



Integrated Assessment of Water Resources and Groundwater Sustainability in Alborz Province Using the Watershed Sustainability Index (WSI) and the Pressure–State–Response (PSR) Framework

Behzad Parsa¹, Hossein Babazadeh^{*2}, Ali Saremi³

1. Ph.D. Candidate, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

*Corresponding author: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Sustainable water resources management in arid and semi-arid regions has become a major challenge due to population growth, urbanization, industrial and agricultural expansion, climate change, and excessive groundwater abstraction. Alborz Province is facing severe water stress as a result of rapid population growth, the concentration of economic activities, and a high dependence on the Hashtgerd, Karaj, and Eshtehard aquifers. This study aimed to conduct an integrated assessment of water resources sustainability in Alborz Province. To this end, the Water Sustainability Index (WSI) and the Pressure–State–Response (PSR) framework were employed, with four dimensions—hydrology, environment, quality of life, and policy and governance—analyzed simultaneously. Hydrological, climatic, socioeconomic, land-use, and management data were collected from official sources, the Regional Water Company, statistical records, remote sensing products, and policy documents. Following the standardization of indicators on a scale from zero to one, the final WSI was calculated as the arithmetic mean of the four dimensions and classified into five sustainability levels. The results indicated that the hydrological and environmental dimensions contributed most strongly to the decline in overall sustainability. Key factors included decreasing precipitation, rising temperatures, persistent groundwater-level decline, reduced natural recharge, an increasing abstraction-to-recharge ratio, deteriorating water quality, and insufficient environmental flows. In contrast, the quality-of-life and policy dimensions showed relatively better conditions; however, institutional fragmentation, weak coordination, financial constraints, and the absence of an integrated data management system have limited the effectiveness of management interventions. The findings highlight the need for demand management, artificial aquifer recharge, wastewater reuse, improved water-use efficiency, integrated governance, and smart monitoring. The integrated WSI–PSR framework can provide a practical approach for assessing water resources sustainability in other river basins across Iran.
Article history:	
Submit Date: 2026/08/18	
Accept Date: 2026/09/28	
Keywords: Alborz Province, Groundwater, Integrated Water Resources Management (IWRM), Pressure– State Response (PSR) Framework, Water Resources Sustainability, Water Sustainability Index (WSI).	

Cite this article: Parsa, B., Babazadeh, H., Saremi, A. (2026). Integrated Assessment of Water Resources and Groundwater Sustainability in Alborz Province Using the Watershed Sustainability Index (WSI) and the Pressure–State–Response (PSR) Framework. *Hydrogeology*, 10 (2), 82-94. DOI: <http://doi.org/10.22034/hydro.2026.74121.1350>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/hydro.2026.74121.1350>

Publisher: University of Tabriz.

Expanded Abstract

Introduction

Water is one of the most fundamental natural resources and plays a critical role in economic development, food security, public health, and ecosystem sustainability. In recent decades, rapid population growth, urbanization, industrial and agricultural expansion, climate change, and excessive groundwater abstraction have substantially increased pressure on surface- and groundwater resources. These challenges are particularly important in arid and semi-arid regions such as Iran, where declining precipitation, increasing temperature, groundwater depletion, deteriorating water quality, and land subsidence have become major concerns. Conventional supply-oriented approaches are increasingly insufficient for addressing these interconnected challenges, highlighting the need for demand management, resource protection, stakeholder participation, integrated water resources management, data-driven decision-making, and continuous sustainability assessment.

The Watershed Sustainability Index (WSI), developed within the UNESCO Hydrology for the Environment, Life and Policy (HELP) framework, provides an integrated approach for evaluating water resources sustainability. The WSI combines the Pressure–State–Response (PSR) framework with hydrological, environmental, social, and governance dimensions. It therefore enables simultaneous assessment of the pressures affecting water resources, their current condition, and the effectiveness of management responses.

Alborz Province is an important case for sustainability assessment because of its rapid population growth, urbanization, industrial development, agricultural activities, and strong dependence on groundwater. Major water supplies are obtained from groundwater aquifers, the Karaj and Taleghan rivers, and the Amir Kabir and Taleghan reservoirs. Declining groundwater levels, increasing abstraction, reduced natural recharge, and growing water demand have created significant challenges for regional water resources sustainability.

Therefore, this study aimed to provide an integrated assessment of water resources sustainability in Alborz Province using the WSI within the PSR framework, complemented by groundwater sustainability indicators. Four major

dimensions—hydrology, environment, quality of life, and policy and governance—were evaluated to identify major pressures, assess resource conditions, evaluate management responses, and provide a basis for improving regional water governance and sustainability.

Materials and Methods

Study Area and Research Approach

Alborz Province covers approximately 5,800 km² and is located on the southern slopes of the Alborz Mountains. It is bordered by Mazandaran, Tehran, Qazvin, and Markazi provinces and represents an important population, industrial, and agricultural center in Iran. Rapid population growth, urban expansion, industrial development, and agricultural activities have substantially increased water demand. Groundwater resources, the Karaj and Taleghan rivers, and the Amir Kabir and Taleghan reservoirs constitute the major water-supply sources. At the same time, reduced precipitation, increasing temperature, excessive groundwater abstraction, and declining groundwater levels have placed considerable pressure on water resources. The research procedure consisted of five main stages: data collection; selection and standardization of indicators; calculation of PSR components; calculation of the WSI; and analysis of results followed by the development of management recommendations. The methodology integrates hydrological, environmental, social, and managerial indicators to provide a comprehensive assessment of water resources sustainability.

Data Collection

Hydrological data, including precipitation, runoff, renewable water resources, groundwater levels, and water quality, were obtained from the Iran Water Resources Management Company, Alborz Regional Water Company, and hydrometric stations. Demographic, social, and economic information was obtained from official census data and the Statistical Center of Iran. Land-use, vegetation, and environmental information were derived from satellite imagery, GIS datasets, and environmental reports. Management-related indicators were assessed using policy documents, water resources management plans, regulations, investment information, aquifer protection programs, and implementation reports.

Pressure–State–Response Framework

The PSR framework was used to investigate the relationships between human activities, water-resource conditions, and management responses.

The Pressure component included population growth, increasing water demand, agricultural and industrial development, urbanization, groundwater abstraction, land-use change, and water pollution. The State component represented the quantitative and qualitative condition of water resources, including renewable water availability, groundwater levels, water quality, vegetation, aquatic ecosystems, and per-capita water availability. The Response component included management measures, investment, regulations, conservation programs, integrated water resources management, improvements in water-use efficiency, and stakeholder participation.

Watershed Sustainability Index

The WSI was used as the main sustainability assessment tool. Four dimensions were considered: Hydrology (H), Environment (E), Life/Quality of Life (L), and Policy and Governance (P). Each component was normalized between zero and one, and equal weighting was applied in accordance with the HELP methodology. The final WSI was calculated as:

$$WSI = (H + E + L + P) / 4$$

The resulting WSI values were classified into three overall sustainability levels: low sustainability ($WSI < 0.6$), medium sustainability ($0.6 \leq WSI \leq 0.8$), and high sustainability ($WSI > 0.8$).

