری آبی به‌عنوان شاخه‌ای تخصصی از تاب‌آوری شهری مطرح شده است. نظریه‌های کنونی تأکید دارند که تاب‌آوری آبی در ساختار شهری، بازتابی از ظرفیت کل سیستم اجتماعی-اکولوژیک برای انطباق پویا با تنش‌های هیدرولوژیک بدون فروپاشی کارکردهای حیاتی آن است. در این راستا، چارچوب WARATA شش ظرفیت کلیدی برای سیستم‌های شهری در مواجهه با اختلالات شامل تحمل‌کنندگی، جذب، بازآورانه، تطبیقی، تحولی و پیش‌بینی‌کننده را تعریف می‌کند و بر ضرورت گذار از رویکردهای صرفاً مهندسی به رویکردهای یکپارچه اجتماعی-اکولوژیک تأکید دارد.

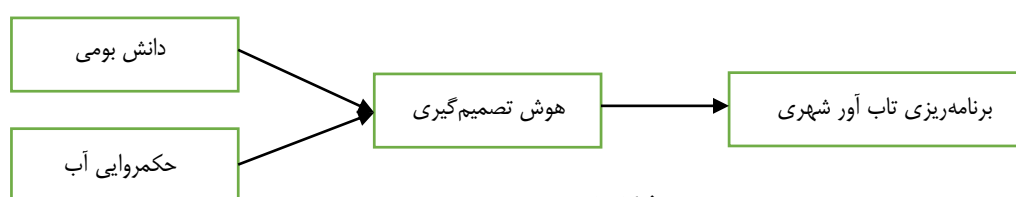
این فرایند، نقش تعیین‌کننده «حکمروایی آب» و «دانش بومی» را در کانون توجه قرار می‌دهد. حکمروایی آب به مجموعه فرایندها، ساختارها و نهادهایی اطلاق می‌شود که از طریق آن‌ها تصمیمات مرتبط با آب اتخاذ و اجرا می‌گردند. در دهه‌های اخیر، پارادایم حکمروایی آب از رویکردهای متمرکز و بالا به پایین به سمت رویکردهای مشارکتی، چند سطحی و مبتنی بر ذی‌نفعان حرکت کرده است. در این میان، دانش بومی به‌عنوان یکی از ارکان کلیدی حکمروایی مؤثر آب در مناطق خشک شناسایی شده است.

پژوهش‌های معاصر نشان می‌دهد که دانش بومی و محلی را نه به‌عنوان یک نظام دانش مکمل، بلکه به‌عنوان نظامی هم‌ارز با دانش رسمی علمی باید درک و عملیاتی کرد. بر این اساس، شکست در ادغام دانش بومی در سیاست‌های آب، یک شکست «دانش‌محور» نیست، بلکه شکستی «حکمروایی محور» است که ریشه در موانع نهادی، حقوقی و عدم تقارن قدرت دارد. مطالعات تجربی نشان داده‌اند که نهادهای جمعی بومی با بهره‌گیری از یادگیری بین نسلی و مشاهده

مستمر محیطی، ظرفیت‌های تطبیقی ارزشمندی ایجاد می‌کنند که می‌تواند سیستم‌های مدرن مدیریت آب را تکمیل و غنی سازد.

در کنار تاب‌آوری و حکمروایی، «هوش تصمیم‌گیری» به‌عنوان رشته‌ای میان‌رشته‌ای و نوظهور، چارچوبی برای بهینه‌سازی نتایج تصمیم‌گیری فراهم می‌آورد. در واقع هوش تصمیم‌گیری با بازتعریف رویکرد «انسان در چرخه»، بستری را فراهم می‌آورد تا بتوان ترجیحات ذهنی، سرمایه‌های اجتماعی و معیارهای برخاسته از دانش بومی را که ماهیتی کیفی و توصیفی دارند، به زبان ریاضی و داده‌های سخت‌مهندسی ترجمه کرد (ژیان و همکاران، ۱۴۰۲). تصمیم‌گیری چندمعیاره گروهی، به‌عنوان یکی از شاخه‌های کاربردی هوش تصمیم‌گیری، بر چگونگی تجمیع و هماهنگ‌سازی نظرات و اوزان خبرگان متنوع (که هر یک دارای دانش، تجربیات و ترجیحات متفاوتی هستند) تأکید دارد (Aslan & Sepetçioğlu, 2022) و تضمین می‌کند که خروجی نهایی نه تنها از نظر فنی بهینه باشد، بلکه از نظر اجتماعی نیز مشروعیت و قابلیت اجرای بالایی کسب کند.

بنابراین، چارچوب تلفیقی این پژوهش بر مبنای یک نظام سلسله‌مراتب کارکردی بر تعامل چهار مؤلفه کلیدی استوار است: برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری به‌عنوان چشم‌انداز، خروجی و مقصد نهایی سیستم است؛ حکمروایی مشارکتی آب به‌عنوان فرایند، قواعد بازی را تعیین می‌کند تا ذی‌نفعان بتوانند تعامل کنند؛ دانش بومی به‌عنوان سرمایه راهبردی، جریان داده‌های نرم، تجارب زیسته و معیارهای کیفی را تأمین می‌کند؛ و هوش تصمیم‌گیری به‌عنوان موتور محرک، با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره گروهی، وزن دهی و پردازش ابعاد فنی و بومی را بر عهده دارد تا خروجی‌های بهینه را برای رسیدن به هدف غایی (تاب‌آوری) تولید کند (شکل ۱).



شکل ۱. چارچوب مفهومی پژوهش

این تلفیق، تلاش می‌کند تا هم به محدودیت‌های رویکردهای صرفاً فنی-مهندسی در مدیریت کم‌آبی پاسخ دهد و هم ظرفیت نهادهای جمعی بومی و اصول حکمروایی شفاف و مشارکتی را در قالب یک چارچوب عملیاتی برای برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری در شهر یزد و سایر شهرهای مناطق خشک ارائه نماید. در این چارچوب، معیارهای تصمیم‌گیری و استراتژی‌های جایگزین، ورودی‌های اصلی برای ساخت ماتریس‌های مقایسه زوجی در روش G-AHP هستند.

درمجموع می‌توان گفت موفقیت در مدیریت ریسک کم‌آبی یزد، مستلزم گذار از رویکردهای سنتی خطی به رویکردهای تاب‌آور، مشارکتی و چندمعیاره است. برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری به‌عنوان چشم‌انداز پژوهش، ضرورت انطباق و تحول در سیستم شهری را گوشزد می‌کند، حکمروایی مشارکتی آب و دانش بومی به‌عنوان سرمایه‌های راهبردی، امکان مشروعیت اجتماعی و پایداری راهکارها را فراهم می‌آورند و در نهایت، هوش تصمیم‌گیری، ابزار تحلیلی مناسبی برای وزن دهی دقیق به معیارهای چندگانه (فنی، اقتصادی، اجتماعی، نهادی و دانش بومی) و انتخاب استراتژی بهینه فراهم می‌کند. این تلفیق چهارگانه، نوآوری اصلی پژوهش حاضر را نسبت به مطالعات پیشین نشان می‌دهد.

