Hydrogeochemical Assessment and Quality Appraisal of Groundwater in South Khorasan Province Using Integrated Indices and Multivariate Modeling

Abstract

Securing high-quality water resources in arid regions such as South Khorasan Province is a critical and escalating challenge. This study aimed to comprehensively evaluate groundwater quality, conduct a comparative appraisal of drinking water indices, apportion contamination sources, and uncover concealed agricultural soil risks. Hydrochemical data from 279 groundwater samples were processed in a Python environment following automated screening based on the ionic balance error. The results revealed that Na-K-Cl is the predominant hydrochemical facies (79.3%), with evaporation–crystallization identified as the primary governing mechanism, aligning completely with regional hydrogeological conditions reported in prior studies. According to the WHO model, 70.6% of samples were classified as suitable for drinking; however, spatial analysis highlighted localized quality deterioration primarily in the southeastern and southwestern hotspots of the aquifer. The comparative evaluation proved that the multidimensional CCME model was the most sensitive in capturing concurrent parameter exceedances (36.6% unsuitable). Crucially, the key novelty emerged in the agricultural sector: despite favorable classifications from traditional SAR, elevated levels of Magnesium Hazard (MH), Kelley's Ratio (KR), and sodium percentage pose severe long-term threats to clay dispersion, permeability decline, and soil physical structural degradation. Furthermore, PCA effectively disentangled geogenic evaporite mineral dissolution (55.9% variance) from anthropogenic agricultural fertilizer inputs (11.2% variance). Overall, sustainable groundwater management in arid basins requires moving beyond traditional single-parameter metrics toward the concurrent integration of multidimensional quality models with soil-structure-sensitive indices.

Keywords: Magnesium Hazard (MH), Gibbs plot, Na-K-Cl facies, Soil sodification, Principal Component Analysis (PCA).

Introduction

Ensuring a safe and reliable water supply in arid and semi-arid regions such as South Khorasan province is a critical and escalating challenge. The increasing demand for water, coupled with prolonged droughts, has placed immense pressure on groundwater resources. This study aimed to comprehensively evaluate the quality of groundwater resources for both drinking and agricultural applications across the region, while also identifying and apportioning the sources of various pollutants. A critical research gap exists regarding the conventional, exclusive reliance on SAR, which masks hidden soil degradation risks detectable through complementary indices such as MH and KR in fragile arid environments.

Methods

To achieve the research objectives, hydrogeochemical data from 279 groundwater samples were collected and systematically processed. To ensure absolute data integrity and eliminate computational or laboratory errors, a Python-based computational script was developed to calculate the Ion Balance Error (IBE) for each sample. Only samples with an IBE of less than ±10% were retained for subsequent analyses. For the evaluation of drinking water suitability, a comparative methodology was employed using three distinct models: the World Health Organization Water Quality Index (WHO-WQI), the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME-WQI), and the Weighted Water Quality Index. Agricultural viability was assessed by calculating multiple irrigation indices, including the Sodium Adsorption Ratio (SAR), Residual Sodium Carbonate (RSC), Sodium Percentage (%Na), Magnesium Hazard (MH), and Kelley's Ratio (KR). Furthermore, to elucidate the hydrogeochemical evolution and disentangle the sources of pollution, Piper and Gibbs diagrams were utilized alongside Principal Component Analysis (PCA) as a multivariate statistical tool.

Results

The hydrochemical analysis revealed that the predominant water type in the studied aquifers is the Na-K-Cl facies (accounting for 79.3% of samples). The Gibbs diagram demonstrated that the chemistry of the groundwater is overwhelmingly governed by the evaporation-crystallization process, which is characteristic of the arid climatic conditions in South Khorasan. Regarding drinking water suitability, the WHO-WQI model indicated that over 70% (70.6%) of the analyzed samples fall into the desirable/permissible categories for human consumption. However, spatial analysis highlighted localized quality deterioration primarily in the southeastern and southwestern hotspots of the province. In the agricultural sector, a critical dichotomy was discovered. While the traditional SAR index categorized the vast majority of samples as favorable, evaluations using MH, KR, and %Na revealed significant hidden risks, indicating a high potential for long-term physical soil degradation and permeability reduction. Finally, the PCA successfully extracted two primary components: a “Geogenic Factor” driven by natural evaporite mineral dissolution and intense evaporation (explaining 55.9% of total variance), and an “Anthropogenic Factor” strongly linked to nitrate and potassium inputs from agricultural fertilizers and domestic wastewater (explaining 11.2% of total variance).

Conclusion

The findings confirm that natural geogenic processes, primarily intense evaporation–crystallization, govern regional groundwater salinity and drive the dominance of the Na-K-Cl facies. Crucially, uncovering "hidden agricultural risks" demonstrates that exclusive reliance on the traditional SAR metric is highly misleading, as elevated MH, KR, and %Na values severely threaten long-term soil structural integrity, mandating their inclusion in regional irrigation protocols. Furthermore, PCA results provide statistical evidence of a dual vulnerability to geogenic salinity and anthropogenic agricultural inputs, necessitating tailored land-use governance. Methodologically, automated Python screening coupled with comparative multi-model WQI evaluations proves indispensable for robust, reliable water quality appraisal.

Funding

This research received no external funding.

Authorship contribution

All authors contributed equally to this work and approved the manuscript.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

During the preparation of this manuscript, the authors utilized Gemini solely for linguistic editing and to enhance the clarity of the text. The authors have reviewed and approved the final text and take full responsibility for the content of this publication.

Acknowledgements

The authors thank all individuals and organizations that supported this research.

Ethical considerations

All authors adhered to and approved all relevant scientific research ethics principles.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest regarding this publication.

ویراستاری نشده

ارزیابی هیدروژئوشیمی و کیفیت منابع آب زیرزمینی استان خراسان جنوبی با شاخص‌های تلفیقی و مدل‌سازی چندمتغیره

چکیده

تأمین آب باکیفیت در اقلیم‌های خشک نظیر استان خراسان جنوبی چالشی حیاتی و رو به گسترش است. این پژوهش با هدف ارزیابی جامع کیفیت منابع آب زیرزمینی، مقایسه تطبیقی شاخص‌های شرب، تفکیک منشأ آلاینده‌ها و آشکارسازی خطرات پنهان زراعی انجام شد. بدین منظور، داده‌های هیدروشیمیایی ۲۷۹ نمونه آب پس از غربالگری بر مبنای خطای تعادل بار یونی در محیط پایتون پردازش گردید. نتایج نشان داد رخساره غالب آبخوان Na-K-Cl (با ۷۹٫۳ درصد) بوده و تبخیر-تبلور مکانیسم اصلی حاکم بر شیمی آب منطقه است که با ساختار هیدروژئولوژیکی گزارش‌شده در مطالعات پیشین حوضه انطباق کامل دارد. بر اساس مدل WHO، حدود ۷۰٫۶ درصد از نمونه‌ها در رده مطلوب شرب قرار دارند، اما تحلیل مکانی بیانگر افت کیفیت در کانون‌های بحرانی جنوب شرقی و جنوب‌غربی آبخوان است. ارزیابی تطبیقی اثبات کرد که مدل چندبعدی CCME با ۳۶٫۶ درصد در رده نامطلوب، حساس‌ترین رویکرد را در مواجهه با تخطی همزمان املاح ارائه می‌دهد. نوآوری شاخص پژوهش در حوزه کشاورزی نشان داد که علیرغم طبقه‌بندی مناسب آب‌ها با شاخص سنتی SAR، مقادیر بحرانی شاخص‌های مکمل خطر منیزیم (MH)، نسبت کلی (KR) و درصد سدیم، تهدیدی جدی برای پراکندگی ذرات رس، افت نفوذپذیری و تخریب فیزیکی ساختمان خاک در درازمدت محسوب می‌شوند. همچنین، تحلیل PCA عامل زمین‌زاد انحلال کانی‌های تبخیری بستر (۵۵٫۹ ٪ واریانس) را از آلاینده انسان‌زاد نیترات و پتاسیم کشاورزی (۱۱٫۲٪ واریانس) تفکیک نمود. در مجموع، یافته‌ها اثبات می‌کنند که مدیریت پایدار آبخوان‌های خشک مستلزم گذار از شاخص‌های سنتی تک‌پارامتری و تلفیق هم‌زمان مدل‌های کیفی چندبعدی با شاخص‌های ناظر بر ساختمان فیزیکی خاک است.

کلمات کلیدی: خطر منیزیم(MH) ، دیاگرام گیبس، رخساره Na-K-Cl ، سدیمی‌شدن خاک، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA).

مقدمه

تأمین آب سالم و پایدار بزرگ‌ترین چالش قرن بیست و یکم است؛ چرا که آب‌های زیرزمینی ۹۸ درصد ذخایر آب شیرین مایع و نیمی از آب شرب جهان را تأمین می‌کنند (Ge et al., 2025). مدل‌سازی‌های جهانی با تفکیک‌پذیری ۱ کیلومتر نشان داده‌اند وابستگی فزاینده به آب زیرزمینی، زوال شدید پیزومتری را در اقلیم‌های خشک رقم زده است (van Jaarsveld et al., 2026). در حوضه‌های فوق‌خشک قطر، تبخیر سالانه فراتر از ۲۲۰۰ میلی‌متر و کسری بیلان ۱۸۴ میلیون مترمکعبی، ۱٫۶۱ در صد آبخوان‌ها را ناگوار برای شرب ساخته و بیشینه املاح کل محلول (TDS) را به ۵۱،۹۴۰ میلی‌گرم بر لیتر رسانده است (Aloui et al., 2025). در خاورمیانه، اضافه برداشت ۶۰ میلیون مترمکعبی سبب نشست رو به بالا و تغلیظ منیزیم، سولفات و بُر گردیده (Rashid et al., 2025) و در دشت‌های عراق رخساره سخت Ca-Mg-SO_4-Cl با هدایت الکتریکی ۱۶،۳۰۵ میکروموز بر سانتی‌متر را حاکم ساخته است (Alameer et al., 2026). این اضافه برداشت‌ها در خاورمیانه، شمال چین و هند به افت تراز، فرونشست، پیشروی آب شور و تخریب ساختار خاک منجر شده (Wada et al., 2010; Famiglietti, 2014) و حتی قنات‌های کهن را دچار خشکیدگی کرده است (Lightfoot, 1996; Awadh et al., 2021). همگام با توسعه هیدروژئولوژی محاسباتی، رویکرد تک‌پارامتری جای خود را به شاخص‌های جامع داد (Jalali et al., 2024). شاخص‌های کیفیت آب (WQI) و وزن‌دهی‌شده با آنتروپی (EWQI) ارزیابی واقع‌بینانه‌تری ارائه می‌دهند (Nahar and Das, 2025)؛ چنان‌که واکاوی ۱۰۴۰ چاه در چین با مدل SHAP سهم انحلال بی‌کربنات و شوری حاصل از Na و K را در تنزل کیفی ۱۴٫۱۳ درصد چاه‌ها آشکار ساخت (Tian et al., 2025b). همچنین ارزیابی‌های ریسک سلامت (HHRA) در تبت نشان داده تمرکز آلاینده‌های نیتروژنه (NH_4^+ و NO_3^-) فاضلاب سبب تخطی شاخص غیرسرطان‌زایی (HI $>$ ۱) در ۱۶٫۶۷ درصد نمونه‌ها می‌شود (Peng et al., 2026).

