

Research Article

Classification and Spatial-Temporal Monitoring of Groundwater Quality for Drinking, Agricultural, and Industrial Uses (Case Study: Qazvin Plain)

Shima Azadeh Ranjbar ¹, Majid Kholghi ², Afshin Ashrafzadeh ^{3✉}

1. MSc of Water Resources, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Professor of Water Resources, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3. Associate Professor of Water Resources, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(✉ Corresponding Author: a.ashrafzadeh@ut.ac.ir)

ARTICLE INFO

Received: 19 November 2025

Revised: 14 December 2025

Accepted: 15 December 2025

Available Online: 24 January 2026

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Ranjbar, Sh.A., Ashrafzadeh, A., & Kholghi, M., A.R (2025). Classification and Spatial-Temporal Monitoring of Groundwater Quality for Drinking, Agricultural and Industrial uses (Case study: Qazvin plain). V.26, No.99, P: 34-55
<https://doi.org/10.22092/idser.2025.371470.1633>

Extended Abstract

Introduction

In countries such as Iran, where drinking water, agriculture, and industry heavily rely on groundwater resources, management and protection are fundamental priorities. Excessive extraction has caused severe decline in groundwater levels and water quality reduction. Given increasing population and surface water shortage, dependence on quality groundwater has intensified significantly.

The Qazvin Plain, as a major agricultural and industrial hub, plays an effective role in regional food security and economic development. Agricultural and industrial activities have imposed increasing pressure on water resources. Although part of water demand is supplied through the Talegha Dam and seasonal rivers, this plain has severe dependence on groundwater with increasing extraction, leading to level decline and serious quality challenges.

The Qazvin Plain is located within 49°10' to 50°40' East longitude and 35°20' to 36°31' North latitude. The plain area is 5059.3 square kilometers with elevation ranging between 1131 and 2902 meters. With semi-arid climate, it receives average annual precipitation of 317 millimeters. With 250,000 hectares of agricultural land, the agricultural sector accounts for more than 85 percent of water consumption.

The objective is to classify groundwater quality for agricultural, drinking, and industrial uses, and investigate spatial and temporal variations over a 20-year period from 2001 to 2021.

Methodology

Groundwater quality data were obtained from Qazvin Regional Water Company. Water type and facies were determined using the Piper diagram. Qualitative classification for agricultural purposes was conducted according to Wilcox classification, for drinking according to Schoeller classification, and for industrial purposes using Langelier Saturation Index (LSI). The Wilcox method classifies water based on electrical conductivity (EC) and sodium adsorption ratio (SAR) into four classes: excellent, good, average, and unsuitable. Schoeller method classifies water into six classes based on total dissolved solids (TDS) and total hardness (TH). Langelier index categorizes water as corrosive (LSI<0), balanced (LSI=0), or scaling (LSI>0). Spatial and temporal zoning maps were prepared using Kriging interpolation in GIS at five-year intervals.

Results and Discussion

Piper diagrams analysis over five periods (2001-2021) revealed continuous aquifer degradation. In 2001, most samples showed calcium-bicarbonate facies indicating fresh water. By 2006, samples shifted toward calcium-sulfate facies. In 2011, degradation accelerated with dramatic dispersion increase and sodium-

chloride facies emergence indicating serious salinization. By 2016, critical condition became evident with high facies diversity. In 2021, crisis peaked with maximum dispersion, where calcium-bicarbonate facies appeared only in limited samples, and significant portions showed saline facies dominated by sodium-chloride and sodium-sulfate.

For agricultural water quality, no sample was excellent quality. Good quality decreased from 25.25% in 2001 to 17.91% in 2021 (29% reduction). Average quality increased from 46.46% to 58.95%, and unsuitable samples fluctuated between 14.23% and 33.33%. Medium and unsuitable categories comprised 75 to 92 percent.

For drinking water quality, about 70% of samples remained in good to average categories, but good quality decreased from 29% to 22%. Completely inappropriate category increased from zero to 2.74%. In total hardness, good quality declined from 39% to 24%, while acceptable water increased to 44%.

For industrial water quality, significant changes occurred. Corrosive water decreased from 96.97% to 70.1%, while scaling water increased dramatically from 2.02% to 23.1%. Balanced water comprised only 1 to 6.7%. More than 93% falls into corrosive or scaling categories, requiring treatment before use.

Spatial-temporal analysis revealed northern areas had best quality while southern areas faced worst quality, with degradation advancing from south to north. For agriculture, medium and unsuitable water increased from 75% to over 90%. For drinking, good quality decreased from 29-39% to 22-24%. For industry, over 93% are either corrosive or scaling.

Conclusions

Groundwater resources show concerning degradation trends. Facies evolution from fresh to saline types, dramatic diversity increase, and significant reduction in suitable quality represent serious warnings.

For agriculture, unsuitable water increased from 75% to over 90%, necessitating urgent strategies including extraction control, cropping pattern modification, and drainage systems development. For drinking, good quality decreased from 29-39% to 22-24%, with southern areas requiring advanced treatment. For industry, more than 93% are corrosive or scaling, requiring treatment.

The spatial pattern indicates degradation advancing from south to north. The trend shows increasing salinity and hardness resulting from excessive extraction, reduced recharge, and likely saline water intrusion. This requires urgent actions including extraction control, artificial recharge enhancement, agricultural return flows treatment, and pollution prevention. Without fundamental measures, sustainability will be severely threatened.

Keywords: Langelier index, Piper, Qazvin aquifer, Quality zoning, Schoeller, Wilcox.

Acknowledgments

The authors wish to express their sincere gratitude to the Editor and the two anonymous reviewers for their insightful comments and constructive feedback, which significantly improved the quality of this manuscript. We also thank the Regional Water Company of Qazvin for providing the necessary data for this research.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article .Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contribution

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts. Sh. AR. handled the methodology, formal analysis, investigation, data curation, visualization, and initial draft preparation. A.A. and M. Kh. provided supervision and validation for the study. Resources were provided by M. Kh., A. A., and M. Kh. shared responsibility for the final review and editing of the manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.



© 2026, The Author(s). Published by [Agricultural Engineering Research Institute](#). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). Which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.22092/idser.2025.370674.1630>

نوع مقاله: پژوهشی

طبقه‌بندی و پایش زمانی-مکانی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت (مطالعه موردی: دشت قزوین)

شیما آزادهرنجبر^۱، مجید خلقی^۲، افشین اشرف‌زاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸ | تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳ | تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳ | تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۰۴

چکیده

منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک روند کاهشی کمی و کیفی قابل توجهی را در سال‌های اخیر نشان داده‌اند. با توجه به رشد روز افزون جمعیت و کمبود منابع آب سطحی، وابستگی به منابع با کیفیت آب زیرزمینی برای شرب، کشاورزی و صنعت دو چندان شده است. به دلیل اهمیت کشاورزی و وابستگی شدید به آب‌های زیرزمینی در قزوین، این منطقه به عنوان منطقه مورد مطالعه تعیین گردید. هدف از این پژوهش، طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی و بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آن در دشت قزوین در یک دوره ۲۰ ساله با تأکید بر مصارف شرب، کشاورزی و صنعت است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد رخساره‌ها از کلسیم-بی‌کربناته به سدیم-کلره و سدیم-سولفات تغییر یافته که بیانگر برداشت بیش از حد و نفوذ املاح است. از نظر کشاورزی، سهم آب‌های نامناسب از ۷۵ به ۹۰ درصد افزایش داشته است. از نظر شرب، آب‌های با کیفیت و خوب از ۳۹ به ۲۲ درصد کاهش یافته است و از نظر صنعتی بیش از ۹۳ درصد آب‌ها خورنده یا رسوب‌گذار هستند. الگوی مکانی نشان داد که آب مناطق شمالی دارای بالاترین و آب مناطق جنوبی دارای پایین‌ترین کیفیت است و روند تخریب از جنوب به شمال پیشروی می‌کند که نیازمند گام‌های فوری مدیریتی برای جلوگیری از تخریب غیرقابل بازگشت آبخوان است.

واژه‌های کلیدی: آبخوان قزوین، پایپر، پهنه‌بندی کیفیت، شاخص لانژلیه، شولر، ویلکاکس

مقدمه

دقیق است (Fetter, 2001; Mahmoudpour et al., 2023).

در کشورهایی مانند ایران که تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت به‌طور عمده متکی بر منابع آب زیرزمینی است، مدیریت و حفاظت از این منابع حیاتی از اولویت‌های اساسی محسوب می‌شود. حفظ پایداری این منابع مستلزم برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت به‌منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از آنهاست (Abu-Khalaf et al., 2013; Faraji et al., 2017). از این‌رو، دسترسی به آب زیرزمینی با کیفیت مطلوب و حفظ استانداردهای کیفی آن، امری ضروری تلقی می‌شود که تحقق آن مستلزم استقرار شبکه پایش جامع و جلیلی و همکاران (Jalali et al., 2016) نشان دادند که روش کریجینگ در درون‌یابی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت اراک، دقیق‌تر از روش‌های سنتی عمل می‌کند. از جمله روش‌های درون‌یابی برای تهیه پهنه‌بندی تغییرات ویژگی‌های آب زیرزمینی می‌توان به روش‌های زمین آماری کریجینگ اشاره کرد (Farnia et al., 2018; Amiri-Bourkhani et al., 2017; Amini et al., 2024). پژوهشی جامع در دشت شیراز با بررسی ۱۰ پارامتر کیفی شامل سدیم (Na^+)، اسیدیته آب (pH)، کلراید (Cl^-)

^۱ کارشناسی ارشد منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.^۲ استاد منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.^۳ دانشیار منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، (نویسنده مسئول: Email: a.ashrafzadeh@ut.ac.ir) کرج، ایران.

قرار دارند، اما کاهش کیفیت آب پس از فصل بارندگی به ویژه سطح سدیم مشاهده می‌شود که می‌تواند بر کیفیت خاک و تولید محصول تأثیر منفی بگذارد (Gökçekuş et al., 2025). در مطالعه‌ای در سودان محققان با استفاده از ۱۱ پارامتر فیزیکوشیمیایی از ۲۰ چاه آب زیرزمینی، به ارزیابی شاخص کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب پرداختند و نشان دادند که ۷۵ درصد نمونه‌ها در کلاس عالی، ۲۰ درصد در کلاس خوب و ۵ درصد در کلاس نامناسب برای مصارف شرب قرار دارند (Mohammed et al., 2023). در پژوهشی در جنوب غربی الجزایر به ارزیابی کیفیت آب برای مصارف کشاورزی پرداخته و نشان داده شد که بر اساس شاخص IWQI، ۴۲/۱۸ درصد نمونه‌ها کیفیت عالی، ۳۴/۳۴ درصد بسیار خوب، ۶/۶۳ درصد خوب، ۹/۶۴ درصد رضایت‌بخش و ۴/۲۱ درصد نامناسب برای آبیاری دارند (Hussein et al., 2024). نتایج بررسی کیفیت ۳۸ نمونه آب رودخانه با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره نشان داد که آب‌های رودخانه با میانگین pH برابر با ۷/۷ و TDS برابر با ۳۱۵/۸ میلی گرم بر لیتر خنثی و شیرین‌اند و کیفیت مناسبی برای مصارف شرب و کشاورزی دارند (Piroozfar et al., 2018).