1Decision Intelligence

2Human-in-the-loop

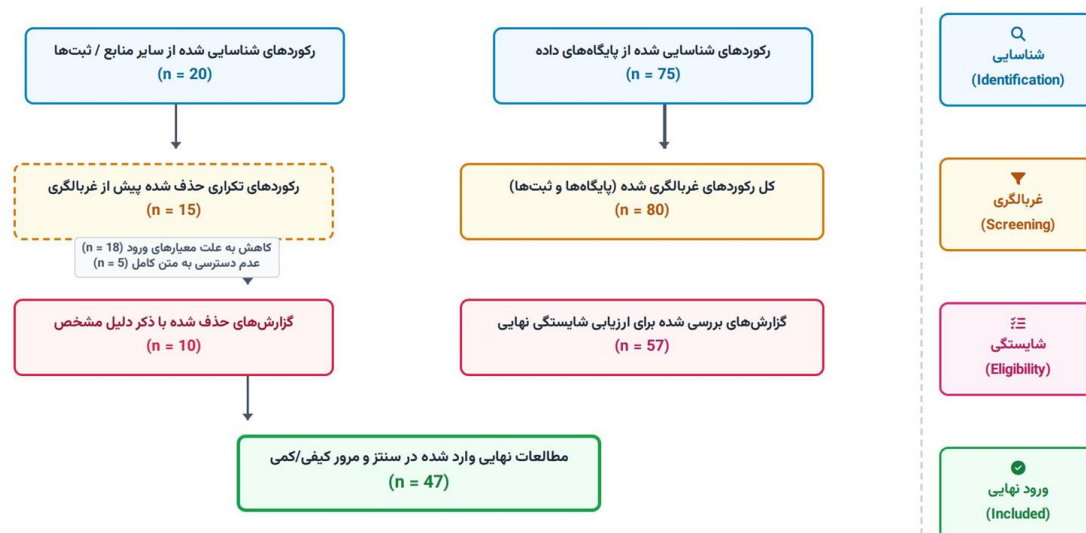
روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی - توسعه‌ای و از نظر ماهیت داده‌ها، آمیخته (کمی-کیفی) است. رویکرد کلی پژوهش، توصیفی-تحلیلی با تأکید بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره گروهی (GMCDM) می‌باشد. ساختار روش‌شناسی این پژوهش بر اساس یک الگوریتم چهار فازی طراحی شده است که با تعریف مسئله و تشکیل گروه تصمیم‌گیری آغاز می‌شود و در مراحل بعد، شناسایی و اعتبارسنجی معیارها و استراتژی‌ها، مدل‌سازی MCDM گروهی با تلفیق G-AHP و G-TOPSIS، و در نهایت تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی نتایج را در برمی‌گیرد.

در فاز نخست، مسئله پژوهش با مشارکت اولیه خبرگان تعریف و ساختاردهی شد. با توجه به ماهیت کیفی-کمی این مرحله، از روش نمونه‌گیری هدفمند مبتنی بر تخصص، جهت انتخاب اعضای پنل استفاده شد. بر خلاف روش‌های سنتی کیفی که حجم نمونه بر اساس فرایند تدریجی و اشباع نظری تعیین می‌شود، در این پژوهش به‌منظور اطمینان از بازتاب کامل طیف نظرات و پوشش جامع تمامی ابعاد مسئله (فنی، اقتصادی، اجتماعی، نهادی و دانش بومی)، حجم نمونه از پیش تعیین شده و متشکل از ۱۴ خبره در قالب چهار زیرگروه تخصصی شامل پنج کارشناس هیدرولوژی و منابع آب، سه مدیر دولتی و برنامه‌ریز شهری، چهار نماینده کشاورزان سنتی و قنات‌داران، و دو کارشناس محیط‌زیست و میراث فرهنگی در نظر گرفته شد. معیارهای انتخاب این افراد شامل داشتن حداقل ۱۰ سال تجربه مرتبط، آشنایی عمیق با بافت محلی و چالش‌های هیدروپلیتیک منطقه یزد و تمایل به مشارکت فعال در فرایند گروهی بود.

در فاز دوم، به‌منظور شناسایی معیارهای اولیه، یک مرور نظام‌مند ادبیات^۱ مبتنی بر استانداردهای بین‌المللی پریسما (PRISMA 2020) انجام شد. فرایند جستجو در پایگاه‌های استنادی Scopus، Web of Science و Science Direct با استفاده از ترکیب کلیدواژه‌های اصلی شامل ("MCDM" OR "Yazd" OR "Water Resource Management" AND "Yazd" OR "MCDM") در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۶ صورت گرفت.

پروتکل غربالگری مقالات بر اساس معیارهای شمول (مقالات اصیل پژوهشی، تمرکز بر مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از رویکردهای شاخص محور) و معیارهای طرد (مقالات مروری صرف، عدم دسترسی به متن کامل، زبان غیر انگلیسی و غیرفارسی) پیاده‌سازی شد. جریان نمودار پریسما شامل مراحل چهارگانه (شناسایی، غربالگری، ارزیابی شایستگی و مقالات نهایی) در قالب شکل ۲ ارائه شده است. از میان مقالات یافت شده، در نهایت ۴۷ مقاله واجد شرایط تشخیص داده شدند که از این تعداد، ۱۵ مقاله به‌طور خاص تمرکز بر حوضه آبریز یزد داشته و ۲۵ مقاله تجارب سطح جهانی در مناطق مشابه را پوشش می‌دادند.



شکل ۲. نمودار جریان پریسما برای مرور نظام‌مند مقالات

پس از استخراج معیارهای اولیه از مرور نظام‌مند، دو جلسه طوفان فکری با گروه تصمیم‌گیری (۱۴ خبره) برگزار شد. به‌منظور رفع چالش‌های رایج در تصمیم‌گیری‌های گروهی، به‌ویژه جلوگیری از پدیده «تسلط» برخی از اعضا یا مدیران بر نظرات دیگران، این جلسات در قالب روش گروه اسمی ساختاریافته (NGT) و به تسهیلگری نویسنده مسئول پژوهش اجرا گردید. در این روش، ایده‌ها ابتدا به‌صورت فردی و مکتوب ثبت، سپس بدون قضاوت در جلسه مطرح و پس از بحث ساختاریافته، اولویت‌بندی شدند. درنتیجه تلفیق مرور نظام‌مند و جلسات NGT، درمجموع ۱۳ معیار اولیه و ۴ استراتژی جایگزین شناسایی و معیارها در شش دسته اصلی هیدرولوژیکی، اقتصادی، اجتماعی، فنی، نهادی- حکمروایی و دانش بومی طبقه‌بندی شدند (Khani et al., 2023; Parivar et al., 2023).

سپس برای غربالگری نهایی معیارها و حذف موارد کم‌اهمیت، از روش دلفی فازی در دو دور استفاده شد. به‌منظور حفظ استقلال آرا و کنترل کامل اثر تسلط، پرسشنامه‌های دلفی فازی به‌صورت فردی، مستقل و ناشناس توزیع و جمع‌آوری گردید. در هر دور، خبرگان اهمیت هر معیار را در طیف لیکرت ۵ درجه‌ای ارزیابی کردند. معیارهایی که میانگین فازی آن‌ها بالاتر از ۳٫۵ و ضریب توافق پائل بالاتر از ۰٫۷ بود، برای فاز بعدی حفظ شدند که درنتیجه، ۷ معیار نهایی انتخاب گردید (Hwang & Yoon, 1981; Saaty, 2008).