روش‌های چندمتغیره نظیر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و خوشه‌ای (HCA) به ابزاری اساسی برای کاهش ابعاد داده‌ها و تفکیک منابع طبیعی از انسان‌زاد بدل شده‌اند (Güler et al., 2002; Singh et al., 2024). مدل فاکتورگیری ماتریسی مثبت (PMF) سهم

انحلال تبخیری بستر (۴۰٫۱۸٪)، هوازدگی سیلیکات‌ها (۱۶٫۳۱٪)، کشاورزی (۱۷٫۰۳٪) و فاضلاب (۱۳٫۴۱٪) را در شوری‌های فراتر از ۵۶،۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر اثبات کرده ا ست (Xiao et al., 2026). همچنین PCA در هند با تبیین ۷۵٫۵۳ در صد واریانس، حاکمیت انحلال فصلی را نشان داد (Pande et al., 2025). شبیه‌سازی‌های ترمودینامیکی در الجزایر اشباع‌نیافتگی هالیت و ژیپس را همراه با تسلط تعویض کاتیونی در ۸۶ درصد چاه‌ها اثبات نموده (Benmerabet et al., 2025; Gibbs, 1970) و در محیط‌های قلیایی (pH >۷٫۵)، اشباع کلسیت رهایش فلوئور و تخطی ۴۲ درصد نمونه‌ها را رقم زده است (Tian et al., 2025a). پایش کیفی کشاورزی نیز با شاخص‌های نسبت جذب سدیم (SAR)، درصد سدیم (Na٪)، نفوذپذیری (PI) و شاخص‌های خورندگی لانژلیه (LSI) و رایزنر (RSI) تو سعه یافته ا ست (Wilcox, 1955; Doneen, 1964; Iheme et al., 2026; Thirumurugan et al., 2018; Egbueri et al., 2021; Szabolcs, 1964). با این حال، شواهد در دشت‌های عربستان و هند نشان می‌دهد تکیه صِرف بر SAR گمراهکننده است؛ زیرا شاخص خطر منیزیم (MH) در ۹۵ تا ۱۰۰ در صد چاه‌های این مناطق از حد بحرانی ۵۰ در صد تجاوز کرده ا ست (Ghrefat et al., 2025; Yadav et al., 2025)، در حالی که در مراکش بخش عمده آبخوان‌ها (بیش از ۸۲درصد) از نظر MH مناسب هستند (Boukich et al., 2025). پایش مخازن شمال آفریقا نیز بروز مقادیر بحرانی منیزیم (MH > ۶۰ در ۳۰ درصد نمونه‌ها) را تأیید نموده (Bokreta et al., 2026) و شاخص آلودگی (PIG) جهش نیترات و فلوئور و تخطی صددرصدی خطر بهداشتی (HQ > ۱) را آشکار ساخته است (Sunitha et al., 2026). در ایران نیز تخلیه آبخوان‌ها در مقیاس ملی تر سیم شده (Maghrebi et al., 2021) و مطالعات د شت‌های زنجان (Hussainzadeh et al., 2023)، بهار–همدان (Jalali et al., 2024)، نی شابور (Hussainzadeh et al., 2024)، خرا سان جنوبی (Kazemi et al., 2022; Rezaei et al., 2021)، آذرشهر (Jabraili-Andaryan et al., 2023)، تبریز (Barzegar and Asghari Moghaddam, 2017)، جاجرم (Asadi et al., 2015) و سد شیرین‌دره (Tajbakhshian, 2023) بر این روندها متمرکز بوده‌اند. پژوهش‌های داخلی با تلفیق EWQI و TOPSIS در زنجان (بیات و اسدی، ۲۰۱۹)، اشباع کلسیت و دولومیت در بهار (فاضل توسل و همکاران، ۲۰۲۰)، کریجینگ در میاندوآب (پاشاخواه و همکاران، ۲۰۲۲) و نقش میان‌لایه‌های تبخیری میوسن در شوری بستر (Nabatian et al., 2025) پیشینه موضوع را توسعه داده‌اند، اما غالباً بر تحلیل‌های تک‌پارامتری یا تک‌مدلی محدود مانده‌اند.

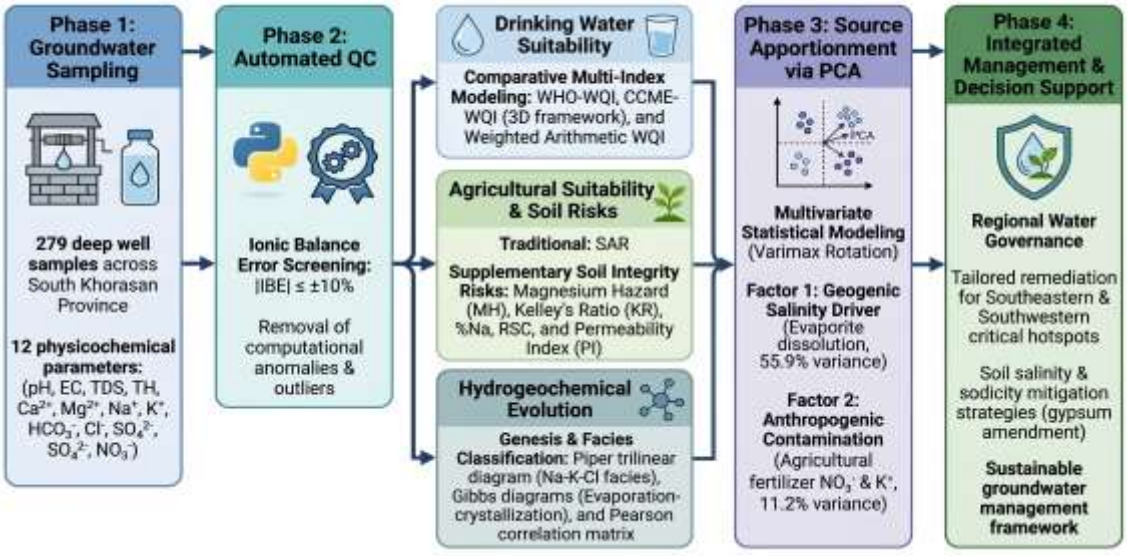
مرور ادبیات پژوهش نشان می‌دهد چندین خلاء تحقیقاتی بنیادین در هیدروژئولوژی دشت‌های خشک بسته پابرجاست (Jalali et al., 2024). نخ ست، ارزیابی‌های مقای سه‌ای هم‌زمان بین شاخص‌های کیفی شرب با ساختارهای ریا ضی متمایز صورت نگرفته ا ست؛ نقصی که مانع از سنجش حساسیت مدل‌ها نسبت به جهش املاح تبخیری و کاهش عدم‌قطعیت وزن‌دهی می‌گردد (Jalali et al., 2024). پژوهش‌های متأخر اثبات کرده‌اند مدل‌های چندبُعدی رفتاری متفاوت از مدل‌های میانگین‌گیری وزنی خطی دارند و اتکا به یک شاخص منفرد می‌تواند تصمیمی گمراه‌کننده باشد (Boukich et al., 2025). دوم، در بخش کشاورزی تمرکز افراطی بر شاخص SAR سبب غفلت از رفتار مخرب منیزیم در خاک گردیده است (Harutyunyan et al., 2026). ضرورت بررسی شاخص‌های فراتر از SAR از آنجا ناشی می‌شود که غلظت بالای منیزیم نقشی به‌مراتب ویران‌کننده‌تر از کلسیم بر خواص فیزیکی خاک دارد. یون منیزیم (Mg^{2+}) به دلیل شعاع هیدراته بزرگ‌تر و چگالی بار سطحی کمتر در مقایسه با کلسیم (Ca^{2+})، با پیوند الکترواستاتیک ضعیف‌تری بر کلوئیدهای رس متصل می‌شود. این ویژگی مانع از لخته‌سازی (Flocculation) خاک‌دانه‌ها توسط کلسیم شده و به پدیده پراکندگی شدید ذرات رس (Clay Dispersion)، تورم کلوئیدها، درهم شکستن ساختمان خاک و انسداد حفرات موئینه منجر می‌شود که فرجام آن افت شدید و بازگ شت‌ناپذیر هدایت هیدرولیکی ا شباع و نفوذپذیری ا ست. بدین ترتیب، آب آبیاری ممکن ا ست بر ا ساس SAR ایمن طبقه‌بندی شود، اما هم‌زمان به دلیل بار منیزیم، شاخص‌های خطر منیزیم (MH) و نسبت کلی (KR) در و ضعیت بحرانی قرار گیرند؛ امری که سدیمی شدن تدریجی و آب‌بندی لایه‌های سطحی را پنهان می سازد (Harutyunyan et al., 2026; Maghrebi et al., 2021; Boukich et al., 2025). افزون بر این، سنجش خطای تعادل بار یونی (IBE) در مراحل پیش‌پردازش نیازمند اتوما سیون محاسباتی الگوریتمی است (Güler et al., 2002) و تفکیک آماری پیشران‌های زمین‌زاد بستر از ردپای آلاینده‌های انسان‌زاد در دشت‌های خشک کمتر بررسی شده است (Singh et al., 2024).

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف پوشش این خلاءها در آبخوان دشت بیرجند پی‌ریزی شده است. نوآوری کلیدی تحقیق در گام نخست، توسعه چارچوب محاسباتی خودکار در بستر پایتون (Python) است تا صحت سنجی سخت‌گیرانه داده‌ها بر مبنای خطای تعادل بار یونی ($|IBE| \leq 10\%$) تضمین و داده‌های پرت با دقت الگوریتمی غربالگری شوند (Güler et al., 2002). همگام با آن، با تحلیل تطبیقی شرب میان سه مدل متمایز (استاندارد جهانی WHO، شاخص چندبُعدی CCME و میانگین وزنی)، عدم قطعیت ساختاری مدل‌ها به چالش کشیده شده است (Jalali et al., 2024). در منشأیابی فرآیندها، مطالعه حاضر با تلفیق تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تحت چرخش واریماکس و نمودارهای ژئوشیمیایی، پیشران شوری زمین‌زاد (انحلال تبخیری) را از بارگذاری انسان‌زاد (نیترات و پتاسیم کشاورزی) تفکیک نموده است (Singh et al., 2024; Alam et al., 2025). سرانجام، بارزترین نوآوری مطالعه در حوزه کشاورزی متجلی می شود؛ جایی که اثبات می‌گردد علیرغم طبقه‌بندی مطلوب آبخوان بر پایه شاخص سنتی SAR، حاکمیت مقادیر بحرانی شاخص‌های تکمیلی خطر منیزیم (MH) و نسبت کلی (KR) از طریق تضعیف هدایت هیدرولیکی، خطری جدی و پنهان برای پایداری درازمدت خاک‌های تحت کشت در این منطقه خشک به‌شمار می‌رود (Harutyunyan et al., 2026).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه ، داده‌ها و روند پژوهش

این پژوهش در استان خراسان جنوبی، واقع در بخش جنوب شرقی ایران با اقلیم خشک و نیمه خشک انجام گردید که به دلیل بارندگی اندک و تبخیر شدید، وابستگی بالایی به آبخوان‌ها دارد. در این راستا، ۲۷۹ نمونه آب زیرزمینی مطابق استانداردهای بین‌المللی (APHA, 2017) گردآوری و ۱۲ پارامتر فیزیکوشیمیایی شامل pH، EC، TDS، TH، کاتیون‌های اصلی (Ca^{2+}،Mg^{2+}،Na^{+}،K^{+}) و آنیون‌های اصلی (Cl^{-}، SO_4^{2-}، HCO_3^{-}، NO_3^{-}) تعیین گردیدند. روند اجرایی در چهار فاز متوالی (شکل ۱) شامل: آماده‌سازی و غربالگری بیلان یونی (Güler et al., 2002)، ارزیابی شرب با سه شاخص WHO-WQI ، CCME-WQI و Weighted WQI (Jalali et al., 2024; Tajbakhshian, 2023)، تعیین شاخص‌های کشاورزی (Amiri et al., 2021) و تفکیک منابع با مدل‌سازی هیدروژئوشیمیایی و آماری پیاده‌سازی شد (Singh et al., 2024).



شکل ۱. فلوچارت روش‌شناسی یکپارچه پژوهش از کنترل کیفیت داده‌ها تا تحلیل‌های کیفی و مدیریت پایدار آبخوان.

پیش‌پردازش داده‌ها و کنترل کیفیت

در مرحله نخست، داده‌های خام حاصل از ۱۲ پارامتر فیزیکوشیمیایی و هیدروشیمیایی یکنواخت‌سازی و پیش‌پردازش شدند (Mayakannan et al., 2026; Kazemi et al., 2022). غلظت‌ها جهت محاسبه WQI بر حسب mg/L و برای شاخص‌های کشاورزی و هیدروژئو شیمیایی به meq/L تبدیل شدند (Güler et al., 2002). صحت آزمایشگاهی داده‌ها با محاسبه خطای بیلان بار یونی (IBE) ارزیابی شد (Güler et al., 2002; Alam et al., 2025):

$$\mathrm{IBE}(\%) = \left(\frac{\sum \mathrm{Cations} - \sum \mathrm{Anions}}{\sum \mathrm{Cations} + \sum \mathrm{Anions}}\right) \times 100 \quad \text{رابطه ۱)}$$

طبق استانداردهای بین‌المللی، صرفاً داده‌های با خطای مجاز ($\mathrm{IBE} \leq \pm 10\%$) به عنوان نمونه‌های معتبر و دقیق شناخته شده و برای مراحل بعدی پذیرفته شدند (Güler et al., 2002; Mayakannan et al., 2026; Tajbakhshian, 2025).

