



Investigating The Water Quality and Hydrogeochemical Characteristics of Springs in The Ilam Dam Watershed

Ehsan Fathi¹ | Mohammadreza Ekhtesasi² | Ali Talebi² | Jamal Mosaffaie³

1. PhD student in Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University. Yazd. Iran.
- 2- Professor, Rangeland and Watershed Department, Faculty of Natural Resources and Desertology, Yazd University. Yazd. Iran.
- 3- Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

✉Corresponding Author: Mr_Ekhtesasi@yazd.ac.ir

Received:
23 October 2024

Accepted:
27 November 2024

Published:
20 December 2024

Keywords:

Schuler,
Spring,
Water Quality,
WQI

Extended abstract

Introduction

Access to high-quality water resources is essential for human life, economic activities, agriculture, and industry. The increasing demand for water due to population growth, agricultural and industrial development, and climate change has heightened the importance of sustainable water resource management and conservation. Continuous monitoring and evaluation of water resource quality play a pivotal role in identifying changes in water quality, reducing Environmental risks, and ensuring water supply for various uses. This study aims to evaluate the water quality of springs within the Ilam Dam watershed, which serves as one of the vital water resources in the region. For this purpose, the Water Quality Index (WQI), World Health Organization (WHO) standards, and analyses based on Schuler and Piper diagrams were utilized to assess the quality status of the springs and their suitability for drinking, agricultural, and industrial uses.

Cite this article: Fathi, E., Ekhtesasi, M.R., Talebi., A. & Mosaffaie, J. (2024). Investigating the water quality and hydrogeochemical characteristics of springs in the Ilam dam watershed, *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (1), 79-100. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8619.1089>



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The analyzed parameters included sulfate (SO₄²⁻), chloride (Cl⁻), bicarbonate (HCO₃⁻), pH, total dissolved solids (TDS), total hardness (TH), potassium (K⁺), sodium (Na⁺), magnesium (Mg²⁺), and calcium (Ca²⁺). These parameters were used to calculate the water quality levels of springs in the Ilam watershed using the Water Quality Index (WQI) method. For this purpose, four selected springs within the watershed were chosen to represent the region's hydrogeochemical conditions and water quality (Figure 1). Sampling was conducted monthly over six months, from April 2023 to September 2023. All tests were performed using standard laboratory methods and precise instruments to obtain accurate and reliable data. The collected samples were stored in a refrigerator at 4°C to prevent microbial degradation before water quality analysis. The calculation of the WQI involves several steps. In the first step, each parameter is assigned a weight ranging from 1 to 5 based on its impact on human health, with these weights estimated according to WHO standards. The second step calculates the relative weight using Equation 1 (Chung et al., 2014; Patil et al., 2020; WHO, 2004b, 2011, 2014, 2017).

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Where W_i represents the relative weight, w_i is the weight of each parameter, and n is the total number of parameters. In the third step, the quality rating index (q_i) is calculated. This index is obtained by dividing the concentration of each parameter in a water sample by its standard value, as described in Equation 2 (WHO, 2004; Patil et al., 2020; WHO, 2017).

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (2)$$

Where C_i is the concentration of each parameter in the water sample, and S_i is the WHO standard value for each parameter in mg/L. Additionally, the SI (sub-index for the n -th parameter) is calculated for each chemical parameter using Equation 3, and finally, the WQI is determined using Equation 4 (Chung et al., 2014; WHO, 2014, 2017).

$$SI = W_i \times q_i \quad (3)$$

$$WQI = \sum SI \quad (4)$$

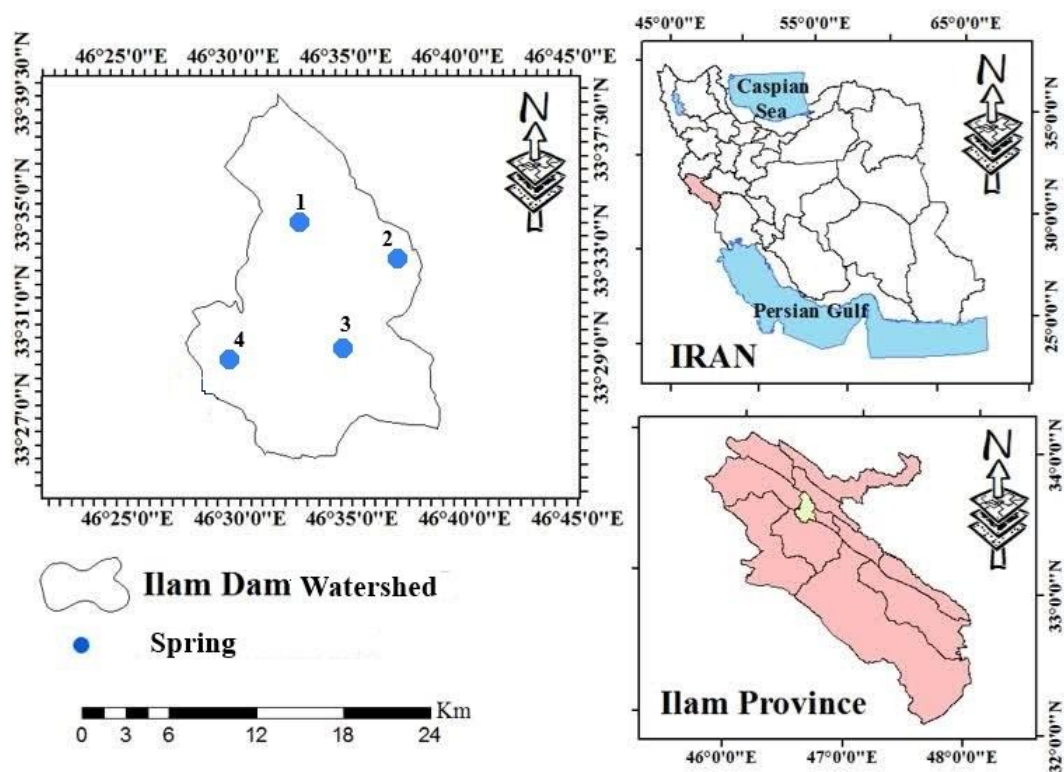


Figure 1 - Map of the locations of sampled stations in the Ilam Dam watershed.

Results and Discussion

The results of this study indicated that the water quality of the examined springs in the region is highly favorable based on the Water Quality Index (WQI). The WQI values at the sampling stations ranged from 38.07 to 45.45, reflecting excellent water quality in all studied springs throughout the research period.

A comparison of the quality data with World Health Organization (WHO) standards also revealed that all

measured parameters, including sulfate, chloride, bicarbonate, pH, TDS, total hardness, potassium, sodium, magnesium, and calcium, fall within the permissible standard limits. The analysis of the Schuler diagram indicated that the spring water quality is in good condition for drinking purposes. Furthermore, the analysis of the Piper diagram revealed that the water quality falls under the hydrochemical group of calcium bicarbonate, indicating a favorable ionic composition of the water for various uses.

Conclusion

Despite the excellent quality of the region's spring water based on valid quality indices and standards, continuous monitoring and precise management of the area's water resources are essential to maintain the current quality and prevent potential future contamination. In areas where water resources play a key role in meeting drinking, agricultural, and industrial needs, human and natural factors such as agricultural activities, industrial development, environmental degradation, and climate change can pose serious threats to water quality. The findings of this study revealed that analyzing qualitative data using the WQI index and Schuler and Piper diagrams is an effective tool for assessing water quality status. These tools not only enhance the understanding and interpretation of complex data but also enable the comparison of water quality across different regions and the identification of areas vulnerable to pollution. Additionally, these methods can provide a robust scientific foundation for developing protective policies, implementing water quality monitoring programs, and making effective management decisions.

Ultimately, adopting integrated management practices and utilizing these analytical tools can significantly contribute to the long-term protection of water resources and the sustainability of the region's aquatic ecosystems.



بررسی کیفیت آب و ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام

احسان فتحی^۱ | محمدرضا اختصاصی^۲ | علی طالبی^۳ | جمال مصفايي^۳

۱. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۲. استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۳. دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

✉ نویسنده مسئول: Mr_Ekhtesasi@yazd.ac.ir

چکیده

نظارت مستمر و ارزیابی کیفیت منابع آب یک مسئله کلیدی برای حفاظت و مدیریت پایدار آن است. هدف از این مطالعه بررسی کیفیت آب چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام واقع در استان ایلام با استفاده از شاخص WQI، استاندارد WHO و بررسی نمودارهای شولر و پایپر می‌باشد. در این مطالعه ده پارامتر کیفی آب شامل سولفات، کلر، بی‌کربنات، pH، TDS، سختی کل، پتاسیم، سدیم، منیزیم و کلسیم در ۴ چشمه انتخابی از فروردین ۱۴۰۲ تا شهریور ۱۴۰۲ با استفاده از روش‌های استاندارد مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که طبق روش WQI، کیفیت آب طی مدت پژوهش در ایستگاه‌های نمونه‌برداری با مقادیر ۳۸/۰۷ تا ۴۵/۴۵ در وضعیت عالی قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان داد که طبق استاندارد WHO، تمامی پارامترها در محدوده استاندارد قرار گرفتند. همچنین کیفیت آب طبق نمودار شولر در وضعیت خوب و طبق نمودار پایپر در گروه بی‌کربنات کلسیمی قرار گرفت. با وجود کیفیت آب عالی، ضروری است که نظارت‌های مستمر و مدیریت دقیق‌تری اعمال شود تا از احتمال وقوع آلودگی‌های آینده جلوگیری شود. تحلیل‌های انجام‌شده با استفاده از شاخص‌های WQI و نمودارهای پایپر و شولر نشان می‌دهد که این ابزارها برای تحلیل و تفسیر مجموعه‌ای از داده‌های پیچیده، ارزیابی کیفیت آب و فهم مکانی کیفیت آب برای مدیریت مؤثر کیفیت آب مفید و سودمند هستند و می‌توانند به‌عنوان مبنای محکمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و اجرای سیاست‌های حفاظتی مورد استفاده قرار گیرند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۳۰

کلیدواژه‌ها:

چشمه،

شولر،

کیفیت آب،

WQI

مقدمه

طول زمان و مکان مورد استفاده قرار گیرند (Carbajal-Hernández et al., 2013). از این رو، شاخص کیفیت آب (WQI) می‌تواند به‌عنوان یک ابزار محاسباتی مؤثر براساس پارامترهای فیزیکی - شیمیایی و میکروبی برای نمایش کیفیت کلی آب در مکان و زمان معین برای مداخله مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد (Qureshimatva et al., 2015). مطالعاتی که بر ارزیابی کیفیت آب چشمه‌ها و دیگر منابع آبی تمرکز دارند، در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. سلگی و همکاران در مطالعه‌ای به منظور ارزیابی کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت ملایر از نظر شرب و کشاورزی از شاخص WQI و ویلکوکس استفاده کردند. برای این منظور ۹۳ نمونه آب که شامل ۶۱ چاه، ۹ چشمه، ۱۶ رودخانه و هفت آبگیر مورد نمونه‌برداری قرار دادند. بر اساس نتایج، کیفیت آب چاه در دشت ملایر پایین‌تر از آب چشمه، رودخانه و آبگیر بود و با توجه به بالاتر بودن نیترات در آب چاه نسبت به سایر منابع، برای مصارف شرب توصیه نمی‌شود. همچنین آب چاه طبق شاخص ویلکوکس کیفیت پایین‌تری نسبت به سایر منابع برای کشاورزی داشت (Solgi et al., 2022). Kibetu و همکاران یک تحلیل ژئوشیمیایی از منابع آب زیرزمینی در منطقه نیمه‌خشک ماکونی در کنیا انجام دادند. آن‌ها از شاخص کیفیت برای ارزیابی عناصر اصلی / ثانویه و فلزات سنگین استفاده کردند و نقشه شاخص کیفیت آب را تهیه کردند. با بررسی ۶۱ نمونه آب زیرزمینی جمع‌آوری شده از بخش‌های مختلف منطقه، نشان دادند که غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی بیشتر از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی بود و شاخص کیفیت آب زیرزمینی در بیشتر مناطق بالاتر از ۱۸۰ بود که آب زیرزمینی را در بیشتر این مناطق غیر قابل شرب کرد (Kibetu et al., 2017). Pantha و همکاران با استفاده از شاخص WQI به ارزیابی کیفیت آب سه چشمه به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب در منطقه تانهوا در کشور نپال پرداختند. طبق نتایج، پارامترهای کیفی آب مانند کدورت، pH، آمونیاک، نیترات، سختی کل و قلیابیت تقریباً زیر محدوده استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO)، استاندارد ملی کیفیت آب آشامیدنی نپال (NDWQS) و اداره استانداردهای هند (BIS) قرار داشتند. با این حال، هدایت

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب برای مصارف شرب، صنعتی و کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشند (He and Wu, 2019; de Paul Obade and Moore, 2018); این آب‌ها به‌عنوان بخش مهمی از آب‌های تجدیدشونده جهان محسوب شده که حدود ۶۰ درصد از منابع آب تجدیدپذیر قابل دسترس را به خود اختصاص داده‌اند (Saadatmand et al., 2021). چشمه‌ها به‌عنوان یکی از منابع آب زیرزمینی، منبع اصلی آب برای استفاده مسکونی (دامداری و کشاورزی) و آشامیدنی (Bhusal and Gyawali, 2015; Shrestha and Gurung et al., 2019; Basnet, 2018) به‌ویژه در منطقه کوهستانی (Tripathi et al., 2015) هستند. چشمه‌ها مناطقی هستند که رها شدن آب زیرزمینی از یک سفره آب باعث ایجاد جریان قابل مشاهده در سطح زمین می‌شود (Kresic and Stevanovic, 2009). در دهه‌های اخیر، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به دلیل رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای کشاورزی آبی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته‌است (Li et al., 2016; O'Dwyer et al., 2018). بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی برای کشاورزی و روش‌های نادرست دفع زباله منجر به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و کاهش کیفیت آب شده است (Sadat-Noori et al., 2014; Zahedi et al., 2017). آلودگی آب سبب حدود ۸۰ درصد از بیماری‌ها در جهان و یک سوم مرگ و می‌رها در کشورهای در حال توسعه می‌شود (WHO, 2004a). بنابراین آگاهی از کیفیت منابع آب یکی از نیازمندی‌های مهم در مدیریت، برنامه‌ریزی و توسعه منابع آب و حفاظت و کنترل آنها می‌باشد (Kumar et al., 2019). یکی از مؤثرترین روش‌های بررسی کیفیت آب، استفاده از شاخص‌های مناسب است. استفاده از شاخص‌ها در برنامه‌های پایش برای ارزیابی سلامت اکوسیستم بسیار مفید بوده و می‌تواند به‌عنوان یک معیار برای ارزیابی موفق و مناسب در استراتژی‌های مدیریتی برای بهبود کیفیت آب استفاده شود (Dwivedi and Pathak, 2007). شاخص‌های کیفی، روش‌هایی هستند که مقادیر ویژگی‌های کیفی آب (پارامترهای اندازه‌گیری شده) را به یک عدد تبدیل می‌نمایند تا برای مدیریت و تحلیل کیفیت آب و همچنین پایش تغییرات کیفی آب در

استفاده از آزمون من-کندال نیز نشان داد که پارامترهای EC، TDS، TH، Na، Mg، Ca، SO₄ و Cl در اکثر چاه‌ها به دلیل برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی، خشک‌سالی، حفر چاه‌های بی‌رویه و تغذیه ناکافی آبخوان روند افزایشی دارند. همچنین طبق نمودار شولر و نمودار ویلکوکس کیفیت آب آبخوان به دلیل شوری بالا و محتوای زیاد سدیم، برای مصارف شرب و آبیاری نامناسب است (Sadeghi-Lari et al., 2022). بررسی مطالعات مختلف نشان می‌دهد که بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و طبقه‌بندی کیفی منابع آب زیرزمینی به دلیل نقش حیاتی این منابع در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت از اهمیت بالایی برخوردار است. بهبود کیفیت منابع آب زیرزمینی آلوده در مدت‌زمان کوتاهی امکان‌پذیر نخواهد بود زیرا مستلزم شناسایی منابع آلودگی و نظارت بر رفتار آن‌ها است. در این مفهوم، پیش‌گیری بهترین روش برای غلبه و مقابله با آلودگی منابع آب زیرزمینی است (Kazakis and Voudouris, 2015). با توجه به اینکه منابع آب زیرزمینی، منابع آب‌محور و ارزشمندی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند لذا شایسته مطالعات بیشتر هستند. داشتن تصویری روشن از تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند منجر به درک بهتر شرایط منابع آب و تسهیل فرایندهای مدیریت این منابع در حال حاضر و آینده شود. بنابراین، نظارت منظم بر کیفیت منابع آب و یافتن راه‌حل‌های عملی برای برآورد و بهبود کیفیت آب امری ضروری است. این مطالعه با توجه به اهمیت کیفیت آب، به ارزیابی وضعیت کیفیت آب چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام می‌پردازد. برای این منظور، از شاخص کیفیت آب (WQI) استفاده شده است که یک ابزار مهم برای تعیین مناسب بودن آب برای مصرف شرب و دیگر مصارف است. همچنین، نمودارهای گرافیکی شولر و پایپر ترسیم شده‌اند تا ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آب‌های مورد بررسی به‌طور دقیق‌تری تحلیل و طبقه‌بندی شوند. این روش‌ها به شناسایی کیفیت و نوع آب‌ها کمک می‌کنند و اطلاعات مفیدی برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های مرتبط فراهم می‌آورند.

الکتریکی (EC)، کل مواد جامد محلول (TDS) و کلی‌فرم مدفوع (E. coli) طبق استانداردهای WHO و NDWQS برای آب آشامیدنی بیش از حد مجاز بود. طبق شاخص WQI هم کیفیت آب چشمه‌ها در ایستگاه‌های یک، دو و سه به ترتیب در وضعیت نامناسب، عالی و خوب برای شرب قرار گرفتند (Pantha et al., 2022). آتشی یزدی و همکاران برای ارزیابی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آبخوان دشت بهاباد یزد از شاخص کیفیت آب (WQI) و نمودار شولر استفاده کردند. برای این منظور، ۱۷ نمونه آب جمع‌آوری و ده پارامتر را مورد اندازه‌گیری قرار دادند. نتایج نشان داد که طبق شاخص WQI، ۲۳/۵۳ درصد نمونه‌ها هیچ محدودیتی برای نوشیدن نداشتند، ۳۵/۲۹ درصد کیفیت پایینی داشتند، ۱۷/۶۵ درصد کیفیت نامرغوب‌تر و ۲۳/۵۳ درصد غیر قابل مصرف بودند. نمودار شولر نیز نشان داد که ۴۴ درصد از نمونه‌ها در سطح عالی و قابل شرب و ۵۶ درصد در سطح نامناسب و غیرقابل نوشیدن بودند (Atashi yazdi et al., 2022).

Bahrami و همکاران در مطالعه‌ای کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت کازرون را از نظر مصارف شرب و آبیاری مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه، در مجموع ۴۰۸ نمونه آب زیرزمینی از ۶۸ چاه برداشت و یازده پارامتر فیزیکی‌وشیمیایی آب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بر اساس استانداردهای WHO آب تمامی سفره‌های آب زیرزمینی در این دشت، به‌جز منطقه شمالی برای مصارف شرب در وضعیت ضعیف و بسیار ضعیف قرار دارد. همچنین، طبق نمودار شوری آزمایشگاه ایالات متحده کیفیت آب زیرزمینی برای آبیاری مشکوک است. آنها پیشنهاد دادند که الگوی کشت در این دشت باید به سمت محصولات مقاوم به شوری تغییر کند (Bahrami et al., 2022).

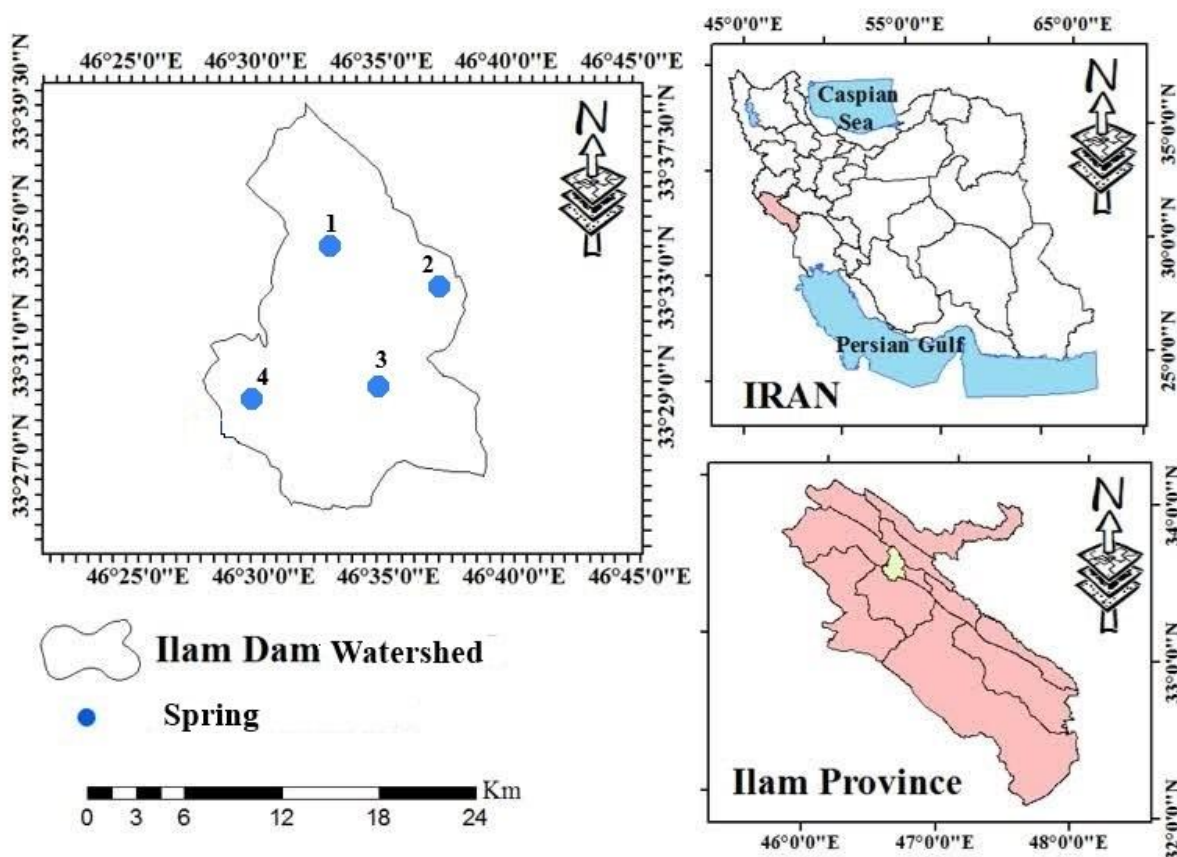
Sadeghi-Lari و همکاران در مطالعه‌ای تغییرات کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی دشت کهورستان، واقع در شمال غربی خلیج فارس را ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که طبق بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی تولید شده توسط GIS نشان‌دهنده یک روند کاهشی در سطح آبخوان و افت ۵/۲۴ متری سطح آب زیرزمینی در مدت ۲۰ سال بود. نمودار پایپر نشان داد که رخساره هیدروژئوشیمیایی غالب در منطقه دشت، از نوع NaCl است. تحلیل تغییرات زمانی با