Results and Discussion

The results indicate that water resources sustainability in Alborz Province is influenced by interconnected natural, economic, social, and managerial factors. Population growth, rapid urbanization, industrial expansion, agricultural development, and strong dependence on groundwater have increased pressure on the regional water system. These conditions demonstrate the need to move from conventional supply-oriented management toward demand management, integrated governance, and evidence-based planning.

Hydrological Dimension

The hydrological assessment showed that climate change, increasing water demand, and groundwater abstraction beyond renewable capacity have negatively affected water resources sustainability. Reduced precipitation, increasing temperature, higher evapotranspiration, and declining surface runoff have reduced the sustainable water-supply capacity of the province. Increasing dependence on groundwater for domestic, agricultural, and industrial purposes has

further intensified pressure on aquifers. Reduced natural recharge combined with increasing abstraction has resulted in persistent groundwater-level decline, representing one of the most important threats to long-term water resources sustainability.

Environmental Dimension

The environmental assessment indicated that rapid urban development, land-use change, vegetation loss, and increasing water pollution have adversely affected water-dependent ecosystems. Declining surface- and groundwater quality, increasing pollutant loads, and reduced environmental flows were identified as important environmental pressures. The findings demonstrate that water resources management cannot be separated from ecosystem protection. Conservation of natural areas, pollution control, maintenance of environmental flows, and restoration of aquatic ecosystems should therefore be incorporated into regional water-management strategies.

Quality-of-Life Dimension

The quality-of-life dimension showed relatively more favorable conditions. Although a considerable proportion of the population has access to drinking-water services, rapid population growth and increasing water demand have placed additional pressure on water-supply infrastructure. The substantial dependence of agriculture on groundwater also highlights limitations in water-use efficiency. Indicators including access to safe water, human development, per-capita water consumption, employment, and economic conditions suggest that improving water-use efficiency and increasing public awareness could contribute to greater sustainability.

Policy and Governance Dimension

Several management measures have been implemented, including groundwater balancing programs, abstraction control, monitoring systems, and other water-management interventions. However, fragmented institutional responsibilities, limited financial resources, insufficient coordination among responsible organizations, and the absence of an integrated data-exchange system have reduced the effectiveness of some management programs. The results emphasize the importance of integrated water governance, data-driven management, intelligent monitoring systems, and greater stakeholder participation.

Overall Sustainability Assessment

The final WSI assessment indicates that the hydrological and environmental dimensions have the greatest negative influence on overall sustainability, while the quality-of-life and policy dimensions show relatively more favorable conditions. The principal challenge is the increasing pressure on natural water resources combined with declining renewable-resource capacity. The integrated WSI-PSR approach provides an advantage over single-dimensional assessment because it simultaneously considers pressures, resource conditions, and management responses, thereby supporting identification of the underlying causes of sustainability problems and evaluation of management effectiveness.

The findings further demonstrate that the high dependence on groundwater represents a major vulnerability of the regional water-supply system. Artificial aquifer recharge, treated wastewater reuse, improved irrigation efficiency, reduction of transmission losses, and development of non-conventional water resources can improve system resilience. Integrated databases, real-time monitoring, remote sensing, Internet of Things technologies, artificial intelligence, and predictive models can also support more accurate and proactive water-resource management. Overall, sustainability requires simultaneous improvements in demand management, governance, efficiency, ecosystem protection, stakeholder participation, and evidence-based decision-making rather than simply increasing water supply.

Conclusions

This study assessed water resources sustainability in Alborz Province using the Watershed

Sustainability Index integrated with the Pressure–State–Response framework. The methodology enabled simultaneous evaluation of hydrological, environmental, social, and governance dimensions and provided a comprehensive assessment of the sustainability status of regional water resources.

The results identified excessive groundwater abstraction, declining natural recharge, climate change, increasing water demand, rapid urbanization, and unbalanced development as major factors reducing water resources sustainability. The hydrological and environmental dimensions showed greater vulnerability, particularly because of persistent groundwater-level decline, reduced renewable water availability, deteriorating water quality, and increasing pressure on aquatic ecosystems. Although water-supply infrastructure and management measures have improved in some areas, institutional fragmentation and insufficient coordination remain important governance challenges.

Sustainable water management in Alborz Province therefore requires a transition from supply-oriented management toward integrated demand management and data-driven water governance. Priority actions include groundwater protection, improved water-use efficiency, artificial aquifer recharge, wastewater reuse, continuous monitoring, stakeholder participation, institutional coordination, and evidence-based decision-making. The integration of WSI and PSR can serve as a practical framework for periodic assessment of water sustainability, evaluation of management effectiveness, and decision support in Alborz Province and other Iranian watersheds.

ارزیابی یکپارچه پایداری منابع آب و آب‌های زیرزمینی استان البرز با استفاده از شاخص پایداری آبریز (WSI) و چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ (PSR)

بهزاد پارسا^۱، حسین بابازاده^{۲*}، علی صارمی^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳. استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: h_babazadeh@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	مدیریت پایدار منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل رشد جمعیت، شهرنشینی، گسترش صنعت و کشاورزی، تغییر اقلیم و برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی به چالشی اساسی تبدیل شده است. استان البرز نیز با رشد سریع جمعیت، تمرکز فعالیت‌های اقتصادی و وابستگی زیاد به آبخوان‌های هشتگرد، کرج و اشتهارد با تنش آبی جدی روبه‌روست. این پژوهش با هدف ارزیابی یکپارچه پایداری منابع آب استان البرز انجام شد. برای این منظور از شاخص پایداری آبریز (WSI) و چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ (PSR) استفاده شد و چهار مؤلفه هیدروژئولوژی، محیط زیست، کیفیت زندگی و سیاست‌گذاری-حکمرانی به صورت هم‌زمان تحلیل شدند. داده‌های هیدروژئولوژیکی، اقلیمی، اجتماعی-اقتصادی، کاربری اراضی و مدیریتی از منابع رسمی، شرکت آب منطقه‌ای، آمار، سنجش از دور و اسناد سیاستی گردآوری شد. پس از استانداردسازی شاخص‌ها در مقیاس صفر تا یک، WSI نهایی از میانگین چهار مؤلفه محاسبه و در پنج سطح پایداری طبقه‌بندی شد. نتایج نشان داد که ابعاد هیدروژئولوژی و محیط زیست بیشترین نقش را در کاهش پایداری دارند؛ کاهش بارندگی، افزایش دما، افت مستمر سطح آب زیرزمینی، کاهش تغذیه طبیعی، افزایش نسبت برداشت به تغذیه، کاهش کیفیت آب و ضعف جریان‌های زیست‌محیطی از عوامل اصلی هستند. در مقابل، ابعاد کیفیت زندگی و سیاست‌گذاری وضعیت نسبتاً بهتری داشتند، اما پراکندگی نهادی، ضعف هماهنگی، محدودیت مالی و نبود سامانه یکپارچه داده، اثربخشی اقدامات را کاهش داده است. یافته‌ها بر ضرورت مدیریت تقاضا، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، بازچرخانی پساب، افزایش بهره‌وری، حکمرانی یکپارچه و پایش هوشمند تأکید می‌کنند. چارچوب تلفیقی WSI-PSR می‌تواند الگویی کاربردی برای ارزیابی پایداری منابع آب در سایر حوضه‌های آبریز کشور باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷	
کلیدواژه‌ها:	
آب‌های زیرزمینی، استان البرز، پایداری منابع آب، چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ، شاخص پایداری آبریز، مدیریت یکپارچه منابع آب.	
استناد: پارسا، بهزاد، بابازاده، حسین و صارمی، علی. (۱۴۰۵). ارزیابی یکپارچه پایداری منابع آب و آب‌های زیرزمینی استان البرز با استفاده از شاخص پایداری آبریز (WSI) و چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ (PSR). هیدروژئولوژی، ۱۰(۲)، ۸۲-۹۴. DOI: http://org/10.22034/hydro.2026.74121.1350	
© نویسندگان.	
	
