

Hydrological Assessment and Economic Valuation of Springs Water in Khorramabad, with an Emphasis on Sustainable Urban Watershed Management

Sahar Amiri¹ , Ali Haghizadeh^{*2} , Leila Ghasemi³ , Mahboubeh Delfan⁴ 

Received: 26-05-2026, Revised: 11-07-2026, Accepted: 23-07-2026, Published: 03-08-2026

<https://doi.org/10.22034/20.72.7>

Extended Abstract

Introduction

In recent years, hydrological systems have been increasingly affected by recurrent droughts and global climate change. Consequently, groundwater resources have gained growing significance. Groundwater has consistently attracted attention due to its inherent characteristics, including stability against seasonal fluctuations, reliability of extraction during drought conditions, relatively lower vulnerability, and superior quality compared to surface water. Karst springs, as natural outlets of aquifers, are considered fundamental components of urban hydrological systems. These resources play a pivotal role in supplying drinking water, maintaining ecological sustainability, and ensuring the social well-being of cities. Khorramabad, a city in western Iran, benefits from a dense network of springs and consequently supplies a significant portion of the region's water demand through its groundwater resources. Nevertheless, rapid urban expansion, land-use changes, excessive anthropogenic extraction, and climatic fluctuations have posed serious challenges to the quantitative and qualitative sustainability of these valuable resources. In response, the present study was conducted with the aim of an integrated analysis of the hydrological and economic status of five representative springs in Khorramabad, namely Motahari, Qiu, Golestan, Gardab-e Sangi, and Gardab-e Daraii. The findings of this research can provide a scientific basis for sustainable management, conservation prioritization, and economic policy-making concerning urban water resources.

Materials and Methods

The present study was conducted using an integrated (hydrological and economic) approach on five principal springs of Khorramabad city over the statistical period from 1984 to 2024. In the quantitative hydrology section, monthly discharge data and the non-parametric Mann-Kendall test were employed using Microsoft Excel to identify long-term trends. The hydrological and meteorological drought status was assessed using the SPI, SPEI, RDI, and SDI indices at temporal scales of 1, 3, 6, 12, and 24 months, utilizing the Python programming environment. In the water quality section, the Water Quality Index (WQI) was calculated in Excel, and Schoeller and Piper diagrams were generated using Chemistry software. The main parameters evaluated in the water quality assessment of the Khorramabad springs included pH, total hardness (TH), electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), chloride (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), nitrate (NO_3^-), phosphate (PO_4^{3-}), bicarbonate (HCO_3^-), sodium (Na^+),

1. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad.

2. Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Iran, Corresponding Author: Haghizadeh.a@lu.ac.ir

3. Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Iran

4. Assistant Professor of Economics, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran

potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}), and magnesium (Mg^{2+}). For economic valuation, the Contingent Valuation Method (CVM) was employed. The required data were collected through questionnaires and in-person interviews with 100 citizens residing in Khorramabad. Statistical analysis of the questionnaire data was performed using SPSS and Excel software. Finally, the Logit model and the maximum likelihood estimation method were applied in EViews13 software to estimate the Willingness to Pay (WTP) and the model parameters.

Results and Discussion

The findings of this study generally indicate that the spring water resources of Khorramabad are, on the one hand, facing a gradual and significant decline in discharge, while on the other hand, they possess favorable chemical quality. Long-term trend analysis of discharge reveals that the discharge of the springs has exhibited a significant decreasing trend over the past four decades. This gradual decline can be attributed to the cumulative effects of climate change, reduced aquifer recharge, and the high sensitivity of karst systems to environmental stresses. The examination of hydrological droughts also revealed that the springs have experienced severe flow reduction during sustained drought periods. From an economic perspective, the contingent valuation results showed that a significant proportion of citizens make direct use of spring water, with drinking water consumption being the predominant use of these resources. The willingness to pay for non-use values (e.g., preserving ecological and tourism values) was estimated at approximately 85,000 Iranian tomans per m^3 . Overall, there is a significant correlation between the hydrological status and the economic value of the springs; springs with greater flow stability and higher quality (e.g., Qiu and Motahari) also possess higher economic value, and people exhibit a greater willingness to pay for their protection. Moreover, the true value of the services provided by these resources far exceeds the current operational costs, and neglecting these values can lead to suboptimal decision-making and the perpetuation of unsustainable trends.

Conclusion

This study emphasizes that the sustainable management of Khorramabad's springs cannot rely solely on either hydrological or economic approaches alone; rather, it requires an integrated and holistic approach encompassing continuous scientific monitoring, hydrological analysis, economic policy-making based on the true value of resources, and active social participation. The findings can serve as a scientific basis for conservation prioritization (especially for springs with lower flow stability, such as Gardab-e Sangi), revising water allocation and pricing policies based on true economic value, and strengthening decision-making systems in urban water resource management. Ultimately, enhancing public awareness, investing in environmental education, and establishing mechanisms for public financial participation are fundamental prerequisites for the sustainable preservation of these valuable resources against climatic and anthropogenic threats. Based on the research findings, a comprehensive and integrated approach is proposed for the sustainable management of Khorramabad's springs. This approach should include: (1) continuous hydrological and water quality monitoring; (2) protection of karst recharge zones; (3) environmental education and public awareness programs to enhance social participation, particularly among youth and direct users; (4) integration of economic valuation (using contingent valuation and ecosystem service assessment) into water policy-making; (5) adaptive management to climate change, considering cumulative effects of medium- and long-term droughts; and (6) strengthening inter-sectoral collaboration among relevant organizations.

Keywords: *Contingent Valuation, Willingness to Pay (WTP), Khorramabad Springs, Hydrological Trend.*

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The support of Lorestan University is acknowledged.

Conflicts of Interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' Contribution

Sahar Amiri: Conceptualization, Software, Writing - original draft preparation, Manuscript editing
Ali Haghizadeh: Supervision, Conceptualization, Formal analysis and investigation, Manuscript editing
Leila Ghasemi: Conceptualization, Formal analysis and investigation, Software, Manuscript editing
Mahboubeh Delfan: Conceptualization, Formal analysis and investigation, Manuscript editing

Citation: Amiri S, Haghizadeh A, Ghasemi L, Delfan M, Hydrological Assessment and Economic Valuation of Springs Water in Khorramabad, with an Emphasis on Sustainable Urban Watershed Management. jwmseir 2026; 20 (72): 92-112

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2026, , Vol 20, No 72, PP 92-112

Publisher: Watershed Management Society of Iran

© Author(s)



ارزیابی هیدرولوژیکی و ارزش گذاری اقتصادی آب چشمه‌های خرم‌آباد با تأکید بر مدیریت پایدار آبخیز شهری

سحر امیری^۱، علی حقی زاده^۲، لیلا قاسمی^۳، محبوبه دلفان^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۵، تاریخ داوری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۲

<https://doi.org/10.22034/20.72.7>

چکیده

چشمه‌های کارستی خرم‌آباد، بخش عمده‌ای از منابع آب زیرزمینی منطقه را تأمین می‌کنند، اما گسترش شهری، تغییر کاربری اراضی، برداشت بی‌رویه و نوسانات اقلیمی، پایداری کمی و کیفی آن‌ها را با چالش مواجه ساخته است. در این پژوهش، پنج چشمه شاخص (مطهری، کیو، گلستان، گرداب سنگی و گرداب دارایی) با رویکرد تلفیقی هیدرولوژیکی و اقتصادی تحلیل شده است. در این پژوهش، برای تحلیل روندهای هیدرولوژیکی از آزمون من کندال استفاده شده است، این روش به دلیل عدم وابستگی به فرضیات توزیع نرمال و توانایی شناسایی روندهای غیرخطی، ابزاری معتبر برای ارزیابی تغییرات زمانی است؛ وضعیت خشک‌سالی هیدرولوژیکی با شاخص‌های SPI، SPEI، RDI و SDI ارزیابی شده است؛ و همچنین کیفیت آب با شاخص WQI و نمودارهای پایپر و شولر تعیین شده است. بخش ارزش گذاری اقتصادی با به کارگیری روش ارزش گذاری مشروط (CVM) و مدل لاجیت در نرم افزار EViews13 انجام پذیرفته است. داده‌های حاصل از پرسشنامه و مصاحبه حضوری با ۱۰۰ نفر از ساکنان شهر خرم‌آباد نیز در نرم‌افزارهای SPSS و اکسل مورد تحلیل آماری قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که دبی چشمه‌ها دارای روند کاهشی معنادار است ($Z = -3/594$). همچنین چشمه‌ها حساسیت بالایی به دوره‌های خشک‌سالی دارند و شدت این تأثیر در چشمه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. کیفیت آب همه چشمه‌ها نیز در طبقه «بسیار خوب» قرار گرفته است. در نهایت میانگین تمایل به پرداخت (WTP) برای کارکرد غیراستفاده‌ای چشمه‌ها، ۸۵ هزار تومان به ازای هر مترمکعب آب برآورد شده است. جوانان و استفاده‌کنندگان مستقیم بیشترین تمایل به مشارکت مالی را نشان دادند، اما درآمد بالاتر با کاهش این تمایل همراه بوده است. تحصیلات و آگاهی محیط زیستی تأثیر مثبت و معناداری بر تمایل به پرداخت داشته است که نقش کلیدی آموزش هدفمند را تأیید می‌کند. در نهایت، مدیریت پایدار چشمه‌های خرم‌آباد نیازمند رویکردی تلفیقی شامل پایش علمی، تحلیل هیدرولوژیکی، سیاست گذاری اقتصادی و مشارکت اجتماعی است.

کلید واژه‌ها: ارزش گذاری مشروط، تمایل به پرداخت (WTP)، چشمه‌های خرم‌آباد، روند هیدرولوژیکی
نوع مقاله: پژوهشی

استناد: امیری سحر، حقی زاده علی، قاسمی لیلا، دلفان محبوبه. ارزیابی هیدرولوژیکی و ارزش گذاری اقتصادی آب چشمه‌های خرم‌آباد با تأکید بر مدیریت پایدار آبخیز شهری علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. ۱۴۰۵؛ ۲۰(۷۲): ۹۲-۱۱۲

علوم و مهندسی آبخیزداری ایران سال ۱۴۰۵، دوره ۲۰، شماره ۷۲، ۹۲-۱۱۲



ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۲. استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران. نویسنده مسئول: haghizadeh.a@lu.ac.ir
۳. دانشجوی دکترا (Ph.D)، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۴. استادیار، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد و علوم اداری، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

آب به عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های سرمایه طبیعی، نقش کلیدی در پایداری محیط زیستی، توسعه اقتصادی و رفاه اجتماعی دارد. افزایش نوسانات اقلیمی، رشد جمعیت، توسعه شهری و برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی، مدیریت آب را به یکی از پیچیده‌ترین چالش‌های سیاست‌گذاری محیط‌زیست تبدیل کرده است؛ چالشی که بدون شناخت هم‌زمان رفتار هیدرولوژیکی منابع و ارزش اقتصادی آن‌ها، پایدار نخواهد بود [۳۹]. مدیریت پایدار منابع آب در سطوح محلی، ملی و جهانی به یکی از اولویت‌های توسعه بدل شده است [۱۳] با وجود اهمیت ذاتی آب، این منبع حیاتی غالباً به‌درستی ارزش‌گذاری نمی‌شود و نبود قیمت واقعی، منجر به هدررفت و تخصیص ناکارآمد آن می‌شود [۱۳]. چشمه‌های شهر خرم‌آباد، به دلیل وابستگی مستقیم به زمین‌شناسی، بارش و شرایط هیدروژئولوژیکی، جایگاهی ویژه در چرخه هیدرولوژیکی منطقه دارند و شاخص حساس برای ارزیابی کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شوند [۴۶]. برداشت بی‌رویه و ضعف حکمرانی، تهدیدی جدی برای پایداری این منابع است [۴]. تحلیل‌های کمی هیدرولوژیکی، به‌ویژه پایش دبی چشمه‌ها و استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال و شاخص‌های خشک‌سالی مانند SPI، RDI، SPEI² و SDI، ابزاری کلیدی برای ارزیابی تاب‌آوری منابع در برابر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی است. علاوه بر کمیت، کیفیت آب نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در ارزش اقتصادی دارد و ورود آلاینده‌های شهری و کشاورزی بر آن تأثیرگذار است [۱]. شاخص WQI⁵ امکان ارزیابی جامع کیفیت آب را در قالب یک عدد فراهم می‌کند. از منظر اقتصادی، قیمت آب باید حداقل هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری را پوشش دهد؛ در غیر این صورت ناکارایی تشدید می‌شود [۲]. با توجه به اینکه قیمت بازار قادر به انعکاس ارزش واقعی آب نیست، روش‌های غیربازاری مانند ارزش‌گذاری مشروط (CVM⁶) برای سنجش تمایل به پرداخت افراد (WTP⁷) و از طریق مدل لاجیت برای برآورد ارزش اقتصادی منابع طبیعی کاربرد دارد [۸]. محمدیاری و همکاران (۱۳۹۷) در یک مطالعه به تحلیل ارزش‌گذاری تغییرات پیشنهادی در کیفیت آب آشامیدنی شهر کرمانشاه با استفاده از روش ارزشیابی مشروط (CVM) پرداختند. نتایج نشان‌دهنده این بود که میانگین تمایل به پرداخت ماهانه هر فرد برای بهبود کیفیت آب آشامیدنی ۴۵۳۳ ریال است. همچنین، عدم رابطه معنی‌دار بین درآمد و تمایل به پرداخت نشان می‌دهد که شهروندان از اقشار مختلف به تأمین مالی پروژه‌های بهبود کیفیت آب آشامیدنی علاقه‌مند هستند [۳۴]. بستامی و همکاران (۱۴۰۰) مطالعه‌ای با بهره‌گیری از روش ارزشیابی اقتصادی مشروط (CVM) به تجزیه و تحلیل تمایل به پرداخت برای