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد ایلام با مساحت ۲۵۵۳۰ هکتار در استان ایلام قرار گرفته و از نظر موقعیت بین $46^{\circ} 16' 44''$ تا $46^{\circ} 18' 24''$ طول شرقی و $33^{\circ} 19' 4''$ تا $33^{\circ} 12' 12''$ عرض شمالی قرار دارد. بر این اساس حداکثر ارتفاع این حوضه ۲۶۰۴ متر و حداقل ارتفاع آن ۱۰۵۲ متر از سطح دریا می‌باشد. ارتفاع متوسط این حوضه از سطح دریا ۱۸۲۸ متر و شیب متوسط حوضه نیز ۲۰ درصد می‌باشد. متوسط بارش سالانه در این حوضه در دوره آماری سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ حدود ۵۶۰ میلی‌متر و میانگین دمای حداکثر و حداقل نیز به ترتیب $23/25$ و $11/06$ درجه سانتیگراد است. حوضه مورد مطالعه در زون زاگرس چین خورده قرار گرفته است. واحدهای سنگی و آبرفتی موجود در حوضه مربوط به ادوار مختلف زمین شناسی می‌باشند. سن واحدهای سنگی مختلف منطقه درجات عمومی از سمت جنوب غرب به سمت شمال شرق و

شمال کاهش می‌یابد. لیتولوژی غالب حوضه نیز شامل آهک دولومیتی و مارنی، آهک رسی - مارن و آهک رسی و شیل-مارن، گچ، آهک رسی و انیدریت و رسوبات آبرفتی کواترنر می‌باشد. به منظور دستیابی به اطلاعات مورد نیاز در بررسی وضعیت و کیفیت آب چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام نمونه‌برداری از فروردین‌ماه ۱۴۰۲ تا شهریور ۱۴۰۲ در ۴ ایستگاه و با سنجش پارامترهای مورد نیاز طبق دستورالعمل‌های موجود در استاندارد متد صورت گرفت (APHA, 2005). برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب چشمه‌ها، نمونه‌ها در بطری‌های پلی‌اتیلنی شسته‌شده، جمع‌آوری و برای جلوگیری از تجزیه میکروبی در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. پارامتر pH در محل نمونه‌برداری اندازه‌گیری و سایر پارامترها جهت سنجش به آزمایشگاه منتقل شدند. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده در حوضه آبخیز سد ایلام

Figure 1 - Map of the locations of sampled stations in the Ilam Dam watershed

۴ محاسبه می‌شود (Chung et al., 2014; WHO, 2014,)
(2017).

$$SI = W_i \times q_i \quad (3)$$

$$\sum SI = WQI \quad (4)$$

مقدار WQI به‌دست آمده برای تعیین طبقه‌بندی کیفیت آب طبق جدول ۱ می‌باشد (WHO, 2017). جدول ۲ نیز وزن، وزن نسبی، واحدها و مقادیر استاندارد پارامترهای شیمیایی، که توسط WHO ارائه شده را نشان می‌دهد. طبق جدول ۲ حداکثر وزن (۵) مربوط به دو پارامتر SO_4^{2-} و TDS به دلیل خطر بالقوه سلامت ناشی از غلظت آنها است.

در ادامه نمودارهای گرافیکی شولر و پایپر برای آسان‌نمودن تفسیر و نمایش نتایج بررسی کیفیت آب چشمه‌های مورد مطالعه ترسیم شدند. دیاگرام شولر یک ابزار است که برای طبقه‌بندی کیفیت آب، به‌ویژه آب شرب، استفاده می‌شود. این دیاگرام بر اساس مقادیر مختلف عناصر شیمیایی در آب، از جمله کاتیون‌ها و آنیون‌ها، طراحی شده است. در این نمودار مقادیر یون‌ها بر روی ستون قائم با تقسیمات لگاریتمی و نتایج تجزیه شیمیایی با خطوط شکسته نشان داده شده و برای هر یک از مقادیر کاتیون‌ها، آنیون‌ها و درجه سختی آب (TH) محور جداگانه‌ای در نظر گرفته شده که از اتصال مقادیر اندازه‌گیری شده روی این محورها می‌توان به درجه آب برای شرب پی برد (Lotfinasabasl et al., 2020). جدول ۳ پارامترهای استفاده شده جهت ترسیم دیاگرام شولر به‌همراه طبقه‌بندی آن‌ها را نشان می‌دهد. از نمودار پایپر نیز برای دسته‌بندی نمونه‌ها و تعیین تیپ شیمیایی آب استفاده می‌شود. طبق این نمودار مقدار کل آنیون‌ها و کاتیون‌ها ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود و میزان درصد یون‌ها روی مثلث‌های کناری علامت‌گذاری شده، نقاط متناظر روی مثلث‌های کناری بر روی لوزی میانی تصویر می‌شوند. در نهایت قضاوت در مورد تیپ کیفی آب به‌وسیله نمودار پایپر با توجه به منطقه تمرکز نقاط انجام می‌شود. در این طبقه‌بندی، آب‌ها بر اساس کاتیون‌ها به سه رخساره منیزیک، کلسیک و سدیک و نیز بر پایه آنیون‌ها به سه تیپ کربناته، سولفات و کلروره تقسیم‌بندی می‌شوند (Piper, 1994).

ارزیابی کیفیت آب چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام

شاخص کیفیت آب^۱ (WQI)

شاخص WQI به‌طور گسترده برای ارزیابی و طبقه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای اهداف آشامیدنی به‌کار گرفته شد. شاخص کیفیت آب زیرزمینی بر اساس استانداردهای آب آشامیدنی به‌دست می‌آید (Chitsazan et al., 2019). این شاخص شامل ده پارامتر سولفات (SO_4^{2-})، کلر (Cl^-)، بی‌کربنات (HCO_3^-)، pH، کل مواد جامد محلول (TDS)، سختی کل (TH)، پتاسیم (K^+)، سدیم (Na^+)، منیزیم (Mg^{2+}) و کلسیم (Ca^{2+}) است؛ که برای محاسبه سطح کیفی آب در چشمه‌های حوزه آبخیز ایلام با استفاده از روش WHO مورد استفاده قرار گرفتند. پس از تعیین پارامترهای کیفی مدنظر، محاسبه شاخص WQI شامل چندین مرحله است. در مرحله اول به هر پارامتر بر مبنای تأثیر در سلامتی انسان، وزنی بین ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود، این وزن‌ها بر مبنای استاندارد WHO برآورد می‌گردند. در مرحله دوم، وزن نسبی با استفاده از معادله ۱ به‌دست می‌آید (Chung et al., 2014; Patil et al., 2020; WHO, 2004b, 2011, 2014, 2017).

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

که در آن W_i : وزن نسبی، w_i : وزن هر پارامتر و n تعداد پارامترها است. در مرحله سوم، شاخص نرخ کیفیت (q_i) محاسبه می‌شود. این شاخص با تقسیم غلظت هر پارامتر در هر نمونه آب بر مقدار استاندارد آن پارامتر طبق معادله ۲ به دست می‌آید (WHO, 2004; Patil et al., 2020;) (WHO, 2017).

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100 \quad (2)$$

که در آن C_i : غلظت هر پارامتر در نمونه آب و S_i : مقدار استاندارد WHO هر پارامتر براساس mg/L است. علاوه بر این، مقدار SI (زیرشاخص پارامتر n ام) برای هر پارامتر شیمیایی با استفاده از معادله ۳ و در نهایت WQI از معادله

جدول ۱. طبقه‌بندی کیفیت آب شرب بر اساس شاخص WQI

Table 1. Classification of drinking water quality based on the WQI index.

مقدار WQI WQI value	طبقه‌بندی Classification
<50	عالی
50 - 100	خوب
100 - 200	ضعیف
200 - 300	بسیار ضعیف
300<	غیر قابل مصرف

جدول ۲. وزن نرمال و نسبی پارامترهای شیمیایی (WHO, 2011).

Table 2. Normalized and relative weights of chemical parameters (WHO, 2011).

وزن نسبی پارامتر (Wi) Relative parameter weight (Wi)	وزن پارامتر (w) Parameter weight (w)	استاندارد WHO (2011) WHO Standard (2011)	واحد Unit	پارامتر Parameter
0.166	5	250	(mg/L)	SO ₄ ²⁻
0.1	3	250	(mg/L)	Cl ⁻
0.1	3	120	(mg/L)	HCO ₃ ⁻
0.133	4	6.5 - 8.5	-	pH
0.166	5	1500	(mg/L)	TDS
0.1	3	500	(mg/L)	TH
0.066	2	12	(mg/L)	K ⁺
0.066	2	50	(mg/L)	Na ⁺
0.034	1	150	(mg/L)	Mg ²⁺
0.066	2	200	(mg/L)	Ca ²⁺
1	30	-	-	کل

جدول ۳. طبقه‌بندی استانداردهای آب آشامیدنی بر اساس نمودار شولر (Choramin et al., 2015)

Table 3. Classification of drinking water standards based on the Schoeller diagram (Choramin et al., 2015).

TH (mg/L)	TDS (mg/L)	Cl (mg/L)	Na (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	وضعیت Status	کلاس Class
<250	<500	<75	<115	<145	0-70	0-100	خوب	1
250-500	-1000 500	175-350	115-230	145-280	70-120	100-200	قابل قبول	2
500-1000	-2000 1000	350-700	230-460	280-580	120-200	200-300	متوسط	3
1000-2000	-4000 2000	700-1400	460-920	-1150 580	200-400	300-600	نامناسب	4
2000-4000	-8000 4000	1400-2800	920-1840	-2240 1150	400-800	-1000 6000	کاملاً نامطلوب	5
4000<	8000<	2800<	1840<	2240<	800<	1000<	غیر قابل شرب	6

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) یکی از روش‌های آماری چند متغیره است که در مواجهه با حجم گسترده‌ای از داده‌ها، با کاهش پیچیدگی تحلیل متغیرهای اولیه، به درک و تفسیر بهتر اطلاعات کمک می‌کند (Camdevyren et al., 2005).
برای اجرای تحلیل مؤلفه‌های اصلی، از نرم‌افزار آماری SPSS

تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)^۱^۱ Principal Component Analysis

شهریور (۵۱/۱۷ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در خرداد (۲۱/۲۶ میلی‌گرم بر لیتر) بود. ایستگاه ۳ بیشترین و کمترین مقدار ۲ کمترین مقدار میانگین سولفات را داشت. بیشترین مقدار سولفات در ایستگاه ۱ و ماه شهریور (۶۲/۴۳ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۲ و خرداد (۷/۲ میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شد.