DOI: http://doi.org/10.22034/hydro.2026.74121.1350	

ناشر: دانشگاه تبریز.

مقدمه

در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری محسوب می‌شود. یکی از جامع‌ترین شاخص‌های ارائه‌شده در این زمینه، شاخص پایداری آبریز (WSI) است که توسط Chaves و Alipaz (2007) معرفی شد و با بهره‌گیری از چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ (PSR)، امکان ارزیابی هم‌زمان ابعاد هیدرولوژیکی، زیست‌محیطی، اجتماعی و نهادی را فراهم می‌کند. این شاخص ضمن ساده‌سازی اطلاعات پیچیده، مقایسه وضعیت پایداری حوضه‌های مختلف را نیز ممکن می‌سازد و به‌عنوان ابزاری مناسب برای پایش روند تغییرات و ارزیابی اثربخشی سیاست‌های مدیریتی شناخته می‌شود.

Jarzębski et al. (2024) در یک مرور نظام‌مند بر ۱۲۴ مطالعه، شاخص‌های مختلف پایداری منابع آب را از نظر ساختار، روش محاسبه، شاخص‌های تشکیل‌دهنده و حوزه کاربرد مقایسه کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه شاخص‌های متعددی برای ارزیابی پایداری منابع آب توسعه یافته‌اند، اما WSI به دلیل تلفیق هم‌زمان ابعاد هیدرولوژیکی، زیست‌محیطی، اجتماعی و نهادی، یکی از جامع‌ترین ابزارهای موجود محسوب می‌شود. این پژوهش همچنین بر ضرورت استانداردسازی شاخص‌ها، استفاده از داده‌های به‌روز و توسعه مدل‌های بومی متناسب با شرایط هر حوضه آبریز تأکید کرده است (Gupta et al., 2020). نیز نشان دادند که شفافیت و پاسخگویی، اگرچه به‌عنوان ابزاری برای اثربخشی مدیریت مطرح می‌شوند، اما همیشه به نتایج مثبت و قطعی منجر نمی‌شوند و اثر آن‌ها به زمینه‌های سیاستی و شیوه طراحی سازوکارهای شفافیت وابسته است.

در ایران نیز طی سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی پایداری منابع آب، مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبریز و تحلیل وضعیت آب‌های زیرزمینی انجام شده است. نتایج اغلب این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از دشت‌های کشور با افت مستمر سطح آب زیرزمینی، کاهش تغذیه طبیعی، افزایش شوری منابع آب، افت کیفیت، فرونشست زمین و کاهش ظرفیت ذخیره آبخوان‌ها مواجه هستند (Karandish and Hoekstra, 2017; Rahmani et al., 2024; Madani, 2014). پژوهشگران ایرانی با استفاده از شاخص‌های مختلفی نظیر شاخص فالکن‌مارک، شاخص تنش آبی، شاخص بهره‌برداری از منابع آب، شاخص پایداری آبریز و مدل‌های

آب به‌عنوان یکی از بنیادی‌ترین منابع طبیعی، نقشی تعیین‌کننده در توسعه اقتصادی، امنیت غذایی، سلامت جوامع و پایداری اکوسیستم‌ها ایفا می‌کند. طی دهه‌های اخیر، رشد سریع جمعیت، توسعه شهرنشینی، گسترش صنایع، افزایش سطح زیرکشت، تغییر الگوی مصرف و پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم، فشار بر منابع آب سطحی و زیرزمینی را در بسیاری از کشورهای جهان افزایش داده است (IPCC, 2023; UNESCO, 2023). این شرایط در کشورهای واقع در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران، با شدت بیشتری مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که کاهش بارندگی، افزایش دما، افت تراز آبخوان‌ها، کاهش کیفیت منابع آب و بروز پدیده فرونشست زمین به مهم‌ترین چالش‌های مدیریت منابع آب تبدیل شده‌اند (Gohari et al., 2013; Madani, 2014). در مقیاس جهانی، مطالعات جدید نشان می‌دهند که برداشت بیش از ظرفیت تغذیه، ذخایر آب زیرزمینی را به‌شدت کاهش داده و امنیت آب میلیون‌ها نفر را تهدید می‌کند (Jasechko and Perrone, 2021; Scanlon et al., 2023).

Karandish et al. (2025) در مرور نظام‌مند ۳۸۶ پژوهش نشان دادند که افزایش راندمان مصرف آب به‌تنهایی موجب کاهش برداشت از آبخوان‌ها نمی‌شود و در برخی موارد به دلیل «اثر بازگشتی»، برداشت آب افزایش می‌یابد. آنان نتیجه گرفتند که موفقیت برنامه‌های احیای آبخوان تنها در صورت اجرای هم‌زمان اقدامات مدیریتی، سیاست‌های سختگیرانه، کنترل برداشت، اصلاح الگوی مصرف و حکمرانی یکپارچه امکان‌پذیر است و کمتر از ۳۰ درصد مطالعات بررسی‌شده موفق به تثبیت یا احیای منابع آب زیرزمینی شده‌اند. این یافته‌ها بیانگر پیچیدگی مدیریت پایدار آب زیرزمینی و ضرورت نگاه چندبعدی به این منابع است.