1. Standardized Precipitation Index
2. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
3. Reconnaissance Drought Index
4. Standardized Drought Index
5. Water Quality Index
6. Contingent Valuation Method
7. Willingness to Pay

آب شهری در مشهد پرداختند. یافته‌ها حاکی از آن بود که ارزش هر مترمکعب آب شهری در سال ۱۳۹۹ معادل ۱۴۶۳۱/۵۲ ریال تعیین شده و توصیه می‌شود که این مقدار به‌عنوان مبنای محاسبه قبوض برای خانوارهای پرمصرف لحاظ شود [۶]. Yudhistira و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تقاضای آب با استفاده از داده‌های ماهانه مصرف آب در بازه زمانی ژانویه ۲۰۱۲ تا سپتامبر ۲۰۱۶ پرداختند. نتایج نشان داد که کشش قیمتی تقاضای آب برای مصرف‌کنندگان خانگی برابر با ۰/۳۲- است، که نشان‌دهنده خاصیت کمکش بودن تقاضای این گروه است. در مقابل، کشش قیمتی برای مصرف‌کنندگان صنعتی و تجاری با مقدار ۱/۱۶- به دست آمده که حاکی از پركششی بالای تقاضای این گروه است [۵۱]. Do و همکاران (۲۰۲۲) پژوهشی با هدف پایداری بوم‌سازگان رودخانه در ویتنام انجام دادند. به همین منظور از روش ارزش‌گذاری مشروط استفاده کردند. نتایج نشان داد که خانوارها به‌طور قابل‌توجهی مایل به مشارکت در همه پروژه‌ها هستند و همین‌طور با حاکم‌های محلی در ارتباط هستند و برای سیاست عمومی در جهت افزایش تاب‌آوری در کشورهای درحال توسعه ضروری هستند [۱۱]. Saadaoui (۲۰۲۵) به ارزیابی ارزش اقتصادی خدمات بوم‌سازگانی جنگل‌های صنوبر در کشور تونس پرداخت که در آن از روش ارزش‌گذاری مشروط بهره گرفته شد. به همین منظور، داده‌ها از طریق تکمیل پرسشنامه توسط ۳۵۰ نفر از افراد جامعه آماری گردآوری و با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که متغیرهایی نظیر سطح درآمد و شیوه ترجیحی پرداخت، تأثیر معناداری بر تمایل افراد به پرداخت (WTP) برای حفاظت از جنگل‌ها دارند [۴۰]. Sultana و همکاران (۲۰۲۶) در پژوهشی به توسعه یک مدل تخصیص آب چندهدفه پرداختند و اهداف اقتصادی و محیط زیستی را به صورت هم‌زمان بررسی کردند. به همین منظور داده‌های جریان آب زیرزمینی و سطحی، میزان تقاضای آب و شاخص‌های محیط زیستی به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در مدل هیدرو-اقتصادی لحاظ شد. داده‌ها برای سال‌های خشک، متوسط و تر در حوضه Rajshahi Barind Tract، شمال غرب بنگلادش به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل چندهدفه قادر است راهکارهایی هم از نظر اقتصادی و هم از نظر هیدرولوژیکی ارائه دهد و تعادل بین بهره‌برداری پایدار منابع آب و حفاظت محیط زیستی را مشخص نماید، به‌گونه‌ای که امکان مدیریت بهینه منابع آب در شرایط مختلف اقلیمی فراهم شود [۴۵]. همچنین Wilkening و همکاران (۲۰۲۶) به ارزیابی مدیریت منابع آب در مناطق حفاظت‌شده تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی پرداختند. در این پژوهش، داده‌های هیدرولوژیکی و محیط زیستی با استفاده از تحلیل چندشاخصی مورد ارزیابی قرار گرفتند. یافته‌ها نشان داد که مدیریت پایدار منابع آب نیازمند یکپارچگی داده‌های هیدرولوژیکی و شاخص‌های محیط زیستی و اتخاذ سیاست‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد علمی است، به‌گونه‌ای که هم حفاظت از بوم‌سازگان و هم نیازهای انسانی تأمین شود [۴۹]. با توجه به مطالعات پیشین، برای مدیریت پایدار منابع آب، ترکیب

مواد و روش‌ها

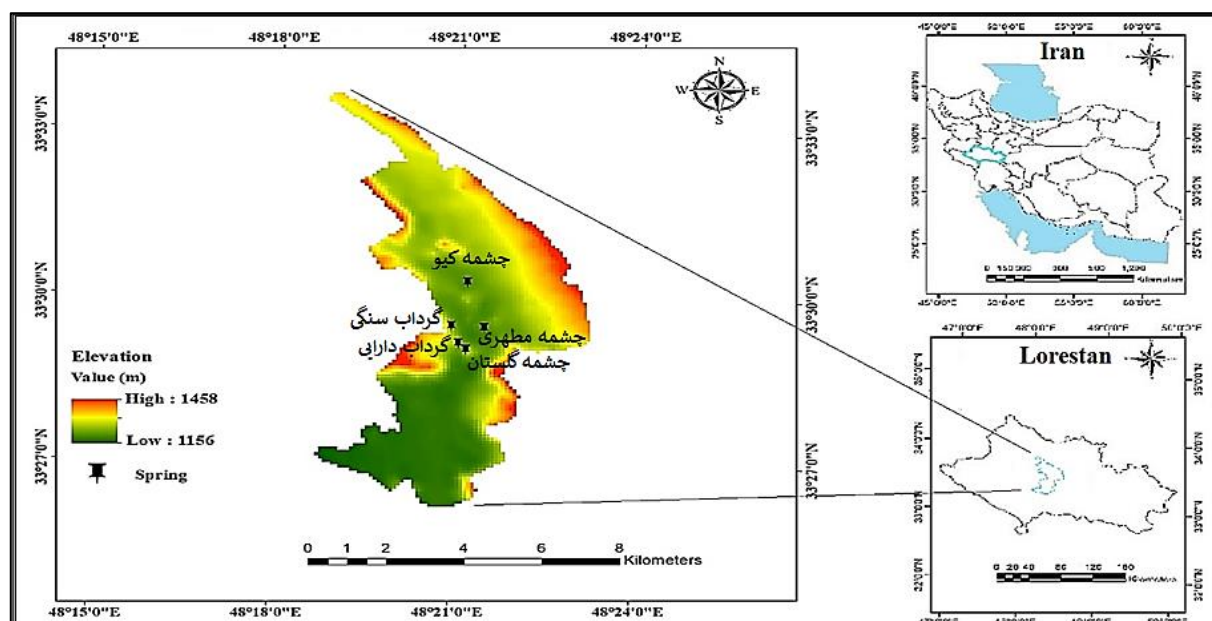
منطقه مورد مطالعه

شهر خرم‌آباد، مرکز استان لرستان، در ارتفاع متوسط ۱۱۷۱ متر از سطح دریا و در زون چین‌خورده زاگرس قرار دارد، شهر خرم‌آباد بخشی از حوزه آبخیز کرخه را شامل می‌شود [۲۲ و ۲۳]. وسعت حوزه مطالعاتی حدود ۲۵۰۱ کیلومترمربع بوده و از نظر مدیریت منابع آب، از اهمیت بالایی برخوردار است [۴۱]. اقلیم منطقه نیمه‌مرطوب زاگرسی است و با بارندگی سالانه ۴۵۰ تا ۶۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای ۱۶/۶۷ درجه سانتی‌گراد، شرایط مناسبی برای تغذیه آبخوان‌ها فراهم می‌کند [۱۸ و ۳۲]. رخداد بارش‌ها عمدتاً در پاییز تا اوایل بهار است. از نظر زمین‌شناسی، گسترش سازندهای آهکی و دولومیتی کارستی موجب نفوذپذیری بالا و شکل‌گیری چشمه‌های پرآب شده است. تمرکز چشمه‌های گلستان، گرداب سنگی، گرداب دارایی، مطهری و کیو در محدوده شهری، خرم‌آباد را به یکی از مهم‌ترین نواحی تخلیه آب‌های زیرزمینی در غرب کشور تبدیل کرده است [۱۴ و ۱۷]. موقعیت منطقه همراه با مشخصات پنج چشمه در شکل ۱ و ج نشان داده شده است.

داده‌های مورد نیاز

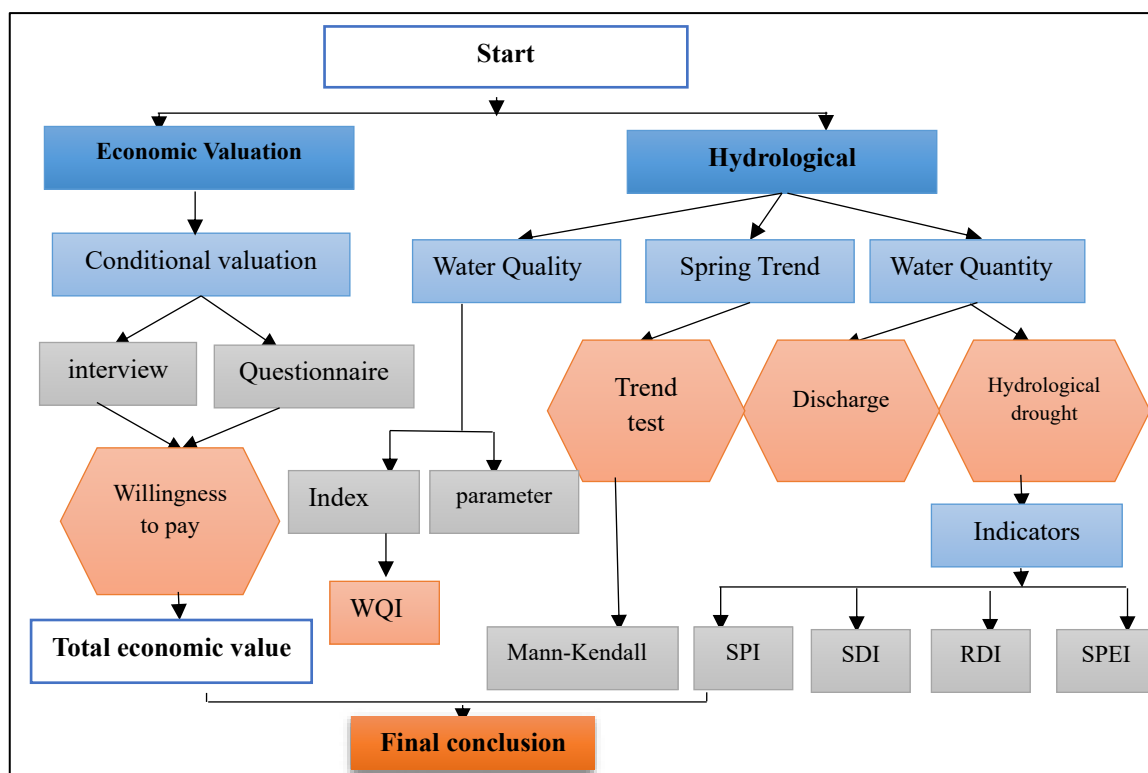
برای بررسی هیدرولوژیکی (کمی و کیفی) داده‌های هواشناسی، دبی چشمه‌ها نیاز است. پارامترهای اصلی مورد ارزیابی در کیفیت آب چشمه‌های خرم‌آباد شامل pH، سختی کل (TH)، هدایت الکتریکی (EC)، مواد جامد محلول (TDS)، کلراید (Cl⁻)، سولفات (SO₄²⁻)، نیترات (NO₃⁻)، فسفات (PO₄³⁻)، بیکربنات (HCO₃⁻)، سدیم (Na⁺)، پتاسیم (K⁺)، کلسیم (Ca²⁺) و منیزیم (Mg²⁺) است. داده‌ها از سازمان آب منطقه‌ای لرستان دریافت شد. ارزیابی ارزش‌گذاری اقتصادی

تحلیل هیدرولوژیکی و ارزش‌گذاری اقتصادی آن‌ها ضروری است. ترکیب تحلیل هیدرولوژیکی و اقتصادی در بررسی چشمه‌های آب خرم‌آباد به عنوان یک رویکرد جامع، ضرورت بالایی دارد. تحلیل هیدرولوژیکی به شناسایی الگوهای جریان، کیفیت آب و پایداری منابع آبی کمک می‌کند و اطلاعات حیاتی را برای درک شرایط موجود و پیش‌بینی تغییرات آبی فراهم می‌آورد. به موازات آن، تحلیل اقتصادی به ارزیابی ارزش مالی آب و تأثیر آن بر توسعه اجتماعی و اقتصادی منطقه می‌پردازد. این ارزیابی نه تنها به تعیین اهمیت اقتصادی و اجتماعی چشمه‌ها کمک می‌کند، بلکه به سیاست‌گذاران این امکان را می‌دهد که با استفاده از داده‌های هیدرولوژیکی، تصمیمات بهتری در راستای حفاظت و بهره‌برداری بهینه از منابع آبی اتخاذ کنند. بنابراین، این ترکیب نه تنها نقاط ضعف و قوت مدیریت منابع آب را مشخص می‌کند، بلکه به تحقق توسعه پایدار و بهبود کیفیت زندگی در خرم‌آباد نیز کمک شایانی خواهد کرد. با توجه به اهمیت استراتژیک چشمه‌های شهر خرم‌آباد، تهدیدات فزاینده پیش‌روی آن‌ها، و خلأ مطالعاتی موجود، در این پژوهش به بررسی جامع هیدرولوژیکی و اقتصادی این چشمه‌ها پرداخته می‌شود. با وجود نقش تعیین‌کننده چشمه‌ها در ساختار منابع آب شهر خرم‌آباد، تاکنون تحقیقی که به‌صورت تلفیقی به تحلیل هیدرولوژیکی این منابع و برآورد ارزش اقتصادی خدمات ناشی از آن‌ها بپردازد، انجام نشده است. این خلأ پژوهشی سبب شده است تا تصمیمات مدیریتی در زمینه بهره‌برداری و حفاظت از چشمه‌ها فاقد پشتوانه علمی و اقتصادی مستند باشد. از این‌رو، انجام پژوهش حاضر با هدف ایجاد مبنای کمی برای مدیریت پایدار منابع آب شهری و افزایش کارایی سیاست‌های حفاظتی، ضرورتی علمی و کاربردی به شمار می‌رود.