پژوهشگران در میناب با استفاده از داده‌های ۱۰ ایستگاه هیدرومتری ارزیابی کیفیت شیمیایی آب برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعتی و به‌کارگیری نمودارهای ویلکاکس، شولر و پایپر، شاخص اشباع لانژلیه (LSI) و شاخص پایداری رایزنر^{۱۰} (RSI) نشان دادند که آب ایستگاه‌های سد سرنی برای مصارف کشاورزی و آبیاری در کلاس‌های C3S2، C4S3 و C4S4 قرار دارد و از نظر مصرف شرب از خوب تا غیرقابل آشامیدن متغیر است، کیفیت آب برای مصارف صنعتی در همه ایستگاه‌ها رسوب‌زا ارزیابی شده است و نوع آب عمدتاً کلره و سولفات با رخساره سدیم است

سولفات (SO_4^{2-})، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، پتاسیم (K^+)، سختی کل (TH) نسبت کل جامدات محلول^۱ (TDS) و هدایت الکتریکی^۲ (EC) در ۲۲ چاه آب شرب شهری، به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی با استفاده از نمودارهای ویلکاکس^۳ و شولر^۴، شاخص اشباع لانژلیه^۵ (LSI) و پارامترهای خطر سلامت مانند دریافت روزانه مزمن^۶ (CDI) و ضریب خطر^۷ (HQ) بر اساس فرمول‌های EPA پرداخته است. نتایج بررسی نشان داد که بر اساس شاخص‌های کیفی ویلکاکس و شولر، آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی در کلاس متوسط و برای مصرف شرب در کلاس قابل قبول طبقه‌بندی می‌شود، منابع آب موجود بر اساس شاخص لانژلیه خاصیت خوردگی تا رسوب‌زایی دارند (Salari, 2024). پژوهشگران در هند با جمع‌آوری ۴۶ نمونه آب زیرزمینی (pH، EC، TDS، کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی) به ارزیابی کیفیت آب برای مصارف شرب و کشاورزی پرداختند و با استفاده از شاخص کیفیت آب^۸ (WQI) و درون‌یابی مبتنی بر GIS نشان دادند که ۷۷ و ۲۳ درصد نمونه‌ها به ترتیب برای آشامیدن مناسب و نامناسب‌اند و بر اساس طبقه‌بندی ویلکاکس، ۷۸، ۲۰ و ۲ درصد نمونه‌ها به ترتیب خوب، متوسط و نامناسب برای کشت ارزیابی می‌شوند (Pappaka et al., 2024).

ال بیلالی و همکاران (El Bilali et al., 2021) با ارزیابی فصلی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی نشان دادند که بیشتر نمونه‌ها بر اساس شاخص کیفیت آب کشاورزی^۹ (IWQI) در کلاس مناسب یا عالی قرار دارند، اما کاهش کیفیت آب پس از فصل بارندگی به ویژه سطح سدیم مشاهده شده که می‌تواند بر کیفیت خاک و تولید محصول تأثیر منفی بگذارد. ارزیابی فصلی کیفیت آب زیرزمینی در قبرس شمالی برای مصارف کشاورزی نشان داد که اکثر نمونه‌ها بر اساس شاخص IWQI در کلاس مناسب یا عالی

⁷ Hazard Quotient (HQ)

⁸ Water Quality Index (WQI)

⁹ Irrigation Water Quality Index (IWQI)

¹⁰ Ryznar Stability Index (RSI)

¹ Total Dissolved Solids (TDS)

² Electrical Conductivity (EC)

³ Wilcox diagram

⁴ Schoeller diagram

⁵ Langelier Saturation Index (LSI)

⁶ Chronic Daily Intake (CDI)

زیرزمینی از نظر کشاورزی، شرب و صنعت و نیز بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی، شرب و صنعت دشت قزوین در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۸۰ است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت قزوین در محدوده جغرافیایی ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۱ دقیقه عرض شمالی واقع است و در بخش شمالی و تقریباً غربی حوضه آبریز دریاچه نمک قرار دارد. مساحت ارتفاعات و دشت به ترتیب ۴۴۹۲/۳۷ و ۵۰۵۹/۳ کیلومتر مربع است. از لحاظ توپوگرافی، دامنه ارتفاعی منطقه بین ۱۱۳۱ تا ۲۹۰۲ متر با میانگین ۱۲۵۰ متر از سطح دریا متغیر است. دشت قزوین اقلیم نیمه‌خشک دارد و میانگین بارندگی سالانه آن ۳۱۷ میلی‌متر است.

دشت قزوین با ۲۵۰ هزار هکتار زمین کشاورزی، یکی از قطب‌های کشاورزی ایران محسوب می‌شود که نقش مهمی در تأمین امنیت غذایی کشور دارد. بیش از ۸۵ درصد از کل مصرف آب در این دشت در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. منابع آب سطحی دشت قزوین را رودخانه‌های شاهرود، خررود، ابهرود و چندین رودخانه فصلی تشکیل می‌دهند که به آن‌ها سهمیه‌ای از سد طالقان نیز افزوده می‌شود. به دلیل محدودیت و فصلی بودن منابع آب سطحی، نیاز آبی برای مصارف کشاورزی به‌طور عمده با برداشت از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. از دیدگاه زمین‌شناسی، این دشت که از طریق فرونشست تکتونیکی شکل گرفته است به تدریج بر اثر رسوبات منتقل‌شده از ارتفاعات مجاور پر شده و مورفولوژی کاسه‌ای شکلی را به وجود آورده است که در آن جریان‌های سطحی و زیرزمینی از اطراف به سمت مرکز دشت متمرکز می‌شوند (Fotamy et al., 2023). دشت قزوین روی یک آبخوان آبرفتی به مساحت تقریبی ۴۰۰۰ کیلومتر مربع قرار گرفته است که حدود ۷۸ درصد از مساحت کل دشت را پوشش می‌دهد.

که در ۶۰ درصد ایستگاه‌ها کلر-سدیم و در ۴۰ درصد سولفات-سدیم شناسایی شده است، همچنین هدایت الکتریکی رابطه‌ای بسیار قوی با یون‌های سدیم، کلر، سولفات و کلسیم نشان داد و شرایط کاتیونی و آنیونی غالب به صورت $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^{+}$ و $Cl^{-} > SO_4^{2-} > HCO_3^{-}$ گزارش شده است (Torkamanitombeki & Khamsehchiyan, 2025). پژوهشگران در مجارستان در دوره زمانی ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۴ به بررسی تکامل مکانی-زمانی شیمی آب زیرزمینی پرداختند و نشان دادند که نوع غالب آب $Ca-Mg-HCO_3$ است که با گذشت زمان به سمت $Na-HCO_3$ تغییر کرده و شوری افزایش یافته است. بر اساس شاخص کیفیت آب زیرزمینی، بهبود کلی کیفیت آب زیرزمینی را در طول زمان با تطابق اکثر مناطق با استانداردهای آب آشامیدنی نشان داده اما مناطق خاصی نشانه‌های آلودگی موضعی را نشان داده‌اند که آن مناطق نیاز به مدیریت هدفمند دارند (Mohammed et al., 2025).

دشت قزوین یکی از قطب‌های مهم کشاورزی و صنعتی کشور است و نقش مؤثری در تأمین امنیت غذایی و توسعه اقتصادی منطقه دارد. رشد فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در این دشت، متراکم‌سازی جمعیت قابل‌توجهی را در دهه‌های اخیر به همراه داشته و فشار فزاینده‌ای بر منابع آب منطقه وارد کرده است. بخشی از تقاضای آب این منطقه از طریق منابع آب سطحی از جمله سد طالقان و رودخانه‌های فصلی تأمین می‌گردد، اما این دشت وابستگی شدیدی به منابع آب زیرزمینی دارد و از آبخوان‌ها بیش از حد برداشت می‌شود. این امر منجر به افت سطح آب زیرزمینی و بروز چالش‌های جدی در کیفیت منابع آبی گردیده است. با توجه به اهمیت این منطقه و چالش‌های موجود در زمینه کیفیت منابع آب، دشت قزوین به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب گردید.

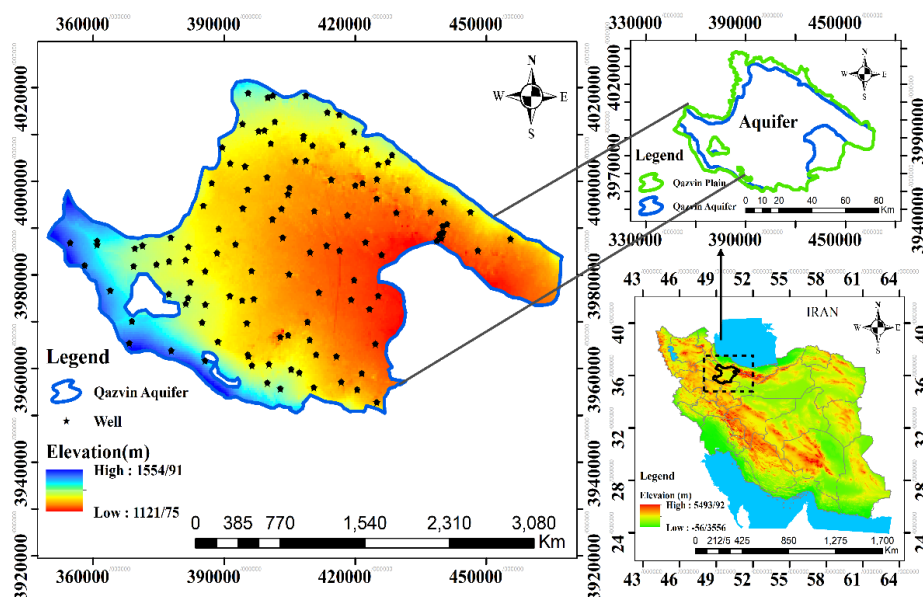
با توجه به اهمیت فراوان شناخت ویژگی‌های کیفی آب زیرزمینی، پایش و طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی برای مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب ضروری به‌نظر می‌رسد، بنابراین هدف از اجرای این پژوهش، طبقه‌بندی کیفیت آب

تامین آب، تعداد و پراکنش مناسب چاه‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی است. داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان قزوین تهیه شده است. موقعیت چاه‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت قزوین در شکل (۱) نشان داده شده است.