کلر (Cl⁻)

در شکل ۳، مقایسه میانگین تغییرات زمانی و مکانی کلر در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار کلر در ماه شهریور (۱۵/۳۶ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در اردیبهشت (۱۰/۴۲ میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. از نظر ایستگاه‌ها، بیشترین مقدار میانگین کلر در ایستگاه ۳ (۱۶/۱ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ (۸/۷۲ میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار کلر در ایستگاه ۳ و ماه فروردین (۲۱/۸ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ و ماه مرداد (۵/۴ میلی‌گرم بر لیتر) مشاهده گردید.

بی‌کربنات (HCO₃⁻)

در شکل ۴، مقایسه میانگین تغییرات بی‌کربنات در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار بی‌کربنات در شهریور (۱۹۶/۱۱ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در اردیبهشت (۱۶۳/۴۲ میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۳ (۱۸۸/۷۳ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۱ (۱۷۷/۹۸ میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار در ایستگاه ۲ و ماه مرداد (۲۰۵/۷۳ میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ و ماه فروردین (۱۳۹/۲۴ میلی‌گرم بر لیتر) بود.

pH

در شکل شماره ۵، مقایسه میانگین تغییرات زمانی و مکانی pH در چهار ایستگاه و طی شش ماه مورد مطالعه آورده شده است. طبق نتایج، در ماه‌های مورد مطالعه، بیشترین و کمترین مقدار میانگین pH به ترتیب مربوط به ماه‌های اردیبهشت (۸/۰۶) و تیر (۷/۰۷) و از نظر ایستگاه نیز بیشترین و کمترین مقدار میانگین به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های سه (۷/۶) و چهار (۷/۴۸) بوده است. همچنین بیشترین مقدار pH در ایستگاه سه (۸/۳) و در ماه اردیبهشت

نسخه ۲۷ استفاده شد. در گام نخست، داده‌ها برای ورود به PCA در محیط نرم‌افزار SPSS بر اساس فرمول مربوط استاندارد شدند. در گام بعد، تناسب جامعه آماری برای انجام PCA به‌وسیله آزمون KMO¹ سنجیده شد و به‌منظور بهبود روابط بین ورودی‌ها و عامل‌های اولیه و نیز تفکیک بهتر آنها جهت عضویت در عامل‌ها، از دوران Varimax استفاده شد (Noori et al., 2005; Ouyang, 2005).

نتایج و بحث

جدول ۴، آمار توصیفی عناصر مورد استفاده برای تحلیل WQI را نشان می‌دهد. وضعیت پارامترهای مورد مطالعه به‌منظور بررسی وضعیت منابع آب شرب براساس تطبیق با دی‌گرام شولر در جدول ۵ آورده شده است. نتایج آمار توصیفی نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی در محدوده بررسی شده به‌طور کلی مناسب است. کاتیون‌ها شامل پتاسیم (K⁺)، سدیم (Na⁺)، منیزیم (Mg²⁺) و کلسیم (Ca²⁺) مقادیر میانگین قابل قبولی دارند و نوسانات آن‌ها (بر اساس انحراف معیار) نشان‌دهنده پایداری نسبی است. سختی کل (TH) با میانگین ۲۵۵/۲۰ mg/L در محدوده سختی متوسط قرار دارد، در حالی که TDS با میانگین ۲۴۰/۸۳ mg/L کیفیت مناسب آب را برای استفاده‌های مختلف نشان می‌دهد. pH با میانگین ۷/۵۴ در محدوده خنثی تا کمی قلیایی قرار دارد که برای شرب و کشاورزی مطلوب است. پارامترهای سولفات (SO₄²⁻)، کلر (Cl⁻)، بی‌کربنات (HCO₃⁻) نیز در محدوده استاندارد قرار داشته، اگرچه تنوع نسبی در سولفات می‌تواند به عوامل زمین‌شناسی و منابع آلاینده مرتبط باشد. شاخص کیفیت آب (WQI) با میانگین ۴۱/۹۵ نشان‌دهنده وضعیت کلی مطلوب منابع آب زیرزمینی است. با این حال، با توجه به تنوع برخی پارامترها و احتمال تأثیرگذاری عوامل محیطی، پایش مستمر کیفیت آب و مدیریت منابع برای حفظ پایداری آن ضروری به نظر می‌رسد.

تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای مورد مطالعه

سولفات (SO₄²⁻)

شکل ۲ نشان‌دهنده تغییرات زمانی و مکانی سولفات در چهار ایستگاه طی شش ماه است. بیشترین مقدار سولفات در ماه

¹ . Kaiser-Meyer-Olkin

و کمترین مقدار pH نیز در ایستگاه دو (۶/۸) و ماه شهریور به دست آمد.

کل مواد جامد محلول (TDS)

در شکل شماره ۶، تغییرات TDS در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین میانگین TDS در شهریور (۲۲۴/۲۵) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین آن در تیر (۲۶۳/۶۶) میلی‌گرم بر لیتر بالاترین و ایستگاه دو با ۲۱۲/۳۳ میلی‌گرم بر لیتر پایین‌ترین مقدار را دارند. بیشترین مقدار TDS (۲۷۶) میلی‌گرم بر لیتر) در اردیبهشت و کمترین مقدار (۱۸۸) میلی‌گرم بر لیتر) در شهریور ثبت شده است.

سختی کل (TH)

در شکل ۷، مقایسه میانگین تغییرات سختی کل (TH) در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار TH در فروردین (۲۸۰) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در مرداد (۲۱۸/۵) میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۳ (۲۹۲) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ (۲۳۳/۱۶) میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار TH در ایستگاه ۳ و ماه اردیبهشت (۳۲۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ و ماه مرداد (۱۹۳) میلی‌گرم بر لیتر) بود.

در شکل ۸، مقایسه میانگین تغییرات پتاسیم در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار پتاسیم در خرداد (۰/۷۵) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در مرداد (۰/۴۳) میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۱ (۰/۶۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ (۰/۳۴) میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار پتاسیم در ایستگاه ۱ و ماه خرداد (۰/۹۶) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ و ماه تیر (۰/۱۴) میلی‌گرم بر لیتر) بود.

سدیم (Na⁺)

در شکل ۹، مقایسه میانگین تغییرات سدیم در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار سدیم در

شهریور (۴/۵۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در فروردین (۲/۲۱) میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۴ (۳/۶) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۱ (۲/۹۵) میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار سدیم در ایستگاه ۱ و ماه شهریور (۴/۸۳) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ و ماه فروردین (۱/۹) میلی‌گرم بر لیتر) بود.

منیزیم (Mg²⁺)

در شکل ۱۰، مقایسه میانگین تغییرات منیزیم در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار منیزیم در شهریور (۲۱/۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در اردیبهشت (۱۳/۴۱) میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۳ (۱۶/۷۲) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۴ (۱۵/۴۳) میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار منیزیم در ایستگاه ۳ و ماه شهریور (۲۵/۷۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۱ و ماه اردیبهشت (۱۱/۲۵) میلی‌گرم بر لیتر) بود.

کلسیم (Ca²⁺)

در شکل ۱۱، مقایسه میانگین تغییرات کلسیم در چهار ایستگاه طی شش ماه نشان می‌دهد که بیشترین مقدار کلسیم در تیر (۵۳/۵۱) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در اردیبهشت (۴۶/۱۷) میلی‌گرم بر لیتر) بوده است. بیشترین مقدار میانگین در ایستگاه ۴ (۵۲/۱۷) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۱ (۴۷/۴۹) میلی‌گرم بر لیتر) ثبت شده است. بیشترین مقدار کلسیم در ایستگاه ۴ و ماه شهریور (۵۶/۱۸) میلی‌گرم بر لیتر) و کمترین مقدار در ایستگاه ۱ و ماه اردیبهشت (۴۱/۸۸) میلی‌گرم بر لیتر) بود.

در شکل شماره ۱۲، میانگین WQI در چهار ایستگاه و طی شش ماه مورد مطالعه آورده شده است. با توجه به شکل ۱۲، مقدار شاخص WQI در طی شش ماه مورد مطالعه و در چهار ایستگاه انتخابی در محدوده ۰/۷ تا ۴۵/۴۵ بود که نشان داد که کیفیت آب طبق این شاخص در وضعیت عالی قرار دارد.

جدول ۴. مقدار WQI و مقدار پارامترهای آماری مورد استفاده برای محاسبه WQI در چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام

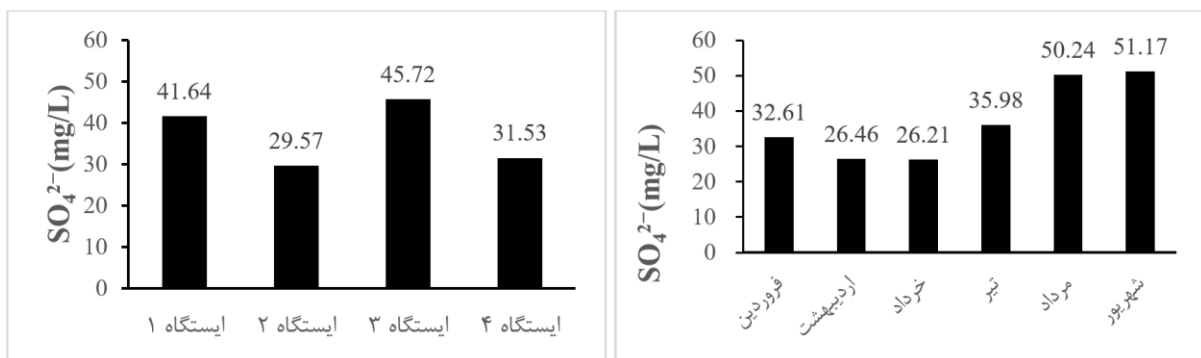
Table 4. WQI values and the statistical parameter values used for the calculation of WQI in the springs of the Ilam Dam watershed.

انحراف معیار (mg/L) Standard Deviation (mg/L)	میانگین (mg/L) Mean (mg/L)	حداکثر (mg/L) Maximum (mg/L)	حداقل (mg/L) Minimum (mg/L)	پارامتر Parameter
3.66	49.57	56.18	41.88	Ca ²⁺
3.47	16.64	25.78	11.25	Mg ²⁺
0.88	3.22	4.83	1.9	Na ⁺
0.21	0.56	0.96	0.14	K ⁺
32.63	255.20	328	193	TH
25.05	240.83	276	188	TDS
0.45	7.54	8.3	6.8	pH
18.83	182.35	205.7	139.24	HCO ₃ ⁻
3.79	12.31	21.8	5.4	Cl ⁻
13.88	37.11	62.43	7.2	SO ₄ ²⁻
2.10	41.95	45.45	38.07	WQI

جدول ۵. وضعیت پارامترهای مورد بررسی در منابع آب شرب براساس تطبیق با دیاگرام شولر

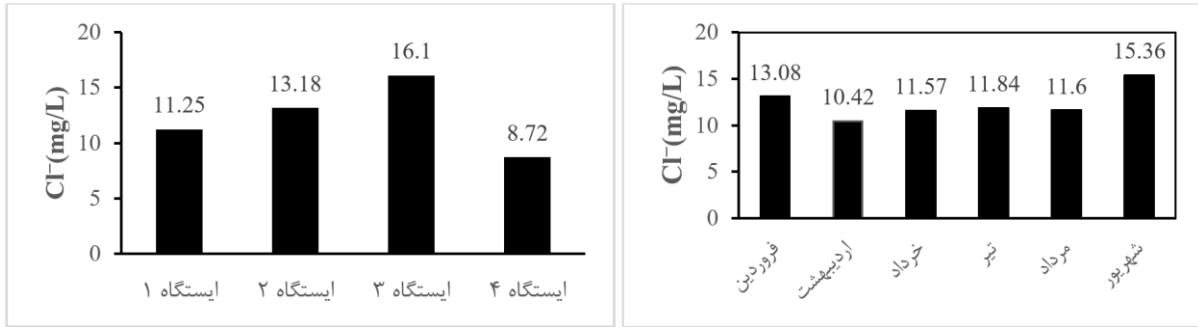
Table 5. Status of the parameters studied in drinking water sources based on comparison with the Schuler diagram.