در چنین شرایطی، رویکردهای سنتی مدیریت منابع آب که بیشتر بر توسعه عرضه آب متمرکز بوده‌اند، پاسخگوی نیازهای امروز نیستند. رویکردهای نوین بر مدیریت تقاضا، حفاظت از منابع طبیعی، مشارکت ذی‌نفعان، حکمرانی آب، مدیریت مبتنی بر داده و ارزیابی مستمر شاخص‌های پایداری تأکید دارند (OECD, 2015). از این رو، توسعه شاخص‌های کمی و جامع برای ارزیابی وضعیت منابع آب، یکی از ابزارهای کلیدی

تصمیم‌گیری چندمعیاره، وضعیت منابع آب را در حوضه‌های مختلف کشور ارزیابی کرده‌اند. نتایج این مطالعات بر ضرورت اصلاح الگوی مصرف، افزایش بهره‌وری آب، کنترل برداشت از منابع آب زیرزمینی، توسعه تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، بازچرخانی آب، تقویت حکمرانی آب و استقرار سامانه‌های پایش هوشمند تأکید دارد (Gohari et al., 2013; Karandish et al., 2025).

استان البرز به دلیل قرارگیری در یکی از مهم‌ترین نواحی جمعیتی کشور، وابستگی گسترده به منابع آب زیرزمینی، استقرار صنایع متعدد، توسعه سریع شهرنشینی و افزایش تقاضای آب، با چالش‌های متعددی در زمینه مدیریت منابع آب مواجه است. از سوی دیگر، بخش قابل توجهی از تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت این استان از طریق آبخوان‌های هشتگرد، کرج و اشتهارد صورت می‌گیرد که طی سال‌های اخیر با افت مستمر سطح آب، کاهش کیفیت و افزایش فشار بهره‌برداری روبه‌رو بوده‌اند (Alaviany et al., 2020). این شرایط ضرورت ارزیابی جامع وضعیت پایداری منابع آب استان را بیش از پیش آشکار می‌سازد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی یکپارچه پایداری منابع آب استان البرز، از شاخص WSI در قالب چارچوب PSR و مجموعه‌ای از شاخص‌های تخصصی پایداری آب‌های زیرزمینی بهره می‌گیرد تا تصویری جامع از وضعیت موجود، عوامل فشار و میزان اثربخشی اقدامات مدیریتی ارائه دهد. تلفیق این دو رویکرد علاوه بر شناسایی نقاط ضعف و قوت نظام مدیریت منابع آب، زمینه ارائه راهکارهای اجرایی برای ارتقای پایداری، افزایش تاب‌آوری و بهبود حکمرانی منابع آب را فراهم می‌کند. نوآوری این پژوهش در استفاده هم‌زمان از شاخص پایداری آبریز، شاخص‌های تخصصی پایداری آب زیرزمینی و چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ برای ارزیابی یکپارچه منابع آب استان البرز است. این رویکرد امکان تحلیل ارتباط میان عوامل طبیعی، اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی را فراهم کرده و می‌تواند به عنوان الگویی برای سایر حوضه‌های آبریز کشور مورد استفاده قرار گیرد.

منطقه مورد مطالعه

استان البرز با مساحتی در حدود ۵۸۰۰ کیلومتر مربع در دامنه جنوبی رشته‌کوه البرز قرار گرفته و یکی از مهم‌ترین قطب‌های جمعیتی، صنعتی و کشاورزی ایران به شمار می‌رود. این استان از شمال به استان مازندران، از شرق به استان تهران، از غرب به استان قزوین و از جنوب به استان مرکزی محدود می‌شود. رشد سریع جمعیت، توسعه شهرنشینی، استقرار صنایع متعدد و گسترش اراضی کشاورزی، موجب افزایش قابل توجه تقاضای آب در این منطقه شده است. بخش عمده نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی استان از طریق منابع آب زیرزمینی، رودخانه کرج، رودخانه طالقان و سدهای امیرکبیر و طالقان تأمین می‌شود. در سال‌های اخیر، کاهش بارندگی، افزایش دما، برداشت بیش از ظرفیت تجدیدپذیر آبخوان‌ها و افت سطح آب زیرزمینی، چالش‌های جدی برای پایداری منابع آب استان ایجاد کرده است. از این رو، استان البرز به عنوان نمونه‌ای مناسب برای ارزیابی شاخص‌های پایداری منابع آب انتخاب شد.

گردآوری داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از منابع مختلف گردآوری شد. اطلاعات هیدروژئولوژیکی شامل بارندگی، رواناب، حجم منابع آب تجدیدپذیر، سطح آب زیرزمینی و کیفیت منابع آب از شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت آب

مواد و روش‌ها

رویکرد کلی پژوهش

هدف اصلی، ارزیابی یکپارچه پایداری منابع آب استان البرز با استفاده از شاخص پایداری آبریز (Watershed

منطقه‌ای البرز و ایستگاه‌های هیدرومتری استخراج گردید. اطلاعات جمعیتی، اجتماعی و اقتصادی از سرشماری‌های رسمی و مرکز آمار ایران تهیه شد. همچنین اطلاعات مربوط به کاربری اراضی، پوشش گیاهی و تغییرات محیط‌زیستی از تصاویر ماهواره‌ای، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و گزارش‌های سازمان حفاظت محیط‌زیست گردآوری شد. به منظور ارزیابی شاخص‌های مدیریتی نیز اسناد بالادستی، برنامه‌های مدیریت منابع آب، قوانین، میزان سرمایه‌گذاری در بخش آب، طرح‌های حفاظت از آبخوان‌ها و گزارش‌های اجرایی دستگاه‌های متولی مورد بررسی قرار گرفتند.

چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ (PSR)

در این پژوهش، برای تحلیل ارتباط میان فعالیت‌های انسانی، وضعیت منابع آب و اقدامات مدیریتی از چارچوب PSR استفاده شد. این چارچوب که توسط سازمان همکاری و توسعه اقتصادی (OECD) توسعه یافته است، بر پایه روابط علت و معلولی میان سه مؤلفه اصلی بنا شده است.

فشار (Pressure): شامل عواملی نظیر رشد جمعیت، افزایش تقاضای آب، توسعه کشاورزی، گسترش شهرنشینی، توسعه صنعتی، برداشت از منابع آب زیرزمینی، تغییر کاربری اراضی و آلودگی منابع آب است.

وضعیت (State): بیانگر شرایط کمی و کیفی منابع آب از جمله میزان منابع آب تجدیدپذیر، سطح آب زیرزمینی، کیفیت آب، پوشش گیاهی، وضعیت اکوسیستم‌ها و سرانه دسترسی به آب است.

پاسخ (Response): شامل اقدامات مدیریتی، سرمایه‌گذاری‌ها، قوانین، برنامه‌های حفاظت از منابع آب، اجرای مدیریت یکپارچه منابع آب، افزایش بهره‌وری مصرف و مشارکت ذی‌نفعان در مدیریت منابع آب است.

استفاده از چارچوب PSR این امکان را فراهم می‌کند که علاوه بر ارزیابی وضعیت موجود، اثربخشی سیاست‌های مدیریتی نیز مورد سنجش قرار گیرد.