در سال‌های اخیر افزایش شوری خاک و آب به چالشی جدی برای دشت قزوین تبدیل شده که نه تنها عملکرد محصولات را کاهش می‌دهد، بلکه باعث تخریب ساختار خاک و کاهش نفوذپذیری آب می‌شود، آلودگی نیترات ناشی از کودهای کشاورزی، نفوذ فاضلاب‌های شهری و صنعتی و افزایش EC و TDS آب، تأمین آب شرب بهداشتی را با چالش جدی روبه‌رو کرده است. همچنین رقابت بین‌بخش‌های صنعت بر سر منابع محدود آب، افزایش هزینه‌های انرژی برای برداشت از عمق بیشتر و ضرورت سرمایه‌گذاری سنگین در سیستم‌های تصفیه پیشرفته آب برای مصارف صنعتی با مشکلات مواجه است. به همین منظور پایش دقیق روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی، شناسایی عوامل مؤثر و ارائه راهکارهای مدیریتی برای حفظ پایداری منابع آب کشاورزی، شرب و صنعت این منطقه لازم است.

دشت قزوین در حوزه منابع آب زیرزمینی با چالش‌های جدی روبه‌رو است. برداشت بی‌رویه از این منابع در سال‌های اخیر موجب افت متوسط سالانه ۱/۲۳ متر سطح آب زیرزمینی شده است (Azadeh Ranjbar, 2025). این وضعیت، علاوه بر کاهش حجم ذخایر آبخوان، کیفیت آب را نیز تحت تأثیر قرار داده است. چالش‌های مدیریتی از جمله ضعف نظارت بر چاه‌های غیرمجاز و نبود سیستم یکپارچه پایش منابع آب زیرزمینی، بر شدت این مشکلات افزوده است. اجرای برنامه‌های حفاظتی مؤثر و به‌کارگیری مدیریت بهینه کیفیت منابع آب برای جلوگیری از تخریب بیشتر آبخوان و بهبود شرایط موجود امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

دشت قزوین توسط چاه شبکه پایش کیفیت آب زیرزمینی (به طور میانگین ۱۲۰ حلقه چاه)، معمولاً دو مرتبه در سال (شش ماه اول و دوم) پارامترهایی مانند سدیم (Na^+)، اسیدیته آب (pH)، کلراید (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-})، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، پتاسیم (K^+)، بی‌کربنات (HCO_3^-)، نسبت کل جامدات محلول (TDS) و هدایت الکتریکی (EC) آماربرداری می‌شود. دلیل انتخاب دشت قزوین علاوه بر اهمیت آب زیرزمینی در این منطقه از نظر



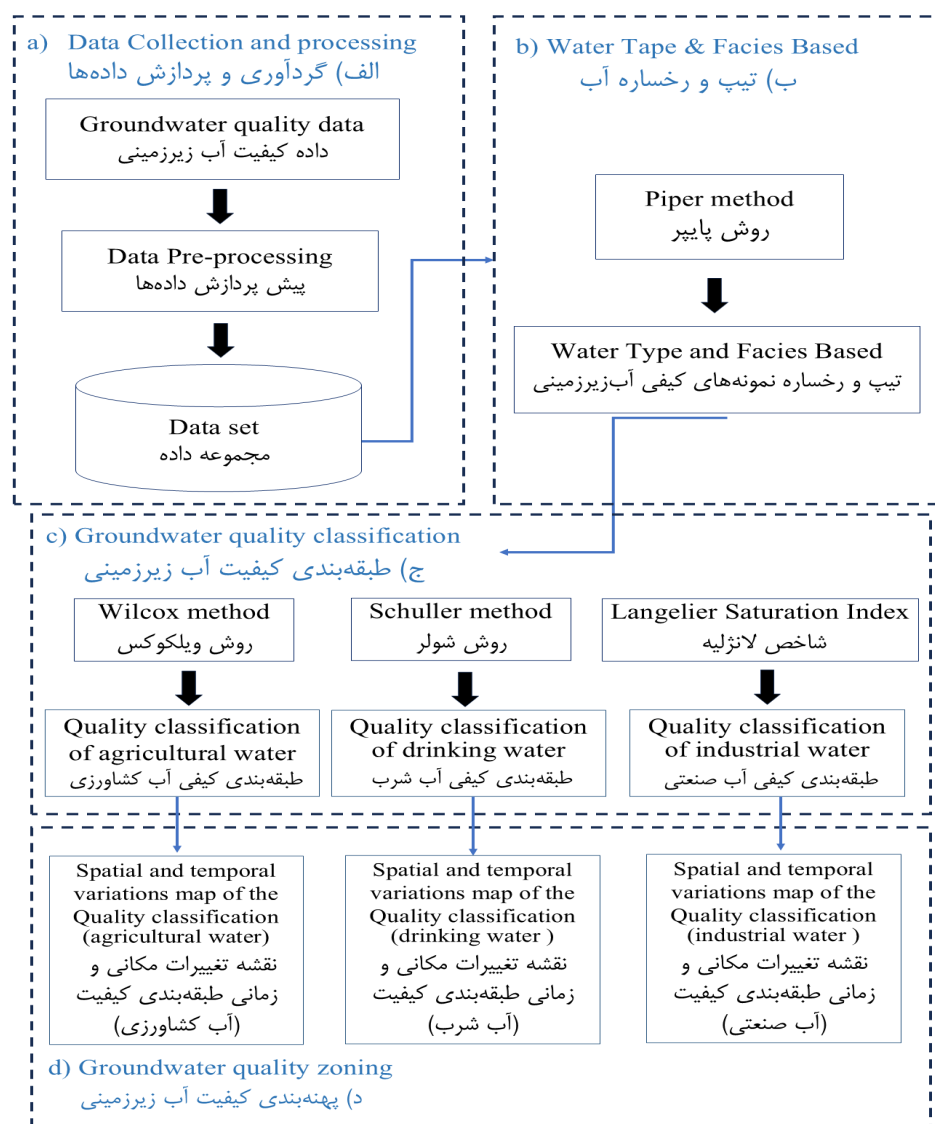
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و توزیع مکانی چاه‌های پایش کیفیت آب زیرزمینی

Fig. 1- Location of the study area and the spatial distribution of Groundwater quality monitoring wells

روش تحقیق

توجه طبقه‌بندی و نمودار شولر و طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ صنعت با توجه شاخص لانژلیه صورت گرفت. در گام چهارم پژوهش، به منظور تحلیل مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین، نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس، پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب بر اساس روش شولر و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر صنعت بر اساس شاخص لانژلیه تهیه گردید. فلوجارت پژوهش در شکل (۲) نشان داده شده است.

در گام اول پژوهش، ابتدا داده‌های کیفیت آب زیرزمینی آبخوان قزوین از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان قزوین اخذ گردید و داده‌های کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت قزوین پیش‌پردازش شدند. در گام دوم پژوهش روی تیپ و رخساره نمونه‌های کیفی آب زیرزمینی با استفاده از نمودار پایپر آغاز گردید. در گام سوم پژوهش، طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ کشاورزی با توجه طبقه‌بندی و نمودار ویلکوکس، همچنین طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ شرب با



شکل ۲- فلوجارت روش‌شناسی پژوهش

Fig. 2- Flowchart of the Methodology

تیپ و رخساره نمونه‌های کیفی آب زیرزمینی

نمودار پایپر یکی از روش‌های متداول و کاربردی برای طبقه‌بندی نمونه‌های آب و تعیین تیپ شیمیایی آب به شمار می‌رود. در این نمودار، مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌ها به صورت درصد و برابر با ۱۰۰ درصد در نظر گرفته می‌شود. درصد یون‌ها روی مثلث‌های جانبی نمودار مشخص می‌شود و نقاط متناظر روی اضلاع این مثلث‌ها در لوزی مرکزی نمایش داده می‌شوند. در نهایت، درباره تیپ کیفی آب با استفاده از نمودار پایپر، بر اساس محل قرارگیری نقاط متمرکز در نواحی مختلف نمودار قضاوت می‌شود. در این طبقه‌بندی، آب بر اساس کاتیون‌های غالب به چهار رخساره اصلی تقسیم می‌شود: نوع کلسیم‌دار، منیزیم‌دار، نوع سدیم‌دار و نوع مختلط. بر پایه آنیون‌های غالب، آب همچنین به سه تیپ بی‌کربناته، سولفاته و کلریده طبقه‌بندی می‌گردد. این تقسیم‌بندی امکان شناسایی دقیق ویژگی‌های هیدروشیمیایی و منشأ آب را فراهم می‌آورد (Piper, 1944). نمودار پایپر در مقایسه سریع ترکیب شیمیایی نمونه‌ها، شناسایی فرآیندهای زمین‌شیمیایی، تعیین منشأ آب‌های زیرزمینی، بررسی مسیرهای جریان، تشخیص منابع آلودگی و رصد تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب در مطالعات هیدروژئولوژی کاربردهای گسترده‌ای دارد.

طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی

آب‌های کشاورزی از لحاظ غلظت و ترکیب نمک‌های محلول متغیر هستند. افزایش غلظت یون‌های محلول در آب زیرزمینی، اثرهای فیزیکی و شیمیایی مخربی بر خاک و گیاهان وارد می‌کند و قابلیت بهره‌وری خاک را می‌کاهد. شوری موجب اختلال در جذب آب و عناصر غذایی توسط ریشه گیاه می‌گردد. شوری با شاخص‌هایی مانند خطر شوری، نسبت جذب سدیم، درصد سدیم، سدیم کربنات باقی‌مانده از پارامترهای مهم در تشخیص مناسب بودن آب زیرزمینی برای مصرف آبیاری است. عوامل مصنوعی و طبیعی در کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی تاثیر بسیار زیادی دارد. عوامل مصنوعی شامل ورود فاضلاب‌های شهری، پساب‌های صنعتی و کشاورزی سبب کاهش کیفیت آب زیرزمینی می‌شود. از عوامل طبیعی می‌توان به هیدرواقلیم و زمین‌شناسی اشاره کرد. برای تعیین کیفیت آب کشاورزی، از طبقه‌بندی و نمودار ویلکاکس استفاده شده است. در این طبقه‌بندی، آب کشاورزی بر اساس میزان هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) به چهار طبقه با کیفیت عالی، خوب، متوسط و نامناسب و ۱۶ رده تقسیم‌بندی می‌شود که در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است (Wilcox, 1955).

جدول ۱- معیارهای طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی

Table 1- Classification criteria for Agricultural water

کیفیت آب Water Quality	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	طبقه‌بندی Classification	SAR	طبقه‌بندی Classification
عالی excellent	<250	C1	<10	S1
خوب good	250-750	C2	10-18	S2
متوسط Average	750-2250	C3	18-26	S3
نامناسب Unsuitable	>2250	C4	>26	S4

طبقه‌بندی و پایش زمانی-مکانی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت...