ایستگاه Station				پارامتر Parameter
4	3	2	1	
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	Ca ²⁺
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	Mg ²⁺
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	SO ₄ ²⁻
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	Na ⁺
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	Cl ⁻
خوب %100	خوب %100	خوب %100	خوب %100	TDS
خوب %50	خوب %50	قابل قبول %100	خوب %83.34	TH
%50 قابل قبول	%50 قابل قبول		%16.66 قابل قبول	



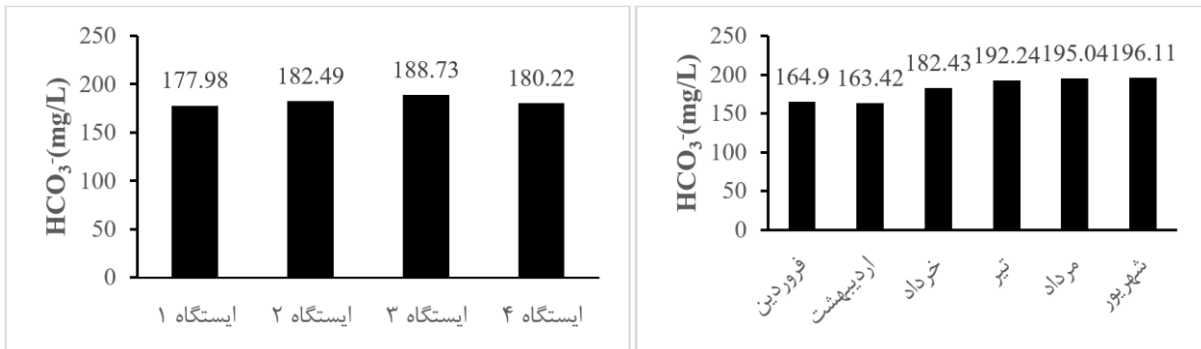
شکل ۲. میانگین تغییرات زمانی و مکانی سولفات در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 2. Average temporal and spatial variations of SO₄²⁻ in the stations and months studied



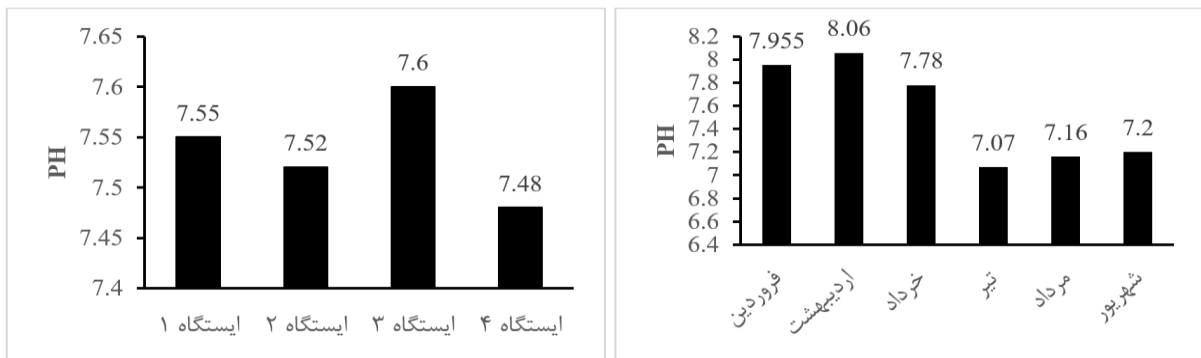
شکل ۳. میانگین تغییرات زمانی و مکانی کلر در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 3. Average temporal and spatial variations of Cl⁻ in the stations and months studied.



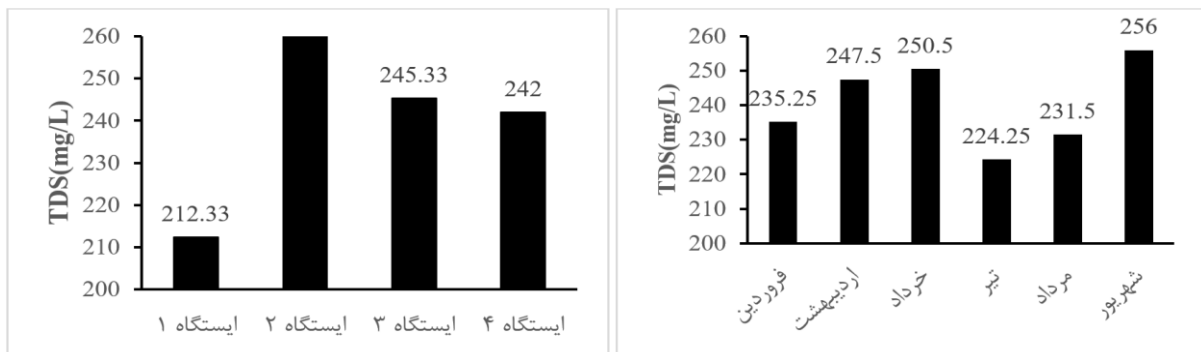
شکل ۴. میانگین تغییرات زمانی و مکانی بی‌کربنات در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 4. Average temporal and spatial variations of HCO₃⁻ in the stations and months studied.



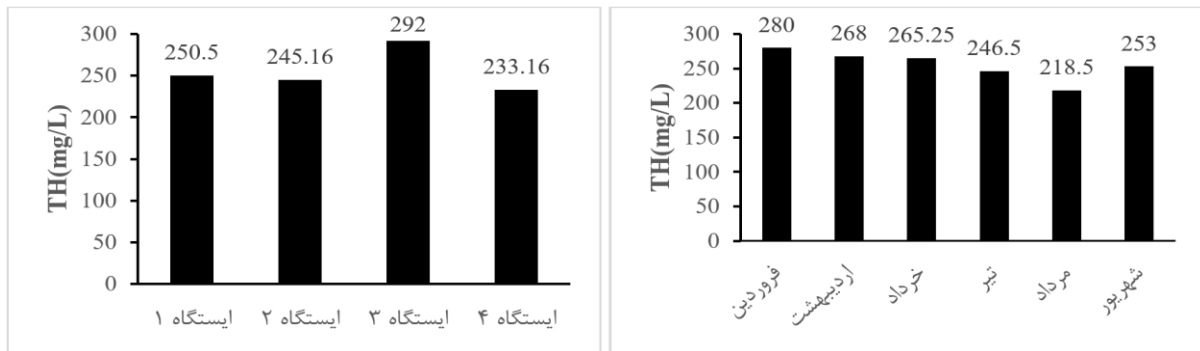
شکل ۵. میانگین تغییرات زمانی و مکانی pH در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 5. Average temporal and spatial variations of pH in the stations and months studied.



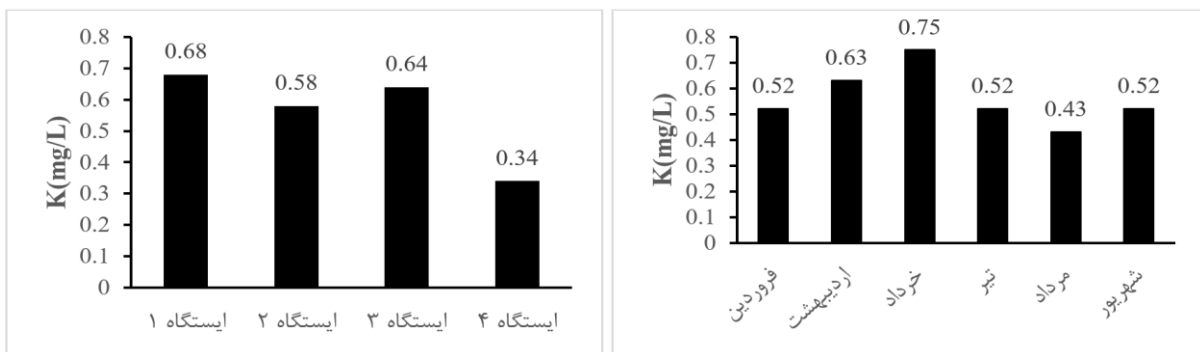
شکل ۶. میانگین تغییرات زمانی و مکانی کل مواد جامد محلول در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 6. Average temporal and spatial variations of TDS in the stations and months studied.



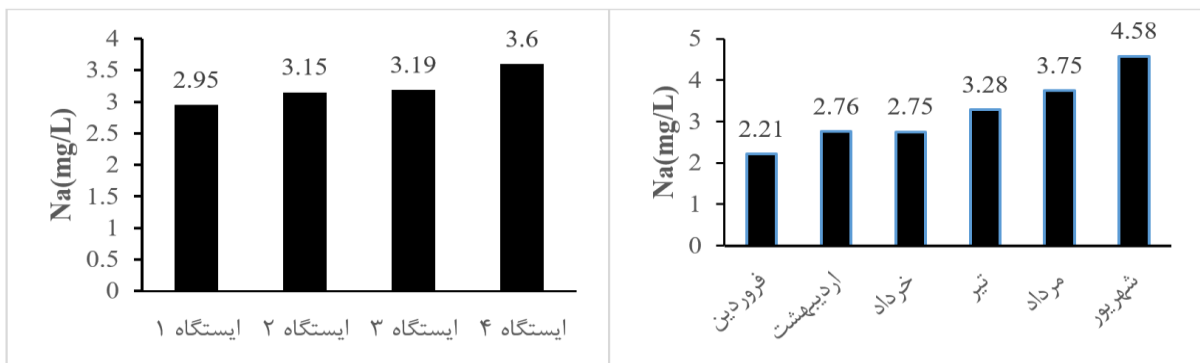
شکل ۷. میانگین تغییرات زمانی و مکانی سختی کل در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 7. Average temporal and spatial variations of TH in the stations and months studied.