شکل ۱- موقعیت منطقه شهرستان خرم‌آباد و چشمه‌های مورد مطالعه

Fig 1. Location of the Khorramabad County area and the springs under study



شکل ۲- نمودار جریانی پژوهش
Fig 2. Research methodology flowchart

آب چشمه‌ها به‌طور مؤثری مورد بررسی قرار گرفت. تلفیق این دو بخش، ارتباط متقابل دبی و کیفیت آب و پیامدهای خشک‌سالی را بر منابع آب نشان می‌دهد [۱۵ و ۳۵]. در نهایت، برای برآورد ارزش اقتصادی آب چشمه‌ها، از روش ارزش‌گذاری مشروط (CVM) مبتنی بر پرسشنامه و مصاحبه حضوری با ساکنان شهر خرم‌آباد استفاده شده است.

تحلیل هیدرولوژیکی کمی: دبی، روند و خشک‌سالی چشمه‌ها بررسی میانگین دبی، ضریب تغییرات و دامنه نوسانات چشمه‌ها

دبی چشمه، نمایانگر میزان تخلیه آب از سامانه آبخوان بوده و حاصل برهم‌کنش فرایندهای تغذیه، ذخیره و انتقال جریان در محیط‌های متخلخل و کارستی است و به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تحلیل رفتار آب زیرزمینی شناخته می‌شود [۱۶]. خرم‌آباد عمدتاً از نوع کارستی بوده و تغییرات دبی آن‌ها به میزان توسعه شبکه شکستگی‌ها، مجاری انحلالی و ساختار سازندهای آهکی زاگرس وابسته است [۱۵]. هیدروگراف این چشمه‌ها معمولاً سریع و غیرخطی نسبت به بارش است که بیانگر وجود جریان‌های ترجیحی و نقش محدود ذخیره ماتریسی آبخوان در تنظیم دبی پایه است [۴۸]. به‌منظور تحلیل نوسانات دبی، ابتدا دبی متوسط هر چشمه محاسبه و سپس ضریب تغییرات آبدی (CV) به‌عنوان شاخصی از ناپایداری جریان به‌صورت رابطه (۱) تعیین شد:

چشمه‌ها نیز از طریق پرسشنامه و مصاحبه حضوری از افراد ساکن شهر خرم‌آباد انجام شد. در شکل ۲ نمودار جریانی پژوهش ارائه شده است

روش تحقیق

بررسی چشمه‌های خرم‌آباد بر پایه تلفیق تحلیل‌های کمی، کیفی و اقتصادی انجام شد. در بخش کمی، با اندازه‌گیری دبی و تحلیل روند هیدرولوژیکی به کمک آزمون من-کندال، به علت عدم نیاز به فرضیات توزیع، توانایی شناسایی دقیق روندهای صعودی و نزولی در داده‌های هیدرولوژیکی، سادگی محاسبات و پایداری در زمان، به عنوان ابزاری مناسب برای تحلیل روندیابی هیدرولوژیکی انتخاب شده است. و ارزیابی خشک‌سالی هیدرولوژیکی با شاخص‌های SPEI، SDI و RDI، تغییرات بلندمدت جریان و اثر کاهش تغذیه آبخوان‌ها مورد بررسی قرار گرفت [۴۳]. در بخش کیفی، با سنجش پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی و محاسبه شاخص کیفیت آب (WQI)، وضعیت سلامت و قابلیت استفاده آب چشمه‌ها ارزیابی شده است. پارامترهای فیزیکی شامل دما، رنگ، کدورت و TDS هستند که به تعیین ویژگی‌های ظاهری و فیزیکی آب کمک می‌کنند. پارامترهای شیمیایی، از جمله pH، اکسیژن محلول، نیتрат، فسفر و فلزات سنگین، به ارزیابی آلودگی‌های شیمیایی و محیط زیستی می‌پردازند. همچنین، پارامترهای زیستی نظیر باکتری‌های کل فرم و E. coli، به عنوان شاخص‌های آلودگی میکروبی و وضعیت بوم‌سازگان آبی عمل می‌کنند. با تحلیل جامع این پارامترها، کیفیت

$$Cv = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (1)$$

انحراف معیار (s) از رابطه (۲) زیر به دست می آید.

$$S = \frac{\sqrt{(\sum xi - \bar{x})^2}}{N - 1} \quad (2)$$

که در آن xi هریک از داده‌های آماری و N فراوانی یا تعداد داده‌ها است افزایش ضریب تغییرات، بیانگر توسعه‌یافتگی بیشتر سامانه کارستی و واکنش سریع‌تر آبخوان به بارش است. در گام بعد، دامنه تغییرات آبدهی به‌عنوان ساده‌ترین شاخص پراکندگی آماری از طریق رابطه (۳) محاسبه شد:

$$R = Q_{max} - Q_{min} \quad (3)$$

در این رابطه Q_{min} و Q_{max} به‌ترتیب بیشینه و کمینه دبی اندازه‌گیری‌شده در یک سال آبی هستند. دامنه بالاتر نشان‌دهنده توسعه بیشتر کارست است، هرچند در برخی موارد مانند چشمه سراب کیو می‌تواند ناشی از کوچک بودن مخزن آبخوان یا عدم توسعه‌یافتگی کافی سامانه کارستی باشد و R دامنه تغییرات آبدهی است.

تحلیل روند بلندمدت دبی با استفاده از آزمون من-کندال

روندابیایی هیدرولوژیکی به‌منظور تحلیل تغییرات زمانی دبی چشمه‌ها و شناسایی الگوهای کوتاه‌مدت و بلندمدت انجام می‌شود و نقش مهمی در ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی ایفا می‌کند [۳۵]. تلفیق نتایج روندابی با داده‌های هیدروشمی و مدل‌سازی جریان زیرزمینی، چارچوبی علمی برای حفظ دبی پایه و بهره‌برداری پایدار از چشمه‌ها فراهم می‌کند [۱۵]. از آنجا که دسترسی به آب شرب و آبیاری در شهر خرم‌آباد به‌شدت به پایداری این چشمه‌ها وابسته است، بررسی روند دبی آن‌ها از جنبه مدیریتی و برنامه‌ریزی منابع آب اهمیت ویژه‌ای دارد. برای تحلیل روندابی هیدرولوژیکی چشمه‌ها از آزمون من-کندال استفاده شده است.

آزمون من-کندال

به‌منظور بررسی تغییرات زمانی متغیرهای هیدرولوژیکی شامل دبی، بارش و سطح آب زیرزمینی، از تحلیل روند به‌عنوان یکی از روش‌های متداول آماری استفاده شد. در این پژوهش، آزمون من-کندال به‌عنوان یک روش ناپارامتریک استاندارد برای شناسایی روندهای بلندمدت در سری‌های زمانی مورد استفاده قرار گرفت [۲۵ و ۳۰]. آزمون من-کندال بدون نیاز به فرض نرمال بودن داده‌ها، قادر به تشخیص روندهای افزایشی، کاهشی یا پایدار در سری‌های زمانی است [۱۹]. در این آزمون، فرض صفر بیانگر عدم وجود روند معنی‌دار بوده و فرض مقابل نشان‌دهنده وجود روند افزایشی یا کاهشی معنی‌دار است [۵۲]. معنی‌داری آماری نتایج در سطوح خطای ۵ و ۱ درصد ارزیابی شد. علامت آماره Z جهت روند را مشخص می‌کند؛ به‌گونه‌ای که مقادیر مثبت بیانگر روند افزایشی و مقادیر منفی نشان‌دهنده روند کاهشی است [۲۵]. از مهم‌ترین مزایای آزمون من-کندال می‌توان به مقاومت در برابر داده‌های پرت، چولگی و

کشیدگی زیاد و عدم وابستگی به فروض پارامتریک اشاره کرد. این ویژگی‌ها، آزمون من-کندال را به ابزاری کارآمد برای تحلیل داده‌های غیرخطی و ناهمگن هیدرولوژیکی و اقلیمی تبدیل کرده است [۲۹]. در این آزمون، داده‌ها ابتدا به‌صورت رتبه‌ای مرتب شده و سپس آماره روند از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{4P}{d N (N - 1)} = 1 \quad (4)$$

که P مجموع تعداد رتبه‌های بزرگ‌تر از ردیف N که بعدازآن قرار می‌گیرند و T آماره من-کندال است که از رابطه (۵) زیر به دست می‌آید [۲۵]:

$$P = \sum_{i=1}^{N-1} n_i \quad (5)$$

که آماره T برای سنجش معنی‌دار بودن از رابطه (۶) استفاده می‌شود:

$$(t) = \frac{\pm g\sqrt{4n + 10}}{9n(n - 1)} \quad (6)$$

که در آن n تعداد کل سال‌های آماری، g برابر سطح احتمال معنی‌دار بودن آزمون و t آماره من-کندال است.

تحلیل کیفی آب چشمه‌ها: شاخص WQI و هیدروشمی محاسبه شاخص کیفیت آب (WQI) و طبقه‌بندی کیفی چشمه‌ها

شاخص کیفیت آب (WQI) ابزاری جامع است که با تلفیق پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی، کیفیت منابع آب را به صورت عددی ارائه می‌دهد و امکان مقایسه آن‌ها در زمان‌ها و مکان‌های مختلف را فراهم می‌کند [۲۸]. این شاخص در مدیریت پایدار چشمه‌ها و تعیین اولویت‌های حفاظتی کاربرد گسترده دارد [۹].

محاسبه WQI از طریق روابط ۷ تا ۱۰ انجام می‌شود:

$$WQI = \frac{\sum q_i w_i}{\sum w_i} \quad (7)$$

که در آن، q_i نشان‌دهنده نمره کیفیت پارامتر i و w_i وزن نسبی آن بر اساس اهمیت آن برای سلامت عمومی تعیین می‌شود. نمره q_i از رابطه (۸) تعیین می‌شود:

$$q_i = \frac{V_a - V_i}{S_i - V_i} \quad (8)$$

که در آن V_a مقدار نمونه برداری، V_i مقدار ایده آل (vi برای PH برابر ۷ و برای اکسیژن ۷/۱۴ و برای سایر پارامترها صفر است) و S_i مقدار استاندارد پارامتر است. همچنین جهت محاسبه وزن نسبی w_i از رابطه (۹) و (۱۰) استفاده می‌شود:

$$w_i = \frac{k}{S_i} \quad (9)$$

$$k = \frac{1}{\sum (1/S_i)} \quad (10)$$

WQI منابع آب را در پنج رده از بسیار خوب تا نامناسب برای آشامیدن طبقه‌بندی می‌کند و امکان تحلیل دقیق کیفیت آب برای

استفاده‌های آشامیدنی و کشاورزی را فراهم می‌سازد [۳۸].