برای معیارهای کیفی، به‌ویژه معیارهای مرتبط با دانش بومی و حکمروایی، تعریف عملیاتی مشخصی ارائه شد تا قابلیت اندازه‌گیری کمی پیدا کنند. برای نمونه، معیار «پذیرش اجتماعی تغییر» به‌عنوان درصد موافقت عمومی ذی‌نفعان با تغییر در الگوی کشت سنتی یا روش‌های توزیع آب تعریف شد و با استفاده از پرسشنامه طراحی شده بر اساس طیف لیکرت ۵ درجه‌ای و با مشارکت ۵۰ نفر از بهره‌برداران محلی اندازه‌گیری گردید (Likert, 1932). همچنین معیار «شفافیت نهادی» به‌عنوان درجه دسترسی ذی‌نفعان به اطلاعات مربوط به تخصیص آب، مصوبات کمیته‌های توزیع و مکانیسم‌های نظارت همگانی تعریف شد و با استفاده از چک‌لیست ارزیابی نهادی و مصاحبه با ۱۰ نفر از مدیران و بهره‌برداران سنجیده شد.

1Dominance Effect

2Structured Nominal Group Technique

در فاز سوم، مدل‌سازی MCDM گروهی با تلفیق دو روش G-AHP و G-TOPSIS انجام شد. استفاده از اعداد خاکستری به دلیل توانایی آن‌ها در مدل‌سازی عدم قطعیت و ابهام ذاتی در قضاوت‌های خبرگان، به‌ویژه در حوزه دانش بومی و معیارهای کیفی، انتخاب گردید (Julong, 1989; Opricovic & Tzeng, 2004).

ماتریس‌های مقایسه زوجی بر اساس مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی (Saaty, 2008) توسط هر یک از ۱۴ عضو گروه تصمیم‌گیری به‌صورت کاملاً مستقل، مجزا و بدون آگاهی از قضاوت‌های یکدیگر تکمیل گردید تا سوگیری حاصل از تعاملات جمعی حذف شود. برای تجمیع نظرات مستقل خبرگان و تشکیل ماتریس مقایسه زوجی ادغامی، از میانگین هندسی خاکستری استفاده شد (Julong, 1989). فرایند اعتبارسنجی با محاسبه نسبت سازگاری انجام شد و تنها ماتریس‌هایی با نسبت سازگاری کمتر از ۰,۱۰ پذیرفته شدند. پس از تعیین وزن خاکستری معیارها، رتبه‌بندی استراتژی‌ها با استفاده از روش G-TOPSIS انجام شد و در نهایت ضریب نزدیکی نسبی هر استراتژی محاسبه گردید که مقادیر آن بین ۰ و ۱ قرار دارد و هرچه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد، استراتژی مطلوب‌تر است.

در فاز نهایی، برای ارزیابی استحکام نتایج و بررسی حساسیت رتبه‌بندی استراتژی‌ها نسبت به تغییرات احتمالی در وزن معیارها (ناشی از تفاوت دیدگاه ذی‌نفعان)، تحلیل حساسیت در دو سطح یک‌طرفه و چندمتغیره انجام شد. در تحلیل حساسیت یک‌طرفه، وزن هر معیار به میزان $\pm 20\%$ درصد تغییر داده شد و تأثیر آن بر رتبه نهایی استراتژی‌ها بررسی گردید. در تحلیل حساسیت چندمتغیره، از شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰ تکرار استفاده شد تا پایداری و درجه اطمینان رتبه‌بندی نهایی در شرایط تغییرات هم‌زمان وزن‌ها تضمین گردد (Saltelli et al., 2008).

یافته‌ها

در این بخش، نتایج حاصل از اجرای الگوریتم چهار فازی پژوهش شامل وزن دهی معیارها با روش G-AHP، رتبه‌بندی استراتژی‌ها با روش G-TOPSIS، تحلیل تفکیکی عملکرد استراتژی‌ها و نتایج تحلیل حساسیت ارائه می‌شود. پس از فرایند اعتبارسنجی، ۷ معیار نهایی در پنج دسته و چهار استراتژی جایگزین برای مدل‌سازی انتخاب شدند که جدول ۲ این معیارها و استراتژی‌ها را به همراه اهمیت هر یک ارائه می‌دهد.

جدول ۲. معیارهای تصمیم‌گیری و استراتژی‌های جایگزین در تحقیق

بخش	شناسه	عنوان معیار / استراتژی	واحد اندازه‌گیری / مقیاس سنجش	اهمیت و پایداری منابع
معیارهای تصمیم‌گیری	H1	نرخ فرونشست زمین	سانتی‌متر در سال (cm/year)	نرخ فرونشست دشت یزد بر اساس داده‌های رادار سازمان زمین‌شناسی
	H2	کسری تراز سالانه آب زیرزمینی	میلیون مترمکعب در سال (Mm ³ /year)	میزان بیلان منفی سالانه دشت بر اساس آمار آب منطقه‌ای
	E1	بازگشت سرمایه	درصد (%)	نرخ بازده داخلی (IRR) استراتژی در بازه زمانی ۱۰ ساله
	E2	هزینه نگهداری سالانه	میلیارد ریال در سال (Billion Rials/year)	هزینه‌های جاری، تعمیرات و پایش عملیاتی راهکارها
	Soc1	پذیرش اجتماعی تغییر	کلامی (طیف ۵ درجه‌ای لیکرت)	درصد موافقت و همراهی ذی‌نفعان محلی با ساختار جدید
	G1	شفافیت نهادی	کلامی (طیف ۵ درجه‌ای لیکرت)	درجه دسترسی عمومی به اطلاعات، مصوبات و نظارت همگانی
	IK1	قابلیت نگهداری با روش‌های بومی	کلامی (طیف ۵ درجه‌ای لیکرت)	میزان اتکا به صنف مقنی‌ها و فنون سنتی بدون نیاز به تکنولوژی خارجی

S1	فناوری‌های نوین و هوشمند آبیاری	–	استفاده از سامانه‌های پایش هوشمند، سنسورهای رطوبت، داده‌کاوی و IoT
S2	احیای قنات‌ها و روش‌های سنتی	–	بازسازی و مرمت شبکه قنات‌های درون و برون‌شهری با ترکیب دانش بومی
S3	آموزش و مشارکت جوامع محلی	–	ارتقای آگاهی عمومی، تقویت مسئولیت اجتماعی و احیای نهادهای جمعی
S4	بازچرخانی و استفاده مجدد از پساب	–	بهره‌گیری از پساب تصفیه‌شده شهری در صنعت، کشاورزی حمایتی و فضای سبز

منبع: Saaty, 2008, Ghorbani, 2021, Berkes, 2019 و مقالات دیگر و جمع‌بندی نویسندگان

اجرای G-AHP برای وزن دهی معیارها

گام اول: تشکیل ماتریس‌های مقایسه زوجی خاکستری

هر یک از ۱۴ عضو گروه تصمیم‌گیری، به صورت مستقل ماتریس مقایسه زوجی ۷×۷ (برای ۷ معیار) را بر اساس مقیاس ۹ درجه‌ای ساعتی تکمیل کردند. برای تبدیل قضاوت‌های زبانی به اعداد خاکستری، از تبدیل‌های ارائه‌شده در جدول ۳ استفاده شد.