شاخص پایداری آبریز (WSI)

برای ارزیابی پایداری منابع آب، از شاخص پایداری آبریز (WSI) استفاده شد. این شاخص نخستین بار توسط Chaves و Alipaz معرفی شد و بر مبنای برنامه HELP یونسکو توسعه یافت. در این شاخص، چهار بعد اصلی شامل هیدروژئولوژی

(Hydrology)، محیط‌زیست (Environment)، کیفیت زندگی (Life) و حکمرانی و سیاست‌گذاری (Policy) در قالب مدل PSR ارزیابی می‌شوند.

امتیاز هر مؤلفه در بازه صفر تا یک نرمال‌سازی شده و سپس شاخص نهایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$WSI = (H + E + L + P) / 4$$

که در آن:

H = شاخص هیدروژئولوژی

E = شاخص محیط‌زیست

L = شاخص کیفیت زندگی

P = شاخص حکمرانی و سیاست‌گذاری

براساس روش استاندارد HELP، به هر چهار مؤلفه وزن مساوی اختصاص داده شد تا از سوگیری ناشی از وزن‌دهی ذهنی جلوگیری شود. این رویکرد در مطالعات جدید نیز به عنوان روش مرجع برای محاسبه WSI به کار گرفته شده است.

استانداردسازی و امتیازدهی شاخص‌ها

به منظور مقایسه شاخص‌هایی با واحدهای اندازه‌گیری متفاوت، تمامی متغیرها به مقیاس بدون بعد بین صفر و یک تبدیل شدند. سپس مطابق دستورالعمل HELP-WSI، هر شاخص در یکی از پنج سطح «بسیار ضعیف»، «ضعیف»، «متوسط»، «خوب» و «بسیار خوب» طبقه‌بندی شد. این نظام امتیازدهی امکان مقایسه بین ابعاد مختلف پایداری و تحلیل روند تغییرات را فراهم می‌کند.

روش تحلیل داده‌ها

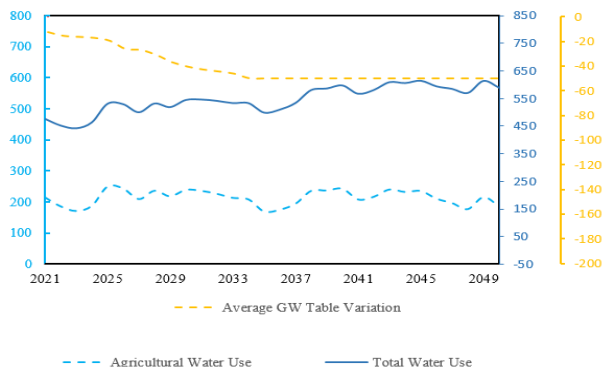
پس از محاسبه امتیاز هر شاخص، میانگین مؤلفه‌های هیدروژئولوژی، محیط‌زیست، کیفیت زندگی و سیاست‌گذاری محاسبه و شاخص نهایی WSI استخراج شد. در ادامه، نتایج در قالب جداول، نمودارها و تحلیل‌های مقایسه‌ای ارائه گردید. همچنین نقاط قوت و ضعف هر یک از ابعاد پایداری شناسایی و اثر عوامل انسانی، شرایط طبیعی و سیاست‌های مدیریتی بر وضعیت منابع آب استان البرز مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌های پژوهش

ارزیابی وضعیت هیدروژئولوژیکی حوضه آبریز

نتایج ارزیابی مؤلفه هیدروژئولوژی نشان داد که منابع آب استان البرز طی سال‌های اخیر تحت تأثیر هم‌زمان تغییرات اقلیمی، افزایش تقاضای آب و برداشت بیش از ظرفیت

ضرورت اجرای برنامه‌های حفاظت از منابع طبیعی، کنترل آلاینده‌ها و احیای اکوسیستم‌های آبی را نشان می‌دهد.



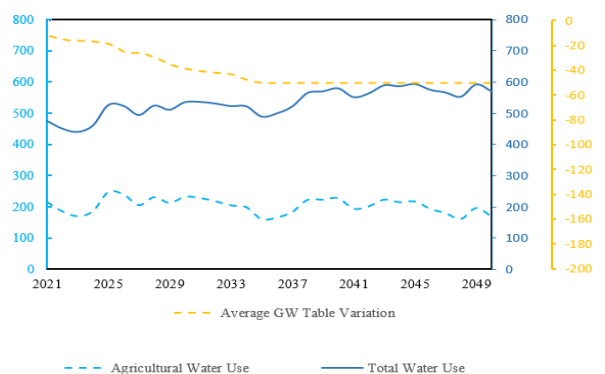
شکل ۲- بررسی اثر بخشی سیاست افزایش ۵ درصد راندمان آبیاری منابع آب و تراز آب زیرزمینی آبخوان کرج در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ تحت اثرات تغییر اقلیم.

Figure 2- Assessment of the Effectiveness of a 5% Increase in Irrigation Efficiency Policy on Water Resources and Groundwater Levels in the Karaj Aquifer during the 2021–2050 Period under the Impacts of Climate Change.

ارزیابی کیفیت زندگی

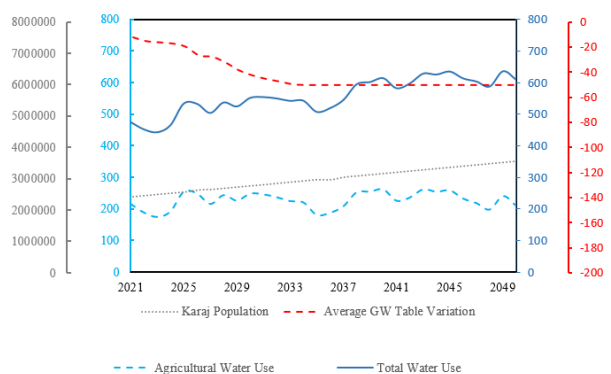
نتایج نشان داد که اگرچه بخش قابل توجهی از جمعیت استان به شبکه آب آشامیدنی دسترسی دارند، اما رشد سریع جمعیت و افزایش تقاضای آب، فشار قابل توجهی بر زیرساخت‌های تأمین آب وارد کرده است. از سوی دیگر، وابستگی بالای بخش کشاورزی به منابع آب زیرزمینی و سهم بالای این بخش در مصرف آب، چالش‌هایی در زمینه بهره‌وری مصرف ایجاد کرده است.

شاخص کیفیت زندگی در این پژوهش بر اساس متغیرهایی نظیر دسترسی به آب سالم، شاخص توسعه انسانی، سرانه مصرف آب، اشتغال و وضعیت اقتصادی محاسبه شد. نتایج نشان داد که بهبود بهره‌وری مصرف و ارتقای آگاهی عمومی می‌تواند نقش مؤثری در افزایش پایداری منابع آب داشته باشد.