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس

Table 2- Quality classification of agricultural water based on the Wilcox method

کیفیت آب Water Quality	نوع کیفیت آب برای کشاورزی Water Quality type for agricultural use	طبقه‌بندی Classification
عالی excellent	شیرین- مناسب برای کشاورزی Clean- completely harmless to agricultural	C1S1
خوب good	کمی شور- مناسب برای کشاورزی Slightly Salty- almost suitable for agricultural	C2S1, C2S2, C1S2
متوسط Average	شور- قابل استفاده برای کشاورزی (با تمهیدات لازم) Salty- for agricultural with the necessary arrangements	C3S3, C3S2, C3S1, C2S3, C1S3
نامناسب Unsuitable	خیلی شور- نامناسب برای کشاورزی Too Salty- harmful to agricultural	C4S1, C4S2, C4S3, C4S4, C3S4, C2S4, C1S4

طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب
آب آشامیدنی باید فاقد رنگ، بو و طعم و به لحاظ عناصر و مواد شیمیایی موجود در آن در محدوده مجاز باشد که سازمان‌های بهداشتی تعیین کرده است. در گزارش‌های هیدرولوژی برای طبقه‌بندی آب از نظر شرب معمولاً از طبقه‌بندی شولر استفاده می‌شود.
شرب، با استفاده از طبقه‌بندی و نمودار شولر، میزان سختی کل منابع آب و میزان کل جامدات محلول (TDS) است که پارامتر بسیار مؤثری در ایجاد طعم آب آشامیدنی است. در روش طبقه‌بندی شولر، آب‌ها را به شش طبقه خوب، قابل قبول، متوسط، نامناسب، کاملاً نامناسب و غیرقابل شرب تقسیم می‌کنند که در جدول (۳) ارائه شده است
مهم‌ترین معیارهای کیفی برای طبقه‌بندی آب از نظر (Schoeller, 1962).

جدول ۳- طبقه‌بندی کیفیت آب آشامیدنی بر اساس روش شولر

Table 3- Quality classification of drinking water based on the Schuller method

کیفیت آب Water Quality	TDS (mg/L)	TH (mg/L)
خوب Good	<500	<250
قابل قبول Acceptable	500-1000	250-500
متوسط Average	1000-2000	500-1000
نامناسب Inappropriate	2000-4000	1000-2000
کاملاً نامناسب Completely inappropriate	4000-8000	2000-4000
غیر قابل شرب Undrinkable	>8000	>4000

طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر صنعت
مهم‌ترین پارامتر تعیین کیفیت آب برای مصارف صنعتی، بررسی مسئله خوردگی و رسوب‌گذاری در شبکه‌های آبرسانی و تاسیسات صنعتی است (Crittenden *et al.*, 2012). به منظور تعیین کیفیت آب از نظر پایداری، شاخص‌های مختلفی پیشنهاد شده‌است که مهم‌ترین آنها شاخص لائزلیه است. این شاخص از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:
$$LSI = pH_s - pH_m \quad (6)$$

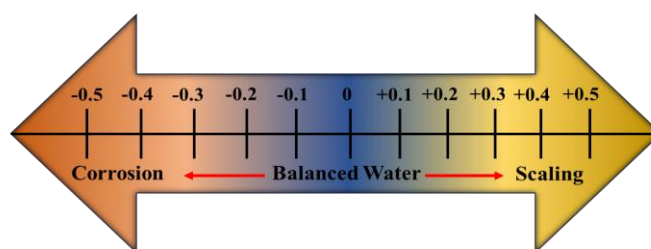
در این رابطه، pH_s و pH_m به ترتیب مقدار pH در حالت اشباع از کربنات کلسیم و اسیدیته واقعی آب است. بر اساس

شاخص لانژلیه، اگر مقدار شاخص منفی باشد آب خاصیت خوردندگی دارد و اگر مثبت باشد آب خاصیت رسوب‌گذاری دارد و چنانچه برابر صفر باشد آب پایدار یا متعادل محسوب می‌شود که در جدول (۴) و شکل (۳) ارائه شده است (Sunkari et al., 2019).

جدول ۴- طبقه‌بندی کیفیت آب صنعتی بر اساس شاخص لانژلیه

Table 4- Quality classification of industrial water based on the Langelier Saturation Index

کیفیت آب Water Quality	شاخص لانژلیه Langelier Saturation Index (LSI)
خورنده Corrosion	$0 < \text{SI}$
آب متعادل یا پایدار Balanced Water	$\text{SI} = 0$
رسوب‌گذار Scaling	$\text{SI} > 0$



شکل ۳- شاخص لانژلیه

Fig. 3- Langelier Saturation Index

بررسی نمودارهای پایپر آب زیرزمینی دشت قزوین در پنج دوره زمانی ۱۴۰۰-۱۳۸۰ روند نگران‌کننده تخریب کیفیت آبخوان را طی دو دهه به روشنی نشان می‌دهد. در سال ۱۳۸۰ آبخوان دشت قزوین وضعیت نسبتاً مطلوبی داشته است. اکثر نمونه‌ها تیپ و رخساره کلسیم-بی‌کربناته را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده آب‌های تازه، کم‌عمق و با کیفیت مناسب برای مصارف شرب و کشاورزی است. پراکندگی نمونه‌ها محدود است و تنوع رخساره‌ای کم مشاهده می‌شود. غلبه کلسیم در کاتیون‌ها و بی‌کربنات در آنیون‌ها بیانگر فرآیندهای طبیعی انحلال کربنات‌ها و تغذیه مناسب آبخوان است. در سال ۱۳۸۵، تغییرات اولیه آغاز گردید و برخی نمونه‌ها از تیپ و رخساره کلسیم-بی‌کربناته به سمت کلسیم-سولفات حرکت کرده‌اند. پراکندگی نمونه‌ها کمی افزایش یافته است و تعداد محدودی از نمونه‌ها به سمت رخساره‌های شورتر گرایش نشان داده‌اند. این تغییرات

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی

به منظور تحلیل مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین، پهنه‌بندی طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی، شرب و آب صنعتی به ترتیب بر اساس روش ویلکاکس، شولر و شاخص لانژلیه دشت قزوین به تفکیک پنج ساله در بازه زمانی ۱۴۰۰-۱۳۸۰ صورت گرفت. برای پهنه‌بندی از روش درون‌یابی کریجینگ در محیط نرم‌افزار GIS استفاده شد.

نتایج و بحث

تیپ و رخساره نمونه‌های کیفی آب زیرزمینی

برای حجیم نشدن مقاله، فقط نمونه‌ای از نمودار پایپر (سال ۱۴۰۰) در شکل (۴) ارائه می‌شود. ضمن اینکه نتایج کامل، تیپ و رخساره آب بر اساس نمودار پایپر در جدول (۵) و روند تغییرات پارامترهای کیفی آب بر اساس نمودار پایپر در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ در جدول (۶) ارائه شده است.

مستمر و بیش از ظرفیت تغذیه از آبخوان که منجر به افت شدید تراز آب زیرزمینی شده است، افزایش زمان ماند آب در آبخوان که باعث شدید شدن فرآیندهای انحلال و تبخیر شده است، تبادل یونی پیشرفته بین آب و سازندهای زمین‌شناسی که باعث تغییر ترکیب شیمیایی آب شده است، نفوذ و برگشت آب‌های کشاورزی شور به آبخوان و احتمال نفوذ آلودگی‌های انسانی و صنعتی. پیامدهای این تخریب کیفیت شامل کاهش شدید حجم آب قابل استفاده برای شرب، محدودیت‌های جدی در بهره‌برداری کشاورزی، افزایش هزینه‌های تصفیه، تهدید امنیت آب و احتمال غیرقابل بازگشت شدن تخریب در صورت ادامه روند فعلی است.

برای مدیریت و بهبود وضعیت آبخوان، برداشتن گام‌های فوری و اساسی ضروری است که شامل این موارد است: کاهش قابل توجه برداشت و برقراری تعادل بین برداشت و تغذیه، کنترل و مدیریت برگشت آب‌های کشاورزی به آبخوان، شناسایی و کنترل منابع آلودگی، افزایش تغذیه مصنوعی آبخوان در مناطق مناسب، تغییر الگوی کشت به محصولات کم‌آب‌بر، استفاده از روش‌های نوین آبیاری و کاهش تلفات آب، پایش مستمر و دقیق کیفیت و کمیت آب زیرزمینی، توسعه منابع آب جایگزین و کاهش وابستگی به آب زیرزمینی ضروری. بدون اتخاذ تصمیمات قاطع و اجرای برنامه‌های جامع مدیریتی، آبخوان دشت قزوین در معرض خطر جدی تخریب غیرقابل بازگشت قرار می‌گیرد که می‌تواند پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری را به دنبال داشته باشد.

اولیه نشان‌دهنده آغاز تأثیر برداشت بیش از حد و کاهش تدریجی تراز آبخوان است.

در سال ۱۳۹۰، تخریب کیفیت به طور معناداری تسریع شده است و این دوره را می‌توان نقطه عطفی در روند کاهش کیفیت دانست. پراکندگی نمونه‌ها به طور چشمگیری افزایش یافته و تنوع رخساره‌ها به شدت بالا رفته است. تعداد قابل توجهی از نمونه‌ها به سمت تیپ و رخساره کلسیم-سولفات و رخساره‌های مختلط حرکت کرده‌اند. ظهور نمونه‌هایی با رخساره سدیم-کلره نشان‌دهنده آغاز شورشدگی جدی آبخوان است. در سال ۱۳۹۵، وضعیت بحرانی آبخوان به وضوح آشکار می‌شود. پراکندگی نمونه‌ها در سراسر نمودار پایپر و تنوع بسیار بالای رخساره‌ها نشان‌دهنده ناهمگنی شدید در کیفیت آب است. تعداد نمونه‌های با رخساره تازه به حداقل رسیده و تعداد نمونه‌های با رخساره‌های شور به طور قابل توجهی افزایش یافته است. حرکت گسترده نمونه‌ها به سمت تیپ و رخساره‌های سدیم-کلره و سدیم-سولفات بیانگر تشدید فرآیندهای تبخیر، تبادل یونی و نفوذ املاح است. در سال ۱۴۰۰، بحران کیفی به اوج خود رسیده است. پراکندگی نمونه‌ها به حداکثر رسیده و تنوع رخساره‌ها کامل شده است. رخساره کلسیم-بی‌کربناته تنها در تعداد بسیار محدودی از نمونه‌ها دیده می‌شود و بخش عمده نمونه‌ها رخساره‌های مختلط و شور را نشان می‌دهند. تعداد قابل توجهی از نمونه‌ها در محدوده رخساره‌های سدیم-کلره و سدیم-سولفات قرار دارند که برای بسیاری از مصارف نامناسب هستند.