محاسبات شاخص کیفیت آب

در جدول ۱، وزن‌های اختصاص‌یافته (w_i) وزن‌های نسبی استاندارد شده (W_i) و استانداردهای مجاز سازمان جهانی بهداشت (S_i) جهت محاسبه شاخص WHO WQI ارائه شده است (WHO, 2011; Ram et al., 2021; Jalali et al., 2024):

جدول ۱. استانداردهای مرجع و ضرایب وزن‌دهی پارامترهای کیفی آب در الگوریتم محاسبه WQI

پارامتر کیفی(Parameter)	واحد (Unit)	وزن اختصاص‌یافته (wi)	حد مجاز استاندارد (Si)	وزن نسبی (Wi)
اسیدیته(pH)		۴	۶٫۵–۸٫۵	۰٫۱۶۰
کل جامدات محلول(TDS)	mg/L	۵	۱۰۰۰	۰٫۲۰۰
سختی کل(TH)	mg/L	۴	۵۰۰	۰٫۰۸۰
کلسیم(Ca^{2+})	mg/L	۲	۲۰۰	۰٫۰۸۰
منیزیم(Mg^{2+})	mg/L	۲	۱۵۰	۰٫۰۸۰
سدیم(Na^{+})	mg/L	۳	۲۰۰	۰٫۱۲۰
کلرید(Cl^{-})	mg/L	۳	۲۵۰	۰٫۱۲۰
سولفات(SO_4^{2-})	mg/L	۴	۲۵۰	۰٫۱۶۰
نیترات(NO_3^{-})	mg/L	۵	۵۰	۰٫۲۰۰
مجموع($\sum$)	-	۲۵	–	۱

شاخص سازمان جهانی بهداشت (WHO WQI) با نرمال‌سازی وزن بهداشتی پارامترها و میانگین‌گیری وزنی رتبه‌های کیفی محاسبه می‌شود (Horton, 1965; Brown et al., 1972). رتبه کیفی pH به‌دلیل داشتن بازه خنثی بر مبنای عدد ۷ اصلاح می‌گردد (Tiwari & Mishra, 1985; Tajbakhshian, 2023) و نمونه‌ها در ۵ رده عالی(<۵۰)، خوب (۵۰–۱۰۰)، ضعیف(۱۰۰–۲۰۰)، بسیار ضعیف(۲۰۰–۳۰۰) و نامناسب(≥۳۰۰) طبقه‌بندی می‌شوند (Brown et al., 1972; Ram et al., 2021; Tajbakhshian, 2025):

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \quad \text{رابطه ۲)}$$

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i}\right) \times 100 \quad \text{رابطه ۳)}$$

$$q_{pH} = \left(\frac{C_{pH}-7}{8.5-7}\right) \times 100 \quad \text{رابطه ۴)}$$

$$\mathrm{WQI} = \sum_{i=1}^{n} (W_i \times q_i) \quad \text{رابطه ۵)}$$

در این روابط، w_i وزن اختصاص‌یافته بر اساس اهمیت بهداشتی، W_i وزن نسبی نرمال‌شده، C_i غلظت اندازه‌گیری‌شده، S_i حد مجاز استاندارد، q_i رتبه‌بندی کیفی هر پارامتر و q_{pH} رتبه‌بندی کیفی اصلاح‌شده اسیدیته است.

ویرایش اندازی نشده

شاخص شورای وزیران محیط زیست کانادا (CCME WQI)، تغییرات کیفیت منابع آب را در ساختاری سه‌بعدی و منعطف بر پایه درصد پارامترهای نامنطبق (دامنه، F_1)، درصد آزمون‌های نامنطبق (تکرار، F_2) و شدت انحراف از استانداردها (F_3) ارزیابی می‌کند (CCME, 2001; Khan et al., 2004). لازم به ذکر است مؤلفه F_3 برحسب انحراف از استاندارد (excursion) و مجموع انحرافات نرمال‌شده (nse) محاسبه می‌شود و نمره نهایی بین ۰ تا ۱۰۰ متغیر است.

رابطه ۶)
$$F_1 = \left(\frac{\text{تعداد پارامترهای نامنطبق}}{\text{تعداد کل پارامترها}}\right) \times 100$$

رابطه ۷)
$$F_2 = \left(\frac{\text{تعداد آزمون‌های نامنطبق}}{\text{تعداد کل آزمون‌ها}}\right) \times 100$$

رابطه ۸)
$$\text{excursion}_i = \left(\frac{\text{Failed Test Value}_i}{\text{Objective}_i}\right) - 1$$

رابطه ۹)
$$\text{nse} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \text{excursion}_i}{\text{تعداد کل آزمون‌ها}}$$

رابطه ۱۰)
$$F_3 = \frac{\text{nse}}{0.01\text{nse} + 0.01}$$

رابطه ۱۱)
$$\text{CCME}_{\text{WQI}} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732}\right)$$

شاخص حسابی وزن‌دار (Weighted Arithmetic WQI) بر پایه تعیین ضریب وزنی به صورت معکوس حد مجاز استاندارد بنا شده تا پارامترهای با اهمیت بهداشتی بالاتر، وزن بیشتری در رتبه‌بندی نهایی داشته باشند (Horton, 1965; Brown et al., 1972; Chatterjee & Raziuddin, 2002; Ram et al., 2021; Jalali et al., 2024).

رابطه ۱۲)
$$w_i = \frac{K}{S_i}$$

رابطه ۱۳)
$$K = \frac{1}{\sum\left(\frac{1}{S_i}\right)}$$

رابطه ۱۴)
$$q_i = \left(\frac{C_i - V_0}{S_i - V_0}\right) \times 100$$

رابطه ۱۵)
$$\text{WQI}_{\text{Weighted}} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(w_i \times q_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$$

در این روابط، w_i ضریب وزن واحد هر پارامتر، S_i حد مجاز استاندارد، K ثابت تناسب محاسباتی، q_i رتبه‌بندی کیفی هر متغیر، C_i غلظت اندازه‌گیری‌شده در نمونه، V_0 غلظت ایده‌آل پارامتر در آب خالص (برای تمامی پارامترها برابر صفر و منحصراً برای pH برابر ۰.۷) و WQI_{Weighted} نمره نهایی شاخص حسابی وزن‌دار است.

ارزیابی قابلیت مصرف در کشاورزی

کلیه شاخص‌های کیفی آب کشاورزی بر پایه غلظت‌های یونی بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر (meq/L) در محیط پایتون محاسبه شدند (Amiri et al., 2021; Harutyunyan et al., 2026). این شاخص‌ها شامل نسبت جذب سدیم (رابطه ۱۶؛ Richards, 1954)، درصد سدیم (رابطه ۱۷؛ Wilcox, 1955)، کربنات سدیم باقیمانده (رابطه ۱۸؛ Eaton, 1950)، شاخص نفوذپذیری (رابطه ۱۹؛ Doneen, 1964)، نسبت خطرات منیزیم (رابطه ۲۰؛ Szabolcs, 1964; Paliwal, 1972) و نسبت کلی (رابطه ۲۱؛ Kelley, 1963) هستند.

رابطه ۱۶)
$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

رابطه ۱۷)
$$\text{Na\%} = \left(\frac{\text{Na}^+ + \text{K}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+}\right) \times 100$$

ویراستاری نشده

$$RSC = (HCO_3^- + CO_3^{2-}) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$ رابطه ۱۸)

$$PI = \left(\frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+}\right) \times 100$$ رابطه ۱۹)

$$MH = \left(\frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}\right) \times 100$$ رابطه ۲۰)

$$KR = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$ رابطه ۲۱)

همچنین، برای ارزیابی جامع‌تر و دقیق‌تر، نتایج در قالب نمودارهای استاندارد (مانند نمودار SAR در برابر EC یا دیاگرام آزمایشگاه شوری آمریکا) برای تعیین دقیق کلاس کیفی آب کشاورزی رسم و طبقه‌بندی گردیدند (USSL, 1954; Wilcox, 1955).

تحلیل‌های هیدروژئوشیمیایی و آماری چندمتغیره

برای ارزیابی تکامل شیمیایی آبخوان، رخساره‌های غالب هیدروژئوشیمیایی با دیاگرام سه‌خطی پایپر شناسایی شدند (Piper, 1944). منشأ و مکانیسم‌های حاکم بر ترکیب یونی (تفکیک سه دسته اصلی کنترل‌کننده شیمی آب: تبخیر-تبلور، برهم‌کنش آب-سنگ و نزولات جوی) با استفاده از دیاگرام‌های دوگانه گیبس شامل رابطه لگاریتم TDS با نسبت‌های وزنی $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ و $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ در محیط برنامه‌نویسی پایتون تعیین گردید (Gibbs, 1970).

جهت واکاوی روابط خطی پارامترها و ردیابی آلاینده‌ها، ماتریس همبستگی پیرسون ترسیم شد (Rezaei et al., 2021). به منظور همگن‌سازی مقیاس متغیرها، پیش‌پردازش استانداردسازی داده‌ها (Z-score) با تابع StandardScaler انجام گرفت (Güler et al., 2002). در نهایت، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تحت چرخش واریماکس جهت تفکیک سهم عوامل طبیعی (زمین‌زاد) از اثرات کشاورزی و انسانی پیاده‌سازی شد و تعداد فاکتورهای معنادار بر پایه نمودار اسکری (Scree plot) و معیار کایزر (مقادیر ویژه بزرگ‌تر از ۱) انتخاب گردیدند (Güler et al., 2002).

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و توزیع آماری پارامترهای کیفیت آب

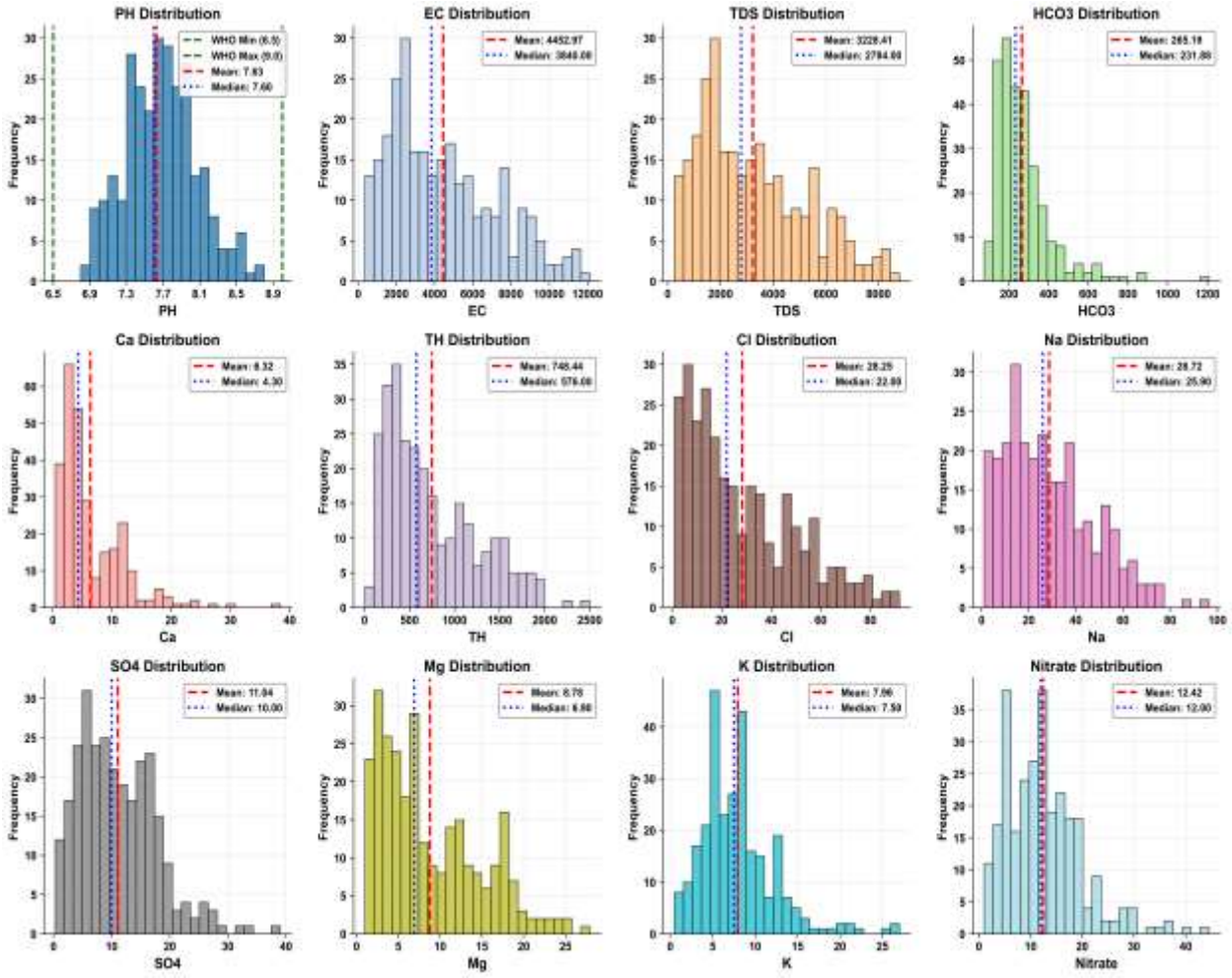
آگاهی از توزیع آماری پارامترهای فیزیکو شیمیایی، گام نخست در درک رفتار هیدروژئو شیمیایی سیستم‌های آب زیرزمینی است. نمودارهای توزیع فراوانی (هیستوگرام) پارامترهای اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است.