تفسیر هیدروشیمیایی با استفاده از نمودارهای شولر و پایپر

برای درک بهتر ترکیب شیمیایی آب و روندهای تغذیه چشمه‌ها، از نمودارهای شولر و پایپر بهره گرفته می‌شود. این نمودارها امکان تشخیص نوع آب، منابع تغذیه و تغییرات هیدروشیمیایی را فراهم می‌آورند و در کنار شاخص‌های خشک‌سالی و دبی پایه، تصویری جامع از وضعیت منابع آب ارائه می‌کنند [۱۵ و ۳۵]. این رویکرد یکپارچه، امکان مدیریت پایدار چشمه‌ها و شناسایی نقاط حساس در برابر آلودگی و کاهش دبی را فراهم می‌سازد و پایه‌ای علمی برای برنامه‌ریزی منابع آب در مناطق کارستی فراهم می‌آورد. برای تحلیل هیدروشیمیایی آب چشمه‌ها از نمودار شولر و پایپر از نرم افزار Chemistry استفاده شد.

ارزیابی خشک‌سالی با شاخص‌های SPI، SPEI، RDI و SDI

برای تحلیل و مدیریت خشک‌سالی، استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی ضروری است. این شاخص‌ها شدت، مدت و فراوانی خشک‌سالی را پیش‌بینی کرده و امکان پیش‌بینی رخدادها و اتخاذ تدابیر مدیریتی را فراهم می‌کنند [۴۷]. در این پژوهش چهار شاخص اصلی SPEI، SPI، RDI و SDI به کار گرفته شده است. در این پژوهش از این چهار شاخص در ارزیابی خشک‌سالی خرم آباد استفاده شد زیرا هر یک از این شاخص‌ها اطلاعات خاصی را در مورد وضعیت رطوبت و تأثیرات خشک‌سالی ارائه می‌دهند که به فهم دقیق‌تر وضعیت کمک می‌کند. SPEI با ترکیب بارش و دما، نوسانات رطوبت را به طور جامع تحلیل می‌کند و به شناسایی الگوهای اقلیمی یاری می‌رساند. SPI به شناسایی و ارزیابی خشک‌سالی‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت می‌پردازد و به پیش‌بینی تغییرات اقلیمی کمک می‌کند. RDI با تمرکز بر رطوبت خاک و نیازهای آبی گیاهان، تأثیرات خشک‌سالی بر بوم‌سازگان و کشاورزی را دقیقاً نمایان می‌سازد و به تصمیم‌گیری‌های مؤثر در مدیریت منابع آب کمک می‌کند. در نهایت، SDI با تحلیل شدت و مدت زمان خشک‌سالی، امکان مقایسه دقیق وضعیت‌های مختلف را فراهم می‌آورد. این رویکرد چندبعدی، به برنامه‌ریزی مؤثر در مدیریت منابع آب و حفظ پایداری بوم‌سازگان‌های محلی کمک شایانی می‌کند و ضرورت استفاده از این شاخص‌ها را نمایان می‌سازد. برای تحلیل شاخص‌های خشک‌سالی مورد مطالعه از برنامه پایتون استفاده شده است.

شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI)

SPEI شاخصی چندمتغیره است که تفاوت بین بارش و تبخیر-تعرق بالقوه (PET) را در مقیاس‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری می‌کند [۴۷]. شاخص SPEI از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت میان بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل براساس رویکرد تورنت وایت استفاده می‌کند [۳۱]. این شاخص برخلاف SPI، اثر دما و نیاز تبخیری جو را نیز لحاظ می‌کند و برای تحلیل خشک‌سالی تحت تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی مناسب است [۵۳]. مقادیر SPEI

مثبت نشان‌دهنده شرایط مرطوب و منفی بیانگر خشک‌سالی است:

$$SPEI = \frac{(P - PET)}{P - PET\sigma} \quad (11)$$

P: بارش ماهیانه، PET: تبخیر-تعرق بالقوه یا دوره زمانی P-PET σ : انحراف معیار تفاوت بین بارش، تبخیر-تعرق برای یک دوره تاریخی (این مقدار به طور معمول برای دوره‌های بلند مدت محاسبه می‌شود).

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

مطابق با شاخص SPI، بارندگی تنها پارامتری است که بر خشک‌سالی هواشناسی تأثیر می‌گذارد [۲۴]. این شاخص بر اساس داده‌های بلندمدت بارش محاسبه می‌شود و امکان مقایسه شرایط خشک‌سالی در مناطق و دوره‌های مختلف را فراهم می‌آورد [۱۲]. این شاخص تنها بارش را مدنظر قرار می‌دهد و با تقسیم اختلاف مقدار بارش از میانگین بر انحراف معیار، شدت خشک‌سالی را کمی‌سازی می‌کند:

$$SPI = \frac{(P_i - P)}{S} \quad (12)$$

در این رابطه، P_i مقدار بارش در دوره مورد نظر، P میانگین بلندمدت بارش و S انحراف معیار مقادیر بارندگی است. طول دوره ثبت داده‌های بارش و همچنین نوع توزیع‌های احتمالاتی به کاررفته، نقش تعیین‌کننده‌ای در محاسبه شاخص SPI دارند و این عوامل از جمله محدودیت‌های آن محسوب می‌شوند [۳۳].

شاخص خشک‌سالی احيایی (RDI)

شاخص RDI نسبت بارش به تبخیر-تعرق بالقوه را اندازه‌گیری کرده و شدت خشک‌سالی را در مقیاس ماهانه مشخص می‌کند. این شاخص به ویژه برای ارزیابی تأثیر خشک‌سالی بر تغذیه آبخوان‌ها و دبی چشمه‌ها مناسب است و در مرحله اول از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۴۲، ۴۴]:

$$a^{\dagger}_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^{12} P_{ij}}{\sum_{j=1}^{12} PET_{ij}} \quad (13)$$

در این رابطه بارندگی P_{ij} و PET_{ij} در ارزیابی خشک‌سالی، به ترتیب مقادیر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه i ام از سال i ام و N برابر تعداد سال‌های آماری بسیار حائز اهمیت است. مرحله دوم در محاسبه این شاخص مقادیر RDI نرمال شده (RDI) با استفاده از مقادیر $a^{\dagger}_{ij}$ محاسبه‌شده برای سال مختلف در گام قبلی، مطابق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$RDI = \frac{a^{\dagger}_{ij}}{\bar{a}^{\dagger}_{ij} - 1} \quad (14)$$

در این رابطه $\bar{a}^{\dagger}_{ij}$ میانگین حسابی مقادیر $a^{\dagger}_{ij}$ در سال‌هایی است که در این مطالعه به استفاده از نسبتی از شاخص خشک‌سالی ارائه شده توسط سازمان فائو می‌پردازد. شاخص RDI با قابلیت انطباق با بازه‌های زمانی متنوع، امکان ارزیابی سالانه‌ی خشک‌سالی را میسر می‌سازد [۴۲].

شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه‌ای (SDI)

SDI شاخصی ناپارامتریک است که شدت خشک‌سالی هیدرولوژیکی را با مقایسه جریان ماهانه یا فصلی با میانگین بلندمدت محاسبه می‌کند: شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه از طریق رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$SDI_{ik} = \frac{V_{ik} - V_K}{S_K} \quad i=1,2, \dots \quad (15)$$

که در آن V_K و S_K به ترتیب نمایانگر میانگین مجموع حجم دبی و انحراف معیار حجم جریانات تجمعی برای دوره مبنای k هستند. شاخص خشک‌سالی جریان رودخانه به ویژه برای تحلیل تغییرات دبی چشمه‌ها و پیش‌بینی اثر خشک‌سالی بر منابع زیرزمینی کاربرد دارد [۳].

ارزش‌گذاری اقتصادی آب چشمه‌ها با استفاده از روش CVM

روش ارزش‌گذاری مشروط (CVM)

برای تعیین ارزش اقتصادی آب چشمه‌های خرم‌آباد، از روش ارزش‌گذاری مشروط (CVM) استفاده شد، روشی که برای ارزیابی منافع غیر بازاری خدمات بوم‌سازگانی و استخراج ارزش‌های اقتصادی منابع طبیعی به کار می‌رود. در این روش، با ایجاد یک بازار فرضی، تمایل به پرداخت (WTP) افراد برای تغییرات در کیفیت و کمیت منابع آب برآورد شده و ارزش‌های استفاده‌ای و غیر استفاده‌ای منابع تعیین می‌شود [۷]. در این پژوهش، پرسشنامه‌ای طراحی شد و به هر پاسخ‌دهنده مبلغی پیشنهادی ارائه شد تا میزان تمایل به پرداخت خود را مشخص کند. برآورد WTP با استفاده از مدل لاجیت و روش حداکثر راستنمایی پارامترها با استفاده از نرم‌افزار SPSS و Eviews 13 انجام شد [۲۶]. مدل لاجیت احتمال انتخاب یک گزینه را بر اساس متغیرهای توضیحی مانند ویژگی‌های فردی، اقتصادی و مبلغ پیشنهادی محاسبه می‌کند. فرمول محاسبه WTP به صورت رابطه (۱۶) ارائه می‌شود:

$$E(WTP) = \int_0^{\max} AF(\Delta U) dx = WTP \quad (16)$$

$$= \int_0^{\max} \{1 / [1 + \exp\{-(\alpha + \beta A)\}] \} dx$$

که $E(WTP)$ مقدار پیش‌بینی شده تمایل به پرداخت، WTP مبلغی که فرد حاضر است برای حفظ و بهبود منبع آب پرداخت کند، α عرض از مبدأ، βA ضریب متغیر مبلغ پیشنهادی و x مبلغ پیشنهادی (قیمت) است. در نهایت برای به دست آوردن میزان تمایل به پرداخت با تخمین مدل لاجیت از نرم‌افزار Eviews استفاده می‌شود.

مدل لاجیت

مدل لاجیت^۱ یکی از ابزارهای مهم در تحلیل‌های آماری و

اقتصادسنجی است که برای پیش‌بینی احتمال وقوع یک رویداد دوتایی (مانند خرید یا عدم خرید) استفاده می‌شود. این مدل از تابع توزیع تجمعی لاجستیک برای مدل‌سازی متغیر وابسته بهره می‌برد و به جای حداقل کردن مجذور خطاها، احتمال وقوع نتیجه را حداکثر می‌کند [۵]. این مدل از طریق رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$P(Y=1|X_i) = 1 + e^{\frac{1}{1 + e^{-ln}} \quad (17)$$

که در آن $P(Y=1|X_i)$ احتمال وقوع رویداد است [۵۰].

طراحی و ساختار پرسشنامه و روش نمونه‌گیری

ابزار اصلی گردآوری داده‌ها، پرسشنامه محقق ساخته بود که بر اساس مبانی اقتصاد محیط‌زیست و شرایط بومی خرم‌آباد طراحی شد. این پرسشنامه شامل پنج بخش: ویژگی‌های جمعیت‌شناختی، نگرش و میزان استفاده از آب چشمه‌ها، ارزش‌گذاری اقتصادی، نگرش محیط‌زیستی و مدیریتی و دریافت نظرات شهروندان بود. جامعه آماری شامل تمامی ساکنان شهر و نمونه ۱۰۰ نفر با روش نمونه‌گیری تصادفی ساده بود. پرسشنامه‌ها به صورت حضوری توزیع و تکمیل شدند تا دقت پاسخ‌ها و درک مفاهیم تخصصی مانند WTP افزایش یابد [۱۰ و ۲۰]. نتایج حاصل از این تحلیل، علاوه بر ارائه ارزش اقتصادی آب چشمه‌ها، امکان ادغام با مطالعات هیدرولوژیکی و ارزیابی آثار اقتصادی ناشی از تغییرات کمی و کیفی آب را فراهم کرده و مبنای تدوین راهبردهای حفاظتی، مدیریت پایدار و هدایت توسعه شهری به سمت پایداری محسوب می‌شود [۳۶ و ۳۷].

نتایج

یافته‌های هیدرولوژیکی کمی: روند و خشک‌سالی

دبی پنج چشمه اصلی خرم‌آباد (مطهری، کیو، گلستان، گرداب سنگی و گرداب دارایی) بر اساس داده‌های بلندمدت ۱۳۶۳-۱۴۰۳ بررسی شد (جدول ۱). سال‌های خشک به صورت صفر در نظر گرفته و داده‌های مفقوده با درون‌یابی زمانی تکمیل شدند تا پیوستگی سری زمانی حفظ شود. میانگین دبی نشان داد که چشمه مطهری با $539/64$ لیتر بر ثانیه بیشترین و چشمه گرداب سنگی با $176/95$ لیتر بر ثانیه کمترین آبدی را دارند، در حالی که چشمه‌های گلستان و کیو پرآب و گرداب دارایی در حد متوسط قرار گرفتند. اختلاف سه‌برابری بیشینه و کمینه دبی، نشان‌دهنده ناهمگونی منابع تغذیه، مسیرهای زیرزمینی و ظرفیت انتقال آب در سامانه‌های کارستی است. میانگین دبی کل پنج چشمه $407/31$ لیتر بر ثانیه، با ضریب تغییرات $35/5\%$ ، انحراف معیار $144/66$ لیتر بر ثانیه و دامنه تغییرات $362/7$ لیتر بر ثانیه، بیانگر تغییرپذیری بالا و حساسیت منابع به نوسانات هیدرولوژیکی است.