تحلیل روند تغییرات در دو دهه نشان می‌دهد که عوامل اصلی مؤثر تخریب کیفیت شامل این موارد است: برداشت

جدول ۵- تیپ و رخساره آب بر اساس نمودار پایپر

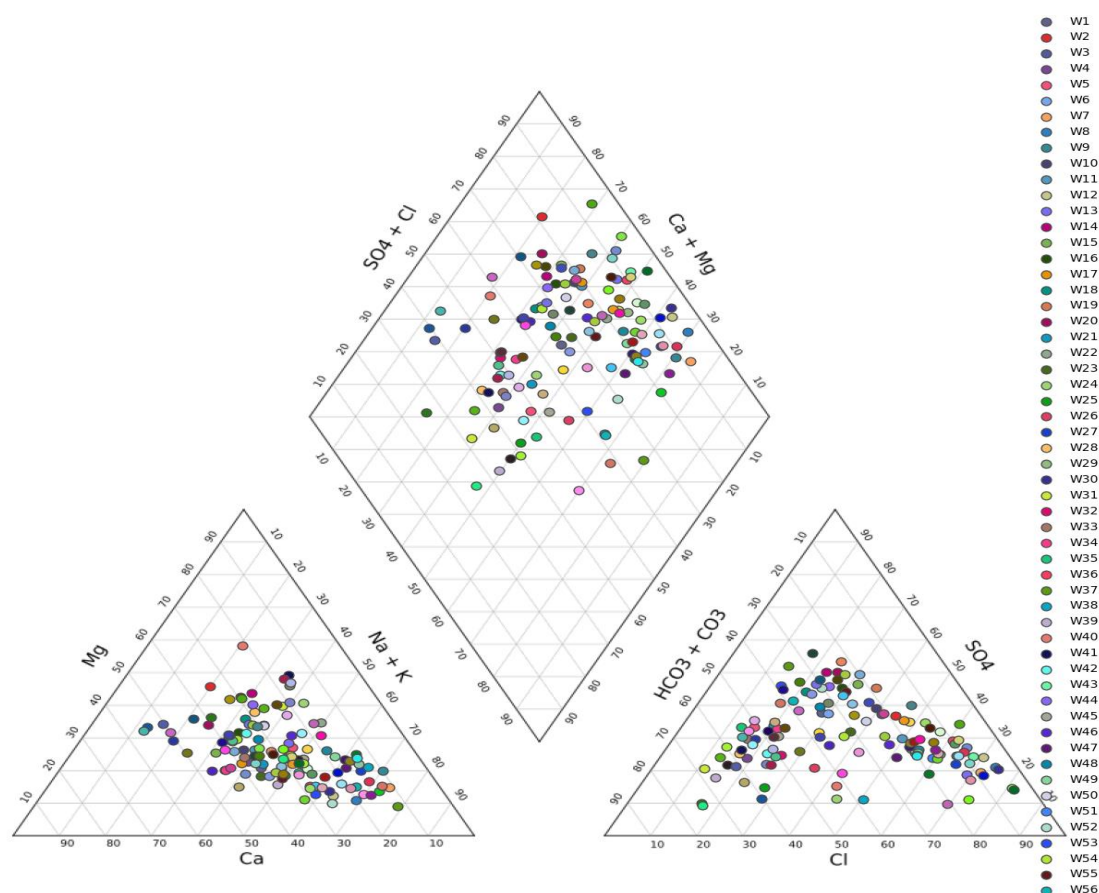
Table 5- Water Type and Facies Based on Piper Diagram

دوره زمانی Time Period	غلظت آنیون‌ها Anion Concentration	غلظت کاتیون‌ها Cation Concentration	تیپ آب Water Type	رخساره آب Water Facies	تیپ و رخساره Type and Facies
2001(۱۳۸۰)	HCO ₃ >SO ₄ >Cl	Ca>Mg>Na+K	بی کربناته Bicarbonate	کلسیت Calcic	کلسیت- بی کربناته Calcium-Bicarbonate
2006(۱۳۸۵)	HCO ₃ >SO ₄ >Cl	Ca>Mg>Na+K	بی کربناته - سولفات Bicarbonate-Sulfate	کلسیت Calcic	کلسیت- بی کربناته - سولفات Calcium-Bicarbonate-Sulfate
2011(۱۳۹۰)	SO ₄ >HCO ₃ >Cl	Ca>Mg>Na+K	سولفات - بی کربناته Sulfate-Bicarbonate	کلسیت Calcic	کلسیت- سولفات- بی کربناته Calcium-Sulfate-Bicarbonate
2016(۱۳۹۵)	SO ₄ >Cl>HCO ₃	Ca>Mg>Na+K	سولفات - کلر Sulfate-Chloride	کلسیت - مختلط Calcic-Mixed	سولفات - کلر - کلسیت - مختلط Calcium-Sulfate-Chloride-Mixed
2021(۱۴۰۰)	SO ₄ >Cl>HCO ₃	Ca>Na>Mg+K	سولفات - کلر Sulfate-Chloride	مختلط - سدیمی Mixed-Sodic	سولفات - کلر - سدیمی - مختلط Mixed-Sodium-Sulfate-Chloride

جدول ۶- روند تغییرات پارامترهای کیفی دشت قزوین

Table 6- Trend of Quality Parameter Changes in Qazvin Plain

پارامتر Parameter	2001(۱۳۸۰)	2006(۱۳۸۵)	2011(۱۳۹۰)	2016(۱۳۹۵)	2021(۱۴۰۰)
کاتیون غالب Dominant Cation	Ca	Ca	Ca	Ca & Mg	Ca, Mg & Na
آنیون غالب Dominant Anion	HCO ₃	HCO ₃ & SO ₄	SO ₄ & Cl	SO ₄ & Cl	SO ₄ & Cl
پراکندگی نمونه‌ها Sample Distribution	محدود Limited	نسبتاً محدود Relatively Limited	متوسط Moderate	گسترده Extensive	بسیار گسترده Very Extensive
تنوع رخساره‌ای Facies Diversity	کم Low	متوسط Moderate	بالا High	خیلی بالا Very High	حداکثر Maximum
نمونه‌های کیفیت خوب Good Quality Samples	بالا High (>35)	متوسط Moderate (25-30)	کم Low (15-20)	خیلی کم Very Low (<10)	خیلی کم Very Low (<5)
درصد رخساره شور Saline Facies (%)	خیلی کم Very Low (<5%)	کم Low (5-10%)	متوسط Moderate (10-20%)	قابل توجه Considerable (20-30%)	بالا High (>30%)
وضعیت کیفی Quality Status	مطلوب Satisfactory	نسبتاً مطلوب Relatively Good	نگران‌کننده Concerning	بحرانی Critical	بسیار بحرانی Highly Critical



شکل ۴- تیپ و رخساره آب بر اساس نمودار پایپر (۱۴۰۰)

Fig. 4- Water Type and Facies Based on Piper Diagram (2021)

طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی

طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از نظر کشاورزی

۱۷/۹۱ درصد در سال ۱۴۰۰ نشان می‌دهد که معادل کاهش ۲۹ درصد در دو دهه اخیر است. در مقابل، سهم نمونه‌های با کیفیت متوسط که نیاز به مدیریت‌های ویژه آبیاری و محدودیت‌هایی در انتخاب نوع محصول دارند، از ۴۶/۴۶ درصد به ۵۸/۹۵ درصد افزایش یافته است. نمونه‌های نامناسب که تنها برای گیاهان بسیار متحمل به شوری و با سیستم‌های زهکشی پیشرفته قابل استفاده هستند، نوسان‌هایی بین ۲۳/۱۴ تا ۳۳/۳۳ درصد داشته‌اند. طبقات متوسط و نامناسب در مجموع حدود ۷۵ تا ۹۲ درصد نمونه‌ها را شامل می‌شوند که هشدار جدی برای آینده کشاورزی منطقه است و ضرورت اتخاذ راهکارهای مدیریتی فوری از جمله بهبود کارایی مصرف آب، توسعه سیستم‌های زهکشی، تغییر الگوی کشت به سمت محصولات کم‌آب‌بر و متحمل به شوری، و کنترل برداشت بی‌رویه از آبخوان را آشکار می‌سازد.

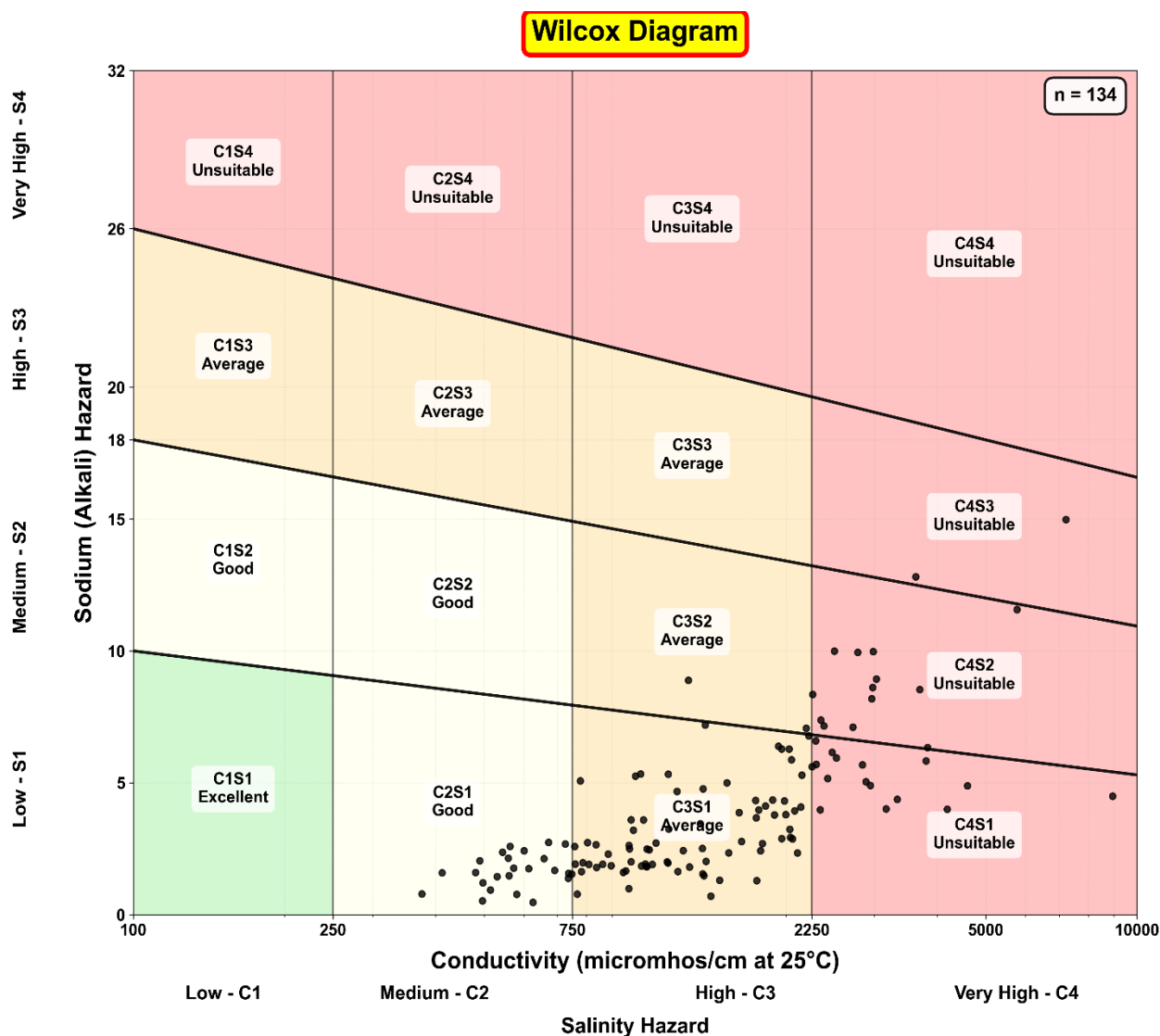
برای حجیم نشدن مقاله، فقط نمونه‌ای از نمودار ویلکاکس (سال ۱۴۰۰) در شکل (۵) ارائه می‌شود. ضمن اینکه نتایج کامل، درصد توزیع کلاس‌های کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی بر اساس طبقه‌بندی ویلکاکس در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول (۷) نشان‌دهنده روند نامطلوب تخریب کیفی منابع آب برای مصارف کشاورزی در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ است. نتایج حاکی از آن است که در این دوره بیست‌ساله، هیچ نمونه آب در طبقه عالی قرار نگرفته است که این امر بیانگر فقدان کامل منابع آب با کیفیت مطلوب در منطقه است. درصد نمونه‌های با کیفیت خوب که برای آبیاری اکثر محصولات کشاورزی مناسب هستند، روندی نزولی و نگران‌کننده را از ۲۵/۲۵ درصد در سال ۱۳۸۰ به