جدول ۳. تبدیل مقیاس زبانی ساعتی به اعداد خاکستری

اهمیت	عدد زبانی	عدد خاکستری متناظر
۱	اهمیت یکسان (Equal importance)	[1,1]
۳	کم‌اهمیت‌تر (Moderate importance)	[2,4]
۵	بسیار مهم‌تر (Strong importance)	[4,6]
۷	خیلی مهم‌تر (Very strong importance)	[6,8]
۹	کاملاً مهم‌تر (Extreme importance)	[8,9]
۲, ۴, ۶, ۸	مقادیر میانی (Intermediate values)	[x-1, x+1]

گام دوم: تجمیع نظرات گروهی با میانگین هندسی خاکستری

برای تجمیع ماتریس‌های مقایسه زوجی ۱۴ خبره، از میانگین هندسی خاکستری استفاده شد تا سوگیری‌های ناشی از میانگین حسابی کاهش یابد (Julong, 1989). میانگین هندسی خاکستری به صورت رابطه ۱ ارائه شده است:

$$\bar{G}_{ij} = \left[\left(\prod_{k=1}^p G_{ij}^k \right)^{1/p}, \left(\prod_{k=1}^p \bar{G}_{ij}^k \right)^{1/p} \right] \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، بخش اول فرمول، عدد خاکستری تجمیع‌شده برای مقایسه معیار i با معیار j ، و بخش دوم فرمول عدد خاکستری ارائه‌شده توسط خبره k ، و p تعداد خبرگان است.

گام سوم: محاسبه وزن‌های نهایی و بررسی سازگاری

پس از تشکیل ماتریس تجمیع‌شده، وزن نهایی هر معیار با استفاده از روش میانگین هندسی ردیف محاسبه شد. فرایند اعتبارسنجی با محاسبه نسبت سازگاری (CR) برای هر ماتریس انجام شد. از مجموع ۱۴ ماتریس اولیه، ۱۲ ماتریس دارای $CR < 0.10$ بودند و ۲ ماتریس (مرتبط با خبرگان گروه کشاورزان) پس از بازبینی و اصلاح، مجدداً وارد فرایند شدند (جدول ۴).

جدول ۴. وزن نهایی معیارها با استفاده از روش G-AHP

رتبه	وزن نهایی	معیار	شناسه
۱	۰/۲۱۷	کسری تراز سالانه آب زیرزمینی	H2
۲	۰/۱۸۶	بازگشت سرمایه	E1
۳	۰/۱۵۸	پذیرش اجتماعی تغییر	Soc1
۴	۰/۱۲۴	هزینه نگهداری سالانه	E2
۵	۰/۱۰۹	شفافیت نهادی	G1
۶	۰/۰۹۳	نرخ فرونشست زمین	H1
۷	۰/۰۷۸	قابلیت نگهداری قنات‌ها با روش‌های بومی	IK1
-	۱	مجموع	

نتایج نشان می‌دهد که معیار «کسری تراز سالانه آب زیرزمینی» (H2) با وزن ۰,۲۱۷ بالاترین اهمیت را از نظر گروه تصمیم‌گیری داشته است. مجموع وزن معیارهای غیر فنی (اجتماعی، نهادی و دانش بومی) برابر با ۳۴۵,۰ است که نشان‌دهنده توجه زیاد گروه تصمیم‌گیری به ابعاد اجتماعی- نهادی و بومی مسئله کم‌آبی در یزد می‌باشد. این یافته با پژوهش خانی و همکاران (۱۴۰۲) که بالاترین وزن را به معیار «مدیریت یکپارچه» اختصاص داده‌اند، همسو است.

اجرای G-TOPSIS برای رتبه‌بندی استراتژی‌ها

پس از تعیین وزن معیارها، از روش تاپسیس برای رتبه‌بندی چهار استراتژی جایگزین استفاده شد.

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری اولیه خاکستری

برای هر یک از ۴ استراتژی و تحت هر یک از ۷ معیار، امتیازدهی توسط گروه تصمیم‌گیری انجام شد. برای معیارهای کمی H1، H2، E1، E2 امتیازات بر اساس داده‌های واقعی و گزارش‌های رسمی (سازمان آب منطقه‌ای یزد، ۱۴۰۲) تعیین شد. برای معیارهای کیفی Soc1، G1، IK1 امتیازات بر اساس نظر جمعی خبرگان و با استفاده از طیف لیکرت ۵ درجه‌ای تعیین و به اعداد خاکستری تبدیل شدند.

گام دوم: نرمال‌سازی خطی خاکستری

ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از روش نرمال‌سازی خطی^۱ نرمال‌سازی شد. برای معیارهای سود یا مثبت (Soc1، E1، G1، IK1) و معیارهای هزینه یا منفی (E2، H2، H1) فرمول‌های جداگانه‌ای به کار گرفته شد.

گام سوم: محاسبه فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی

پس از نرمال‌سازی وزنی، فاصله هر استراتژی از راه‌حل ایده‌آل مثبت (A^+) و راه‌حل ایده‌آل منفی (A^-) با استفاده از فرمول اقلیدوسی محاسبه می‌شود:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\tilde{u}_{ij} - \tilde{u}_j^+)^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\tilde{u}_{ij} - \tilde{u}_j^-)^2}$$

که در آن d^+ و d^- به ترتیب بهترین و بدترین مقادیر نرمال شده برای معیار j هستند.

گام چهارم: محاسبه ضریب نزدیکی نسبی (C_i)

ضریب نزدیکی نسبی هر استراتژی با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شده و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

رابطه ۳

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}$$

جدول ۵. نتایج رتبه‌بندی استراتژی‌ها با استفاده از روش G-TOPSIS

رتبه	Ci (ضریب نزدیکی)	d ⁻ (فاصله از ایده‌آل مثبت)	d ⁺ (فاصله از ایده‌آل منفی)	شرح	استراتژی
۱	۰/۷۹۱	۰/۲۱۰	۰/۷۹۶	آموزش و مشارکت جوامع محلی	S3
۲	۰/۵۵۵	۰/۴۵۰	۰/۵۶۲	بازچرخانی و استفاده مجدد از پساب	S4
۳	۰/۴۴۱	۰/۵۵۰	۰/۴۳۳	احیای قنات‌ها و روش‌های سنتی پایدار	S2
۴	۰/۱۴۲	۰/۸۸۰	۰/۱۴۶	فناوری‌های نوین و هوشمند آبیاری	S1

یافته‌های این پژوهش نشان داد که استراتژی S3 (آموزش و مشارکت جوامع محلی) با ضریب نزدیکی ۰,۷۹۱ به‌عنوان بهترین استراتژی شناسایی شد. این نتیجه نشان می‌دهد که در چارچوب برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری یزد، رویکردهایی که بر مشارکت ذی‌نفعان، ارتقای آگاهی عمومی و احیای سرمایه اجتماعی تأکید دارند، به دلیل کاهش ریسک اجتماعی و حفظ شفافیت نهادی، بر رویکردهای صرفاً فنی یا صرفاً اقتصادی ترجیح داده شده‌اند. استراتژی S4 (بازچرخانی پساب) با ضریب ۰,۵۵۵ در رتبه دوم، استراتژی S2 (احیای قنات‌ها) با ضریب ۰,۴۴۱ در رتبه سوم و استراتژی S1 (فناوری‌های نوین) با ضریب ۰,۱۴۲ در رتبه چهارم قرار گرفت.