جدول ۱- دبی میانگین بلندمدت چشمه‌ها (۱۳۶۳-۱۴۰۳)

Table 1. Long-term average discharge of springs (1984-2024)

چشمه Spring	Discharge (L/s)
مطهری Motahhari	539.643
کیو Qiu	501.8985
گلستان Golestan	454.0737
گرداب سنگی Gerdab-e Sangi	176.9479
گرداب داریی Gerdab-e Darai	364.0028

روند کاهشی معنادر دبی چشمه‌ها در بازه ۴۰ ساله

با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال، روند تغییرات دبی طی ۱۳۶۱-۱۴۰۳ مورد بررسی قرار گرفت. طبق شکل ۳ مقدار Z برابر ۳/۵۹۴- و منفی بودن آن، نشان‌دهنده روند کاهشی معنادر دبی چشمه‌ها است. کاهش تدریجی دبی در طول دوره آماری، حاکی از اثرات تجمعی تغییرات اقلیمی، کاهش تغذیه آبخوان و حساسیت سامانه‌های کارستی به تنش‌های محیطی است.

شناسایی دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی با شاخص‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی

برای ارزیابی خشک‌سالی، شاخص‌های هیدرولوژیکی SDI و شاخص‌های اقلیمی SPI، SPEI و RDI در بازه ۲۰۰۶-۲۰۲۲ و مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه محاسبه شد. بر اساس جدول ۲، میانگین مقادیر شاخص‌های SPI-۱۲ (۰/۰۸)، SPEI-۱۲ (۰/۰۰)، RDI-۱۲ (۰/۰۰) و SDI-۶ (۰/۰۰۸) به صفر بوده و انحراف معیار آن‌ها به ترتیب ۰/۷۸، ۰/۹۹، ۱/۰۰ و ۰/۹۶ محاسبه شده است که صحت محاسبات را تأیید می‌کند. دامنه تغییرات شاخص‌ها

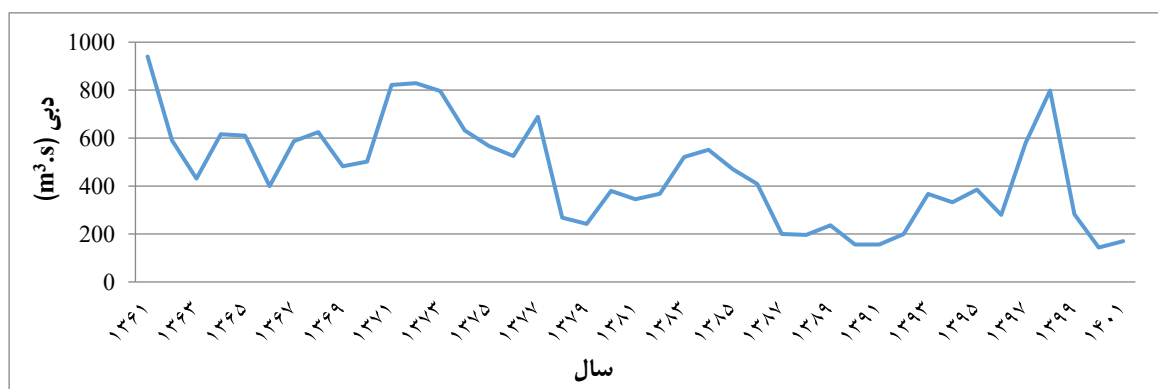
نشان‌دهنده نوسانات قابل توجه اقلیمی و هیدرولوژیکی در دوره مورد مطالعه است؛ به گونه‌ای که SPI-۱۲ در دامنه ۰/۷۶- تا ۲/۷۷، SPEI-۱۲ در بازه ۲/۶۹- تا ۲/۶۹، RDI-۱۲ بین ۱/۲۲- تا ۲/۸۵ و SDI-۶ در محدوده ۴/۷۵- تا ۱/۴۵ تغییر کرده است. مقادیر منفی شاخص SDI-۶ (حداقل ۴/۷۵-) نشان‌دهنده رخداد‌های هیدرولوژیکی فوق‌بحران و حساسیت بالای دبی چشمه‌ها به تغییرات اقلیمی است. همچنین شاخص‌های SPI و SPEI نوسانات بارش و اثر تبخیر و تعرق بالقوه را آشکار می‌سازند، در حالی که شاخص RDI با ترکیب هر دو مؤلفه بارش و دما، نمایی نزدیک‌تر به وضعیت منابع آب زیرزمینی ارائه می‌دهد.

بر اساس طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی/ترسالی ارائه‌شده در جدول ۳، از مجموع ۱۸۲ ماه دوره آماری، ۱۱۹ ماه (۶۵/۴ درصد) در شرایط نرمال (۰/۰- < SPI < ۱/۱) قرار داشته است. طبقه ترسالی متوسط تا بسیار شدید در مجموع ۴۳ ماه (۲۳/۶ درصد دوره) رخ داده که شامل ۱۶ ماه ترسالی متوسط (۸/۸ درصد)، ۱۳ ماه ترسالی شدید (۷/۱ درصد) و ۱۴ ماه ترسالی بسیار شدید (۷/۷ درصد) است. مقادیر بسیار منفی (SDI-۶) نشان‌دهنده رخداد‌های هیدرولوژیکی فوق بحرانی و حساسیت بالای جریان چشمه‌ها به تغییرات اقلیمی است. همچنین شاخص‌های SPI و SPEI، نوسانات بارش و اثر تبخیر و تعرق بالقوه را آشکار کردند، در حالی که RDI، نمایی نزدیک‌تر به وضعیت منابع زیرزمینی ارائه داد. بر مبنای نتایج دوره‌های خشک‌سالی پایدار در ۲۰۱۰-۲۰۱۴ و ۲۰۲۰-۲۰۲۲ دوره ترسالی شدید و ممتد ۲۰۱۸-۲۰۲۰ شناسایی شد. و شاخص‌های ترکیبی نشان دادند که حتی در شرایط اقلیمی بلندمدت نرمال، اثرات تجمعی خشک‌سالی میان‌مدت و بلندمدت به وضوح در کاهش دبی چشمه‌ها نمایان است.

یافته‌های هیدرولوژیکی کیفی: کیفیت آب و هیدروشیمی

ارزیابی کیفیت آب چشمه‌ها با شاخص WQI

تحلیل نتایج کیفیت آب چشمه‌ها براساس پارامترهای pH، TDS، NO_3 ، SO_4 و Ca محاسبه شد. براین مبنای شاخص WQI در بازه ۳۷-۳۹ قرار داشت که نشان‌دهنده کیفیت بسیار خوب آب و مناسب برای مصارف



شکل ۳- نمودار روند دبی چشمه‌های خرم آباد در بازه زمانی ۴۰ سال

Fig 3. Discharge trend diagram of Khorramabad springs over a 40-year period

جدول ۲- آمار توصیفی شاخص‌ها و متغیرهای هواشناسی (۲۰۰۶-۲۰۲۲)

Table 2. Descriptive statistics of meteorological indices and variables (2006–2022)

متغیر/شاخص Variable/Index	واحد/میانگین Unit/Mean	میانگین Mean	انحراف معیار Standard Deviation	بیشینه Maximum	کمینه Minimum
بارش ماهیانه Monthly Precipitation	mm	234.41	344.06	3537.2	13.84
دمای ماهانه Monthly Temperature	°C	5.39	4.18	13	0
SPI-12	بی بعد Dimensionless	0.08	0.78	2.67	-0.76
SPEI-12	بی بعد Dimensionless	0.00	0.99	2.69	-2.69
RDI-12	بی بعد Dimensionless	0.00	1.00	2.85	-1.22
SDI-6	بی بعد Dimensionless	0.008	0.96	1.45	-4.75

جدول ۳- طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی/ترسالی بر اساس SPI و SDI-6

Table 3. Classification of drought/wet period severity based on SPI and SDI-6

توضیح Description	محدوده شاخص SDI-6 SDI-6 Range	درصد دوره Percentage of Period	تعداد ماه Number of Months	محدوده شاخص SPI SPI Range	طبقه شدت Intensity Class
پاسخ مثبت چشمه‌ها Positive response of springs	1.0 – 1.4547	7.7%	14	$SPI \geq 2.0$	ترسالی بسیار شدید Extremely Wet
افزایش دبی تدریجی Gradual discharge increase	0.1 – 1.0	7.1%	13	$1.5 \leq SPI < 2.0$	ترسالی شدید Severely Wet
پاسخ چشمه‌ها معتدل Moderate spring response	0 – 0.5	8.8%	16	$1.0 \leq SPI < 1.5$	ترسالی متوسط Moderately Wet
شرایط معمولی جریان Normal flow conditions	$(-0.5) - 0$	65.4%	119	$-1.0 < SPI < 1.0$	نرمال Normal
افت تدریجی جریان کاهش شدید جریان Gradual flow decline	$(-1.0) - (-0.5)$	8.2%	15	$-1.5 < SPI \leq -1.0$	خشک‌سالی متوسط Moderately Dry
کاهش شدید جریان Severe flow reduction	$(-2.5) - (-1.0)$	2.7%	5	$-2.0 < SPI \leq -1.5$	خشک‌سالی شدید Severely Dry
رخداد فوق بحرانی Critical event occurrence	$\geq (-4.75)$	0.0%	0	$SPI \leq -2.0$	خشک‌سالی بسیار شدید Extremely Dry
		100%	182 months		جمع Total

شرب است. در نهایت نتایج تحلیل در جدول ۴ نشان داده می‌شود.

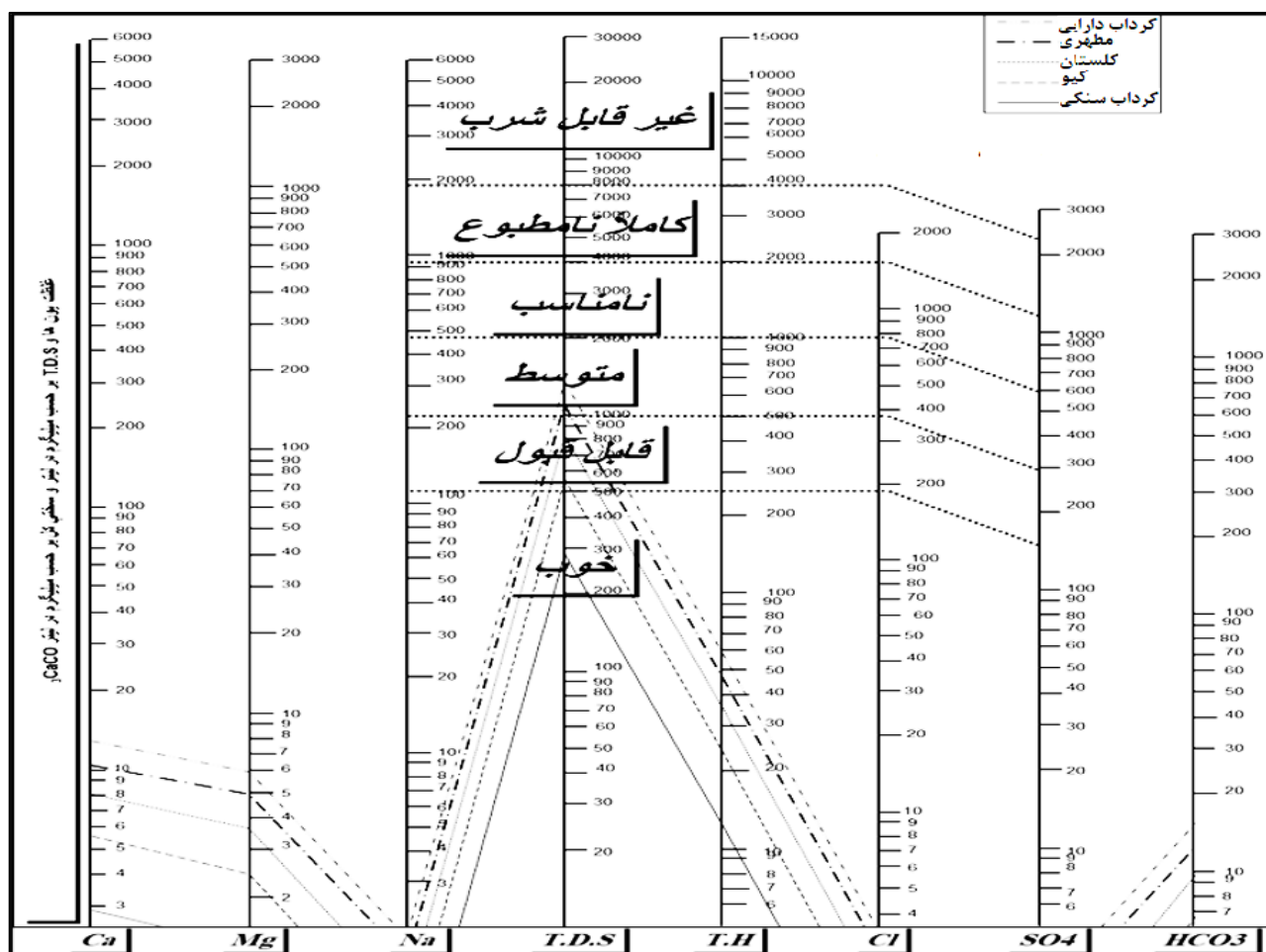
تفسیر هیدروشیمیایی با نمودار شولر

به طور کلی تحلیل شیمیایی در شکل ۴ نشان داد که کاتیون غالب Ca^{2+} و Mg^{2+} و آنیون غالب HCO_3^- است، که تأثیر مستقیم انحلال سنگ‌های کربناته را منعکس می‌کند. براساس نتایج حاصله از نمودار شولر چشمه‌های کیو و مطهری؛ بالاترین کیفیت شیمیایی

و پایداری یونی، کم‌هزینه‌ترین منابع برای استفاده شهری هستند. چشمه‌های گلستان و گرداب دارایی؛ تماس طولانی‌تر با رسوبات و تأثیر فعالیت‌های شهری، نیازمند پایش دقیق‌تر هستند. و همچنین گرداب سنگی؛ نوسانات فصلی قابل توجه، با ارزش غیرمصرفی بالا (گردشگری) دارند. این تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Chemistry بررسی شده‌اند.