میانگین pH آب زیرزمینی در منطقه برابر با ۷٫۶۳ (با میانه ۷٫۶۰) است که نشان‌دهنده ماهیت کمی قلیایی آبخوان بوده و در محدوده مجاز استانداردهای شرب (۶٫۵ تا ۹٫۰) قرار دارد. با این حال، بررسی شاخص‌های شوری شامل هدایت الکتریکی (EC) و کل جامدات محلول (TDS) نشان‌دهنده تغییرات فضایی بسیار شدید در سطح آبخوان است. میانگین EC برابر با ۴۴۵۲٫۹۷ ($\frac{\mu S}{cm}$) و میانگین TDS برابر با ۳۲۲۸٫۴۱ (mg/L) به دست آمد که ارقام بالایی محسوب می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۲ مشهود است، توزیع اکثر پارامترها به‌ویژه EC و TDS دارای چولگی مثبت (Positive Skewness) و نقاط دورافتاده ای با غلظت‌های بالا هستند. این الگو نشان می‌دهد که اگرچه بخش عمده‌ای از نمونه‌ها دارای شوری متوسطی هستند، اما در مناطق خاصی از آبخوان به دلیل تاثیرات شدید تبخیر (ناشی از اقلیم خشک منطقه) یا انحلال سازندهای زمین‌شناسی حاوی کانی‌های تبخیری، شوری به شدت افزایش یافته است.

مقادیر بسیار بالای میانگین هدایت الکتریکی(µS/cm ۴۴۵۲٫۹۷) و کل جامدات محلول(mg/L ۳۲۲۸٫۴۱)، نشان‌دهنده شوری بحرانی و کانی‌زایی شدید (Hyper-mineralization) در بخش‌های وسیعی از آبخوان‌های منطقه است. تکامل هیدروژئو شیمیایی و تمرکز غیرعادی این املاح تحت تأثیر هم‌افزایی دو پدیده پیوسته صورت می‌پذیرد: نخست، انحلال کانی‌های تبخیری بستر (Evaporite Dissolution)؛ وجود سازندهای تبخیری حاوی هالیت(NaCl) و ژیپس/انیدریت ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) در حوضه، موجب

ویرایشی نشده

آزادسازی شدید یون‌ها در فاز اولیه تماس آب و سنگ شده که همبستگی خطی بسیار بالای TDS و EC با یون‌های سدیم(r=۰,۹۶)، کلرید (r=۰,۹۷) و سولفات (r=۰,۸۵) مؤید آن ا ست. دوم، فرآیند تغلیظ تبخیری شدید(Evaporative Enrichment)؛ در اقلیم خ شک منطقه با پتانسیل تبخیر سالانه بیش از ۲۵۰۰ میلی‌متر، تبخیر و مکش مویینگی موجب خروج آب خالص و تمرکز پیشرونده املاح در آبخوان می‌گردد .این فرآیند تبخیر–تبلور با خارج کردن کلسیم و منیزیم در قالب رسوب کانی‌های کربناته، غلظت یون‌های بسیار محلول(Na^+ و Cl^-) را در فاز مایع افزایش داده و چرایی غلبه مطلق رخساره تکامل‌یافته Na-K-Cl (۷۹,۳ در صد نمونه‌ها) و قرارگیری عمده نمونه‌ها در پهنه تسلط تبخیر دیاگرام گیبس را اثبات می‌نماید.



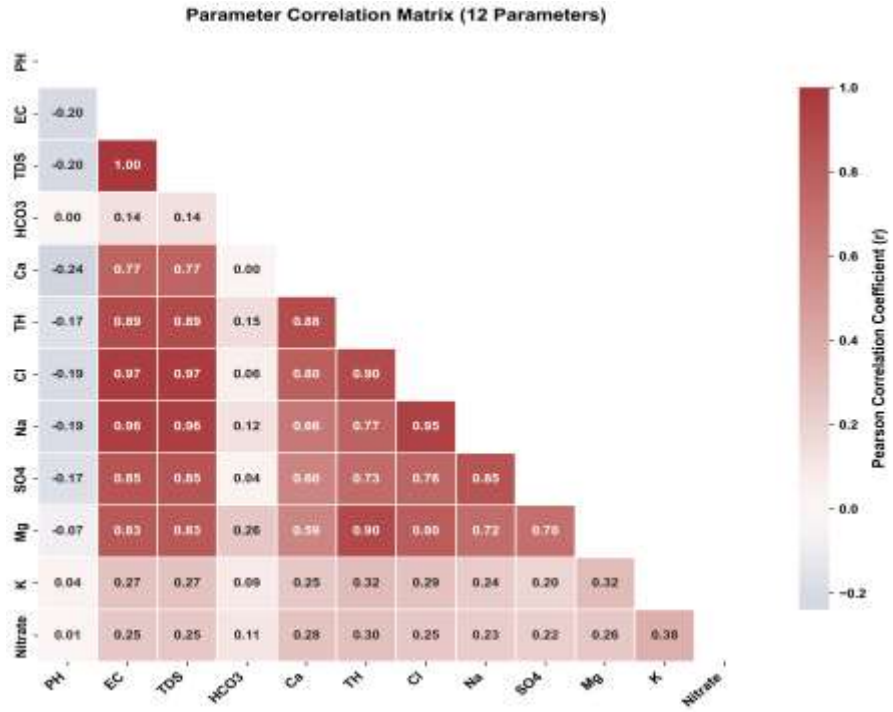
شکل ۲. توزیع پارامترهای کیفی آب در نمونه‌ها

در میان کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی، میانگین غلظت سدیم (Na^+) برابر با ۲۸,۷۲، کلرید (Cl^-) برابر با ۲۸,۲۵، کلسیم (Ca^{2+}) برابر با ۶,۳۲، منیزیم (Mg^{2+}) برابر با ۸,۷۸، پتاسیم (K^+) برابر با ۷,۹۶، سولفات (SO_4^{2-}) برابر با ۱۱,۰۴ (meq/L) و بی‌کربنات (HCO_3^-) برابر با ۲۶۵,۱۹ (mg/L) می‌با شد. همچنین میانگین سختی کل (TH) برابر با ۷۴۸,۴۴ (mg/L) بر ح سب $CaCO_3$ اندازه‌گیری شده ا ست. وجود نقاط دورافتاده با غلظت ب سیار بالا برای Na^+ و Cl^- تاییدی بر نقش غالب فرآیندهای هالوژنز (Halogenesis) و تبخیر در تکامل شیمیایی آب زیرزمینی این منطقه است. از سوی دیگر، توزیع نیترات (NO_3^-) با میانگین ۱۲,۴۲ و میانه ۱۲,۰۰ میلی‌گرم بر لیتر

به عنوان یک شاخص آلایندگی انسان‌زاد، حاکی از نفوذ موضعی پساب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های شهری به بخش‌هایی از آبخوان است.

روابط متقابل پارامترها و منشأ یون‌ها (تحلیل ماتریس همبستگی)

ماتریس همبستگی پیرسون ابزاری کارآمد برای شناسایی روابط خطی بین پارامترهای هیدروشیمیایی و درک فرآیندهای ژئوشیمیایی کنترل‌کننده کیفیت آب است. مقادیر ضریب همبستگی (r) محاسبه شده برای ۱۲ پارامتر شیمیایی اصلی در قالب نقشه حرارتی (Heatmap) در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳. نقشه حرارتی همبستگی پارامترهای کیفیت آب

بر اساس نتایج به دست آمده، هدایت الکتریکی (EC) و کل جامدات محلول (TDS) همبستگی مثبت بسیار قوی و کامل ($r = 1.00$)با یکدیگر داشته و همچنین همبستگی فوق‌العاده بالایی با یون‌های کلرید($r = 0.97$) ، سدیم($r = 0.96$) ، سختی کل ($r = 0.89$)، سولفات($r = 0.85$) ، منیزیم ($r = 0.83$) و کلسیم ($r = 0.77$) نشان می‌دهند. این همبستگی قوی تایید می‌کند که شوری آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه عمدتاً تحت کنترل انحلال کانی های تبخیری (مانند هالیت NaCl و ژیپس $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) و همچنین اثرات تمرکز ناشی از تبخیر شدید در اقلیم خشک منطقه است.

کاتیون‌های کلسیم (Ca^{2+}) و منیزیم (Mg^{2+}) نیز همبستگی معنی‌داری با یکدیگر ($r = 0.59$) و همچنین با سختی کل (TH)به ترتیب $r = 0.88$ و $r = 0.90$ دارند. علاوه بر این، همبستگی بالایی بین این کاتیون‌ها با آنیون‌های سولفات و کلرید (بین $r = 0.60$ تا $r = 0.80$) دیده می شود که نشان‌دهنده هوازدگی توامان کانی‌های کربناته (دولومیت و کلسیت) و کانی‌های تبخیری-سیلیکاتی در آبخوان می‌باشد. در این میان، یون بی‌کربنات (HCO_3^-) همبستگی ضعیفی با اکثر پارامترها (بین $r = 0.00$ تا $r = 0.26$) نشان می‌دهد که بیانگر اثرپذیری کمتر آن از فرآیندهای انحلال شدید و شوری است.

پذیرفته شده

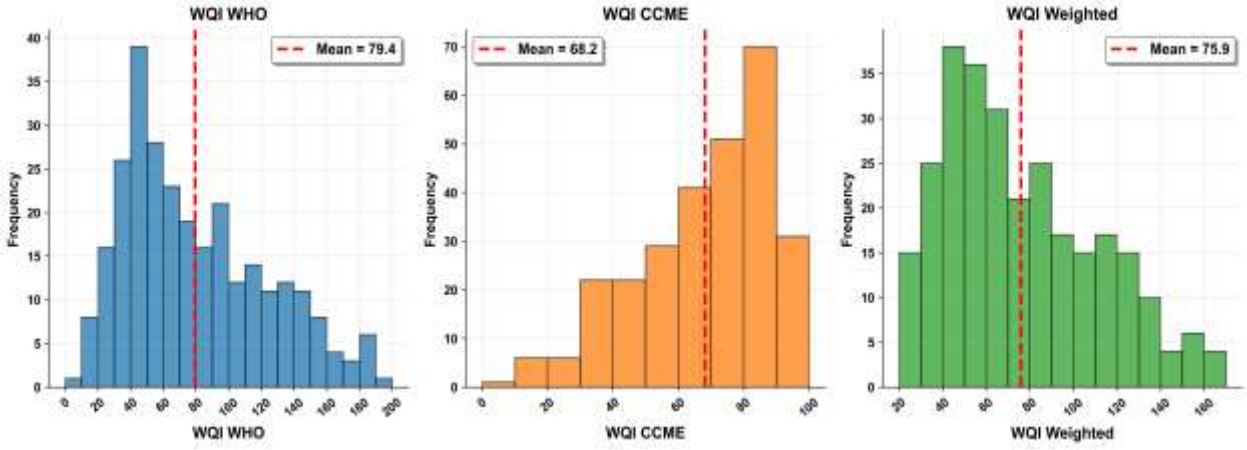
در مقابل، بررسی رفتار هیدروشیمیایی نیترات (NO_3^-) نشان می‌دهد که این یون همبستگی ضعیفی (بین $r = 0.11$ تا $r = 0.38$) با سایر پارامترهای اصلی دارد (بیشترین همبستگی آن با پتاسیم $r = 0.38$ و $r = 0.30$ TH است). عدم وجود همبستگی قوی بین نیترات و یون‌های اصلی با منشأ زمین‌شناختی (Geogenic)، اثبات می‌کند که ورود نیترات به آبخوان منشأ طبیعی نداشته و عمدتاً تحت تاثیر فعالیت‌های انسان‌زاد (Anthropogenic) است. این امر نشان‌دهنده نشت کودهای نیتروژنه از اراضی کشاورزی و نفوذ فاضلاب‌های خانگی به سفره آب زیرزمینی می‌باشد. همچنین، پارامتر اسیدیته (pH) تنها متغیری است که با اکثر پارامترهای مورد بررسی همبستگی منفی ضعیف تا متوسطی (بین $r = -0.07$ تا $r = -0.24$) نشان می‌دهد (به استثنای همبستگی تقریباً صفر با HCO_3^- و نیترات). این روند منفی بیانگر کاهش جزئی pH (افزایش نسبی اسیدیته) به موازات افزایش غلظت املاح است.

ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی با استفاده از شاخص‌های WQI

برای ارزیابی جامع کیفیت آب زیرزمینی منطقه از نظر قابلیت مصرف شرب، سه شاخص معتبر جهانی یعنی WHO-WQI، CCME-WQI و Weighted Arithmetic WQIمورد محاسبه قرار گرفتند. نتایج این ارزیابی‌ها که با استفاده از ۲۷۹ نمونه جمع‌آوری شده در شکل ۴) تحلیل توزیع شاخص‌های (WQI ارائه شده‌اند، تصویری دقیق از وضعیت کیفیت آب در منطقه به دست می‌دهند.

شاخص WHO-WQI میانگین کلی کیفیت آب شرب در منطقه برابر با ۷۹,۴ نشان داد. بر اساس طبقه‌بندی پنج‌گانه استاندارد کیفیت آب($n = 279$) ، بیش از ۷۰٪ از نمونه‌های آبی منطقه در رده‌های کیفی قابل قبول (عالی و خوب) قرار دارند. با این حال، دامنه تغییرات وسیع و وجود نمونه‌هایی با شاخص بالای ۱۰۰ تا ۲۰۰، نشان‌دهنده عدم یکنواختی فضایی و افت شدید کیفیت آب در برخی نقاط خاص است.

شاخص CCME-WQI که ارزیابی کیفیت آب با استفاده از مدل شورای وزرای محیط‌زیست کانادا است، میانگین ۶۸,۲ را نشان می‌دهد. در این مدل، ارزش‌های بالاتر نشان‌دهنده کیفیت بهتر آب هستند و قرارگیری بخش عمده نمونه‌ها در بازه‌های ۶۰ تا ۹۰ (به طوری که بیشترین فراوانی نمونه‌ها در محدوده ۸۰ تا ۹۰ قرار دارد) بیانگر وضعیت نسبتاً مناسب و متوسط تا خوب آبخوان بر اساس این شاخص است.



شکل ۴. مقایسه توزیع شاخص کیفیت آب با روش‌های WHO ، CCME و Weighted

شاخص حسابی وزن‌دار (Weighted Arithmetic WQI) میانگین ۷۵,۹ را ارائه می‌دهد. توزیع این شاخص نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌ها در محدوده ۳۰ تا ۷۰ متمرکز شده‌اند، اما وجود نقاطی با شاخص‌های بالاتر از ۱۰۰ تا ۱۷۰ حاکی از اثرگذاری شدید برخی پارامترها در نقاط خاص آبخوان است. خلاصه نتایج آماری، مقادیر میانگین و مقایسه تطبیقی درصدهای طبقه‌بندی کیفی آبخوان بر اساس این سه مدل در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. خلاصه آماری و مقایسه شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی منطقه

شاخص کیفی	میانگین(Mean)	کیفیت مطلوب (عالی / خوب)	کیفیت نامطلوب / نیازمند پایش
WHO-WQI	۷۹٫۴	۷۰٫۶٪	۲۹٫۴٪
CCME-WQI	۶۸٫۲	۶۳٫۴٪	۳۶٫۶٪
Weighted Arithmetic WQI	۷۵٫۹	۷۴٫۶٪	۲۵٫۴٪

همان‌طور که در جدول ۲ ملاحظه می شود، مقایسه تطبیقی سه شاخص نشان می‌دهد که مدل CCME-WQI با اختصاص ۳۶٫۶ درصد از نمونه‌ها به رده نامطلوب و نیازمند پایش، سخت‌گیرانه‌ترین رویکرد را در ارزیابی آبخوان اتخاذ کرده ا ست؛ در حالی که مدل‌های WHO-WQI و Weighted Arithmetic WQI به ترتیب ۷۰٫۶ درصد و ۷۴٫۶ درصد از منابع را در وضعیت مطلوب طبقه‌بندی نموده‌اند. دلیل سخت‌گیری بی شتر CCME، ساختار سه‌بعدی آن بر پایه متغیرهای دامنه (F_1)، تکرار (F_2) و شدت (F_3) تخطی از ا ستانداردها ست. در منطقه مورد مطالعه که فرآیندهای انحلال تبخیری و فعالیت‌های ک شاورزی موجب عبور هم‌زمان چند پارامتر نظیر شوری و نیترات از حد مجاز می‌شوند، نمره شاخص CCME به دلیل حساسیت بالا به تخطی‌های چندگانه افت محسوسی پیدا می‌کند. در مقابل، مدل‌های WHO و Weighted Arithmetic مبتنی بر تجمیع و میانگین‌گیری وزنی خطی هستند. اگرچه در مدل حسابی وزن هر پارامتر بر پایه عکس حد مجاز آن تعیین می‌شود، اما اثر تعدیل‌کنندگی ماتریس کل املاح در فرمولاسیون خطی باعث می شود انحرافات تک‌پارامتری تا حدی تلطیف شده و این شاخص‌ها درصد مطلوبیت بالاتری را نسبت به CCME ثبت نمایند. تفاوت در نتایج این مدل‌ها ضرورت به‌کارگیری هم‌زمان رویکردهای وزنی و چندبُعدی را در پایش جامع کیفی آبخوان نشان می‌دهد.

در پاسخ به مسئله تعمیم‌پذیری یافته‌ها به سایر حوضه‌ها با اقلیم مشابه، شایان ذکر است که رفتار محافظه‌کارانه و سخت‌گیرانه‌تر شاخص CCME در مقایسه با مدل‌های مبتنی بر میانگین‌گیری وزنی، یک ویژگی ساختاری وابسته به فرمولا سیون ریا ضی این مدل‌ها ا ست .در پهنه‌های خ شک و نیمه‌خ شک که با تبخیر شدید و غلظت بالای املاح محلول (TDS) و (EC مواجه ه ستند، بروز تخطی‌های هم‌زمان چند پارامتر از حد مجاز یک پدیده متداول هیدروژئو شیمیایی ا ست .از آنجا که ساختار CCME بر پایه سه بعد دامنه تخطی(F_1) ، بسامد تکرار (F_2) و دامنه انحراف از ا ستاندارد (F_3) پی‌ریزی شده، حسا سیت بسیار بالایی نسبت به انحرافات چندگانه نشان داده و کیفیت را به طور محسوسی تنزل می‌دهد .در حالی که در مدل‌های حسابی وزنی نظیرWHO-WQI ، به دلیل فرآیند میانگین‌گیری خطی، اثر غلظت‌های بحرانی تا حدی در کل ماتریس داده‌ها پوشش داده شده و رتبه کیفیت تعدیل می‌گردد .از این رو، این الگو و تمایز در رتبه‌بندی شاخص‌ها برای سایر آبخوان‌های واقع در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک با رخساره‌های تبخیری مشابه کاملاً قابل تعمیم است.

شکل ۵ نمایانگر موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری و توزیع فضایی کیفیت آب در منطقه مطالعاتی است. نقشه سمت چپ (Sampling Locations) بیانگر پراکندگی نقاط نمونه‌برداری در امتداد سه بخش اصلی شامل نوار غربی، بخش مرکزی و تمرکز گسترده نمونه‌ها در بخش شرقی استان است.

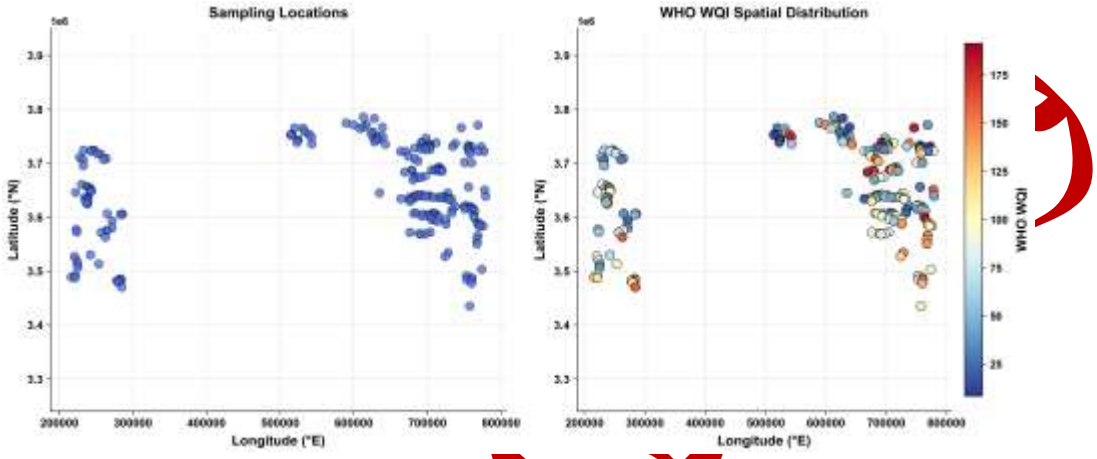
با م شاهده نق شه سمت را ست (WHO WQI Spatial Distribution)، روند مکانی تغییرات کیفیت آب بر ا ساس طیف رنگی شاخص (WQI از رنگ آبی تیره برای مقادیرکمتر از ۲۵ تا قرمز تیره برای مقادیر بیشتر از ۱۷۵) به شرح زیر تحلیل می شود:

- مناطق با کیفیت عالی و خوب (رنگ‌های آبی تیره، آبی روشن و زرد کمرنگ): بخش‌های عمده‌ای از منطقه، به‌ویژه در نواحی شمالی و شمال شرقی، دارای مقادیر WQI پایین (کمتر از ۷۵) ه ستند. این امر پتا نسیل بالای این بخش‌ها را برای تأمین آب شرب پایدار و باکیفیت نشان می‌دهد.
- مناطق با کیفیت ضعیف تا غیرقابل شرب (رنگ‌های نارنجی و قرمز تیره): مقادیر بالای شاخص WQI (بین ۱۲۵ تا بیش از ۱۷۵) عمدتاً در دو پهنه جغرافیایی متمرکز شده‌اند :نخست در بخش جنوب‌شرقی استان و دوم در بخش جنوب‌غربی (امتداد پایینی نوار غربی) .این در حالی است که مناطق شمالی، شمال‌شرقی و مرکزی از وضعیت کیفی به مراتب مطلوب‌تری برخوردارند. این نقاط

ویرایشی نشده

آلوده و بحرانی احتمالاً ناشی از فعالیت‌های کشاورزی فشرده (نفوذ کودهای شیمیایی و پساب آبیاری) یا نزدیک بودن به منابع آلودگی نقطه‌ای (نظیر تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی) می‌باشند.

در مجموع، بررسی نقشه توزیع مکانی نشان می‌دهد که اگرچه بخش وسیعی از سفره آب زیرزمینی منطقه از وضعیت کیفی قابل قبولی برخوردار است، اما وجود کانون‌های آلودگی در بخش‌های جنوب‌شرقی و غربی، لزوم اعمال مدیریت حوزه‌ای و پایش مستمر منابع آب در این نواحی را ایجاب می‌کند.