تحلیل تفکیکی عملکرد استراتژی برتر

استراتژی S3 (آموزش و مشارکت جوامع محلی) کمترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل مثبت (۰,۲۱۰) و بیشترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل منفی (۰,۷۹۶) نشان داد. این بدان معناست که این استراتژی در اکثریت قریب به اتفاق معیارها، امتیازاتی بسیار نزدیک به بهترین حالت ممکن در نظر گرفته شده توسط گروه تصمیم‌گیری را کسب کرده است. دلایل برتری این استراتژی عبارت‌اند از: در معیار «پذیرش اجتماعی تغییر» امتیاز بسیار بالایی دارد زیرا مشارکت جوامع محلی در فرایند تصمیم‌گیری، مقاومت در برابر تغییرات را کاهش می‌دهد. در معیار «شفافیت نهادی» نیز امتیاز بالایی کسب کرده زیرا فرایندهای مشارکتی، دسترسی به اطلاعات و نظارت همگانی را افزایش می‌دهند. در معیار «قابلیت نگهداری قنات‌ها» امتیاز متوسط به بالا دارد زیرا احیای نهادهای سنتی (مانند شورای قنات) باعث بهبود نگهداری می‌شود. همچنین در معیار «بازگشت سرمایه» امتیاز متوسط دارد زیرا هزینه‌های اولیه پایین بوده و بازگشت سرمایه در بلندمدت حاصل می‌شود. این یافته، این نتیجه را تداعی می‌کند که در شرایط تنش آبی مزمن در شهر یزد، استراتژی‌هایی که هم‌زمان با معیارهای هیدرولوژیکی، اجتماعی و نهادی سازگار هستند، بیشترین امتیاز را کسب می‌کنند.

مقایسه استراتژی‌های متضاد

به‌منظور درک بهتر تمایزات بین استراتژی‌ها، عملکرد دو استراتژی با رویکردهای متضاد موردبررسی قرار گرفته است. استراتژی S1 (فناوری‌های نوین و هوشمند آبیاری) با ضریب نزدیکی ۰,۱۴۲ در رتبه چهارم قرار گرفت. این استراتژی در معیار اقتصادی «بازگشت سرمایه» امتیاز بالایی کسب کرده است، اما در معیار «پذیرش اجتماعی تغییر» بدترین امتیاز را دریافت کرد، زیرا اجرای آن مستلزم تغییرات اساسی در روش‌های سنتی آبیاری و افزایش وابستگی به فناوری‌های وارداتی است که با ساختارهای اجتماعی-تاریخی یزد همخوانی ندارد. در مقابل، استراتژی S4 (بازچرخانی و استفاده مجدد از پساب) با ضریب نزدیکی ۰,۵۵۵ در رتبه دوم قرار گرفت. این استراتژی در معیار اجتماعی امتیاز نسبتاً خوبی گرفت، اما در معیار اقتصادی «هزینه نگهداری سالانه» به دلیل نیاز به زیرساخت‌های تصفیه پیشرفته و نظارت مستمر، امتیاز کمتری کسب کرد. استراتژی بهینه (S3) در ناحیه نزدیک به ایده‌آل قرار دارد که نشان‌دهنده سازش موفقیت‌آمیز بین پذیرش اجتماعی بالا و کارایی اقتصادی مناسب است.

نتایج تحلیل حساسیت

برای ارزیابی استحکام نتایج و بررسی حساسیت رتبه‌بندی استراتژی‌ها نسبت به تغییرات در وزن معیارها، تحلیل حساسیت در دو سطح یک‌طرفه و چندمتغیره انجام شد. در تحلیل حساسیت یک‌طرفه، وزن هر معیار به‌طور جداگانه به میزان $\pm 20\%$ درصد تغییر داده شد و تأثیر آن بر رتبه نهایی استراتژی‌ها موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رتبه‌بندی نهایی بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات وزن معیارهای «پذیرش اجتماعی تغییر» (S1) و «شفافیت نهادی» (G1) دارد. کاهش ۲۰ درصدی وزن این معیارها منجر به جابه‌جایی رتبه استراتژی‌های S3 و S4 می‌شود؛ به‌طوری‌که استراتژی S3 از رتبه اول به رتبه دوم تنزل می‌یابد و استراتژی S4 از رتبه دوم به رتبه اول صعود می‌کند. در مقابل، رتبه استراتژی S3 حتی با تغییرات $\pm 20\%$ درصدی در وزن معیارهای هیدرولوژیکی (H2) و اقتصادی (E1)، همچنان در رتبه اول باقی ماند که نشان‌دهنده استحکام بالای این نتیجه است. همچنین افزایش ۲۰ درصدی وزن معیار «پذیرش اجتماعی تغییر» (Soc1) تأثیری بر رتبه‌بندی نداشت و استراتژی S3 همچنان در رتبه اول قرار گرفت (جدول ۶).

جدول ۶. نتایج تحلیل حساسیت یک‌طرفه (تغییر $\pm 20\%$ در وزن معیارها)

معیار تغییر داده شده	تغییر وزن	رتبه S1	رتبه S2	رتبه S3	رتبه S4	S3 رتبه پایداری
(کسری تراز سالانه) H2	+۲۰٪	۴	۳	۱	۲	پایدار ✓
(کسری تراز سالانه) H2	-۲۰٪	۴	۳	۱	۲	پایدار ✓
(بازگشت سرمایه) E1	+۲۰٪	۴	۳	۱	۲	پایدار ✓
(بازگشت سرمایه) E1	-۲۰٪	۴	۳	۱	۲	پایدار ✓
Soc1 (پذیرش اجتماعی تغییر)	+۲۰٪	۴	۳	۱	۲	پایدار ✓
Soc1 (پذیرش اجتماعی تغییر)	-۲۰٪	۴	۳	۲	۱	شکنده ⚠
G1 (شفافیت نهادی)	-۲۰٪	۴	۳	۲	۱	شکنده ⚠

در تحلیل حساسیت چندمتغیره، از شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰ تکرار استفاده شد. در هر تکرار، وزن معیارهای اصلی (S1، G1 و IK1) به‌صورت تصادفی در بازه $\pm 50\%$ درصد وزن اولیه تغییر داده شد. نتایج نشان داد که در ۹۴٫۲ درصد از تکرارها، استراتژی S3 به‌عنوان بهترین گزینه انتخاب شده است که حاکی از استحکام بسیار بالای نتایج پژوهش می‌باشد. یافته کلیدی تحلیل حساسیت آن است که شکندگی رتبه‌بندی نسبت به معیارهای اجتماعی و نهادی، تأکیدی مضاعف بر ضرورت نهاده‌سازی مشارکت ذی‌نفعان و شفافیت در فرایندهای تصمیم‌گیری برای مدیریت پایدار کم‌آبی در یزد دارد.