جدول ۴- محاسبه کیفیت آب با شاخص WQI
Table 4. Water quality calculation using the WQI index

WQI	نتایج	Ca	SO4	TH	NO3	TDS	PH	نام چشمه Spring Name
39.12	بسیارخوب Very Good	2.96	0.47	238.91	6.28	310	7.43	گرداب سنگی Gerdab-e Sangi
37.67	بسیارخوب Very Good	2.75	0.52	198	6.27	270.85	7.51	کیو Qiu
37.85	بسیارخوب Very Good	2.83	0.52	206.17	6.16	286.68	7.46	گلستان Golestan
38.70	بسیارخوب Very Good	2.99	0.56	221.63	6.13	326	7.44	مطهری Motahhari
37.66	بسیارخوب Very Good	2.31	1.75	208.33	5.35	350	7.52	گرداب دارایی Gerdab-e Darai



شکل ۴- تحلیل شیمیایی کیفیت آب با استفاده از نمودار شولر
Fig 4. Chemical analysis of water quality using the Schoeller diagram

تحلیل نمودار پایپر

طبق تحلیل نمودار پایپر در شکل ۵ نشان داد که همه چشمه‌ها در رخساره Ca-Mg-HCO_3 قرار دارند، بیانگر آب‌های تازه با زمان ماند کوتاه تا متوسط و همگنی نسبی سیستم آبخوان منطقه است. بررسی مثلث کاتیونی نشان داد که تمامی چشمه‌ها در محدوده غلبه کلسیم و منیزیم قرار دارند. در مثلث آنیونی، نمونه‌ها عمدتاً در محدوده بی‌کربنات غالب (HCO_3^-) قرار دارند که بیانگر نفوذ آب‌های جوی و واکنش CO_2 با سنگ‌های کربناته است. نتایج نمودار پایپر، همراه با شکل ۵، نشان می‌دهد که آب تمامی چشمه‌ها از نظر تیپ کاتیونی و آنیونی پایدار و عمدتاً تحت کنترل فرآیندهای طبیعی است و هیچ‌گونه آلودگی شدید انسانی مشاهده نشد.

به طور کلی نتایج کمی نشان‌دهنده کاهش تدریجی دبی چشمه‌ها و حساسیت سامانه‌های کارستی به تغییرات اقلیمی است، در حالی که تحلیل شاخص‌های خشک‌سالی، اثرات تجمعی و طولانی‌مدت کاهش ورودی آب زیرزمینی را آشکار می‌کند. کیفیت آب تمامی چشمه‌ها بسیار خوب است و ترکیب داده‌های کمی و کیفی ابزار قدرتمندی برای مدیریت پایدار منابع آب و ارزش‌گذاری اقتصادی

چشمه‌ها فراهم می‌کند.

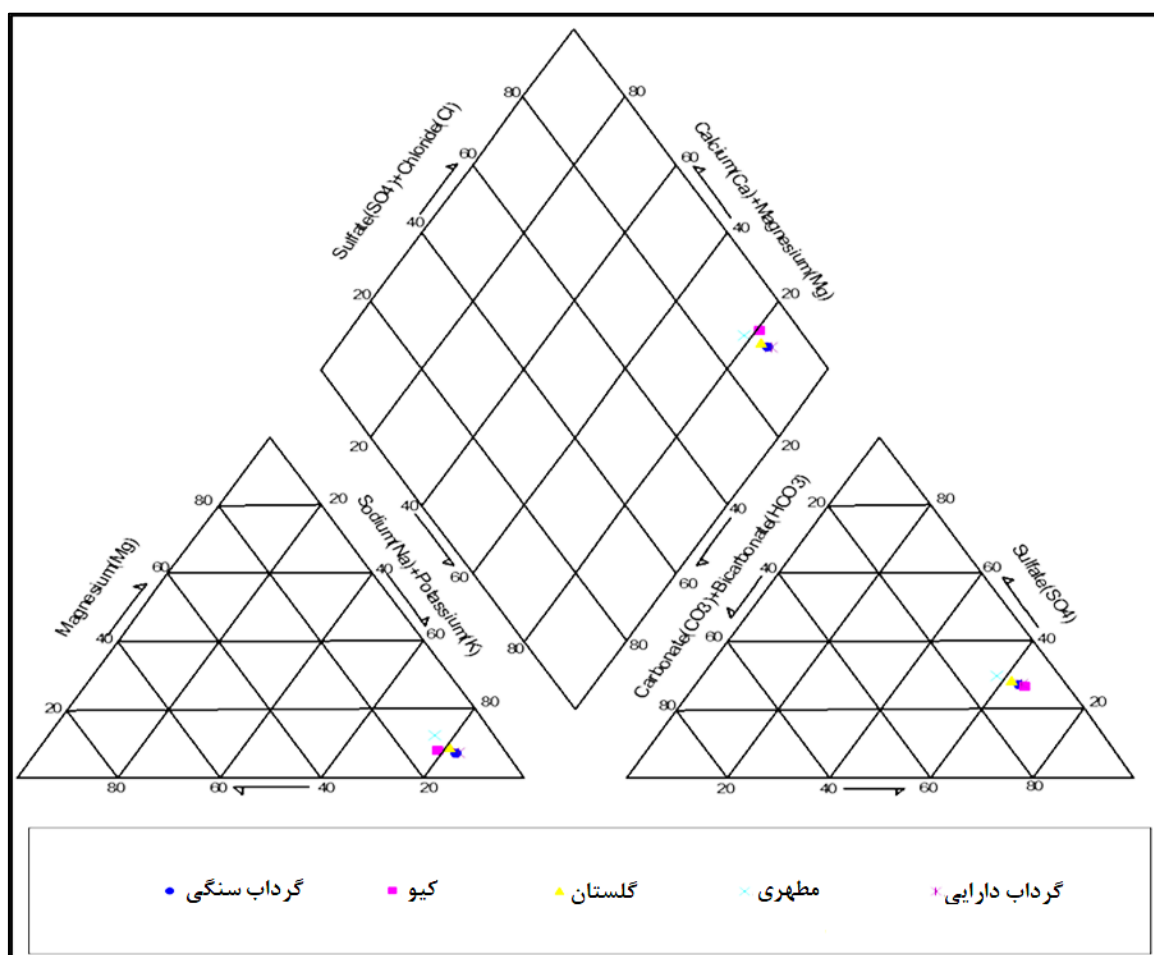
یافته‌های ارزش‌گذاری اقتصادی: تمایل به پرداخت و عوامل

مؤثر

در این مطالعه، ۱۰۰ پرسشنامه تکمیل‌شده توسط شهروندان خرم‌آباد تحلیل شد تا هیدرولوژی، ارزش اقتصادی و نگرش جامعه نسبت به کیفیت و استفاده از چشمه‌ها بررسی گردد. داده‌ها با نرم‌افزار SPSS تحلیل شده و هیچ داده مفقودی مشاهده نشد؛ و تمامی پرسشنامه‌ها معتبر بودند.

تحلیل جمعیت‌شناختی پاسخ‌دهندگان

نتایج تحلیل توصیفی ویژگی‌های جمعیت‌شناختی نشان داد که بیشترین فراوانی سنی مربوط به گروه ۲۰-۳۰ سال (۳۶٪) و پس از آن ۳۰-۴۰ سال (۲۸٪) بوده است؛ به‌طوری‌که در مجموع ۷۸٪ از پاسخ‌دهندگان کمتر از ۴۰ سال سن داشتند. توزیع جنسیت نسبتاً متعادل بود (۵۳٪ مرد و ۴۷٪ زن) و اکثریت افراد ساکن مناطق شهری بودند (۹۳٪). از نظر تحصیلات، بیشترین فراوانی به مدرک کارشناسی (۳۶٪) اختصاص داشت و پس از آن دیپلم (۲۹٪) و مدارک بالاتر از دیپلم (۱۸٪) قرار داشتند. از حیث وضعیت شغلی،



شکل ۵- تحلیل شیمیایی کیفیت آب با استفاده از نمودار پایپر

Fig 5. Chemical analysis of water quality using the Piper diagram

۴۰٪ شاغل و ۳۳٪ دانشجو بودند. همچنین بیشترین فراوانی درآمد ماهیانه در بازه ۲۰ تا ۳۰ میلیون ریال (۳۷٪) گزارش شد. در خصوص بُعد خانوار، ۴۷٪ دارای ۲-۴ نفر و ۳۷٪ دارای ۴-۶ نفر عضو بودند.

الگوی مصرف و بهره‌برداری از چشمه‌ها

نتایج نشان داد که ۸۰٪ از پاسخ‌دهندگان از آب چشمه‌ها به صورت مستقیم استفاده می‌کنند. بیشترین بهره‌برداری مربوط به چشمه‌های کیو (۳۰٪) و مطهری (۲۹٪) بوده و پس از آن گلستان (۲۰٪)، گرداب سنگی (۱۵٪) و گرداب دارایی (۶٪) قرار دارند. کاربری غالب آب چشمه‌ها مصرف شرب (۷۱٪) است و سایر مصارف شامل تفریح (۱۹٪)، صنعتی (۸٪) و آبیاری (۲٪) سهم کمتری دارند. از نظر فراوانی استفاده، ۵۸٪ به صورت روزانه، ۱۸٪ هفتگی و ۱۶٪ ماهیانه از این منابع بهره‌برداری می‌کنند. همچنین، ۳۶٪ از افراد اعتماد کامل، ۴۲٪ اعتماد نسبی و ۲۲٪ نگرانی یا آگاهی ناکافی نسبت به کیفیت آب گزارش کرده‌اند که بیانگر وجود سطحی از تردید در میان بخشی از پاسخ‌دهندگان است.

نگرش پاسخ‌دهندگان نسبت به حفاظت و ارزش اقتصادی چشمه‌ها

نتایج نشان داد که ۹۳٪ از پاسخ‌دهندگان حفاظت از چشمه‌ها را امری مهم تلقی می‌کنند. همچنین، ۵۵٪ ارزش اقتصادی چشمه‌ها را بالا ارزیابی کرده‌اند. در میان دلایل مطرح شده برای ارزش بالای چشمه‌ها، سلامت عمومی (۳۱٪) در رتبه نخست قرار دارد، سپس کشاورزی و صنعت (۲۰٪)، کیفیت آب شرب و گردشگری (هر کدام ۱۷٪) و در نهایت حفظ بوم‌سازگان (۱۵٪) گزارش شده است.

برآورد تمایل به پرداخت برای کارکردهای استفاده‌ای غیراستفاده‌ای

تمایل به پرداخت برای کارکرد استفاده‌ای

به طور کلی، ۴۵٪ افراد پاسخ‌دهنده تمایل به پرداخت دارند. بر

این اساس بیشترین مبلغ اعلامی به‌ازای هر مترمکعب آب چشمه ۱۰۰-۱۵۰ هزار تومان بود و در نهایت ۵۴٪ افراد تمایلی به پرداخت نداشتند. نتایج تحلیل آماری متغیر میزان حداکثر مبلغ قابل پرداخت برای کارکرد استفاده‌ای در جدول ۵ نمایش داده می‌شود.

تمایل به پرداخت برای کارکرد غیراستفاده‌ای

به طور کلی طبق نتایج حاصل جدول ۷، ۵۲٪ افراد پاسخ‌دهنده تمایل به پرداخت دارند. براین اساس بیشترین مبلغ اعلامی به‌ازای هر مترمکعب آب چشمه‌ها ۵۰-۱۰۰ هزار تومان است و در نهایت ۴۸٪ افراد پاسخ‌دهنده تمایل به پرداخت مبلغی نداشتند (جدول ۶).

تحلیل نگرش محیط زیستی، عوامل تهدید و راهبردهای مدیریتی از دیدگاه شهروندان

تحلیل نتایج آماری به دست آمده، نتایج به دست آمده از الگوی رفتاری در مواجهه با افزایش منابع آب در صورت افزایش ۱۰ درصدی آب چشمه‌ها، ۵۵٪ از پاسخ‌دهندگان کاهش مصرف و ۲۸٪ پرداخت هزینه را انتخاب کرده‌اند، در حالی که تنها ۱۱٪ به منابع جایگزین و ۶٪ بدون تغییر باقی مانده‌اند. این الگو بیانگر غلبه رفتارهای مبتنی بر ارزش اقتصادی و مدیریت پایدار منابع آب است. براساس تحلیل‌های انجام شده، از ابعاد ارزش اقتصادی چشمه‌ها، بیشترین سهم ارزش اقتصادی به بهبود سلامت عمومی (۳۱٪) اختصاص دارد و پس از آن نقش در تولید و اشتغال (۲۰٪)، کیفیت آب شرب (۱۷٪)، گردشگری (۱۷٪) و حفاظت اکولوژیکی (۱۵٪) قرار می‌گیرند. این نتایج بیانگر ماهیت چندبعدی ارزش منابع آب است.