تجدیدپذیر قرار گرفته‌اند. کاهش بارندگی، افزایش دمای متوسط سالانه، رشد تبخیر و تفرق و کاهش رواناب سطحی موجب کاهش قابلیت تأمین پایدار منابع آب شده است. از سوی دیگر، وابستگی روزافزون بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت به منابع آب زیرزمینی، فشار مضاعفی بر آبخوان‌های استان وارد کرده است.

بررسی شاخص‌های هیدروژئولوژیکی نشان می‌دهد که کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها و افزایش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری، روند افت سطح آب زیرزمینی را تشدید کرده است. این وضعیت بیانگر آن است که تداوم الگوی فعلی بهره‌برداری می‌تواند پایداری منابع آب را در بلندمدت با مخاطره جدی مواجه سازد.



شکل ۱- تراز آب زیرزمینی به همراه کل آب مصرفی، آب مصرفی بخش کشاورزی و جمعیت در آبخوان کرج تحت اثرات تغییر اقلیم در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ میلادی.

Figure 1- Groundwater Level Along with Total Water Consumption, Agricultural Water Consumption, and Population in the Karaj Aquifer under the Impacts of Climate Change during the 2021–2050 Period.

ارزیابی وضعیت محیط‌زیست

تحلیل شاخص‌های محیط‌زیستی نشان داد که توسعه سریع شهرنشینی، تغییر کاربری اراضی، کاهش پوشش گیاهی و افزایش آلودگی منابع آب، کیفیت اکوسیستم‌های وابسته به آب را تحت تأثیر قرار داده است. کاهش کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی در برخی نواحی، افزایش بار آلاینده‌ها و کاهش توان خودپالایی رودخانه‌ها از مهم‌ترین پیامدهای این روند محسوب می‌شود.

همچنین نتایج بیانگر آن است که کاهش جریان‌های زیست‌محیطی در برخی زیرحوضه‌ها می‌تواند عملکرد اکوسیستم‌های طبیعی را با محدودیت مواجه کند. این یافته‌ها

شکل ۴- وضعیت شاخص‌های حکمرانی منابع آب و اثر بخشی سیاست استفاده از ۱۰ میلیون متر مکعب پساب در بخش صنعت و تراز آب زیرزمینی آبخوان کرج در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ تحت اثرات تغییر اقلیم.

Figure 4. Status of Water Resources Governance Indicators and the Effectiveness of a Policy for Using 10 million Cubic Meters of Reclaimed Wastewater in the Industrial Sector and Its Impact on Groundwater Levels in the Karaj Aquifer during the 2021–2050 Period under the Impacts of Climate Change.

محاسبه شاخص نهایی پایداری آبریز (WSI)

پس از محاسبه چهار مؤلفه اصلی شامل هیدرولوژی (H)، محیط‌زیست (E)، کیفیت زندگی (L) و سیاست‌گذاری (P)، شاخص نهایی پایداری آبریز مطابق رابطه زیر محاسبه شد:

$$[WSI = \frac{H+E+L+P}{4}]$$

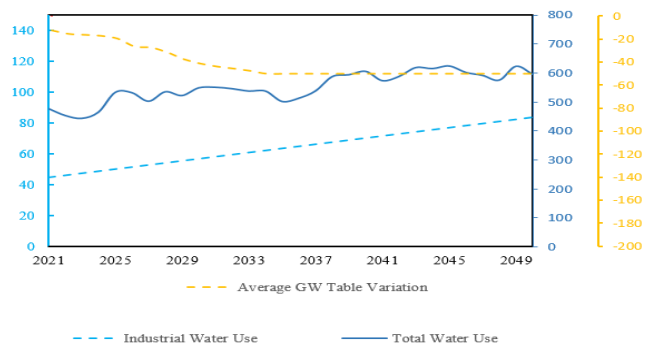
براساس نتایج به‌دست‌آمده، مقدار نهایی شاخص WSI بیانگر وضعیت کلی پایداری منابع آب استان البرز است. تحلیل مؤلفه‌های مختلف نشان می‌دهد که ابعاد هیدرولوژی و محیط‌زیست بیشترین تأثیر را در کاهش امتیاز نهایی داشته‌اند، در حالی که شاخص‌های کیفیت زندگی و سیاست‌گذاری وضعیت نسبتاً مطلوب‌تری را نشان می‌دهند. این موضوع بیانگر آن است که مهم‌ترین چالش استان، افزایش فشار بر منابع طبیعی و کاهش ظرفیت تجدیدپذیری منابع آب است.

شکل ۳- مقایسه شاخص‌های کیفیت زندگی بررسی اثر بخشی سیاست افزایش ۱۰ درصد راندمان آبیاری بر منابع آب و تراز آب زیرزمینی آبخوان کرج در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ تحت اثرات تغییر اقلیم.

Figure 3- Comparison of Quality-of-Life Indicators: Assessment of the Effectiveness of a 10% Increase in Irrigation Efficiency Policy on Water Resources and Groundwater Levels in the Karaj Aquifer during the 2021–2050 Period under the Impacts of Climate Change.

ارزیابی سیاست‌گذاری و حکمرانی آب

تحلیل شاخص‌های حکمرانی نشان داد که طی سال‌های اخیر اقدامات متعددی در زمینه مدیریت منابع آب، کنترل برداشت از آبخوان‌ها، اجرای طرح‌های تعادل‌بخشی و توسعه سامانه‌های پایش انجام شده است. با این حال، افزایش تقاضا، پراکندگی مسئولیت‌های مدیریتی، محدودیت منابع مالی و ضعف هماهنگی بین دستگاه‌های اجرایی، اثربخشی برخی برنامه‌ها را کاهش داده است. بررسی شاخص‌های این مؤلفه نشان داد که توسعه حکمرانی داده‌محور، استقرار سامانه‌های هوشمند مدیریت منابع آب، افزایش مشارکت ذی‌نفعان و تقویت نظام پایش می‌تواند نقش مهمی در ارتقای پایداری منابع آب استان ایفا کند.



جدول ۱- زیرشاخص‌ها و پارامترهای شاخص پایداری آبریز.

Table 1- Sub-indices and Parameters of the Watershed Sustainability Index.

Sub-index	Pressure	State	Response
Hydrology	• Ratio of the change in per capita water availability during the study period to its long-term average in the watershed.	• Per capita water availability in the watershed (long-term average).	• Improvement in water-use efficiency over a 10-year period.
	• Change in watershed BOD ₅ during the study period.	• BOD ₅ in the watershed (long-term average).	• Improvement in wastewater collection and treatment systems over a 10-year period.
Environment	• Watershed Environmental Performance Index (EPI) during the study period.	• Percentage of the watershed area covered by natural vegetation.	• Change in the extent of environmentally protected areas in the watershed (percentage change during the study period).
Quality of Life	• Change in the income-related sub-index of the Human Development Index (HDI) in the watershed during the study period.	• HDI value for the watershed.	• Change in the watershed HDI during the study period.