بحث

یافته‌های این پژوهش نشان داد که استراتژی «آموزش و مشارکت جوامع محلی» (S3) با ضریب نزدیکی ۰٫۷۹۱ به‌عنوان بهترین گزینه برای مدیریت ریسک کم‌آبی در کلان‌شهر یزد شناسایی شده است. این نتیجه از چند جهت حائز اهمیت است:

نخست آنکه برتری استراتژی مبتنی بر مشارکت اجتماعی نشان می‌دهد که در شرایط کم‌آبی مزمن یزد، رویکردهای فنی-مهندسی به‌تنهایی پاسخگو نیستند و رویکرد تاب‌آوری که بر «انطباق»، «یادگیری» و «تحول» تأکید دارد، می‌تواند با تقویت سرمایه اجتماعی و ظرفیت‌سازی محلی، بستر چنین تحولی را فراهم آورد. این یافته با پژوهش دهقان

دهنوی و همکاران (۲۰۲۵) که نشان دادند برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در دشت یزد - اردکان، تاب‌آوری آبی را به شدت تضعیف کرده است، همسو می‌باشد.

دوم آنکه نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که رتبه‌بندی نهایی نسبت به تغییرات وزن معیارهای «پذیرش اجتماعی تغییر» و «شفافیت نهادی» بسیار شکننده است. این یافته تأکیدی مضاعف بر نقشی است که ژیان و همکاران (۱۴۰۲) برای سه عنصر «شفافیت، مشارکت عمومی و گشودگی» در نظام حکمرانی سنتی قنات‌های یزد قائل شده‌اند. به عبارت دیگر، احیای این اصول حکمرانی در قالب‌های مدرن، نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت برای موفقیت هرگونه استراتژی مدیریت آب در یزد است.

نکته واجد اهمیت و چالش‌برانگیز در رتبه‌بندی استراتژی‌ها، قرار گرفتن استراتژی «احیای قنات‌ها و روش‌های سنتی پایدار» (S2) در رتبه سوم است؛ رویکردی که علیرغم تأکید شدید مبانی نظری بر ارزش‌های تاریخی و اکولوژیک آن، پایین‌تر از استراتژی مدرن بازچرخانی پساب (S4) قرار گرفته است. تحلیل تفکیکی ماتریس تصمیم‌گیری نشان می‌دهد که این رتبه‌بندی معلول چند چالش کلیدی و واقعیت ساختاری در بافت کنونی شهر یزد است:

۱) موانع اقتصادی و هزینه‌های عملیاتی (E2): اگرچه حفر اولیه قنات در گذشته انجام شده، اما دغدغه اصلی خبرگان، هزینه‌های سرسام‌آور لایروبی، مرمت و نگهداری سالانه شبکه قنات در مواجهه با توسعه کور شهری و کور شدن مادر چاه‌هاست که امتیاز این استراتژی را در معیار هزینه نگهداری کاهش داده است.

۲) بحران مقنی‌های متخصص و متبحر: تحلیل دیدگاه خبرگان نشان داد که نبود نیروی کار متخصص نسل جدید (مقنی) و عدم تمایل جوانان به یادگیری این حرفه سنتی، قابلیت اجرای پیوسته این استراتژی را با ریسک عملیاتی مواجه کرده است.

۳) تعارضات مالکیت و توسعه هیدروپلیتیک شهری: توسعه کالبدی شهر یزد، حریم قنات را دچار مخاطره کرده و ساختار مالکیت مشاع و سنتی آب قنات با قوانین نوین توسعه شهری و مدیریت متمرکز شهرداری‌ها دچار تعارض جدی است.

۴) افت شدید سطح ایستابی (H2): به دلیل افت شدید و چند ده‌متری سفره‌های آب زیرزمینی یزد در دهه‌های اخیر (معیار H2 با وزن بالای ۰.۲۱۷)، بسیاری از قنات عملاً خشکیده یا کم دبی شده‌اند. از این رو، خبرگان پتانسیل بازدهی سریع و حجم آب قابل استحصال از طریق استراتژی بازچرخانی پساب (S4) را برای پاسخ به نیازهای فوری فضای سبز و صنعت، واقع‌گرایانه‌تر و ملموس‌تر از احیای قنات خشکیده ارزیابی کرده‌اند.

بنابراین، قرار گرفتن S2 در رتبه سوم، نفی‌کننده ارزش قنات نیست، بلکه نشان‌دهنده هوشمندی مدل G-TOPSIS در بازتاب واقعیت‌های زمینی، فنی و اقتصادی حاکم بر دشت یزد است که این یافته با پژوهش پریور و همکاران (۲۰۲۳) همسو است.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پژوهش خانی و همکاران (۲۰۲۳) که شش معیار کلیدی دانش بومی را برای مدیریت آب در یزد شناسایی و وزن دهی کرده است، نشان داد که «مدیریت یکپارچه» بالاترین وزن را به خود اختصاص داده است. یافته پژوهش حاضر با این نتیجه همسو است؛ چراکه استراتژی S3 دقیقاً از طریق ایجاد هماهنگی بین ذی‌نفعان مختلف و یکپارچه‌سازی دانش‌های متنوع، به تحقق مدیریت یکپارچه کمک می‌کند. همچنین در سطح بین‌المللی، مطالعه Mbilinyi و همکاران (۲۰۰۵) در تانزانیا نشان داد که دانش بومی کشاورزان در مورد الگوهای رواناب و مکان‌های مناسب برای استحصال آب، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری عمل کند. پژوهش حاضر با تأکید بر مشارکت قنات‌داران و کشاورزان سنتی در گروه تصمیم‌گیری، همین رویکرد را در بافت یزد دنبال کرده

است.

از نظر نوآوری، این پژوهش برای اولین بار سه مؤلفه «برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری»، «هوش تصمیم‌گیری» و «حکمرمایی آب با دانش بومی» را در یک چارچوب واحد تلفیق کرده است. بر خلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر معیارهای فنی و اقتصادی متمرکز بودند، این پژوهش معیار «شفافیت نهادی» را وارد مدل کرده است. همچنین استفاده از روش خاکستری گروهی (G-AHP و G-TOPSIS) برای مدل‌سازی، عدم قطعیت‌های ذاتی در قضاوت‌های خبرگان و انجام تحلیل حساسیت چندمتغیره با شبیه‌سازی مونت کارلو، از نوآوری‌های روش‌شناختی این پژوهش محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارائه چارچوب برنامه‌ریزی تاب‌آور شهری در مواجهه با کم‌آبی در شهر یزد، با تلفیق سه مؤلفه هوش تصمیم‌گیری، حکمرمایی مشارکتی آب و دانش بومی انجام شد. یافته‌های پژوهش به‌روشنی نشان داد که استراتژی «آموزش و مشارکت جوامع محلی» (S3) با ضریب نزدیکی ۰,۷۹۱، بهترین گزینه برای مدیریت ریسک کم‌آبی در یزد است. تحلیل حساسیت یک‌طرفه و چند متغیره (مونت کارلو) نیز ثابت کرد که رتبه‌بندی نهایی بیشترین شکنندگی و حساسیت را نسبت به معیارهای اجتماعی (پذیرش تغییر) و نهادی (شفافیت حکمرمایی) دارد؛ امری که تأکیدی مضاعف بر ضرورت نهادینه‌سازی نظام‌مند مشارکت ذی‌نفعان و ارتقای شفافیت اطلاعاتی در فرآیندهای تصمیم‌گیری کلان‌شهری دارد.