جدول ۷- درصد هر یک از طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس

Table 7- Percentage of each the Quality classification of agricultural water based on the Wilcox method

دوره زمانی Time Period	عالی excellent	خوب good	متوسط Average	نامناسب Unsuitable
	C1S1	C2S1, C2S2, C1S2	C3S3, C3S2, C3S1, C2S3, C1S3	C4S1, C4S2, C4S3, C4S4, C3S4, C2S4, C1S4
2001(۱۳۸۰)	0	25.25	46.46	28.28
2006(۱۳۸۵)	0	27.37	47.37	25.17
2011(۱۳۹۰)	0	19.79	46.88	33.33
2016(۱۳۹۵)	0	19.18	46.58	34.25
2021(۱۴۰۰)	0	17.91	58.95	23.14



شکل ۵- طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس (۱۴۰۰)

Fig. 5- Quality classification of agricultural water based on the Wilcox diagram (2021)

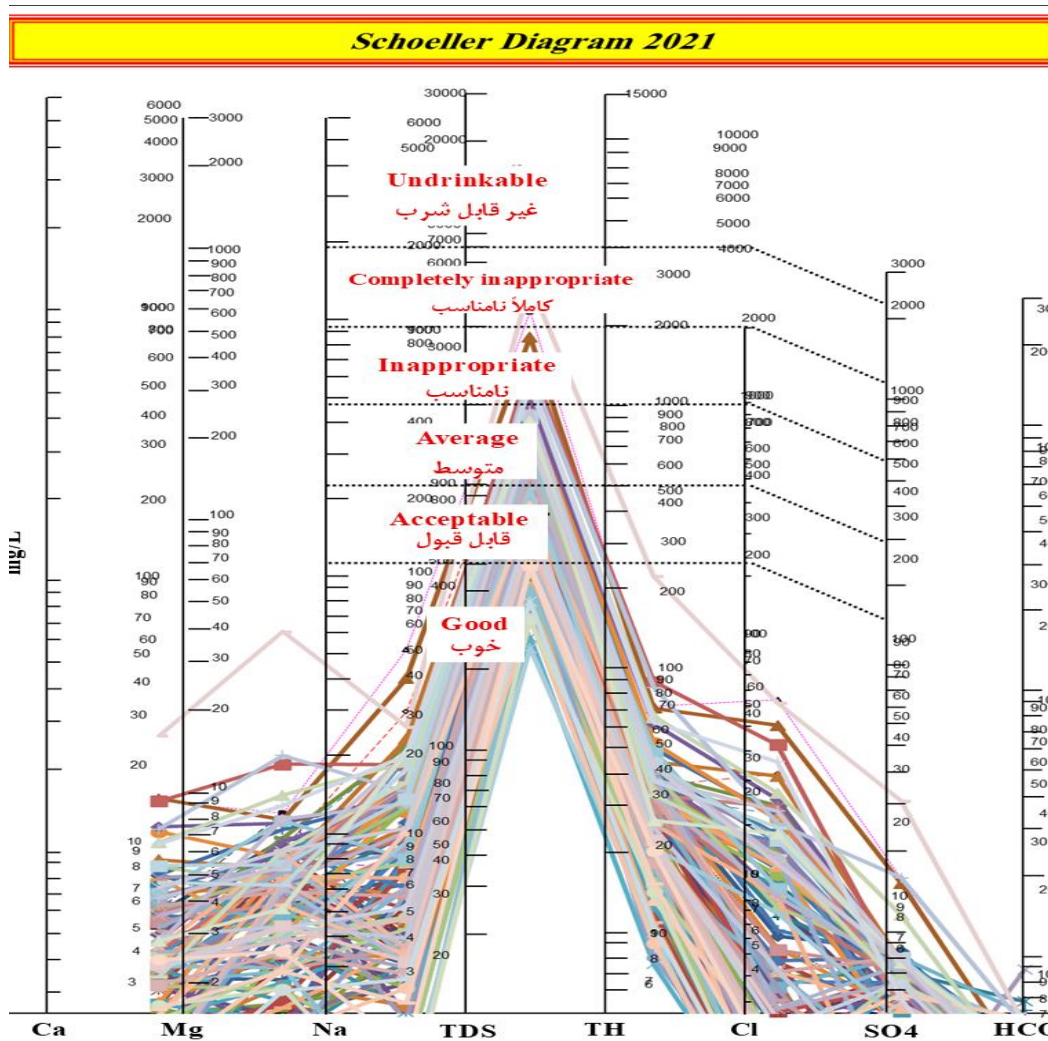
طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از نظر شرب
 برای حجیم نشدن مقاله، فقط نمونه‌ای از نمودار شولر (سال ۱۴۰۰) در شکل (۶) ارائه می‌شود. ضمن اینکه نتایج کامل، درصد توزیع کلاس‌های کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب بر اساس طبقه‌بندی شولر در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ در جدول (۸) ارائه شده است.

در جدول (۸) کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین از نظر شرب در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ نشان می‌دهد که از نظر TDS، وضعیت نسبتاً پایدار است و حدود ۷۰ درصد نمونه‌ها در دسته‌های خوب تا متوسط قرار دارند، اما آب‌های با کیفیت خوب از ۲۹ درصد به ۲۲ درصد کاهش یافته و نگران‌کننده‌تر، طبقه کاملاً نامناسب از صفر در سال ۱۳۸۰ به ۲/۷۴ درصد در ۱۳۹۵ افزایش یافته است. از نظر سختی کل (TH)، وضعیت بدتر است و آب‌های با کیفیت خوب کاهش شدیدی از ۳۹ درصد به ۲۴ درصد داشته‌اند، در حالی که آب‌های قابل قبول به ۴۴ درصد در سال ۱۴۰۰ افزایش یافته‌اند. طبقه کاملاً نامناسب در TH نیز از صفر به ۱/۳۷ درصد در سال ۱۳۹۵ ظهور کرده است. به طور کلی، هر دو معیار TDS و TH روند کاهش تدریجی کیفیت آب را نشان می‌دهند، به‌طوری‌که آب‌های با کیفیت خوب کاهش و آب‌های با کیفیت متوسط و نامناسب افزایش یافته‌اند. ظهور و افزایش طبقات کاملاً نامناسب در هر دو شاخص، هشدار جدی درباره تخریب منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شود و نیازمند راهبردهای مدیریتی فوری است.

جدول ۸- درصد هر یک از طبقه بندی کیفیت آب شرب بر اساس روش شولر

Table 8- Percentage of each the Quality classification of drinking water based on the Schuller method

TDS						
دوره زمانی Time Period	خوب Good	قابل قبول Acceptable	متوسط Average	نامناسب Inappropriate	کاملاً نامناسب Completely inappropriate	غیر قابل شرب Undrinkable
2001(۱۳۸۰)	29.29	30.3	33.33	7.07	0	0
2006(۱۳۸۵)	27.37	26.32	41.05	5.26	0	0
2011(۱۳۹۰)	20.83	32.29	36.46	9.38	1.04	0
2016(۱۳۹۵)	20.55	27.4	38.36	10.96	2.74	0
2021(۱۴۰۰)	22.39	34.33	35.07	6.72	1.49	0
TH						
2001(۱۳۸۰)	39.39	36.36	23.23	1.01	0	0
2006(۱۳۸۵)	38.95	40.00	20.00	1.05	0	0
2011(۱۳۹۰)	27.08	29.17	39.58	4.17	0	0
2016(۱۳۹۵)	24.66	35.62	34.25	4.11	1.37	0
2021(۱۴۰۰)	23.88	44.03	27.61	3.73	0.75	0



شکل ۶- طبقه‌بندی کیفیت آب شرب بر اساس نمودار شولر (۱۴۰۰)

Fig. 6- Quality classification of drinking water based on the Schuller diagram (2021)

برای مصارف صنعتی است، تنها ۱ تا ۶/۷ درصد نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد و روند پایدار ندارد. تغییر از آب با خاصیت خوردگی به سمت آب با خاصیت رسوب‌گذاری نشان‌دهنده تغییر در ترکیب شیمیایی آب و افزایش غلظت املاح است. با توجه به اینکه بیش از ۹۳ درصد آب‌های منطقه در دسته‌های خوردگی یا رسوب‌گذاری قرار دارند، استفاده از این آب‌ها برای کاربردهای صنعتی بدون تصفیه و تنظیم شیمیایی مناسب، می‌تواند باعث ایجاد خسارت‌های جدی به لوله‌ها، تجهیزات و سیستم‌های صنعتی شود و نیازمند برداشتن گام‌های مدیریتی و تصفیه‌ای است.

طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از نظر صنعت جدول (۹) توزیع کلاس‌های کیفیت آب زیرزمینی را از نظر صنعت بر اساس شاخص لانژلیه در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ نشان می‌دهد. این جدول تغییرات قابل توجهی در خصوصیات شیمیایی آب در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ نشان می‌دهد. آب با پتانسیل خوردگی که غالب‌ترین نوع است، از ۹۶/۹۷ درصد در سال ۱۳۸۰ به ۷۰/۱ درصد در سال ۱۴۰۰ کاهش یافته است، در حالی که آب با پتانسیل رسوب‌گذاری افزایش چشمگیری (افزایش بیش از ۱۰ برابر) از ۲/۰۲ درصد به ۲۳/۱ درصد داشته است. آب متعادل که ایده‌آل‌ترین حالت

جدول ۹- درصد هر یک از طبقه‌بندی کیفیت آب صنعتی بر اساس شاخص لانگیلر

Table 9- Percentage of each the Quality classification of industrial water based on the Langelier Saturation Index

دوره زمانی Time Period	خورنده Corrosion	آب پایدار Balanced Water	رسوب‌گذار Scaling
2001(۱۳۸۰)	2.02	1.01	96.97
2006(۱۳۸۵)	3.16	2.11	94.74
2011(۱۳۹۰)	20.83	5.21	74.00
2016(۱۳۹۵)	13.7	1.4	84.9
2021(۱۴۰۰)	23.1	6.7	70.1

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی

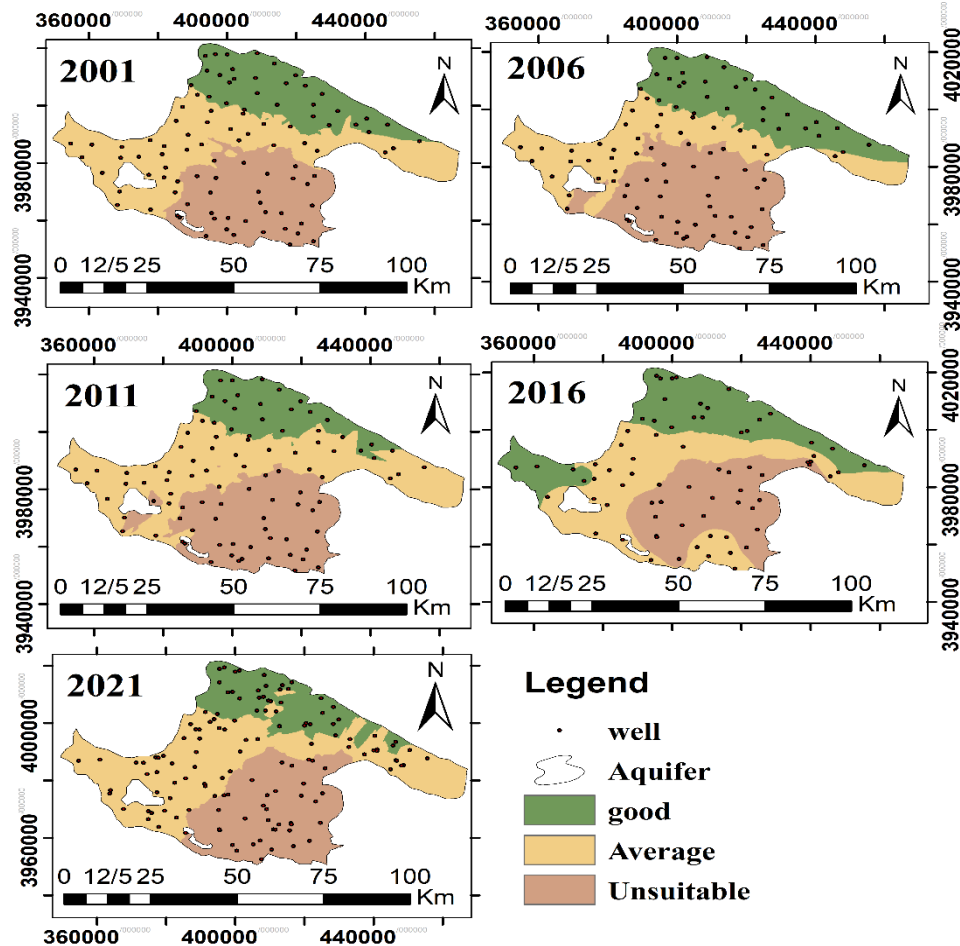
پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی

بخش‌های مرکزی و جنوبی دشت ثابت مانده یا گسترش یافته‌اند. در نقشه سال ۱۴۰۰، تنها بخش‌های کوچکی از شمال و شمال شرق دشت دارای کیفیت خوب باقی مانده‌اند و غالب سطح آبخوان به مناطق با کیفیت متوسط و نامناسب تبدیل شده است. الگوی مکانی تخریب نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی و جنوبی دشت که احتمالاً با افزایش فعالیت‌های کشاورزی و فشرده‌تر، برداشت بیشتر آب و عوامل زمین‌شناسی و وجود مناطق بایر و شوره‌زار روبه‌رو بوده‌اند همواره وضعیت بدتری داشته‌اند، در حالی که مناطق شمالی به دلیل تغذیه بهتر و فشار کمتر برداشت، کیفیت نسبتاً بهتری را حفظ کرده‌اند. این تغییرات مکانی-زمانی بیانگر ضرورت اتخاذ راهبردهای مدیریتی متفاوت برای نواحی مختلف دشت و توجه ویژه به حفاظت از مناطق شمالی با کیفیت بهتر و بازسازی و احیای مناطق مرکزی و جنوبی با کیفیت نامناسب است.

تغییرات مکانی، زمانی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی بر اساس طبقه‌بندی ویلکاکس به تفکیک پنج ساله در بازه زمانی ۱۳۸۰-۱۴۰۰ در شکل (۷) نشان داده شده است.

نقشه‌های توزیع مکانی-زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین روند تخریب تدریجی و گسترش مکانی را نشان می‌دهند. در سال ۱۳۸۰، مناطق شمالی و شمال شرقی دشت که با رنگ سبز نمایش داده شده‌اند، کیفیت خوب برای آبیاری داشته‌اند. در سال ۱۳۸۵، مشاهده می‌شود که مساحت مناطق با کیفیت خوب کاهش یافته و مناطق با کیفیت متوسط (رنگ خردلی) به سمت شمال گسترش پیدا کرده‌اند. این روند در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۵ تشدید شده است و مناطق سبز رنگ به طور محسوسی محدودتر شده‌اند، در حالی که نواحی با کیفیت نامناسب (رنگ قهوه‌ای) در

Quality classification of agricultural water (Wilcox)

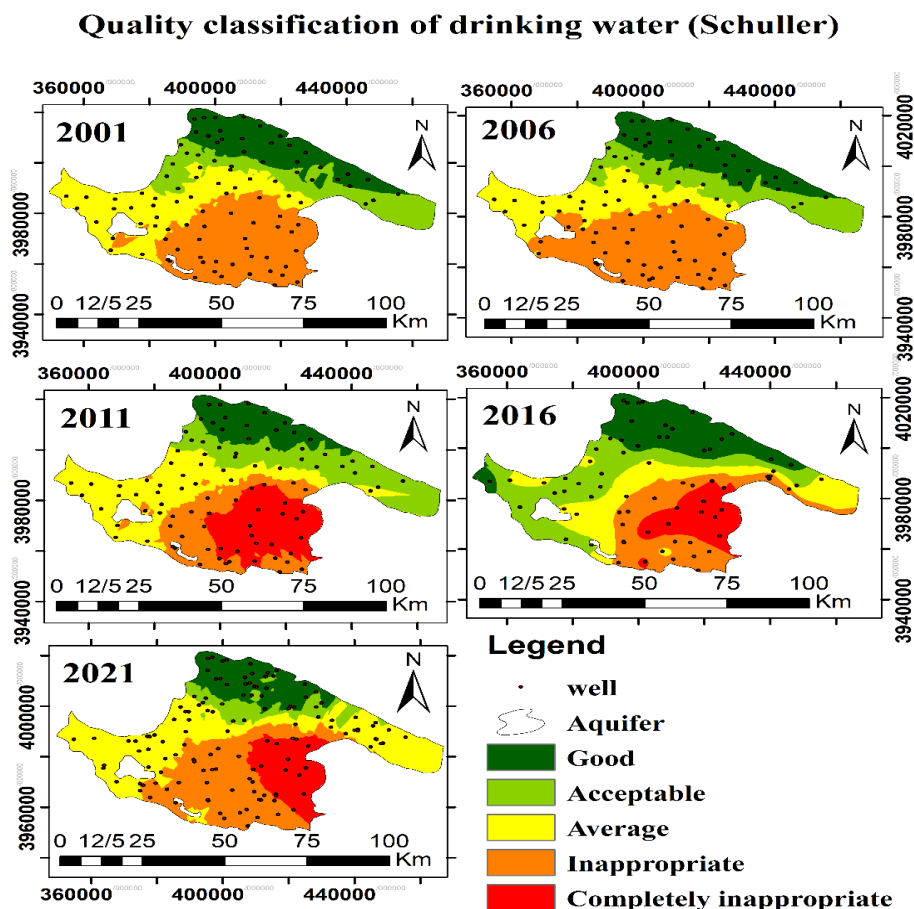


شکل ۷- نقشه تغییرات مکانی و زمانی طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس

Fig. 7- The spatial and temporal variations map of the Quality classification of agricultural water based on the Wilcox method

جنوب ظاهر شده‌اند و به سرعت گسترش یافته‌اند. در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۴۰۰، این مناطق قرمز رنگ به طور چشمگیری به سمت مرکز آبخوان پیشروی کرده‌اند و در ۱۴۰۰ تقریباً نیمی از بخش جنوبی و مرکزی را پوشانده و به بزرگ‌ترین مساحت خود رسیده‌اند، در حالی که فقط بخش شمالی کیفیت نسبتاً خوب خود را حفظ کرده است. این روند نزولی شدید احتمالاً ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، تغییرات اقلیمی یا ورود آلاینده‌هاست و نیاز فوری به مدیریت و کنترل برداشت را به‌ویژه در بخش جنوبی آبخوان نشان می‌دهد.

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب تغییرات مکانی، زمانی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی (TDS) از نظر شرب بر اساس طبقه‌بندی شولر به تفکیک پنج ساله در بازه زمانی ۱۳۸۰-۱۴۰۰ در شکل (۸) نشان داده شده است. نقشه‌های توزیع مکانی-زمانی کیفیت آب زیرزمینی (TDS) دشت قزوین روند تخریب شدید و پیشرونده‌ای را آشکار می‌کنند. در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۵، بخش شمالی آبخوان دارای کیفیت خوب تا قابل قبول بوده‌است و تنها بخش جنوبی کیفیت نامناسب داشته‌است، اما از سال ۱۳۹۰ به بعد، مناطق یا کیفیت کاملاً نامناسب (قرمز رنگ) در



شکل ۸- نقشه تغییرات مکانی و زمانی طبقه‌بندی کیفیت آب شرب بر اساس روش شولر

Fig. 8- The spatial and temporal variations map of the Quality classification of drinking water based on the Schuller method