شکل ۵. توزیع مکانی ایستگاه‌های نمونه‌برداری و پهنه‌بندی شاخص کیفیت آب

ارزیابی کیفیت آب برای مصارف کشاورزی و آبیاری

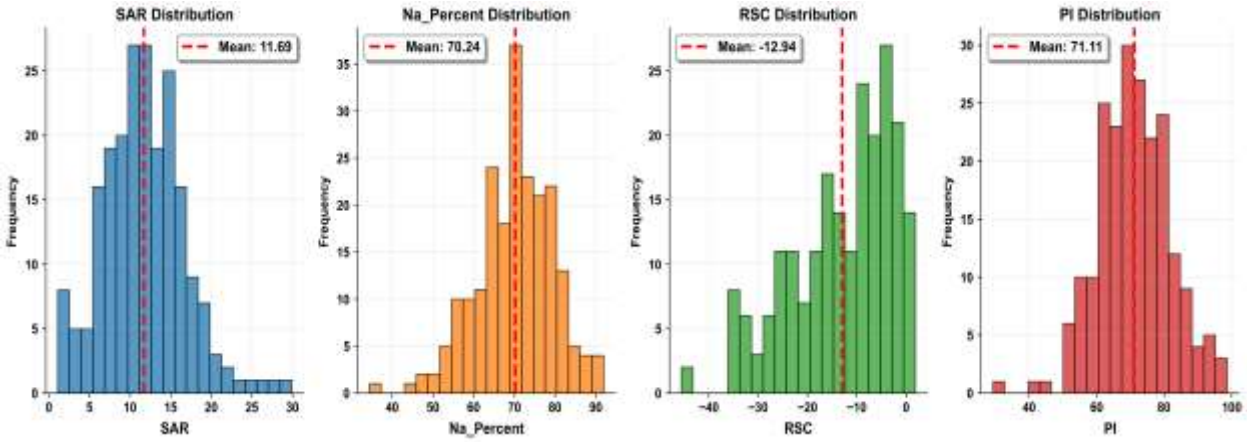
کیفیت آب آبیاری تأثیر مستقیمی بر ساختمان خاک، نفوذپذیری و در نهایت عملکرد محصولات کشاورزی دارد. برای ارزیابی صلاحیت آب زیرزمینی منطقه جهت استفاده در کشاورزی، شاخص‌های کلیدی متعددی از جمله نسبت جذب سدیم (SAR)، درصد سدیم (Na٪)، کربنات سدیم باقیمانده (RSC) و شاخص نفوذپذیری (PI) محاسبه و مورد بررسی قرار گرفتند. توزیع و وضعیت این شاخص‌ها در قالب شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. شاخص SAR (نسبت جذب سدیم) که بیانگر خطر قلیائیت و جایگزینی سدیم در خاک است، یکی از مهم‌ترین پارامترها برای تعیین کیفیت آب آبیاری محسوب می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میانگین شاخص SAR در منطقه مورد مطالعه برابر با ۱۱٫۶۹ محاسبه گردید (با دامنه عمده داده‌ها بین ۵ تا ۱۸). بررسی سایر شاخص‌های کشاورزی در نمودارها نشان‌دهنده ویژگی‌ها و محدودیت‌های کیفی زیر در آبخوان منطقه است:

درصد سدیم(Na%) : میانگین این شاخص برابر با ۷۰٫۲۴ درصد است (با بیشترین تجمع فراوانی در محدوده ۶۰ تا ۸۵ درصد). مقادیر بالای درصد سدیم نشان می‌دهد که سدیم بخش عمده‌ای از کاتیون‌های آب را تشکیل می‌دهد و در صورت عدم مدیریت مناسب آبیاری، می‌تواند باعث افت تهویه و تخریب ساختار خاک شود.

کربنات سدیم باقیمانده(RSC) : میانگین این شاخص برابر با ۱۲٫۹۴- محاسبه گردید. منفی بودن این شاخص (برتری غلظت کلسیم و منیزیم نسبت به کربنات و بی‌کربنات) نشان می‌دهد که خطر رسوب‌گذاری کربنات سدیم و افزایش قلیائیت ناشی از این شاخص وجود ندارد و آب از نظر خطرات RSC در وضعیت ایمن قرار دارد.

شاخص نفوذپذیری(PI) : میانگین شاخص نفوذپذیری در منطقه برابر با ۷۱٫۱۱ به دست آمد (با تمرکز اکثر نمونه‌ها در بازه ۶۰ تا ۸۵). این مقادیر نشان‌دهنده وضعیت مناسب و مطلوب جریان و نفوذپذیری آب در خاک است.

در مجموع، با وجود مناسب بودن شاخص‌های RSC و PI، مقادیر بالای درصد سدیم و نرخ میانگین SAR زنگ خطری برای افت کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک در درازمدت به شمار می‌روند. استفاده مستمر از این آب‌ها نیازمند مدیریت اصولی آبیاری، پایش مستمر خاک و در صورت نیاز، استفاده از اصلاح‌کننده‌هایی نظیر گچ کشاورزی برای تعدیل اثرات سدیم است.

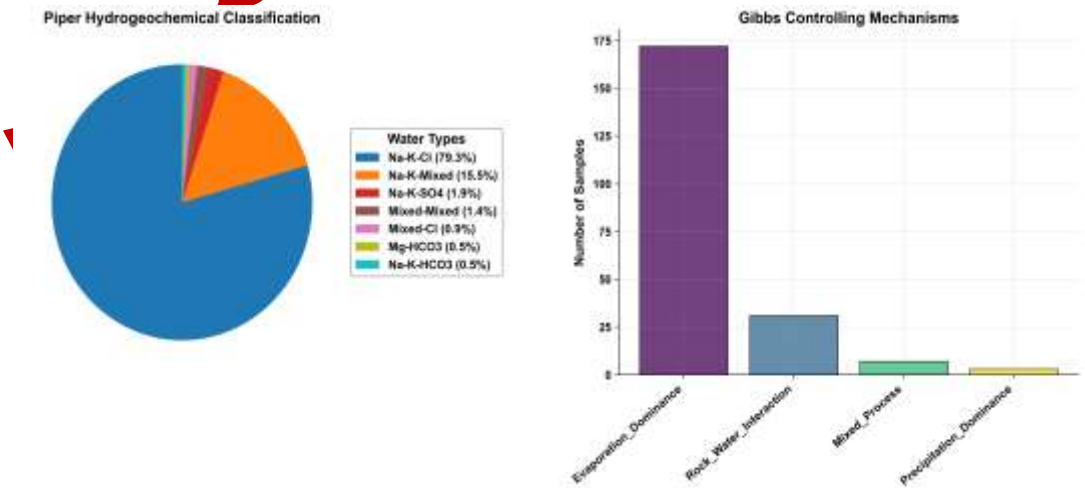


شکل ۶. تحلیل شاخص‌های کیفیت آب برای مصارف کشاورزی

در پایان میانگین شاخص MH (Magnesium Hazard) در آبخوان منطقه برابر با ۵۸,۷۴ در صد محا سبه گردید (با دامنه‌ای بین ۲۲,۸۸ تا ۹۲,۱۶ درصد). از آنجا که مقادیر MH بزرگتر از ۵۰ درصد نشان‌دهنده خطر تخریب ساختمان خاک و کاهش نفوذپذیری به دلیل برتری یون منیزیم نسبت به کلسیم است، قرارگیری حدود ۷۴ در صد از نمونه‌ها در محدوده بالاتر از ۵۰ در صد، بیانگر لزوم توجه به اثرات ناشی از آن بر خاک‌های تحت آبیاری است. میانگین شاخص نسبت کلی (Kelly's Ratio – KR) برابر با ۲,۲۱ به دست آمد. بر اساس این شاخص، مقادیر کمتر از ۱ نشان‌دهنده وضعیت مناسب و ایمن آب برای آبیاری است (حدود ۱۶ درصد نمونه‌ها)، در حالی که مقادیر بزرگتر از ۱ (حدود ۸۴ در صد نمونه‌ها) بیانگر غلبه یون سدیم نسبت به کلسیم و منیزیم بوده و بر لزوم اتخاذ تدابیر مدیریتی جهت جلوگیری از سدیمی شدن خاک تأکید دارد.

تحلیل هیدروژئوشیمیایی و تکامل شیمیایی آبخوان

برای درک بهتر فرآیندهای حاکم بر تکامل شیمیایی آبخوان و تعیین تیپ آب، طبقه‌بندی هیدروژئوشیمیایی و مکانیسم‌های کنترل‌کننده مورد ارزیابی قرار گرفتند (شکل ۷). بر اساس نمودار دایره‌ای پایپر، رخساره غالب هیدروژئوشیمیایی در منطقه Na-K-Cl است که به تنهایی ۷۹,۳ در صد از کل نمونه‌ها را به خود اختصاص داده است. پس از آن، رخساره Na-K-Mixed با ۱۵,۵ در صد در رتبه دوم قرار دارد. سایر رخساره‌ها شامل Na-K-SO4 با ۱,۹ در صد، Mixed-Mixed با ۱,۴ در صد، Mixed-Cl با ۰,۹ در صد، Mg-HCO3 با ۰,۵ درصد و رخساره Na-K-HCO3 با ۰,۵ درصد سهم ناچیزی از نمونه‌ها را نشان می‌دهند.

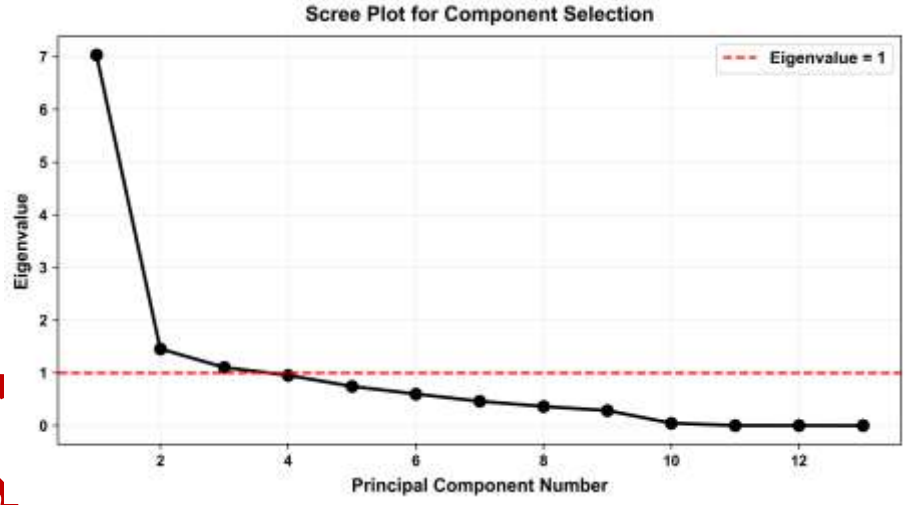


شکل ۷. نمودار میله‌ای مکانیسم‌های کنترل‌کننده گیبس (سمت راست) و نمودار دایره‌ای طبقه‌بندی هیدروژئوشیمیایی پایپر (سمت چپ)

غلبه یون‌های سدیم–پتاسیم و کلر معمولاً نشان‌دهنده تکامل بیشتر آب‌های زیرزمینی در مسیر حرکت خود، تأثیر پدیده‌های تبخیر و شوری‌زایی یا انحلال سازندهای تبخیری در آبخوان است. این تسلط رخساره کلریدی– سدیمی و حاکمیت تبخیر با نتایج مطالعات پیشین در دشت بیرجند و استان خراسان جنوبی (Rezaei et al., 2021; Kazemi et al., 2022) همخوانی و انطباق کامل دارد.برای شناسایی مکانیسم‌های اصلی کنترل‌کننده شیمی آب، از دیاگرام گیبس استفاده شد که نتایج آن در قالب نمودار میله‌ای (شکل ۷) ارائه شده است. نتایج به وضوح نشان می‌دهد که بیشترین تعداد نمونه‌ها (۱۷۲ نمونه) تحت تسلط فرآیند تبخیر–تبلور (Evaporation Dominance) قرار دارند. پس از آن، برهم‌کنش آب–سنگ (Rock-Water Interaction) با دربرگرفتن 31نمونه، دومین عامل مهم است. بخش کوچکی از نمونه‌ها نیز تحت تأثیر فرآیندهای ترکیبی (Mixed Process با ۷ نمونه) و تسلط نزولات جوی (Precipitation Dominance با ۳ نمونه) قرار گرفته‌اند. غلبه چشمگیر فرآیند تبخیر کاملاً با اقلیم خشک و نیمه‌خشک منطقه، نرخ بالای تبخیر سطحی و تمرکز املاح در آبخوان همخوانی دارد.

شناسایی منابع آلاینده با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

به منظور شناسایی و تفکیک منابع طبیعی (زمین‌زاد) و انسان‌زاد، به‌ویژه فعالیت‌های کشاورزی، مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با استفاده از چرخش واریماکس (Varimax Rotation) بر روی داده‌ها اعمال گردید. برای تعیین تعداد مؤلفه‌های اصلی، از معیار مقدار ویژه و نمودار اسکری (شکل ۸) استفاده شد. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود، مقدار ویژه مؤلفه اول بیش از ۷ بوده و مؤلفه‌های دوم و سوم نیز دارای مقادیر ویژه بالاتر از آستانه ۱ هستند (مؤلفه چهارم کمی پایین‌تر از آستانه ۱ قرار دارد). از مؤلفه چهارم به بعد، مقادیر ویژه به کمتر از ۱ کاهش می‌یابند. بنابراین، بر اساس معیار مقدار ویژه، سه مؤلفه اولیه قابلیت بررسی دارند.