پژوهش حاضر از یک‌سو، با بازخوانی اصول حکمرانی سنتی قنات‌های یزد (شفافیت، مشارکت و گشودگی) در قالبی مدرن و ساختاریافته (روش گروه اسمی)، نشان داد که «سنت پویا» می‌تواند پاسخی کارآمد به چالش‌های هیدروپلیتیک امروز باشد. از سوی دیگر، قرار گرفتن استراتژی احیای قنات‌ها (S2) در رتبه سوم علیرغم جایگاه نظری بالا، واقعیت مهمی را آشکار ساخت: در شرایط افت شدید سفره‌های آب زیرزمینی و بحران نیروی مقنی متخصص، استراتژی‌های سنتی به‌تنهایی تکاپوی نیازهای فوری شهری را نمی‌کنند و باید در قالب یک بسته سیاستی مکمل در کنار راهکارهای مدرن (نظیر بازچرخانی پساب) قرار گیرند. این امر نشان می‌دهد که هوش تصمیم‌گیری در محیط خاکستری، توانایی بالایی در تلفیق واقع‌گرایانه داده‌های کمی و قضاوت‌های کیفی بومی دارد.

بااین‌حال، پژوهش حاضر با محدودیت‌هایی مواجه بوده است؛ ازجمله عدم دسترسی به داده‌های هیدرولوژیکی تفکیک‌شده در مقیاس محلی (محل محور) و تکیه بر آمار تجمیعی دشت، دشواری‌های هماهنگی و جلب مشارکت هم‌زمان ذی‌نفعان سنتی (کشاورزان و مقنی‌ها) در کنار مدیران دولتی در پntl خبرگان، و عدم ورود مستقیم سناریوهای تغییر اقلیم آینده به مدل ریاضی تصمیم‌گیری.

بر اساس یافته‌ها و محدودیت‌های تبیین شده، پیشنهادهای زیر برای پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود:

تلفیق روش MCDM گروهی با مدل‌سازی سیستم دینامیک برای شبیه‌سازی اثرات بلندمدت استراتژی‌ها، انجام ارزیابی پس از اجرای آزمایشی استراتژی S3 در یکی از محلات یزد، مقایسه روش‌های MCDM خاکستری و فازی در زمینه مدیریت آب یزد، اجرای چارچوب مشابه در سایر شهرهای فلات مرکزی ایران، و طراحی سامانه پشتیبانی تصمیم‌گیری مبتنی بر چارچوب این پژوهش برای مدیران شهری.

حامی مالی

این اثر حمایت مالی نداشته است.

مشارکت نویسندگان

کلیه مراحل پژوهش را بر عهده هر دو نویسنده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند هیچ‌گونه تعارض منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که در ارزیابی کیفیت مقاله نقش داشتند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- خانی، مهدی؛ هویدی، حسن؛ یآوری، احمدرضا و خانی، محمدرضا. (۱۴۰۲). مدل‌سازی برای وزن دهی مؤثرترین معیارهای ارزیابی‌شده دانش بومی با استفاده از روش BWM در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب استان یزد. *فصلنامه آب و توسعه پایدار*، ۱۰ (۳)، ۶۱-۷۴. doi: 10.22067/jwsd.v10i3.2303-1227
- دبیری، روح‌الله؛ عبقری، هیراد و قربانی، اردوان. (۱۴۰۲). مکان‌یابی عملیات مکانیکی آبخیزداری با رویکرد MCDM و روش ANP و AHP (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سقزچی چای استان اردبیل). *علوم آب و خاک*، ۲۷ (۴)، ۳۲۴-۳۹۹.
- زاهدی، محمدجواد. (۱۳۸۶). نگاهی به بنیان‌های جامعه‌شناختی نظام‌های آبیاری سنتی در ایران. *پیک نور (علوم انسانی)*، ۱. ژیان، تهمینه؛ هاشمی منفرد، سید آرمان؛ راشکی، محسن و عزیزیان، غلامرضا. (۱۴۰۲). انتخاب سیستم تصفیه فاضلاب مناسب با استفاده از G-EDAS و G-COPRAS و ادغام با روش G-AHP. *محیط‌شناسی*، ۴۹ (۳)، ۳۷۲-۳۵۳. doi: 10.22059/jes.2023.360163.1008418
- سمساریزدی، علی اصغر و لباف خانیکی، مجید. (۱۳۹۰). درس‌هایی از دانش بومی در مدیریت قنات. *همایش بین‌المللی دانش سنتی مدیریت منابع آب، یزد*.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد (۱۴۰۳). گفتگو با مدیرعامل شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد، خبربان. <https://42121979.khabarban.com>
- مرکز توسعه فناوری آب (۱۴۰۵). <http://wtc.ystp.ac.ir/>
- مسعودی، مسعود؛ برزگر، سعیده. (۱۳۹۴). ارزیابی و پهنه‌بندی شدت تخریب کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل اصلاحی بیابان‌زایی IMDPA و GIS مطالعه موردی دشت فیروزآباد استان فارس. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۵ (۴)، ۸۶-۹۵.
- معرب، یاسر؛ صالحی، اسماعیل؛ امیری، محمدجواد و بالیست، جهانبخش. (۱۳۹۸). ساخت مدل مفهومی تاب‌آوری کاربری اراضی شهری در برابر بلایا با رویکرد توسعه پایدار. *فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، ۲۱ (۳)، ۱۵۶-۱۴۱.
- نفرزادگان، علی؛ محمدی فر، علی‌اکبر؛ وقارفر، حسن و فروزان فرد، معصومه. (۱۳۹۸). ادغام مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و تکنیک تجزیه و تحلیل منطقه‌ای سیلاب جهت اولویت‌بندی زیر حوزه‌ها برای کنترل سیل (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دهباز خراسان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۸ (۲)، ۴۵-۲۷. doi: 10.22067/geo.v0i0.76607

References

- Al-Shabeeb, A. R., Hamdan, I., Al Amoush, H., Al-Adamat, R., & Al-Fugara, A. K. (2022). Integrating indigenous knowledge with MCDA in the GIS environment to determine site