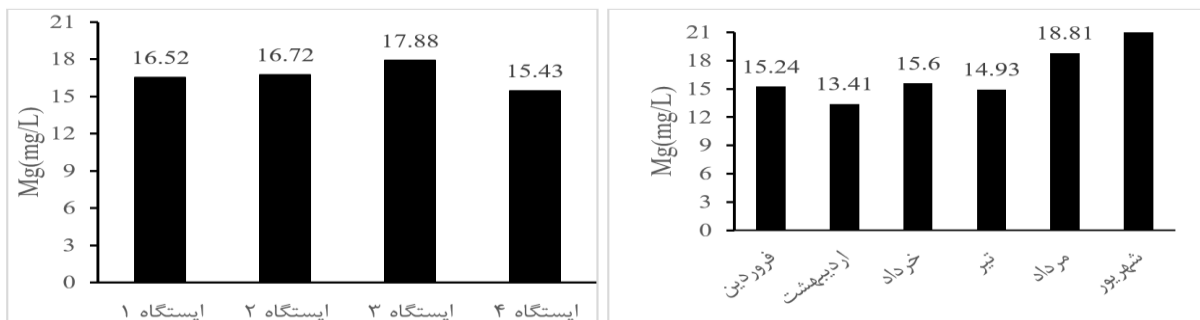
شکل ۸. میانگین تغییرات زمانی و مکانی پتاسیم در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 8. Average temporal and spatial variations of K⁺ in the stations and months studied.



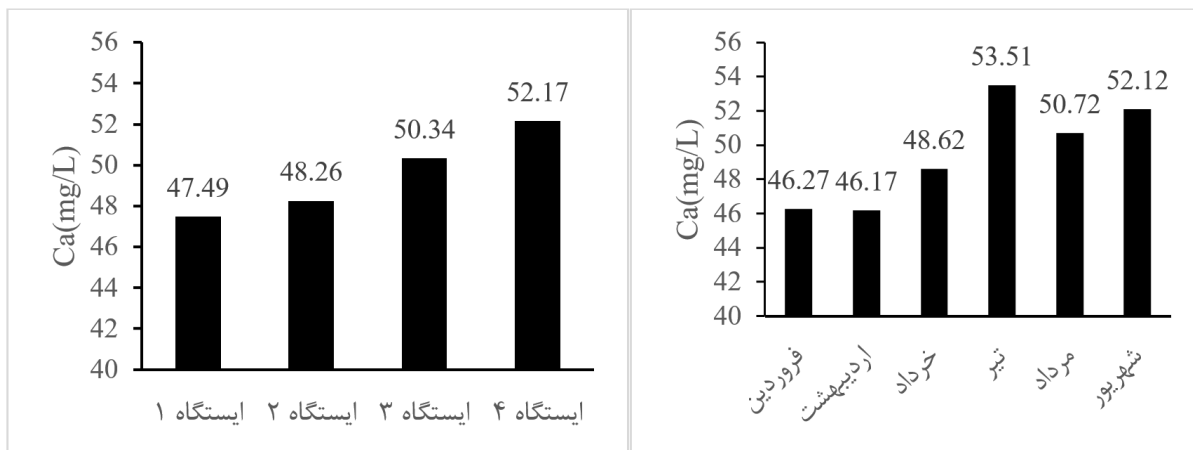
شکل ۹. میانگین تغییرات زمانی و مکانی سدیم در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 9. Average temporal and spatial variations of Na⁺ in the stations and months studied.

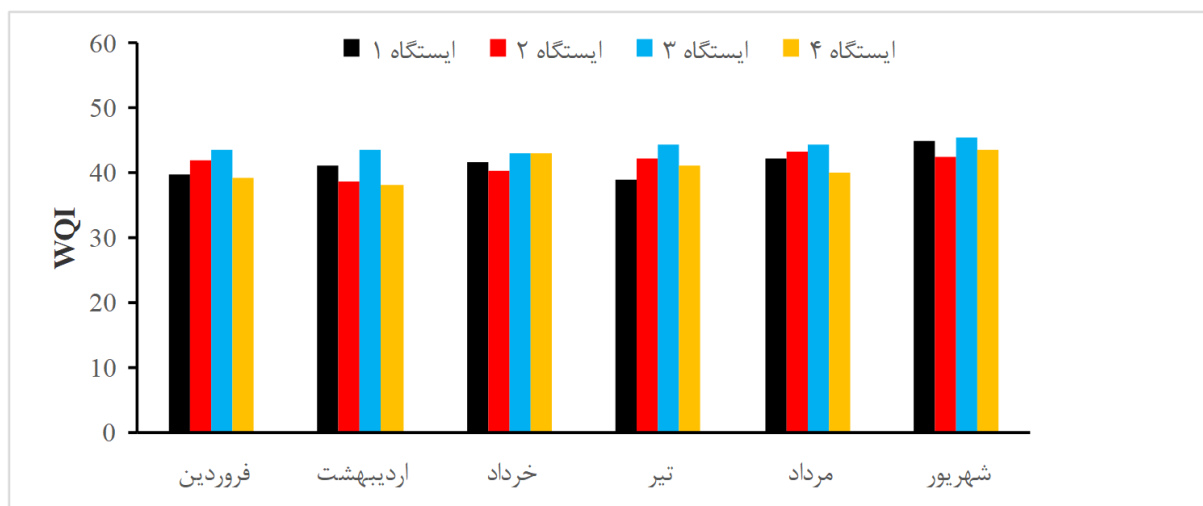


شکل ۱۰. میانگین تغییرات زمانی و مکانی منیزیم در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 10. Average temporal and spatial variations of Mg²⁺ in the stations and months studied.



شکل ۱۱. میانگین تغییرات زمانی و مکانی کلسیم در ایستگاه‌ها و ماه‌های مورد مطالعه

Figure 11. Average temporal and spatial variations of Ca²⁺ in the stations and months studied.

شکل ۱۲. میانگین تغییرات WQI در دو فصل بهار و تابستان و در ماه‌های مورد مطالعه

Figure 12. Average variations of WQI in the spring and summer seasons during the months studied.

ارائه دهد. طبق نمودار شولر که برای ارزیابی کیفیت آب از نظر قابلیت شرب استفاده می‌شود، چشمه‌های مورد بررسی در وضعیت خوبی قرار دارند. این نتیجه بیانگر این است که پارامترهای شیمیایی آب، مانند غلظت‌های یون‌های مختلف، در محدوده قابل قبول برای مصرف انسانی قرار دارند. همچنین، نمودار پایپر که نوع غالب یون‌های موجود در آب را تعیین می‌کند، می‌تواند به درک بهتر از خواص شیمیایی آب کمک کند و در کنار نمودار شولر، تصویر جامع‌تری از وضعیت کیفی آب ارائه دهد. طبق نمودار پایپر تیپ آب‌های مورد بررسی در گروه بی‌کربناته کلسیمی قرار دارند. این نوع آب‌ها عموماً در مناطقی با ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی کوهستانی و تحت تأثیر منابع آب زیرزمینی قرار دارند. این امر می‌تواند نشان‌دهنده کیفیت مناسب آب از نظر شرب و کشاورزی

مقادیر مشاهده شده در شکل‌های ۲ تا ۱۲ نشان‌دهنده کیفیت مناسب آب زیرزمینی در بیشتر پارامترها است، اما تنوع در برخی یون‌ها می‌تواند به تفاوت در ترکیب زمین‌شناسی و منابع آلاینده مرتبط باشد. سختی کل و TDS در محدوده‌ای قرار دارند که نشان‌دهنده نیاز به پایش مستمر برای جلوگیری از افزایش احتمالی است. در نهایت، شاخص کیفیت آب (WQI) وضعیت کلی رضایت‌بخش آب زیرزمینی را تأیید می‌کند، اما مدیریت پایدار منابع آبی برای جلوگیری از تخریب کیفیت ضروری است.

نتایج دیاگرام شولر و پایپر برای چشمه‌های مورد مطالعه به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آورده شده است. نتایج تحلیل نمودارهای شولر و پایپر می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره کیفیت آب و مناسب بودن آن برای مصارف مختلف

خوب حفظ کرده‌اند، اما در برخی موارد، باید به کنترل و مدیریت سختی کل توجه بیشتری شود تا از ورود به دسته‌های پایین‌تر کیفیت جلوگیری شود. این وضعیت به‌وضوح نشان می‌دهد که منابع آب این منطقه از نظر کیفیت شیمیایی برای مصارف شرب ایده‌آل هستند. برای تعدیل سختی کل (TH) در آب چشمه‌ها می‌توان اقداماتی مانند مدیریت کاربری اراضی در حوزه آبخیز شامل کاهش فعالیت‌های انسانی مخرب مانند استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی، تخلیه فاضلاب‌ها، و جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی است که می‌تواند از ورود املاح به منابع آب جلوگیری کند. همچنین، اجرای برنامه‌های تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی با استفاده از رواناب‌های سطحی یا آب باران که سختی کمتری دارند، می‌تواند به کاهش غلظت املاح کمک کند. این اقدامات در کنار آموزش و اطلاع‌رسانی به ساکنان محلی درباره حفاظت از منابع آب، نقش مؤثری در کنترل سختی کل و سایر پارامترها خواهد داشت. در ادامه مقایسه‌ای از مقدار میانگین شاخص کیفیت آب در چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام با چشمه‌های مختلف دنیا در جدول ۶ آورده شده است. مقایسه شاخص کیفیت آب (WQI) چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام با سایر چشمه‌ها در نقاط مختلف ایران و جهان نشان می‌دهد که آب این چشمه‌ها از کیفیت مناسبی برخوردار است. بر اساس جدول ۶، شاخص کیفیت آب در حوزه آبخیز سد ایلام بین ۳۸/۰۷ تا ۴۵/۴۵ متغیر است که نسبت به مناطقی مانند آبخوان روئین اسفراین و مناطق شرقی دشت گرگان، در محدوده مناسبی قرار دارد. برای مثال، شاخص WQI در آبخوان روئین اسفراین بین ۱۶/۶۷ تا ۷۵/۱ و در مناطق شرقی دشت گرگان بین ۵۰ تا ۷۵ متغیر است. این نشان‌دهنده کیفیت نسبی بهتر آب چشمه‌های حوزه سد ایلام است. همچنین، در مقایسه با برخی مناطق هند که شاخص WQI آنها بسیار بالا بوده (تا ۶۶۰/۵۶ در ایالت کارناتاکا)، آب چشمه‌های ایلام کیفیت بسیار مطلوب‌تری دارد. این نتایج نشان می‌دهد که چشمه‌های این منطقه با وجود نیاز به پایش و مدیریت، هنوز کیفیت آب مناسبی برای استفاده‌های مختلف دارند و می‌توانند در تأمین آب آشامیدنی محلی نقش مهمی ایفا کنند. جهت تعیین مهم‌ترین پارامترهای کیفیت آب چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام، میانگین پارامترهای فیزیکوشیمیایی در هر ایستگاه و

باشد. در نهایت، آب‌های بی‌کربناته کلسیمی، به دلیل ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و منشأ زیرزمینی، معمولاً دارای کیفیت خوبی هستند.