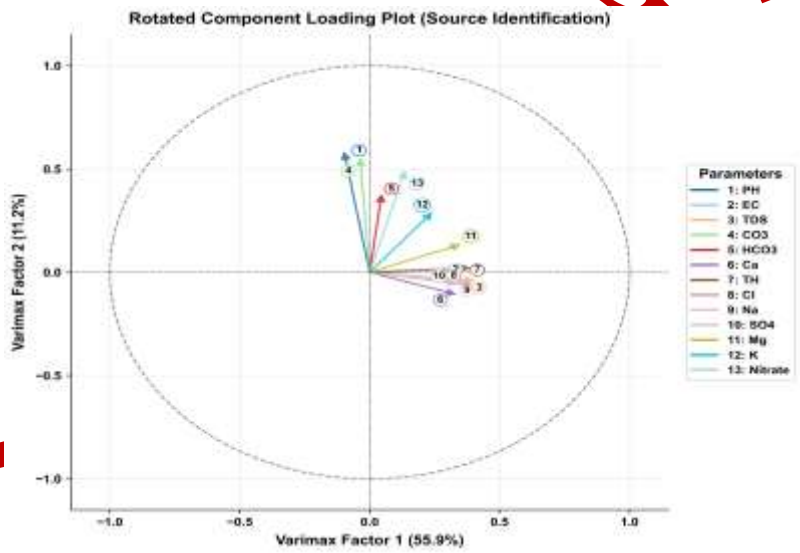
شکل ۸. نمودار اسکری (Scree Plot) برای تعیین و انتخاب مؤلفه‌های اصلی معنادار بر اساس آستانه مقدار ویژه(Eigenvalue = 1)

با توجه به هدف پژوهش و به‌منظور شناسایی دقیق و تفسیر هیدروژئوشیمیایی فرآیندهای حاکم بر کیفیت آب، ماتریس همبستگی داده‌ها پس از چرخش واریماکس واکاوی شد که طی آن دو فاکتور اصلی در مجموع ۶۷,۱ درصد از واریانس کل داده‌ها را تبیین نمودند (شکل ۹).

فاکتور اول (VF1– عامل شوری و فرآیندهای زمین‌زاد): این مؤلفه با تبیین ۵۵,۹ درصد از واریانس کل، بیشترین سهم را در کنترل ترکیب یونی آبخوان دارد. این فاکتور دارای بارهای عاملی مثبت و بسیار قوی برای متغیرهای هدایت الکتریکی (EC)، املاح محلول (TDS)، سختی کل (TH)، کلرید (Cl^-)، سدیم (Na^+)، سولفات (SO_4^{2-})، کلسیم (Ca^{2+}) و منیزیم (Mg^{2+}) است. تمرکز

هم‌زمان این یون‌ها در جهت مثبت این فاکتور، حاکمیت مطلق فرآیندهای زمین‌زاد (Geogenic) در آبخوان را اثبات می‌کند. همبستگی شدید Na^+ و Cl^- همراه با مقادیر بالای TDS، نشان‌دهنده انحلال کانی‌های تبخیری به‌ویژه هالیت و وقوع فرآیند شدید تبخیر–تبلور در محیط آبخوان است که به تغلیظ مداوم نمک‌ها در آب زیرزمینی می‌انجامد. افزون بر این، بارگذاری بالای Ca^{2+} و SO_4^{2-} نقش انحلال تشکیلات گچی و انیدریتی بستر و همچنین رخداد تبادل کاتیونی معکوس در رسوبات را آشکار می‌سازد. بنابراین، فاکتور اول بیانگر تکامل طبیعی هیدروژئوشیمی و شورشدگی آبخوان در اثر ویژگی‌های سنگ‌شناسی تبخیری و شرایط اقلیم خشک منطقه است.

فاکتور دوم (VF2– عامل بارگذاری انسان‌زاد و فعالیت‌های کشاورزی): این فاکتور ۱۱٫۲ درصد از واریانس کل را به خود اختصاص داده و با بارگذاری مثبت و معنی‌دار نیترات (NO_3^-) و پتاسیم (K^+) متمایز گردیده است. تفکیک کامل نیترات از فاکتور اول شوری نشان می‌دهد که حضور این آلاینده ناشی از فرآیندهای کانی‌شناسی بستر نبوده، بلکه منشأیی کاملاً بیرونی و انسان‌زاد دارد. هم‌جهتی بارگذاری NO_3^- و K^+ به‌وضوح نشان‌دهنده نفوذ زهاب‌های کشاورزی، مصرف نامتعادل کودهای شیمیایی نیتروژنه و پتاسه و نفوذ پساب‌های بهداشتی سکونتگاه‌های روستایی مجاور چاه‌ها است. همچنین همبستگی جزئی پارامترهای بی‌کربنات (HCO_3^-) و pH با این مؤلفه، بازتابی از واکنش‌های بیوشیمیایی نیتریفیکاسیون و ترشح اسیدهای آلی در خاک‌های تحت کشت است. بدین ترتیب، فاکتور دوم اثر انگشت فعالیت‌های بشر بر منابع آب زیرزمینی را از فرآیندهای زمین‌زاد تفکیک می‌نماید.



شکل ۹. نمودار بارگذاری مؤلفه‌های چرخش‌یافته (Rotated Component Loading Plot) برای تفسیر و تفکیک منابع مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی.

در مجموع، نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد که تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه عمدتاً تحت تأثیر دو گروه فرآیند قرار دارد: فرآیندهای زمین‌زاد و مرتبط با شوری که بخش عمده تغییرات شیمیایی آب را کنترل می‌کنند، و فرآیندهای انسان‌زاد، به‌ویژه فعالیت‌های کشاورزی که در افزایش برخی ترکیبات از جمله نیترات نقش دارند.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که فرآیند تبخیر–تبلور و انحلال کانی‌های تبخیری بستر، عوامل اصلی حاکم بر شیمی آبخوان بوده و منجر به شکل‌گیری رخساره غالب Na-K-Cl و افزایش شوری در منطقه شده‌اند. علاوه بر این، این یافته‌ها نشان داد که میانگین بسیار بالای هدایت الکتریکی و TDS در آبخوان، پیامد مستقیم اندرکنش توأم انحلال تشکیلات تبخیری دیرینه و تغلیظ موبینگی ناشی از تبخیر سالانه شدید است که آب زیرزمینی را به فاز تکامل‌یافته کلریدی–سدیمی سوق داده است. از این رو، هرچند

کیفیت آب برای شـــرب در بخش عمده‌ای از آبخوان (بیش از ۷۰ درصـــد نمونه‌ها) در محدوده مطلوب ارزیابی می‌شـــود، اما بروز کانون‌های بحرانی و افت کیفی در بخش‌های جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی استان، ضرورت تفکیک مدیریتی و پایش مستمر این نواحی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد.

در ارزیابی تناسب آب برای مصارف کشاورزی، نتایج آشکار ساخت که اتکای صِرف به شاخص سنتی نسبت جذب سدیم (SAR) برای تعیین کیفیت آب گمراه‌کننده است؛ زیرا به‌رغم آنکه وضعیت میانگین SAR در بازه قابل قبول قرار دارد، مقادیر بحرانی شاخص‌های مکمل نظیر شاخص خطر منیزیم (MH)، درصد سدیم (Na%) و نسبت کلی (KR) حاکی از وجود خطرات پنهان و جدی برای تخریب ساختمان فیزیکی خاک، کاهش نفوذپذیری و سدیمی‌شدن تدریجی اراضی زراعی در درازمدت است.

علاوه بر این، به‌کارگیری مدل‌سازی آماری چندمتغیره (PCA) امکان تفکیک دقیق منشأ آلاینده‌ها را فراهم آورد و اثبات کرد که کیفیت آبخوان تحت تأثیر دو عامل مجزا قرار دارد: نخست، عامل زمین‌زاد با سهم غالب در ایجاد شوری کلی آبخوان (تبیین ۵۵٫۹ درصد از واریانس کل) و دوم عامل انسان‌زاد (تبیین ۱۱٫۲ درصد از واریانس کل) که با افزایش غلظت نیترات و پتاسیم، ردپای مستقیم مصرف کودهای شیمیایی و نفوذ پساب‌های کشاورزی را در آبخوان نشان می‌دهد.

در نهایت، مقایســه تطبیقی شــاخص‌های کیفی آب اثبات کرد که اســتفاده انفرادی از یک شــاخص می‌تواند به نتایج نادقیق بیانجامد، چرا که مدل CCME ســخت‌گیرانه‌ترین (۳۶٫۶ درصــد نامطلوب) و مدل‌های WHO و حســابی وزن‌دار (Weighted WQI) رویکردی منعطف‌تر را ارائه دادند؛ ضمن آنکه پیاده‌سازی چارچوب محاسباتی در بستر پایتون جهت غربالگری مبتنی بر تعادل بار یونی (IBE)، خطاهای داده‌ای را به حداقل رسانده و دقت و اطمینان‌پذیری تحلیل‌های هیدروژئو شیمیایی را برای تصمیم‌گیری‌های کلان منابع آب به میزان چشمگیری ارتقا بخشید.

ویراستاری نشده

ملاحظات اخلاقی

حامی تأمین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خارجی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان به‌طور یکسان در این کار مشارکت داشته و مقاله را تأیید کردند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوریهای مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

در فرایند نگارش این مقاله، نویسندگان صرفاً از **Gemini** برای ویرایش زبانی و بهبود شفافیت متن استفاده کرده‌اند. نویسندگان متن و تمامی خروجی‌ها را تایید کرده و مسئولیت کامل محتوای نهایی را بر عهده می‌گیرند.

سپاسگزاری

نویسندگان از تمامی افراد و سازمان‌هایی که از این پژوهش حمایت کردند، قدردانی می‌نمایند.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید تمامی آن‌هاست.

تعارض منافع

بر اساس اظهار نویسندگان، هیچ‌گونه تعارض منافعی در رابطه با انتشار این مقاله وجود ندارد.

منابع

بیات، فاطمه و اسـدی، اسـماعیل. (۱۳۹۸). ارزیابی کیفیت منبع‌های آب زیرزمینی دشـت زنجان با اسـتفاده از روش‌های EWQI و TOPSIS. *علوم محیطی نوین*، ۱۷(۱)، ۴۱-۵۶.

پاشاخواه، پریسا، بابازاده، حسین، شاه‌محمدی کلالق، شهرام و سرائی تبریزی، مهدی. (۱۴۰۰). بررسی هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی دشت میاندوآب. *مهندسی منابع آب*، شماره پیاپی ۵۷، ۱–۱۸.

فاضل توسل، سجاد، احمدی، علی، صفری کمیل، مصطفی و دهقانی، رضا. (۱۳۹۸). بررسی تغییرات هیدروژئوشیمی آب زیرزمینی؛ مطالعه موردی: دشت همدان–بهار. *زمین‌شناسی محیط زیست*، ۱۳(۴۶)، ۳۳–۴۷.

References

Alameer, Z. S. A., Mohammed, A. A., Maliki, A. A. A., Gad, A., Aufaristama, M., & Ahmed, A. (2026). Hydrogeochemical Processes Controlling Groundwater Quality and Water-Use Constraints in Semi-Arid Central Iraq. Hydrology, 13(7), 175.

Alam, S. K., Li, P., Wang, D., Fida, M., & Elumalai, V. (2025). Sources and transformations of shallow groundwater nitrate in intensively irrigated agricultural lands of the Yinchuan plain, Northwest China. Journal of Environmental Sciences.

Aloui, S., Zghibi, A., Mazzoni, A., Abushaikha, A. S., & Elomri, A. (2025). Assessing groundwater quality and suitability in Qatar: Strategic insights for sustainable water management and environmental protection. Environmental and Sustainability Indicators, 25, 100582.

Amiri, V., Bhattacharya, P., & Nakhaei, M. (2021). The hydrogeochemical evaluation of groundwater resources and their suitability for agricultural and industrial uses in an arid area of Iran. Groundwater for Sustainable Development, 12, 100527.

APHA, AWWA, WEF. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). American Public Health Association, Washington, D.C.

Asadi, V., Shamaeian, G. H., & Raghibi, M. (2015). Hydrogeochemical assessment of underground water resources in Jajarm plain. Geography and Environmental Planning, 22(42), 111-132. (In Persian).