Policy	• Change in the education-related sub-index of the HDI in the watershed during the specified period.	• Institutional capacity of the watershed to implement Integrated Water Resources Management (IWRM).	• Change in expenditure on IWRM implementation in the watershed during the study period.
--------	--	--	--

جدول ۲- تعیین سطوح پایداری آبریز به کمک WSI.

Table 2- Determination of Watershed Sustainability Levels Using the WSI.

Watershed Sustainability Index (WSI)	Watershed Sustainability Level
$WSI < 0.6$	Low
$0.6 \leq WSI < 0.8$	Moderate
$WSI \geq 0.8$	High

نتایج و بحث

زیست‌محیطی و توسعه‌ای را دنبال کنند. در بخش کیفیت زندگی، اگرچه توسعه زیرساخت‌های تأمین آب موجب افزایش دسترسی جمعیت به آب آشامیدنی شده است، اما رشد سریع تقاضا، افزایش مصرف سرانه و تمرکز جمعیتی در برخی مناطق استان، فشار قابل توجهی بر منابع موجود وارد کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که توسعه زیرساخت‌ها به تنهایی تضمین‌کننده پایداری نیست و ارتقای بهره‌وری مصرف، اصلاح الگوی مصرف و افزایش آگاهی عمومی باید به عنوان اجزای اصلی سیاست‌های مدیریت تقاضا مورد توجه قرار گیرند. در مؤلفه سیاست‌گذاری و حکمرانی، نتایج بیانگر آن است که اگرچه اقدامات متعددی نظیر اجرای طرح‌های تعادل‌بخشی آبخوان‌ها، نصب کنتورهای هوشمند، کنترل برداشت از چاه‌ها و توسعه سامانه‌های پایش انجام شده است، اما پراکندگی مسئولیت‌های نهادی، ضعف هماهنگی بین سازمان‌های متولی، محدودیت منابع مالی و نبود نظام یکپارچه تبادل داده، اثربخشی این برنامه‌ها را کاهش داده است. این موضوع اهمیت استقرار حکمرانی یکپارچه منابع آب و توسعه نظام‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را بیش از پیش آشکار می‌سازد. یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، برتری رویکرد تلفیقی WSI-PSR نسبت به روش‌های تک‌بعدی ارزیابی منابع آب است. بسیاری از شاخص‌های متداول تنها وضعیت کمی منابع آب یا تنش آبی را اندازه‌گیری می‌کنند، در حالی که شاخص WSI علاوه بر وضعیت منابع، عوامل فشار و پاسخ‌های مدیریتی را نیز به صورت هم‌زمان مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این ویژگی موجب می‌شود که مدیران بتوانند منشأ مشکلات را شناسایی کرده و اثربخشی سیاست‌های اجراشده را نیز ارزیابی کنند. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که وابستگی زیاد استان البرز به منابع آب زیرزمینی، یکی از مهم‌ترین نقاط

نتایج این پژوهش نشان داد که پایداری منابع آب استان البرز تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل طبیعی، اقتصادی، اجتماعی و مدیریتی قرار دارد و هیچ‌یک از این عوامل به تنهایی قادر به تبیین وضعیت موجود نیستند. ارزیابی چهار مؤلفه اصلی شاخص پایداری آبریز (WSI) نشان داد که فشارهای ناشی از رشد جمعیت، توسعه سریع شهرنشینی، گسترش فعالیت‌های صنعتی، افزایش سطح زیرکشت و وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی، موجب کاهش ظرفیت پایداری منابع آب در استان شده است. این یافته بیانگر آن است که مدیریت منابع آب باید از رویکرد سنتی تأمین عرضه فاصله گرفته و به سمت مدیریت تقاضا، حکمرانی یکپارچه و برنامه‌ریزی مبتنی بر شواهد حرکت کند. در بعد هیدرولوژیکی، نتایج نشان داد که کاهش منابع آب تجدیدپذیر، افت مداوم سطح آب زیرزمینی و افزایش نسبت برداشت به تغذیه طبیعی، مهم‌ترین عوامل کاهش پایداری هستند. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های بین‌المللی که کاهش ذخایر آب زیرزمینی را پیامد مستقیم برداشت بیش از ظرفیت تجدیدپذیر و تغییرات اقلیمی می‌دانند، همخوانی دارد. استمرار این روند علاوه بر کاهش امنیت آبی، می‌تواند موجب افزایش هزینه‌های تأمین آب، کاهش کیفیت منابع آب، فرونشست زمین و کاهش ظرفیت تولید کشاورزی شود. در مؤلفه محیط‌زیست، نتایج نشان داد که توسعه نامتوازن، تغییر کاربری اراضی، کاهش پوشش گیاهی، افت جریان‌های زیست‌محیطی و افزایش آلودگی منابع آب، عملکرد اکوسیستم‌های وابسته به آب را تحت تأثیر قرار داده است. این یافته‌ها بیانگر آن است که حفاظت از منابع آب بدون حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی امکان‌پذیر نیست. بنابراین، برنامه‌های مدیریت منابع آب باید هم‌زمان اهداف

شاخص پایداری آبریز (WSI) و چارچوب فشار-وضعیت-پاسخ (PSR) مورد ارزیابی قرار گرفت. تلفیق این دو رویکرد، امکان بررسی هم‌زمان ابعاد هیدرولوژیکی، محیط‌زیستی، اجتماعی و مدیریتی را فراهم ساخت و تصویری جامع از وضعیت منابع آب استان ارائه داد. نتایج نشان داد که اگرچه اقدامات مدیریتی متعددی برای حفاظت و بهره‌برداری از منابع آب اجرا شده است، اما فشار ناشی از رشد تقاضا، برداشت بیش از حد از آبخوان‌ها، کاهش تغذیه طبیعی، تغییرات اقلیمی و توسعه نامتوازن، همچنان مهم‌ترین عوامل کاهش پایداری منابع آب در استان البرز محسوب می‌شوند. تحلیل مؤلفه‌های شاخص WSI نشان داد که بعد هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی نسبت به سایر ابعاد از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردار هستند. افت مستمر سطح آب زیرزمینی، کاهش حجم منابع آب تجدیدپذیر، افت کیفیت منابع آب و افزایش فشار بر اکوسیستم‌های آبی، بیانگر آن است که استمرار روند فعلی بهره‌برداری می‌تواند پایداری منابع آب را در بلندمدت با مخاطرات جدی مواجه سازد. در مقابل، نتایج مربوط به ابعاد کیفیت زندگی و سیاست‌گذاری نشان داد که اگرچه زیرساخت‌های مدیریتی و خدمات آب‌رسانی در سال‌های اخیر بهبود یافته‌اند، اما برای دستیابی به حکمرانی پایدار منابع آب، اصلاحات ساختاری و تقویت هماهنگی بین دستگاه‌های اجرایی ضروری است.