حوزه آبخیز سد ایلام یکی از مهم‌ترین حوزه‌ها از نظر تولید آب می‌باشد. در مطالعه حاضر وضعیت کیفیت آب چهار چشمه انتخابی در حوزه آبخیز سد ایلام با استفاده از روش WHO، استاندارد WHO و ترسیم نمودارهای پایپر و شولر مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی جامع کیفیت آب چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) و تطبیق آن با استانداردهای جهانی و دی‌گرام شولر نشان می‌دهد که آب این چشمه‌ها به‌طور کلی از کیفیت بسیار مطلوبی برخوردار است. شاخص WQI که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارها برای تعیین قابلیت مصرف آب شرب شناخته می‌شود، در محدوده ۳۸/۰۷ تا ۴۵/۴۵ قرار دارد. این مقادیر به‌وضوح نشان می‌دهند که آب چشمه‌های مورد بررسی در دسته عالی طبقه‌بندی می‌شود و برای مصرف انسانی کاملاً مناسب است. در تحلیل پارامترهای شیمیایی، سولفات (SO_4^{2-})، کلر (Cl^-)، بی‌کربنات (HCO_3^-)، pH، کل مواد جامد محلول (TDS)، سختی کل (TH)، پتاسیم (K^+)، سدیم (Na^+)، منیزیم (Mg^{2+}) و کلسیم (Ca^{2+}) بررسی شدند. این پارامترها نه‌تنها به‌طور انفرادی در محدوده‌های مجاز قرار دارند بلکه بر اساس استانداردهای WHO نیز تأیید می‌شوند. با توجه به اینکه بیشتر این پارامترها دارای وزن نسبی بالا در محاسبات شاخص WQI هستند، کیفیت عالی آب چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام به‌خوبی تأیید می‌شود. این بدان معناست که این پارامترها در محدوده استانداردهای مطلوب برای آب آشامیدنی هستند و به کیفیت مطلوب آب کمک می‌کنند. مطالعات مشابه در مناطق دیگر نشان داده‌اند که ارزیابی کیفیت آب با استفاده از شاخص‌های WQI و تطبیق آن با استانداردهای جهانی، می‌تواند ابزار مؤثری برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی باشد.

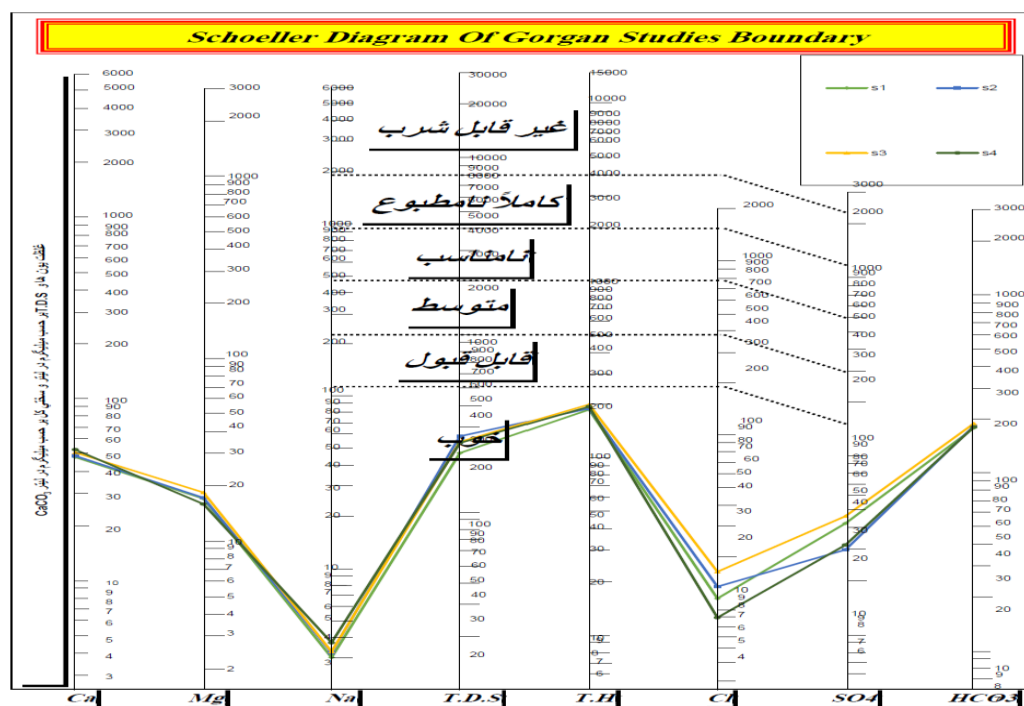
نتایج حاصل از تطبیق پارامترهای اندازه‌گیری شده در چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام با دی‌گرام شولر نیز نشان می‌دهد که تمامی پارامترها به‌جز سختی کل (TH) در تمام ایستگاه‌ها در محدوده خوب قرار دارند. تنها پارامتر سختی کل (TH) در برخی ایستگاه‌ها به صورت ترکیبی از دو کلاس خوب و قابل‌قبول طبقه‌بندی شده است. این نشان می‌دهد که هرچند بیشتر ایستگاه‌ها کیفیت سختی کل آب را در سطح

شناسایی این مؤلفه‌ها می‌تواند در مدیریت منابع آب و کنترل عوامل آلاینده مؤثر باشد. در نهایت، سهم بالای مؤلفه اول از کل واریانس نشان‌دهنده اهمیت پارامترهای شیمیایی اصلی در کیفیت آب این منطقه است.

مدیریت پایدار و کارآمد منابع آب برای تضمین دسترسی نسل‌های آینده به آب پاک و کافی از اهمیت بالایی برخوردار است. این هدف از طریق اجرای سیاست‌ها و اقداماتی که هدررفت آب را کاهش داده و کیفیت منابع آبی را ارتقا می‌بخشند، قابل دستیابی است. از جمله این اقدامات می‌توان به بهبود سیستم‌های آبیاری، ترویج فناوری‌های کم‌مصرف، کاهش آلودگی منابع آبی، و حفاظت از حوضه‌های آبخیز و سفره‌های زیرزمینی اشاره کرد. آب به‌عنوان یکی از نیازهای اساسی بشر و عنصر حیاتی در تمامی فعالیت‌های انسانی، نقش کلیدی در توسعه پایدار دارد. بنابراین، مدیریت هوشمندانه و پایدار منابع آب نه‌تنها برای تأمین نیازهای کنونی بلکه برای تضمین دسترسی نسل‌های آینده به آب پاک و کافی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

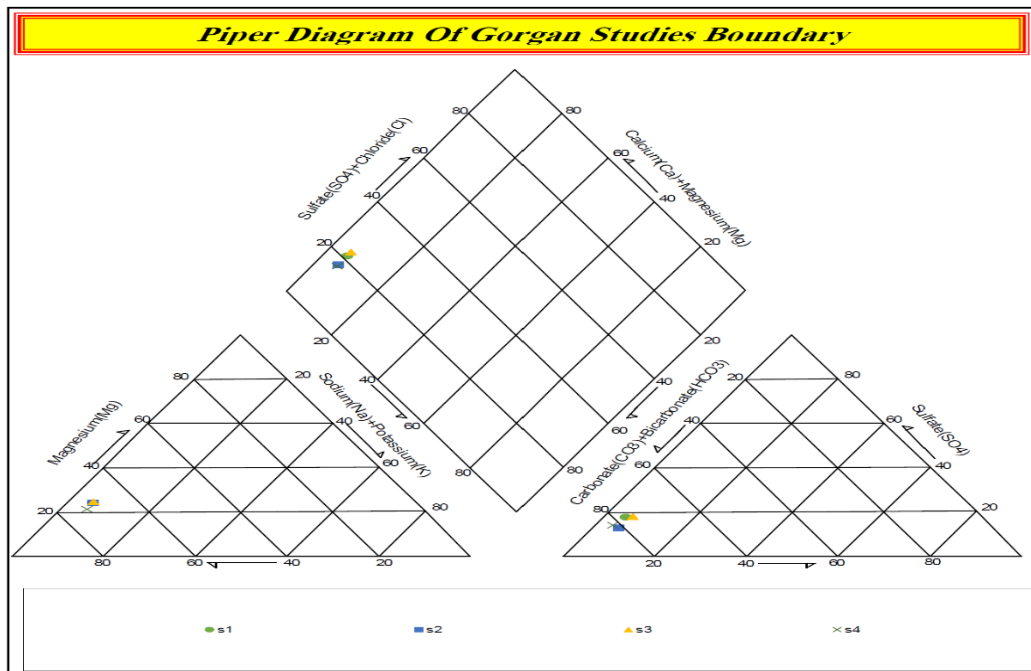
در ۶ ماه اندازه‌گیری شده در جدول ۷ ارائه‌شده، سپس با استفاده PCA مهم‌ترین پارامترها تعیین شدند (جدول ۸).

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای تبیین واریانس داده‌های کیفیت آب چشمه‌ها مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۸). مؤلفه اول به‌عنوان مهم‌ترین عامل معرفی شده است که بیش از نیمی از کل واریانس داده‌ها (۵۲/۰۷۳ درصد) را توجیه می‌کند. این نشان‌دهنده اهمیت بالای پارامترهای شیمیایی مرتبط با مؤلفه اول، شامل سولفات، کلر، بی‌کربنات، pH، سختی کل و منیزیم در تعیین کیفیت آب است. مؤلفه دوم بر ترکیبات یونی شامل پتاسیم، سدیم و کلسیم تمرکز دارد که به نظر می‌رسد نقش مهمی در تغییرات شیمیایی آب ایفا می‌کنند. مؤلفه سوم نیز بر غلظت مواد جامد محلول (TDS) تأکید دارد که شاخصی کلیدی برای ارزیابی کیفیت آب به‌شمار می‌رود. این تفکیک به درک عوامل مختلف تأثیرگذار بر کیفیت آب کمک می‌کند و به پژوهشگران امکان می‌دهد که تغییرات کیفیت آب را با توجه به نقش هر مؤلفه و پارامترهای مربوطه تحلیل کنند. همچنین،



شکل ۱۳. نمودار شولر آب چشمه‌های مورد مطالعه

Figure 13. Schuler diagram of the studied springs' water.



شکل ۱۴. نمودار پایپر آب چشمه‌های مورد مطالعه

Figure 14. Schuler diagram of the water quality of the studied springs.

جدول ۶. مقایسه شاخص کیفیت آب در چشمه‌های حوزه آبخیز سد ایلام در طی مدت پژوهش با چشمه‌های مختلف

Table 6. Comparison of the Water Quality Index (WQI) in the springs of the Ilam Dam watershed during the study period with springs from other areas.

منطقه مورد مطالعه Study area	WQI	منبع Reference
حوزه آبخیز سد ایلام	38.07 – 45.45	مطالعه حاضر
آبخوان روئین اسفراین	16.67 – 75.1	Motamedi Rad et al., 2021
مناطق شرقی دشت گرگان	50 - 75	Gharemahmoodlu & Shirzadnia, 2023
Srikakulam India	10.84 – 191.33	Sundar Kumar et al., 2010
Karnataka State, India	89.21 – 660.56	Ramakrishnaiah et al., 2009

جدول ۷. میانگین پارامترهای کیفی آب چشمه‌های مورد مطالعه در حوزه آبخیز سد ایلام

Table 7. Average Quality Parameters of the Studied Springs' Water in the Watershed

ایستگاه Station				پارامتر Parameter
4	3	2	1	
31.53	45.72	29.57	41.64	SO ₄ ²⁻
8.72	16.1	13.18	11.25	Cl ⁻
180.22	188.73	182.49	177.98	HCO ₃ ⁻
7.48	7.6	7.52	7.55	PH
242	245.33	263.66	212.33	TDS
233.16	292	245.16	250.5	TH
0.34	0.64	.58	0.68	K ⁺
3.6	3.19	3.15	2.95	Na ⁺
15.43	17.88	16.72	16.2	Mg ²⁺
52.17	50.34	48.26	47.49	Ca ²⁺

جدول ۸. نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی برای پارامترهای اندازه‌گیری شده در چشمه‌های مورد مطالعه

Table 8. The results of principal component analysis for measured parameters in studied river springs

مؤلفه			پارامتر
Component			Parameter
3	2	1	
-0.672	-0.153	0.723	SO ₄ ²⁻
0.222	-0.329	0.918	Cl ⁻
0.312	0.221	0.924	HCO ₃ ⁻
-0.272	-0.360	0.893	PH
0.959	0.213	0.189	TDS
-0.148	-0.081	0.986	TH
-0.223	-0.832	0.508	K ⁺
0.225	0.941	-0.253	Na ⁺
0.053	-0.372	0.927	Mg ²⁺
0.046	0.998	0.051	Ca ²⁺
17.191	30.736	52.073	واریانس
			Variance

آب چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام برای تأمین آب شرب سالم تأکید می‌کند و ضرورت حفظ و بهبود کیفیت این منابع را با رعایت اصول مدیریتی و نظارتی مستمر تأیید می‌نماید.