نتایج آماری حاصل پیامدهای کاهش کارکرد اقتصادی چشمه‌ها، نشان می‌دهد کاهش کیفیت زندگی با ۵۲٪ مهم‌ترین پیامد کاهش کارکرد اقتصادی چشمه‌هاست و سپس به ترتیب تأثیر بر فعالیت‌های اقتصادی (۱۸٪)، گردشگری (۱۳٪) و افزایش هزینه آب (۱۲٪) قرار

جدول ۵- تحلیل آماری متغیر میزان حداکثر مبلغ قابل پرداخت برای کارکرد استفاده‌ای

Table 5. Statistical analysis of the variable for the maximum willingness to pay for use value

درصد تجمعی Cumulative Percent	درصد Percent	فراوانی Frequency	حداکثر مبلغ قابل پرداخت برای کارکرد استفاده‌ای (به ازای هر متر مکعب) Maximum Payable Amount for Consumptive Use (per cubic meter)
0.21	0.21	21	۱۰۰ هزار تومان 100 thousand Tomans
0.36	0.15	15	۱۵۰ هزار تومان 150 thousand Tomans
0.42	0.06	6	۲۰۰ هزار تومان 200 thousand Tomans
0.46	0.04	4	بیشتر از ۲۰۰ هزار تومان More than 200 thousand Tomans
1.00	0.54	54۰۴	تمایل به پرداخت ندارم I am not willing to pay
	1.00	100	جمع Total

جدول ۶- تحلیل آماری متغیر میزان حداکثر مبلغ قابل پرداخت کارکرد غیراستفاده‌ای چشمه‌ها

Table 6- Statistical analysis of the variable for the maximum willingness to pay for non-use value of springs

درصد تجمعی Cumulative Percent	درصد Percent	فراوانی Frequency	میزان حداکثر مبلغ قابل پرداخت کارکرد غیراستفاده‌ای چشمه‌ها (به ازای هر متر مکعب) Maximum Payable Amount for Unused Water Rights of Springs (per cubic meter)
0.25	0.25	25	۵۰ هزار تومان 50 thousand Tomans
0.43	0.18	18	۱۰۰ هزار تومان 100 thousand Tomans
0.47	0.04	4	۱۵۰ هزار تومان 150 thousand Tomans
0.52	0.05	5	۲۰۰ هزار تومان 200 thousand Tomans
1.00	0.48	48	تمایل به پرداخت ندارم I am not willing to pay
	1.00	100	جمع Total

جدول ۷- تخمین تمایل به پرداخت کارکرد غیراستفاده‌ای

Table 7. Estimation of willingness to pay for non-use value

متغیر معنادار Significant Variable	ضریب Coefficient	میانگین Mean	جواب ضرب Product Result	جمع با c Sum with c
سن Age	-0.736271	2.58	-1.899	
تحصیلات Education	0.375809	2.87	1.078	
درآمد Income	-0.540146	2.59	-1.399	-3.641
عرض از مبدا Intercept	-1.421105	-	-	

تخمین تمایل به پرداخت (WTP) با مدل لاجیت برای کارکرد غیراستفاده‌ای

تخمین WTP برای ارزش اقتصادی کارکرد غیراستفاده‌ای چشمه‌ها با مدل لاجیت در نرم‌افزار EViews انجام شد. نتایج مدل دودویی طبق جدول ۷ نشان داد، که نگرش محیط زیستی و آگاهی پاسخ‌دهندگان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تمایل به پرداخت هستند. ضریب متغیرهای معنادار با میانگین پاسخ‌ها ترکیب شد و ضریب Q6 لحاظ شد. بر اساس مدل، تمایل متوسط به پرداخت حدود ۸۵ هزار تومان به ازای هر مترمکعب برای حفظ و استفاده غیرمستقیم از چشمه‌ها برآورد شد، کمتر از بالاترین مبلغ پیشنهادی (۲۰۰ هزار تومان). تحلیل نشان داد که استفاده مستقیم، سن و درآمد مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده WTP هستند: افراد جوان‌تر و استفاده‌کنندگان مستقیم بیشترین احتمال پرداخت را دارند، در حالی که درآمد بالاتر با کاهش تمایل به پرداخت همراه است. تحلیل برای کارکرد استفاده‌ای

دارند که وابستگی رفاه محلی به پایداری منابع بستگی دارد. تحلیل نتایج آماری حاصل متغیر ادراک عمومی از کیفیت آب نشان دهنده این که ۷۱٪ افراد پاسخ‌دهنده آب را خوب تا عالی و ۲۹٪ متوسط تا ضعیف ارزیابی کرده‌اند که نشان‌دهنده همزمانی اعتماد عمومی و نگرانی‌های کیفی است. تحلیل نتایج آماری متغیر عوامل تهدیدکننده کیفیت و دسترسی آب چشمه‌ها از نظر پاسخ‌دهندگان نشان می‌دهد، آلودگی فاضلاب (۳۱٪) و مدیریت نادرست (۲۶٪) بیشترین نقش را در کاهش کیفیت و دسترسی دارند، در حالی که تغییرات اقلیمی (۲۳٪) و فعالیت‌های صنعتی-کشاورزی (۱۹٪) نیز اثرگذارند. نتایج آماری متغیر راهبردهای اولویت‌دار برای بهبود وضعیت چشمه‌ها توسط پاسخ‌دهندگان، پایش مستمر کیفیت (۳۹٪)، آموزش و ارتقای آگاهی (۲۹٪) و توسعه زیرساخت‌های آب و فاضلاب (۲۵٪) به‌عنوان مهم‌ترین اقدامات شناسایی شده‌اند که ضرورت رویکرد یکپارچه مدیریتی-اجتماعی را نشان می‌دهد.

ناموفق بود، زیرا متغیرهای سن، تحصیلات، درآمد، جنسیت، تعداد اعضای خانواده و شغل معنادار نبودند. بر همین اساس میزان تمایل به پرداخت ارزش گذاری اقتصادی برای کارکرد غیراستفاده های مورد تحلیل قرار گرفت.

بحث و نتیجه گیری

تحلیل هیدرولوژیکی و کیفیت آب چشمه های خرم آباد نشان دهنده حساسیت بالای سامانه های کارستی به تغییرات اقلیمی و کاهش تغذیه منابع زیرزمینی است. کاهش تدریجی دبی پنج چشمه اصلی (مطهری، کیو، گلستان، گرداب سنگی و گرداب دارایی) با ضریب تغییرات ۳۵.۵٪ و دامنه گسترده بین بیشینه و کمینه، با یافته های پژوهش های پیشین درباره تأثیرپذیری این سامانه ها از شرایط اقلیمی همخوانی دارد [۵۴]. شاخص های خشک سالی SPI، SPEI، RDI و SDI دوره های خشک سالی شدید ۲۰۱۰-۲۰۱۴ و ۲۰۲۰-۲۰۲۲ و دوره ترسالی ۲۰۱۸-۲۰۲۰ را مشخص کردند. این شاخص ها به خوبی نشان دادند که اثرات تجمعی خشک سالی میان مدت و بلندمدت بر کاهش دبی چشمه ها قابل مشاهده است. این یافته با تأکید Vicente-Serrano et al. (2010) بر توانایی شاخص های چندمقیاسی^۱ خشک سالی در آشکارسازی پاسخ متغیرهای هیدرولوژیک در مقیاس های زمانی مختلف، همخوانی کامل دارد [۴۷].

کیفیت آب چشمه ها بر اساس شاخص WQI بسیار خوب ارزیابی شد و تحلیل شیمیایی نشان دهنده غلبه Ca^{2+} ، Mg^{2+} و HCO_3^- بود، که نمایانگر منابع آب تازه با زمان ماند کوتاه تا متوسط و اثر غالب لیتولوژی کارستی است. این نتایج با مطالعه Hatamifard et al., (2018) همسو است [۲۱].

تحلیل اقتصادی با پرسشنامه و مدل لاجیت نشان داد که استفاده مستقیم، سن و درآمد مهم ترین عوامل مؤثر بر تمایل به پرداخت (WTP) برای کارکرد غیراستفاده ای چشمه ها هستند. تمایل متوسط به پرداخت حدود ۸۵ هزار تومان برآورد شد که محدودتر از بالاترین مبلغ پیشنهادی (۲۰۰ هزار تومان) است و نشان دهنده آگاهی افراد از ارزش منابع و محدودیت توان مالی آنهاست. افراد جوان تر و استفاده کنندگان مستقیم بیشترین تمایل به پرداخت را دارند، در حالی که درآمد بالاتر تأثیر منفی دارد. این نتایج با یافته های Levin et al., (2014) همخوانی دارد [۲۷].

این یافته ها تأکید می کنند که آگاهی و نگرش محیط زیستی، دسترسی به منابع و تجربه مستقیم استفاده، از عوامل کلیدی در ارزش گذاری اقتصادی هستند. بنابراین، سیاست های محیط زیستی باید بر آموزش، اطلاع رسانی و هدف گیری گروه های مؤثر، به ویژه جوانان و استفاده کنندگان مستقیم، متمرکز شود تا مشارکت مالی و حفاظت پایدار منابع افزایش یابد. در مجموع، تلفیق نتایج کمی و کیفی هیدرولوژیکی و اقتصادی، تصویر علمی و جامع از وضعیت

1. multi-scalar

منابع آب کارستی و رفتار اقتصادی جامعه ارائه کرده و پایه ای مطمئن برای طراحی برنامه های مدیریت پایدار و سیاست گذاری حفاظت از چشمه ها فراهم می کند. ترکیب مقوله های هیدرولوژیکی، کیفیت آب و تحلیل اقتصادی در پژوهش های آبخیز، امکان ارائه یک دیدگاه جامع از وضعیت منابع آب را فراهم می کند و تأثیر قابل توجهی بر مدیریت پایدار آبخیز شهری دارد. این رویکرد جامع امکان شناسایی الگوهای تعامل بین کیفیت و کمیت منابع آب را فراهم می آورد و به مدیران این امکان را می دهد تا به طور مؤثر به چالش های ناشی از تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی پاسخ دهند. با تحلیل داده های هیدرولوژیکی، نواحی آسیب پذیر شناسایی می شوند و اقداماتی برای تقویت تاب آوری بوم سازگان ها انجام می گیرد. همچنین، اطلاعات کیفی آب به تصمیم گیرندگان کمک می کند تا استانداردهای بهتری برای حفاظت و مدیریت منابع آب تدوین کنند. تحلیل اقتصادی و شناخت ارزش منابع آب به افزایش آگاهی عمومی و مشارکت جامعه در حفاظت از این منابع منجر می شود. در نهایت، این اطلاعات می تواند مبنایی برای سیاست گذاری مؤثر در مدیریت پایدار آبخیز شهری باشد و به حفظ بوم سازگان های کارستی و تأمین پایداری منابع آبی کمک کند.