Awadh, S. M., Al-Mimar, H., & Yaseen, Z. M. (2021). Groundwater availability and water demand sustainability over the upper mega aquifers of Arabian Peninsula and west region of Iraq. Environment, Development and Sustainability, 23, 1–21.

Barzegar, R., & Asghari Moghaddam, A. (2017). Identification of hydrogeochemical processes and pollution sources of groundwater resources in the Marand plain, northwest of Iran. Environmental Earth Sciences, 76, 297.

Bayat, F., & Asadi, E. (2019). Evaluation of the quality of groundwater resources in Zanjan Plain using EWQI and TOPSIS methods. Environmental Sciences, 17(1), 41-56. (In Persian).

Benmerabet, N., Sedrati, N., & Djabri, L. (2025). Hydrogeochemical processes, water-rock interactions, and the suitability of groundwater in a semi-arid region, Northeastern Algeria. Water Supply, 25(3), 404–423.

Bokreta, A., Hamil, S., Baha, M., Pannard, A., & Piscart, C. (2026). Integrated Assessment of Reservoir Water Quality in Northwest Algeria Combining Chemical and Biological Indicators. Water, 18(9), 1022.

Boukich, O., Ben-tahar, R., Brahmi, M., Alzain, M. N., Noman, O., Shahat, A. A., El guerrouj, B., & Smiri, Y. (2025). Assessment of groundwater quality for irrigation using a new customized irrigation water quality index. Journal of Hydrology: Regional Studies, 59, 102346.

Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & O'Connor, M. F. (1972). A water quality index—crashing the psychological barrier. Indicators of Environmental Quality, 173–182.

Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2001). Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, User's manual. In Canadian environmental quality guidelines, 1999, Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg.

Chatterjee, C., & Raziuddin, M. (2002). Determination of Water Quality Index (WQI) of a degraded river in Asansol industrial area (West Bengal). Nature Environment and Pollution Technology, 1(2), 181–189.

Doneen, L. D. (1964). Notes on water quality in agriculture. Department of Water Science and Engineering, University of California, Davis, 4001.

Eaton, F. M. (1950). Significance of carbonate in irrigation water. Soil Science, 69(2), 123–133.

Egbueri, J. C., et al. (2021). Nitrate health risk and geochemical characteristics of water in a semi-urban: implications from graphical plots and statistical computing. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 104(19), 8491–8511.

Famiglietti, J. S. (2014). The global groundwater crisis. Nature Climate Change, 4, 945–947.

Fazel Tavasol, S., Manshoori, M., Ahmadi, A., Safari Komil, M., & Dehghani, R. (2020). Investigation of Hydro Geochemical Changes in Groundwater, Case Study: Hamedan-Bahar Plain. Journal of Environmental Geology, 13(64), 21-73. (In Persian).

Ge, Q., et al. (2025). Toward Decontamination in Coastal Regions: groundwater Quality, Fluoride, Nitrate, and Human Health Risk Assessments. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 31(3–4), 367–390.
Ghrefat, H., Al-Taani, A., Rikan, N., Sankaran, R., Elwaheidi, M. M., Batayneh, A., & Al Shaltoni, S. (2025). Hydrogeochemical assessment of groundwater quality in the Midyan Basin, northwest Saudi Arabia: implications for irrigation use in an arid region. Arab Gulf Journal of Scientific Research, 43(1), 4–17.
Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. Science, 170(3962), 1088–1090.
Güler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., & Turner, K. A. (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology Journal, 10(4), 455–474.
Harutyunyan, A., Khachatryan, H., Gevorgyan, A., Singh, A., Eloyan, A., Sandu, M. A., Singh, R. K., & Ghazaryan, K. (2026). Application of Advanced Methods for the Assessment of Irrigation Suitability of Groundwater: A Case Study of Armavir Region, Armenia. Sustainability, 18(14), 7451.
Horton, R. K. (1965). An index number system for rating water quality. Journal of Water Pollution Control Federation, 37(3), 300–306.
Hussainzadeh, J., Mohammadzadeh, H., & Mohammaddost, A. (2024). Inverse Geochemical Modeling and Hydrogeochemical Evolution Mechanism of Groundwater in Neyshabur Plain, NE Iran. Water Resources, 51, S306–S319.
Hussainzadeh, J., Samani, S., & Mahaqi, A. (2023). Investigation of the geochemical evolution of groundwater resources in the Zanjan plain, NW Iran. Environmental Earth Sciences, 82, 123.
Iheme, K. O., et al. (2026). Hydrogeochemical profiling and suitability evaluation of groundwater for industrial and municipal applications in the Southern Anambra Basin, Nigeria. Borneo Journal of Sciences & Technology, 8(1), 124–144.
Jabraili-Andaryan, N., Nadiri, A. A., & Gharekhani, M. (2023). Investigating the Quantity and Quality of Groundwater and its Effect on the Hydrogeochemistry of the Azarshahr Plain Aquifer and Identifying the Possible Source of Contamination. Hydrogeomorphology, 11, 60–79.
Jalali, M., Jalali, M., & Morrison, L. (2024). Groundwater hydrogeochemical processes, water quality index, and probabilistic health risk assessment in an arid and semi-arid environment (Hamedan, Iran). Groundwater for Sustainable Development, 26, 101255.
Kazemi, A., Esmaeilbeigi, M., Sahebi, Z., & Shooshtari, S. J. (2022). Risk assessment and water quality of groundwater in South Khorasan Province. Environmental Science and Pollution Research, 29, 81804–81829.
Kelley, W. P. (1963). Use of saline irrigation water. Soil Science, 95(6), 385–391.
Khan, A. A., Paterson, R., & Khan, H. (2004). Modification and application of Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCMEWQI) for the communication of drinking water quality data in Newfoundland and Labrador. Water Quality Research Journal, 39(3), 285–293.
Lightfoot, D. R. (1996). Syrian qanat Romani: history, ecology, abandonment. Journal of Arid Environments, 33(3), 321–336.
Maghrebi, M., Noori, R., Partani, S., Araghi, A., Barati, R., Farnoush, H., & Torabi Haghighi, A. (2021). Iran's groundwater hydrochemistry. Earth and Space Science, 8(8), e2021EA001793.
Mayakannan, M., Seenuvasan, K., & Vilvanathan, S. (2026). Hydrogeochemical Insights of Groundwater Quality and associated risks. Spectroscopy Letters, 59, 1–15.
Nabatian, G., Ebrahimi, M., & Rabbia, O. (2025). Sediment-hosted stratiform copper deposits in Iran. Journal of Geochemical Exploration, 274, 107745.
Nahar, N., & Das, T. K. (2025). Hydrogeochemical Evaluation and Health Implications of Groundwater in Magura Sadar. Journal of Chemistry, 2025, 1–15.
Paliwal, K. V. (1972). Irrigation with saline water. Water Technology Centre, Indian Agricultural Research Institute, New Delhi, 198.
Pande, C. B., Tolche, A. D., Egbueri, J. C., Sidek, L. M., Singh, R., Mishra, A. P., Refadah, S. S., Alshehri, F., Khan, M. Y. A., Scholz, M., & Sammen, S. S. (2025). Implications of seasonal variations of hydrogeochemical analysis using GIS, WQI, and statistical analysis method for the semi-arid region. Applied Water Science, 15(4), 80.
Pashakhah, P., Babazadeh, H., Shahmohammadi-Kalalagh, S., & Sarai-Tabrizi, M. (2022). Hydro Geochemical Investigation of Groundwater in Miandoab Plain. Water Resources Engineering Journal, 14(49), 1-12. (In Persian).
Peng, H., Xia, Z., Guo, X., Xiao, Y., Yuan, Y., Zhao, Z., Ren, Y., Liu, J., Li, C., Wang, W., & Zhan, P. (2026). Hydrogeochemical Processes, Governing Factors, and Comprehensive Quality Evaluation of Groundwater in an Arid Alpine Basin on the Tibetan Plateau. Sustainability, 18(9), 4505.

Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Transactions, American Geophysical Union, 25(6), 914–928.
Ram, A., Tiwari, S. K., Pandey, H. K., Chaurasia, A. K., Singh, S., & Singh, Y. V. (2021). Groundwater quality assessment using water quality index (WQI) under GIS framework. Applied Water Science, 11(3), 46.
Rashid, T., Sabarathinam, C., Bhandary, H., Al-Jumaa, M., Shishter, A., & Al-Salman, B. (2025). Hydrogeochemical changes in arid groundwater systems: Inferences from well-field long-term data. Environmental Earth Sciences, 84(22), 674.
Rezaei, A., Sayadi, M. H., Jazini Zadeh, R., & Mousazadeh, H. (2021). Assessing the hydrogeochemical processes through classical integration of groundwater parameters in the Birjand plain in eastern Iran. Groundwater for Sustainable Development, 15, 100684.
Richards, L. A. (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook No. 60, United States Department of Agriculture (USDA), Washington D.C.
Singh, P., Rishi, M. S., & Kaur, L. (2024). Hydrogeochemical characterization of groundwater under natural and anthropogenically influenced areas located in Upper Ghaggar River Basin, India. Environment, Development and Sustainability, 26, 25415–25437.
Sunitha, V., Deepthi, P., Balaji, E., & Muralidhara Reddy, B. (2026). Hydrogeochemistry and Source Appraisal of Groundwater Quality in a Semi-Arid Region of Kadapa, India: Insights into Pollution, Health Risks. Journal of the Geological Society of India, 102(1), 55–64.
Szabolcs, I. (1964). The influence of sodium carbonate on soils. Agrokémia és Talajtan, 13, 237–246.
Tajbakhshian, M. (2023). Hydrogeochemical evolution and water quality assessment of surface and groundwater resources: case study, Shirin Darreh dam basin (NE Iran). Arabian Journal of Geosciences, 16, 544.
Tajbakhshian, M. (2025). Groundwater quality and hydrogeochemical challenges in the Sarakhs Plain, NE Iran: a call for sustainable management. Environmental Geochemistry and Health, 47, 75.
Tian, J., Wang, Z., Daskalopoulou, K., Zhang, M., Huo, Y., Cao, Y., Yang, J., Liu, W., Liu, J., & Xu, S. (2025a). Hydrochemical characteristics, driving factors and health risk of fluoride in groundwater from the northwestern Ordos Basin, China. Geoscience Frontiers, 16(5), 102123.
Tian, J., Yang, J., Liu, W., Zhang, M., Daskalopoulou, K., Zou, Y., Xu, N., Liao, Z., Huo, Y., Zhu, Y., Cao, Y., Xu, S., & Liu, J. (2025b). Assessing groundwater quality for drinking and irrigation using hydrogeochemistry and machine learning in Northern China. Agricultural Water Management, 322.
Tiwari, T. N., & Mishra, M. A. (1985). A preliminary assignment of water quality index of major Indian rivers. Indian Journal of Environmental Protection, 5(4), 276-279.
Thirumurugan, M., et al. (2018). Interaction between solutes and groundwater chemistry. Geochemistry International, 56(9), 954–968.
United States Salinity Laboratory Staff (USSL). (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agriculture Handbook No. 60, Washington, D.C.
van Jaarsveld, B., Wanders, N., Otoo, N. G., Sutanudjaja, E. H., Verkaik, J., Zamrsky, D., & Bierkens, M. F. P. (2026). Global hyper-resolution modeling of historical and future groundwater dynamics. Earth System Dynamics, 17(5), 1201–1236.
Wada, Y., van Beek, L. P. H., van Kempen, C. M., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S., & Bierkens, M. F. P. (2010). Global depletion of groundwater resources. Geophysical Research Letters, 37(20), L20402.
Wilcox, L. V. (1955). Classification and Use of Irrigation Waters. US Department of Agriculture, Circular 969.
World Health Organization (WHO). (2011). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). World Health Organization.
Xiao, Y., Wang, L., Wang, J., Guo, X., Zhang, Z., Wei, J., Zhao, Z., Yang, S., Chen, H., Yang, N., & Zhu, G. (2026). Groundwater hydrogeochemical evolution and driving forces in a typical arid closed intermountain basin on Tibetan Plateau: a quantitative framework. Applied Geochemistry, 198, 106711.
Yadav, P., Sreekesh, S., & Raju Nandimandalam, J. (2025). Groundwater Quality and Its Suitability in the Semi-Arid River Basin in India: An Analysis of Hydrogeochemical Processes Using Multivariate Statistics. Environmental Modeling & Assessment, 30(3), 625–646.