سیاس‌گزاری

بدین‌وسیله مراتب قدردانی از شرکت آب و فاضلاب استان ایلام جهت همکاری در انجام این پژوهش اعلام می‌گردد.

منابع

- Atashi yazdi, S. S., Motamedvaziri, B., Hosseini, S. Z., & Ahmadi, H. (2022). Assessment of vulnerability and hydrogeochemical specifications of Bahabad Yazd Plain aquifer. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 1-21.
- Bahrami, M., Khaksar, E., & Bahrami, A. (2022). Groundwater quality evaluation for potable and irrigation uses in the semi-arid region of southern Iran. *Irrigation and Drainage*, 71(3), 749-765.
- Bhusal, J., & Gyawali, P. (2015). Water quality of springs in Badigad Catchment, Western Nepal. *Bulletin of the Department of Geology*, 18, 67-74.
- Carbajal-Hernández, J. J., Sánchez-Fernández, L. P., Villa-Vargas, L. A., Carrasco-Ochoa, J. A., & Martínez-Trinidad, J. F. (2013). Water quality assessment in shrimp culture using an analytical hierarchical process. *Ecological indicators*, 29, 148-158.
- Çamdevýren, H., Demýr, N., Kanik, A., & Keskýn, S. (2005). Use of principal component scores in multiple linear regression models for prediction of Chlorophyll-a in reservoirs. *Ecological Modelling*, 181(4), 581-589.
- Chaudhry, A. K., Kumar, K., & Alam, M. A. (2019). Spatial distribution of physicochemical parameters for groundwater quality evaluation in a part of Satluj River Basin, India. *Water Supply*, 19(5), 1480-1490.

نتیجه‌گیری

حفاظت و استفاده بهینه از منابع آب از اصول بنیادین توسعه پایدار در هر کشور به‌شمار می‌رود. این مطالعه به بررسی کیفیت آب چشمه‌های حوضه آبخیز سد ایلام پرداخته است و نتایج حاصل از آن نشان می‌دهد که شاخص کیفیت آب (WQI) در تمامی نمونه‌های مورد بررسی در بازه زمانی ۶ ماهه (فروردین تا شهریور ۱۴۰۲) در محدوده عالی قرار دارد. این وضعیت نشان‌دهنده کیفیت بالای آب برای مصارف شرب است و مقادیر شاخص WQI در طی ماه‌های مختلف، بیانگر ثبات کیفیت آب در این منطقه است. تحلیل پارامترهای مورد مطالعه نیز تأیید کرد که تمامی این پارامترها در محدوده‌های استاندارد و مناسب قرار دارند. با توجه به تطابق این داده‌ها با استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO) و دی‌اگرام‌های شولر و پایپر، می‌توان نتیجه گرفت که آب چشمه‌های این منطقه از نظر شیمیایی بسیار مطلوب و برای مصرف شرب کاملاً مناسب است. باین‌حال، ضروری است که توجه داشته باشیم که استانداردهای کیفیت آب ممکن است در طول زمان به دلیل تغییرات کاربری زمین، منابع آلودگی و تغییرات آب و هوایی تغییر کنند؛ بنابراین، نظارت و ارزیابی مستمر منابع آب برای اطمینان از رعایت مستمر استانداردهای لازم و ایمن‌بودن آنها برای استفاده ضروری است. درحالی‌که منابع آب در منطقه مورد مطالعه در حال حاضر از کیفیت مطلوبی برخوردارند، حفظ این استانداردها از طریق نظارت دوره‌ای، ارزیابی مستمر، و مدیریت صحیح آب بسیار حائز اهمیت است. به‌طور خلاصه، نتایج این مطالعه بر پتانسیل بالای منابع

- a case study in and around Hua County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 1-17.
- Lotfinasabasl, S., Dargahian, F., & Khosroshahi, M. (2020). Water quality assessment of Gopalriver and its variations in the Maroon basin. *Watershed Engineering and Management*, 12(3), 835-852. (In Persian)
- Motamedi Rad, M., Goli Mokhtari, L., Bahrami, S. & zanganeh asadi M A. (2021). Assessment of the quality of water resources for drinking, agriculture, and industry in the karstic aquifer of Roein Esfarayen basin of North Khorasan province. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 21(62), 62-73. (In Persian)
- Noori, R., Khakpour, A., Omidvar, B., & Farokhnia, A. (2010). Comparison of ANN and principal component analysis-multivariate linear regression models for predicting the river flow based on developed discrepancy ratio statistics. *Expert Systems with Applications*, 37(8), 5856-5862.
- O'Dwyer, J., Hynds, P. D., Byrne, K. A., Ryan, M. P., & Adley, C. C. (2018). Development of a hierarchical model for predicting microbiological contamination of private groundwater supplies in a geologically heterogeneous region. *Environmental Pollution*, 237, 329-338.
- Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39(12), 2621-2635.
- Pantha, S., Timilsina, S., Pantha, S., Manjan, S. K., & Maharjan, M. (2022). Water quality index of springs in mid-hill of Nepal. *Environmental Challenges*, 9, 100658.
- Patil, V. B., Pinto, S. M., Govindaraju, T., Hebbalu, V. S., Bhat, V., & Kannanur, L. N. (2020). Multivariate statistics and water quality index (WQI) approach for geochemical assessment of groundwater quality—a case study of Kanavi Halla Sub-Basin, Belagavi, India. *Environmental Geochemistry and Health*, 42, 2667-2684.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928.
- Qureshimatva Umerfaruq, M., Maurya Rupesh, R., Gamit Sandip, B., & Solanki Hitesh, A. (2015). Seasonal Variation of Phytoplankton in Bibi Lake, Ahmedabad, Gujarat, India. *Preservation*, 4(10).
- Ramakrishnaiah, C. R., Sadashivaiah, C., & Ranganna, G. (2009). Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. *Journal of Chemistry*, 6(2), 523-530.
- Saadatmand, A., Noorollahi, Y., Yousefi, H., & Mohammadi, A. (2021). Investigation, modeling, and analysis of qualitative parameters of groundwater resources in Kurdistan's Kamyaran plain. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 8(2), 357-367. (In Persian)
- Chitsazan, M., Aghazadeh, N., Mirzaee, Y., & Golestan, Y. (2019). Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in the suburban area of Urmia city, Iran. *Environment, development and sustainability*, 21, 331-351.
- Choramini, M., Safaei, A., Khajavi, S., Hamid, H., & Abozari, S. (2015). Analyzing and studying chemical water quality parameters and their changes on the basis of Schuler, Wilcox, and Piper diagrams (project: Bahamanshir River). *WALIA journal*, 31(S4), 22-27.
- Chung, S. Y., Venkatramanan, S., Kim, T. H., Kim, D. S., & Ramkumar, T. (2015). Influence of hydrogeochemical processes and assessment of suitability for groundwater uses in Busan City, Korea. *Environment, Development and Sustainability*, 17, 423-441.
- de Paul Obade, V., & Moore, R. (2018). Synthesizing water quality indicators from standardized geospatial information to remedy water security challenges: A review. *Environment International*, 119, 220-231.
- Dwivedi, S. L., & Pathak, V. (2007). A preliminary assignment of water quality index to Mandakini River, Chitrakoot. *Indian Journal of Environmental Protection*, 27(11), 1036.
- Gharemahmoodlu, M. (2023). Assessment and comparison of the spring and well water resources quality for Drinking and Irrigation Purposes (Case study: East of Gorgan Plain. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1), 47-66. (In Persian)
- Gurung, A., Adhikari, S., Chauhan, R., Thakuri, S., Nakarmi, S., Rijal, D., & Dongol, B. S. (2019). Assessment of spring water quality in the rural watersheds of western Nepal. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 7(11), 39-53.
- He, S., & Wu, J. (2019). Hydrogeochemical characteristics, groundwater quality, and health risks from hexavalent chromium and nitrate in groundwater of Huanhe Formation in Wuqi county, northwest China. *Exposure and Health*, 11, 125-137.
- Kazakis, N., & Voudouris, K. S. (2015). Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*, 525, 13-25.
- Kibetu, P.M., Thumbi, G.M., Okwadha, G.O., & Nyadawa, M.O. (2017). Groundwater quality assessment and water quality indexing: Case study of Makueni County, Eastern Kenya. In Jkuat Annual Scientific Conference Proceedings, 130-143.
- Kresic, N., & Stevanovic, Z. (Eds.). (2009). *Groundwater hydrology of springs: engineering, theory, management, and sustainability*. Butterworth-heinemann.
- Li, P., Wu, J., & Qian, H. (2016). Hydrochemical appraisal of groundwater quality for drinking and irrigation purposes and the major influencing factors:

- Sadat-Noori, S. M., Ebrahimi, K., & Liaghat, A. M. (2014). Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71, 3827-3843.
- Sadeghi-Lari, A., Bahrami, M., & Dastandaz, T. (2024). Temporal and spatial variations of groundwater quantity and quality for drinking and irrigation purposes in the arid and hot weather of Southern Iran. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134, 103582.
- Shrestha, A. K., & Basnet, N. (2018). An evaluation of physicochemical analysis and water quality index of Ratuwa River of Damak, Jhapa, Nepal. *Int J Recent Res Rev*, 11(2), 1-9.
- Solgi, E., Bigmohammadi, F., Rozbhani, Z., & Ghiasvand, S. (2022). Water quality assessment of surface and groundwater sources used for drinking and agriculture. *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(3), 97-111. (In Persian)
- Sundar Kumar K., Kumar PS., Babu M. J. R., & RAO C.H. (2010). Assessment and mapping of groundwater quality using geographical information systems. *Assessment*, 2(11), pp.6035-6046.
- Tripathi, D. K., Pandey, G., & Jain, C. K. (2015). Physicochemical analysis of selected springs water samples of Dehradun City, Uttarakhand, India. *Int J for Innov Res Sci Tech*, 2(5), 99-103.
- WHO. (2004a). Guidelines For Drinking-Water Quality. World Health Organization.
- WHO. (2004b). Guidelines for drinking water quality vol. 1 recommendations (p. 130). Geneva: WHO.
- WHO. (2011). Guidelines for drinking-water quality. *World Health Organization*, 216, 303-304.
- WHO. (2014). Guidelines for drinking-water quality, World Health Organization (3rd ed., 1(515). Geneva, Recommendations.
- WHO. (2017). Guidelines for drinking-water quality. In: Incorporating 1st Addendum, fourth ed. World Health Organization, Geneva.
- Zahedi, S., Azarnivand, A., & Chitsaz, N. (2017). Groundwater quality classification derivation using multi-criteria-decision-making techniques. *Ecological Indicators*, 78, 243-252