به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که مدیریت پایدار منابع آب تنها از طریق افزایش عرضه آب امکان‌پذیر نیست، بلکه نیازمند مدیریت تقاضا، حفاظت از آبخوان‌ها، ارتقای بهره‌وری مصرف، توسعه حکمرانی داده‌محور، افزایش مشارکت ذی‌نفعان، پایش مستمر منابع آب و اتخاذ تصمیم‌های مبتنی بر شواهد علمی است. از این‌رو، استفاده از شاخص WSI در کنار چارچوب PSR می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش دوره‌ای وضعیت منابع آب، ارزیابی اثربخشی سیاست‌های مدیریتی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در سایر حوضه‌های آبریز کشور نیز مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

رحمانی، ح.، صارمی، ع.، عراقی نژاد، ش. و بابازاده، ح.، ۱۴۰۳. تحلیل سناریوهای مختلف به‌کارگیری کنتور هوشمند حجمی برای افزایش اثربخشی طرح احیا و تعادل بخشی

آسیب‌پذیری سیستم تأمین آب محسوب می‌شود. در چنین شرایطی، هرگونه کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها یا افزایش برداشت می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای بر امنیت آبی، توسعه اقتصادی و پایداری محیط‌زیست داشته باشد. از این‌رو، اجرای برنامه‌های تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده، افزایش راندمان آبیاری، کاهش تلفات شبکه‌های انتقال و توسعه منابع آب غیرمعارف می‌تواند نقش مهمی در افزایش تاب‌آوری سیستم منابع آب ایفا کند.

از منظر سیاست‌گذاری، نتایج این پژوهش بر ضرورت گذار از مدیریت بخشی به حکمرانی یکپارچه منابع آب تأکید دارد. تحقق این هدف مستلزم ایجاد بانک اطلاعاتی یکپارچه، توسعه سامانه‌های پایش برخط، استفاده از فناوری‌های سنجش از دور، اینترنت اشیا، هوش مصنوعی و مدل‌های پیش‌بینی برای پایش و مدیریت منابع آب است. به‌کارگیری این فناوری‌ها علاوه بر افزایش دقت تصمیم‌گیری، امکان پیش‌بینی بحران‌های آینده و مدیریت پیشگیرانه منابع آب را فراهم می‌کند. به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که پایداری منابع آب تنها از طریق افزایش عرضه آب قابل دستیابی نیست، بلکه نیازمند اصلاح ساختار حکمرانی، مدیریت تقاضا، ارتقای بهره‌وری، حفاظت از اکوسیستم‌ها، مشارکت ذی‌نفعان و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده است. بنابراین، چارچوب تلفیقی ارائه‌شده در این پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی برای ارزیابی و پایش پایداری منابع آب در سایر حوضه‌های آبریز کشور نیز مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

منابع آب به عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های توسعه پایدار، نقش اساسی در تأمین امنیت آب، امنیت غذایی، رشد اقتصادی، حفاظت از محیط‌زیست و ارتقای کیفیت زندگی ایفا می‌کنند. با این حال، افزایش جمعیت، توسعه شتابان شهرنشینی، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری بیش از ظرفیت تجدیدپذیر، موجب افزایش فشار بر منابع آب و کاهش پایداری سامانه‌های آبی شده است. در چنین شرایطی، استفاده از چارچوب‌های جامع ارزیابی پایداری می‌تواند ابزار مؤثری برای برنامه‌ریزی، تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری در مدیریت منابع آب باشد. در این پژوهش، پایداری منابع آب استان البرز با بهره‌گیری از

strategies and future pathways. *Journal of Hydrology*, 657, 133060. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133060>

Madani, K., 2014. Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4):315–328. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>

OECD. 2015. OECD principles on water governance. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264237605-en>

Rahmani, H., Saremi, A., Iraqi nejad, S. and Babazadeh, H. 2024. Analysis of different scenarios of using smart meter to increase the effectiveness of Groundwater Restoration and Balancing Plan using the Agent Base Model in Qazvin Plain. *Hydrogeology*, 9(1), 57-70. doi: 10.22034/hydro.2023.55317.1282 [In Persian]

Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., Grafton, R. Q., Jia, X., Jiao, J., Jolly, I., Konikow, L., Kroll, S., Li, Q., Liu, J., Mekonnen, M. M., Moosdorf, N., Müller Schmied, H., Perrone, D., Roderick, M. L., ... Zheng, C. 2023. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth and Environment*, 4(2), 87–101. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00378-6>

UNESCO. 2023. The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water. UNESCO. <https://doi.org/10.54677/MNYW2555>

آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل عامل‌بنیان در دشت قزوین. هیدروژئولوژی، ۹(۱): ۵۷-۷۰.

علویانی، ف.، صدقی، ح.، اصغری مقدم، ا.، بابازاده، ح.، ۱۳۹۸. بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب‌های سطحی، زیرزمینی و نامتعارف دشت هشتگرد. هیدروژئولوژی ۴(۲): ۴۸-۶۲.

References

Alaviany, F., Sedghi, H. Asghari moghaddam, A. and Babazadeh, H. 2020. Optimization of Conjunctive Use of Surface Water, Groundwater and Wastewater Resources in Hashtgerd Plain. *Hydrogeology*, 4(2), 48-62. doi: 10.22034/hydro.2020.10436 [In Persian]

Chaves, H. M. L., Alipaz, S. 2007. An integrated indicator for basin hydrology, environment, life, and policy: The Watershed Sustainability Index. *Water Resources Management*, 21(5):883–895. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9107-2>

Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupaei, J., Massah Bavani, A., and Madani, K., 2013. Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can backfire. *Journal of Hydrology*, 491:23–39. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.021>

Gupta, A., Boas, I., Oosterveer, P. 2020. Transparency in global sustainability governance: To what effect? *Journal of Environmental Policy and Planning*, 22(1): 84–97. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2019.1703652>

IPCC. 2023. Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Jarzebski, M. P., Karthe, D., Chapagain, S. K., Setiawati, M. D., Wadumestriga Dona, C. G., Pu, J., and Fukushi, K. 2024. Comparative analysis of water sustainability indices: A systematic review. *Water*, 16(7): 961. <https://doi.org/10.3390/w16070961>

Jasechko, S., and Perrone, D. 2021. Global groundwater wells at risk of running dry. *Science*, 372(6540):418–421. <https://doi.org/10.1126/science.abc2755>

Karandish, F., and Hoekstra, A. Y. 2017. Informing national food and water security policy through water footprint assessment: The case of Iran. *Water*, 9(11): 831. <https://doi.org/10.3390/w9110831>

Karandish, F., Liu, S., and de Graaf, I. 2025. Global groundwater sustainability: A critical review of