تحلیل جامع هیدرولوژیکی و کیفیت آب چشمه های اصلی خرم آباد نشان داد که این منابع از نظر کمی و کیفی رفتار ناهمگن دارند و حساس به تغییرات اقلیمی، فشارهای انسانی و شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه هستند. دبی بلندمدت چشمه ها با اختلاف قابل توجه (۵۳۹/۶۴ لیتر بر ثانیه در مطهری و ۱۷۶۷۹۵ لیتر بر ثانیه در گرداب سنگی) و ضریب تغییرات ۳۵/۵٪، حساسیت بالای سامانه های کارستی به تغییرات تغذیه و تخلیه را نشان می دهد. آزمون من-کندال کاهش معنادار دبی طی چهار دهه اخیر را تأیید کرد که با کاهش بارش، افزایش تبخیر، توسعه شهری و برداشت فزاینده آب زیرزمینی مرتبط است. شاخص های خشک سالی هیدرولوژیکی و اقلیمی (SDI، SPI، SPEI و RDI) دوره های خشک سالی پایدار و اثرات تجمعی آنها بر کاهش ذخایر زیرزمینی و دبی چشمه ها را مشخص کردند. چشمه های با تغذیه عمیق (مطهری و گلستان) واکنش تدریجی و پایدار نشان دادند، در حالی که چشمه های حساس تر (کیو، گرداب سنگی و گرداب دارایی) پاسخ سریع و قابل توجهی به نوسانات اقلیمی داشتند، که ضرورت پایش مستمر و مدیریت تلفیقی منابع آب را برجسته می کند. از منظر کیفیت، شاخص WQI نشان داد که آب همه چشمه ها در محدوده بسیار خوب و مطابق استاندارد شرب است. غالب بودن $Ca-Mg-HCO_3$ و پایین بودن TDS، سدیم و سولفات بیانگر کنترل طبیعی ترکیب آب توسط لیتولوژی منطقه و حداقل اثر آلودگی انسانی است. چشمه های کیو و مطهری از نظر ثبات ترکیب یونی و نوسانات کم، کم هزینه ترین منابع برای مصرف شهری هستند، در حالی که چشمه های گلستان و گرداب دارایی نیازمند پایش دقیق تر هستند و گرداب سنگی با ارزش غیرمصرفی بالا (گردشگری) اهمیت ویژه ای دارد. ارزش اقتصادی و

منابع مورد استفاده

1. Abbasnia, A., Yousefi, N., Mahvi, A. H., Nabizadeh, R., Radfard, M., Yousefi, M., and Alimohammadi, M., 2019. Evaluation of groundwater quality using water quality index and its suitability for drinking and irrigation purposes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 1-15. doi: 10.1007/s10661-019-7481-8
2. Asadi, H., and Soltani, G., 2000. Investigating the reaction of domestic and agricultural water consumers to water pricing. *Agricultural Economics and Development*, 32, 167-186. (In Persian)
3. Azareh, A., Rahdari, M. R., Rafiei, E., and Azaria, F., 2014. Investigate the relationship between hydrological and meteorological droughts in Karaj dam Basin. *European Journal of Experimental Biology*, 4(3), 102-107.
4. Balali, H., and Lal, F. K., 2022. Economic valuation of groundwater in agriculture sector: Case study Hamedan-Bahar Plain. *Conference Proceedings*.
5. Bani-Mahd, B., Arabi, M., and Hasanpour, S., 2016. *Empirical Research and Methodology in Accounting* (Vol. 1, 7th ed.). Tehran: Termeh Publications. (In Persian)
6. Bastami, M., Saleh Nia, N., Mirbagheri, S. S., 2021. Estimating the economic value of water by calculating the willingness of citizens of Mashhad to pay for surplus agricultural water for drinking purposes. *Journal Name Not Specified*. (In Persian)
7. Brouwer, R., 2000. Environmental value transfer: state of the art and future prospects. *Ecological Economics*, 32(1), 137-152. doi: 10.1016/S0921-8009(99)00093-0
8. Carson, R. T., and Flores, N. E., 2001. Contingent valuation: controversies and evidence. *Environmental and Resource Economics*, 19, 173-210. doi: 10.1023/A:1011128332243
9. Cude, C. G., 2001. A water quality index: A tool for assessing water quality management effectiveness. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(1), 125-136. doi: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb05481.x
10. Dillman, D. A., Smyth, J. D., and Christian, L. M. (2014). *Internet, phone, mail, and mixed-mode surveys: The tailored design method* (4th ed.). John Wiley & Sons.
11. Do, H. H., and Fror, O., 2022. River Ecosystem Resilience: Applying the Contingent Valuation Method in Vietnam. *Journal Name Not Specified*.
12. Edwards, D. C., and McKee, T. B., 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple scales. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 634, 1-30.

اجتماعی چشمه‌ها چندبعدی است؛ بیش از نیمی از پاسخ‌دهندگان تمایل به پرداخت برای کارکردهای استفاده‌ای و غیر استفاده‌ای دارند و میانگین تمایل به پرداخت برای کارکرد غیر استفاده‌ای حدود ۸۵ هزار تومان برآورد شد. جوانان و استفاده‌کنندگان مستقیم بیشترین تمایل به مشارکت مالی را داشتند، در حالی که درآمد بالاتر با کاهش تمایل همراه بود. تحصیلات و آگاهی محیط زیستی اثر مثبت و معناداری بر تمایل به پرداخت داشت، که اهمیت آموزش و اطلاع‌رسانی هدفمند را تأکید می‌کند. چشمه‌ها علاوه بر تأمین آب شرب، نقش قابل توجهی در ارتقای سلامت عمومی، گردشگری، کشاورزی، صنعت، اشتغال و حفظ تنوع زیستی دارند. تهدیدهای اصلی شامل آلودگی فاضلاب، مدیریت ناکارآمد، تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی است و شهروندان پایش مستمر، آموزش و توسعه زیرساخت‌های مدیریت آب را برای حفاظت منابع ضروری می‌دانند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که حفاظت و مدیریت پایدار چشمه‌های خرم‌آباد تنها با رویکردی جامع شامل مدیریت علمی منابع آب، پایش مستمر، ارتقای آگاهی عمومی و مشارکت اجتماعی امکان‌پذیر است. چنین رویکردی تضمین‌کننده پایداری کمی، کیفی و اقتصادی منابع و حفظ ارزش‌های محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی آن‌ها خواهد بود. در نهایت به‌منظور دستیابی به چارچوبی جامع برای مدیریت پایدار منابع آب شهری در خرم‌آباد، پیشنهاد می‌شود ارزش‌گذاری اقتصادی چشمه‌ها با رویکرد ترکیبی و استفاده از روش ارزش‌گذاری مشروط (CVM) و ارزیابی خدمات بوم‌سازگانی از طریق پیمایش پرسشنامه‌ای و مصاحبه با شهروندان، گردشگران و نهادهای مرتبط، با هدف تعیین ارزش اقتصادی واقعی چشمه‌ها، تحلیل عوامل مؤثر بر مشارکت اجتماعی و برآورد پیامدهای کاهش دبی یا افت کیفیت آب بر رفاه اجتماعی استفاده شود.

سپاسگزاری

از حمایت‌های دانشگاه لرستان قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافع در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

سحر امیری: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نگارش نسخه اولیه مقاله

علی حقی زاده: راهنمایی، مفهوم‌سازی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري

لیلا قاسمی: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، کنترل نتایج، تحلیل‌های آماری

محبوبه دلفان: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، کنترل نتایج

Quality, Exposure and Health, 3, 11–24. doi: 10.1007/s12403-011-0040-5

29. Mahdavi, M., 2005. Applied Hydrology. Tehran: University of Tehran Press. (In Persian)

30. Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. doi: 10.2307/1907187

31. Mesbahzadeh, T., Mirakbari, M., mohseni saravi, M., Khosravi, H., and Mortezaei, G., 2019. Study of Current and Future Meteorological Drought Conditions using the CMIP5 Model Under RCP scenarios. *Jwmseir*, 13 (46) :11-21. (In Persian)

32. Ministry of Energy, Lorestan Regional Water Company., 2021. Report on the Status of Groundwater Resources in the Khorramabad Plain. (In Persian)

33. Mishra, A., and Singh, V. P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202–216. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012

34. Mohammadyari, F., Shayesteh, K., Modbari, A., 2018. Estimation of drinking water quality value using conditional valuation method (Case study: Kermanshah city). *Environmental Science*. (In Persian)

35. Montanari, A., 2013. Hydrological trends and variability: understanding the past to manage the future. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 2353–2370. doi: 10.5194/hess-17-2353-2013

36. OECD., 2015. Groundwater allocation: Managing increasing stress on water resources. OECD Publishing. doi: 10.1787/9789264228966-en

37. Pearce, D. W., and Turner, R. K., 1990. Economics of natural resources and the environment. Johns Hopkins University Press.

38. Ramakrishnaiah, C. R., Sadashivaiah, C., and Ranganna, G., 2009. Assessment of water quality index for the groundwater. *Journal of Chemistry*, 6(2), 523–533.

39. Rijsberman, F. R., 2006. Water scarcity: Fact or fiction? *Agricultural Water Management*, 80, 5–22. doi: 10.1016/j.agwat.2005.07.001

40. Saadaoui, I., 2025. Investing in nature: Stakeholder's willingness to pay for Tunisian forest services. *New Medit, Mediterranean Journal of Economics, Agriculture, Environment and Food*. doi: 10.30682/nm2404a

41. Sadaghian Aghkandi, M., Rezaei, H., Khalili, K., and Ahmadi, F., 2024. Investigation of the performance of GPR and Kstar algorithms in modeling the RDI drought index: A case study of the eastern Urmia Lake basin. *Journal of Civil Engineering and Environmental Studies*, 54(1), 142-151. doi:10.22034/ceej.2023.55292.2225 (In Persian)

13. European Environment Agency., 2013. Assessment of cost recovery through water pricing.

14. Farhpour, M. M., 2024. Investigating the Hydrochemical Characteristics of Khorramabad Springs. National Conference on Hydrology of Iran. (In Persian)

15. Ford, D., and Williams, P., 2007. Karst hydrogeology and geomorphology. Wiley. doi: 10.1002/9781118684986

16. Freeze, R. A., and Cherry, J. A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall.

17. Geological Survey and Mineral Explorations of Iran, 2016. 1:100,000 Geological Map and Report of Khorramabad. (In Persian)

18. Ghasemi, M., 1999. Investigating Climatic Characteristics and Precipitation in Iran. [Master's thesis, University of Tehran]. (In Persian)

19. Hamed, K. H., and Rao, A. R., 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1–4), 182–196. doi: 10.1016/S0022-1694(97)00125-X

20. Hanley, N., and Barbier, E. B., 2009. Pricing nature: Cost-benefit analysis and environmental policy. Edward Elgar Publishing.

21. Hatamifard, R., Saffari, A., Myamani, M., and Harimi, H., 2018. Evaluating hydrodynamic behavior and karst development in the Gareen Anticline (Case Study: Alashtar and NourAbad Karstic Aquifers). *Geography and Environmental Planning*, 29(3), 15-34. doi:10.22108/gep.2018.101464.1014 (In Persian)

22. Iran Water Resources Management Company., 2019. Comprehensive Water Resources Studies of the Karkheh Watershed Basin. (In Persian)

23. Izadpanah, H., 1997. Investigating the Geographical and Natural Characteristics of Western Iran's Watershed Basins. [Master's thesis, Tarbiat Modares University]. (In Persian)

24. Jahangiri, E., Motamedvaziri, B., and Kiadaliri H., 2024. Investigating the Impact of Climate Change on Drought with SPI and SPEI Indices (Case Study of Karun 3 Watershed). *Jwmseir*, 18 (65) : 8. (In Persian)

25. Kendall, M. G., 1975. Rank correlation methods. Griffin.

26. Lehtonen, E. J., Kuuluvainen, E., Pouta, M., Rekola, and Li, C., 2003. Non-market benefits of forest conservation in Southern Finland. *Environmental Science and Policy*, 6, 195-204.

27. Levin, C., and Green, L., 2014. Willingness to pay for water conservation programs in the United States. *Journal of Environmental Economics*, 38, 15-32.

28. Lumb, A., Sharma, T. C., and Bibeault, J. F., 2011. A review of genesis and evolution of water quality index (WQI). *Water*

50. Wooldridge, J. M., 2010. Econometric analysis of cross section and panel data. MIT Press.
51. Yudhistira, M.H., Sastiono, P., and Meliyawati, M. 2020. Exploiting unanticipated change in block rate pricing for water demand elasticities estimation: evidence from Indonesian suburban area. *Water Resources and Economics*, 32, 100161
52. Yue, S., Pilon, P., and Cavadias, G., 2002. Power of the Mann–Kendall and Spearman’s rho tests. *Journal of Hydrology*, 259, 254–271. doi: 10.1016/S0022-1694(01) 00594-7
53. Zareabyaneh, H., GHobaeisoogh, M. and Mosaedi, A., 2015. Drought Monitoring Based on Standardized Precipitation Evaoptranspiration Index (SPEI) Under the Effect of Climate Change. *Water and Soil*, 29(2), 374-392. doi: 10.22067/jsw.v0i0.36472 (In Persian)
54. Zeydalinejad, N., Pour-Beyranvand, A., Nassery, H. R., and Ghazi, B., 2024. Evaluating climate change impacts on snow cover and karst spring discharge in a data-scarce region: a case study of Iran. *Acta Geophysica*. <https://doi.org/10.1007/s11600024-01288-3>
42. Sangab Zagros Engineering Group., 2014. Report on the Continuation of Semi-Detailed Studies of the Khorramabad Study Area. Ministry of Energy, Lorestan Regional Water Company. (In Persian)
43. Shafer, B. A., and Dezman, L. E., 1982. Development of a surface water supply index (SWSI). *Journal of Hydrology*, 121–131.
44. Shahid, S. (2011). Hydrological drought and its impacts on water resources. *Journal of Hydrology*, 411, 63–75.
45. Sultana, N., Rizvi, M. M., and Wadhawan, I., 2026. A multiobjective water allocation model for economic efficiency and environmental sustainability: Case study. *arXiv*, arXiv:2601.19746.
46. Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater hydrology* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
47. Vicente-Serrano, S., Begueria, S., and Lopezmoreno, J. I., 2010. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index-SPEI. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. doi: 10.1175/2009JCLI2909.1
48. White, W.B., 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Eng. Geol.* 65, 85–105, [https://doi.org/10.1016/s0013-7952\(01\)00116-8](https://doi.org/10.1016/s0013-7952(01)00116-8).
49. Wilkening, J. L., Esralew, R. A., and Newman, B. F., 2026. From assessment to action: Informing water resource management in protected areas amid global change. *Frontiers in Water*. doi:10.3389/frwa.2025.1719814