- potential for water harvesting in Wadi Hammad Basin in Jordan. *Sustainability*, 14(21), 14033. <https://doi.org/10.3390/su142114033>
- Armas Vargas, F., Nava, L. F., Gómez Reyes, E., Olea-Olea, S., Rojas Serna, C., Sandoval Solís, S., & Meza-Rodríguez, D. (2023). Water and environmental resources: A multi-criteria assessment of management approaches. *Water*, 15(16), 2991.
- Aslan, V., & Sepetçioğlu, M. Y. (2022). Modeling of groundwater potential and quality of Harran Plain by GIS supported AHP and TOPSIS methods. *Türk Hidrolik Dergisi*, 6(1), 31-41.
- Banihabib, M. E., Hashemi, F., & Shabestari, M. H. (2017). A framework for sustainable strategic planning of water demand and supply in arid regions. *Sustainable Development*, 25(3), 254-266. <https://doi.org/10.1002/sd.1650>
- Barzegar, M., Ghorbani, M., Moghaddamnia, A., & Rahimi, M. (2025). The analysis of indigenous ecological knowledge and adaptive local initiatives in water resources management in southern Iran. *Environmental Science & Policy*, 173, 104248. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104248>
- Berkes, F., Tsai, H. M., Bayrak, M. M., & Lin, Y. R. (2021). Indigenous resilience to disasters in Taiwan and beyond. *Sustainability*, 13(5), 2435. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-2633-1>
- Chang, L. C., Yang, M. T., Liou, J. Y., Kow, P. Y., & Chang, F. J. (2025). Intelligent urban flood management using real-time forecasting, multi-objective optimization, and adaptive pump operation. *Smart Cities*, 8(3), 91. <https://doi.org/10.3390/smartcities8030091>
- Dabiri, R., Abghari, H., & Ghorbani, A. (2023). Locating of watershed management operations with MCDM approach and AHP and ANP methods (Case study: Saezchi-Chay Watershed in Ardabil Province). *Journal of Water and Soil Science*, 27(4), 299-324. [in Persian]
- Dehghan Dehnavi, E., Kheyroddin, R., & Kalhor, M. (2025). Assessing water resources resilience through underground water and surface-water and urban function analysis in Yazd-Ardakan Plain, Iran. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(11), 10365-10382. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06539-6>
- Ekman, U. (2023). Peripheral: Resilient hydrological infrastructures. *Infrastructures*, 8(7), 111. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8070111>
- Ghorbani, M., Eskandari-Damaneh, H., Cotton, M., Ghoochani, O. M., & Borji, M. (2021). Harnessing indigenous knowledge for climate change-resilient water management: Lessons from an ethnographic case study in Iran. *Climate and Development*, 13(9), 766-779. <https://doi.org/10.1080/17565529.2020.1841601>
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. In *Multiple attribute decision making: Methods and applications a state-of-the-art survey* (pp. 58-191). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- Julong, D. (1989). Introduction to grey system theory. *The Journal of Grey System*, 1(1), 1-24.
- Khani, M., Hoveidi, H., Yavari, A., & Khani, M. R. (2023). Modeling for weighting the most effective evaluated criteria of indigenous knowledge using the BWM method in the management and planning of water resources in Yazd Province. *Journal of Water and Sustainable Development*, 10(3), 61-74. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v10i3.2303-1227> [in Persian]
- Khani, M., Yavari, A. R., Dehghani-Sanij, A. R., Khani, M. R., & Hoveidi, H. (2023). Assessing and weighting the most effective criteria of indigenous knowledge for use in water resources planning and management of arid and semi-arid areas of Iran: A case study of Yazd Province. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(11), 11973-11996. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v10i3.2303-1227>
- Kharmyllem, B. (2025). Securing Shillong's water future: The role of indigenous institutions. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s13412-025-01056-x>
- Liu, S., Forrest, J., & Yang, Y. (2011). A brief introduction to grey systems theory. In *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services* (pp. 1-9). IEEE. <https://doi.org/10.1108/20439371211260081>
- Loucks, D. P. (2000). Sustainable water resources management. *Water International*, 25(1), 3-10.
- Masoudi, M., & Barzegar, S. (2015). Assessment and mapping of qualitative and quantitative

- severity degradation of groundwater resources using the modified IMDPA desertification model and GIS: A case study: Firuz-abad Plain of Fars Province. *Irrigation and Water Engineering*, 5(4), 86-95. [in Persian]
- Mbilinyi, B. P., Tumbo, S. D., Mahoo, H. F., Senkondo, E. M., & Hatibu, N. (2005). Indigenous knowledge as decision support tool in rainwater harvesting. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30(11-16), 792-798. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.08.022>
- Moarab, Y., Salehi, E., & Balist, J. (2019). Construction of a conceptual model for against disasters using a sustainable development approach. *Journal of Environmental Sciences and Technology*, 21(3), 141-156. [in Persian]
- Naah, B., Kanlisi, S. K., Pervarah, M., & Derbile, E. K. (2025). Perennial flooding and indigenous adaptation strategies in Wa Metropolitan Area, Ghana. *Discover Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02399-9>
- Nafarzadegan, A. R., Mohammadifar, A. A., Vagharfard, H., & Foruzanfard, M. (2019). Combination of multi-criteria decision-making models and regional flood analysis technique to prioritize sub-watersheds for flood control (Case study: Dehbar Watershed of Khorasan). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(2), 27-45. <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.76607> [in Persian]
- Okpa, K., Farahmandfar, Z., & Negahban-Azar, M. (2024). Developing a drought resilience matrix to evaluate water supply alternatives. *Climate*, 12(5), 66.
- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445-455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- Parivar, P., Saadatmand, M., Dehghan Manshadi, Z., Morovati Sharifabadi, A., & Malekinezhad, H. (2023). Evaluation of the effect of unsustainable urban development on water bankruptcy in arid regions using the system dynamics method: Case of Yazd, Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 9(5), 166. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00937-9>
- Perney, M. (2025). *Dynamic topology of climate risk: Urban system transformation and the operationalisation of resilience: A topological approach to climate-resilient development: Case of Mediterranean coastal cities* [Doctoral dissertation, Université Gustave Eiffel; Università degli Studi di Napoli Federico II].
- Saatsaz, M. (2020). A historical investigation on water resources management in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 1749-1785. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-00307-y>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., ... & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: The primer*. John Wiley & Sons.
- Samarizadeh, A. A., & Labbaf Khaneiki, M. (2011). Lessons from indigenous knowledge in Qanat management. *International Conference on Traditional Knowledge of Water Resources Management*, Yazd. [in Persian]
- Tavosi, M., Vafakhah, M., Sadeghi, S. H., & Bateni, S. M. (2025). Sub-watershed prioritization based on watershed hydrological security using different multi-criteria decision-making methods. *Water Resources Management*, 39(1), 65.
- Wang, L., Bian, L., Leon, A. S., Yin, Z., & Hu, B. (2024). Integrating policy instruments for enhanced urban resilience: A machine learning and IoT-based approach to flood mitigation. *Water*, 16(23), 3364.
- Zahedi, M. J. (2007). A look at the sociological foundations of traditional irrigation systems in Iran. *Payam-e Noor (Humanities)*, (1). [in Persian]
- Zhian, T., Hashemi Monfared, S. A., Rashki, M., & Azizyan, G. (2023). Appropriate wastewater treatment plant selection using G-EDAS and G-COPRAS incorporating G-AHP. *Journal of Environmental Studies*, 49(3), 353-372. [in Persian]