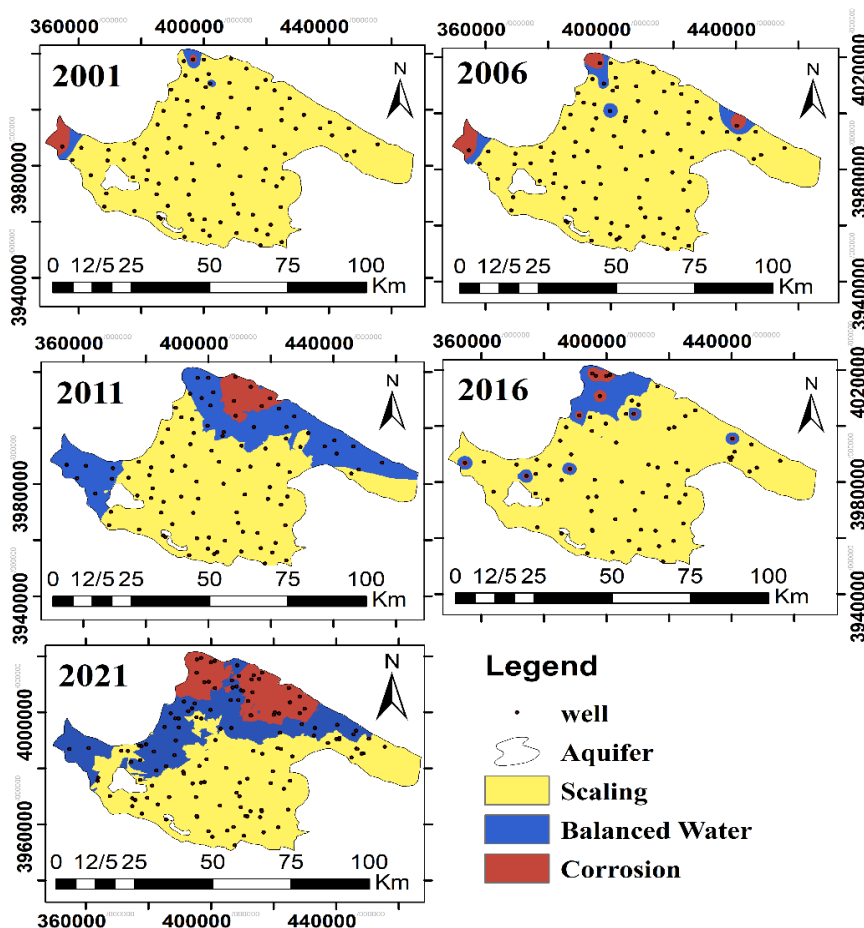
یافته‌اند. این وضعیت هرچند در سال ۱۳۹۵ کمی کاهش یافته اما در سال ۱۴۰۰ به‌طور چشمگیری گسترش پیدا کرده است. وضعیت در سال ۱۴۰۰ بدترین سناریو را نشان می‌دهد، زیرا همزمان هم مناطق رسوب‌گذار (جنوب و شرق) و هم مناطق خورنده (شمال و مرکز) وجود دارند که هر دو برای صنایع مشکل‌ساز هستند. در واقع، رسوب‌گذاری باعث انسداد لوله‌ها و خوردگی باعث تخریب فلزات و تجهیزات می‌شود و نیازمند آن‌اند که پیش از استفاده شدن تصفیه شوند. این تغییرات احتمالاً ناشی از تغییرات pH، دما یا ترکیب شیمیایی آب است و نیاز فوری به بررسی دلایل و مدیریت کیفیت آب برای حفاظت از زیرساخت‌های صنعتی را نشان می‌دهد.

پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر صنعت

تغییرات مکانی، زمانی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر صنعت بر اساس شاخص لانتزلیه به تفکیک پنج ساله در بازه زمانی ۱۳۸۰-۱۴۰۰ در شکل (۹) نشان داده شده است.

نقشه‌های توزیع مکانی-زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین روند تخریب شدید و نگران‌کننده‌ای را آشکار می‌کنند. در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۵، تقریباً کل آبخوان در وضعیت رسوب‌گذاری (زرد رنگ) بوده که پتانسیل تشکیل رسوب کربنات کلسیم در لوله‌ها و تجهیزات صنعتی را داشته است. از سال ۱۳۹۰ تغییر اساسی آغاز شده است و مناطق در وضعیت آب متعادل (آبی رنگ) و وضعیت خوردگی (زرشکی رنگ) در بخش‌های شمالی و غربی گسترش

Quality classification of industrial water (LSI)



شکل ۹- نقشه تغییرات مکانی و زمانی طبقه‌بندی کیفیت آب صنعتی بر اساس شاخص لانژلیه

Fig. 9- The spatial and temporal variations map of the Quality classification of industrial water based on the Langelier Saturation Index

نتیجه‌گیری

دارد، تعداد چاه‌های پایش و پراکنش آن‌ها مناسب است و کیفیت آب زیرزمینی و مشکلات آن در این دشت قابل تامل است. در گام اول پژوهش، داده‌های کیفیت آب زیرزمینی جمع‌آوری گردید و پیش‌پردازش روی داده‌های کیفیت آب زیرزمینی آبخوان دشت قزوین صورت گرفت. در گام دوم پژوهش تیپ و رخساره نمونه‌های کیفی آب زیرزمینی با استفاده از نمودار پایپر تعیین گردید. در گام سوم پژوهش، طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ کشاورزی با توجه طبقه‌بندی ویلکاکس، طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ شرب با توجه طبقه‌بندی شولر و طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی از لحاظ صنعت با توجه شاخص لانژلیه به‌اجرا در

تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی یکی از دغدغه‌های اصلی مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. شناخت ویژگی‌های کیفی آب زیرزمینی برای مدیریت و حفاظت از منابع آب امری ضروری به‌نظر می‌رسد و بنابراین هدف از این تحقیق، طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی، شرب و صنعت و بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی، شرب و صنعت در نظر گرفته شد.

دشت قزوین از آن رو انتخاب شد که یکی از دشتهای مهم کشاورزی است، وابستگی شدید به آب‌های زیرزمینی

بیش از ۹۰ درصد افزایش یافته است. این روند تخریبی، که به ویژه در نواحی مرکزی و جنوبی دشت شدیدتر است، ضرورت اتخاذ راهبردهای مدیریتی تفکیک‌شده را از طریق کنترل برداشت، تغییر الگوی کشت و توسعه سیستم‌های زهکشی پیشرفته برای حفاظت از مناطق شمالی با کیفیت نسبتاً بهتر و احیای آبخوان در بخش‌های آسیب‌دیده ضروری می‌سازد.

از نظر آب شرب، در مناطق شمالی آب‌های با کیفیت خوب از ۲۹ تا ۳۹ درصد به ۲۲ تا ۲۴ درصد کاهش یافته است و از سال ۱۳۹۰ مناطق کاملاً نامناسب در جنوب ظاهر شده‌اند که این وضعیت نشان می‌دهد مناطق جنوبی برای مصرف شرب مستقیم نامناسب‌اند و نیازمند تصفیه هستند. از نظر صنعتی، آب متعادل که ایده‌آل‌ترین حالت است، تنها ۱ تا ۶/۷ درصد نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد. بیش از ۹۳ درصد آب‌های دشت در دسته‌های خوردگی یا رسوب‌گذاری قرار دارند که هر دو برای صنایع مشکل‌ساز هستند و به ترتیب باعث خوردگی تجهیزات فلزی یا گرفتگی و رسوب در لوله‌ها می‌شوند.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد دشت قزوین با چالش‌های جدی کیفی در منابع آب زیرزمینی خود مواجه است. الگوی مکانی به طور مشخص نشان می‌دهد که آلودگی و تخریب کیفیت از جنوب به شمال در حال پیشروی است و مناطق شمالی کیفیت نسبتاً بهتری دارند اما در معرض خطر تخریب تدریجی هستند. روند کلی در هر سه کاربری (شرب، کشاورزی و صنعت) حاکی از افزایش شوری، سختی و تغییرات شیمیایی نامطلوب است که ناشی از برداشت بی‌رویه، کاهش تغذیه آبخوان، و احتمالاً نفوذ آب‌های شور یا آلوده است. این وضعیت نیازمند راهبردهای فوری و جامع مدیریتی شامل کنترل برداشت، افزایش تغذیه مصنوعی، تصفیه آب‌های برگشتی کشاورزی و جلوگیری از گسترش بیشتر آلودگی به سمت شمال است. بدون اتخاذ تدبیرهای اساسی، پایداری منابع آب زیرزمینی دشت قزوین در آینده نزدیک به شدت تهدید خواهد شد.

آمد. در گام چهارم پژوهش، به منظور تحلیل مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین، نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر کشاورزی بر اساس روش ویلکاکس، پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب بر اساس روش شولر و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی از نظر صنعت بر اساس شاخص لانژلیه تهیه گردید.

بررسی نمودارهای پایپر در پنج دوره زمانی نشان داد که دشت قزوین در دو دهه اخیر (۱۴۰۰-۱۳۸۰) با تخریب شدید کیفیت آب زیرزمینی همراه بوده است. تحول رخساره‌ها از حالت غالب کلسیم-بی‌کربناته در سال ۱۳۸۰ به رخساره‌های مختلط و شور با غلبه سدیم-کلره و سدیم-سولفات در سال ۱۴۰۰، همراه با افزایش چشمگیر پراکندگی و تنوع رخساره‌ها، و کاهش چشمگیر نمونه‌های با کیفیت مناسب همگی هشدارهای جدی برای آینده منطقه هستند. این وضعیت بیانگر وقوع فرآیندهای مخرب شامل برداشت بیش از حد، تبادل یونی و نفوذ املاح است. نتایج به‌دست آمده هشدار می‌دهد که ضرورت اتخاذ راهبردهای فوری مدیریتی برای جلوگیری از تخریب غیرقابل بازگشت آبخوان، زیرا ادامه روند فعلی می‌تواند منجر به بحران آب و پیامدهای جبران‌ناپذیر اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی در منطقه گردد.

بر اساس ارزیابی جامع طبقه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین در دوره ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ از سه نظر کشاورزی، شرب و صنعتی، وضعیت منابع آب زیرزمینی روند نگران‌کننده‌ای از تخریب کیفیت را نشان می‌دهد. از نظر توزیع مکانی، یک الگوی مشترک در هر سه کاربری (کشاورزی، شرب و صنعت) مشاهده می‌شود که مناطق شمالی و شمال شرقی دارای بهترین کیفیت‌اند، در حالی که مناطق جنوبی و جنوب شرقی با بدترین کیفیت مواجه هستند و روند تخریب از جنوب به شمال در حال پیشروی است.

از نظر کشاورزی، مناطق با کیفیت خوب از بخش‌های شمالی و شمال شرقی به سمت محدودیت شدید پیش رفته و سهم آب‌های با کیفیت متوسط و نامناسب از ۷۵ درصد به

تشکر و قدردانی

نویسندگان از سردبیر و دو داور ناشناس به خاطر نظرات و بازخوردهای ارزشمندشان که به طور قابل توجهی کیفیت مقاله را بهبود بخشیده است صمیمانه سپاسگزارند. همچنین از شرکت سهامی آب منطقه‌ای قزوین به خاطر فراهم آوردن داده‌های مورد نیاز برای این پژوهش، قدردانی می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تألیف و انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور مساوی در تعریف مسأله و نگارش پیش‌نویس اصلی و متن نهایی مشارکت داشتند. ش.آ.ر، روش‌شناسی، پیشینه تحقیق و گردآوری داده‌ها و تهیه پیش‌نویس نتایج اولیه را انجام داده است. ا.ا. و م.خ. نظارت بر اجرای پروژه و اعتبارسنجی نتایج را انجام داده‌اند. امکانات لازم برای انجام کار توسط م.خ. فراهم شده است. ا.ا. و م.خ. مسئولیت بازبینی نهایی و ویرایش متن را به صورت مشترک انجام داده‌اند. نسخه منتشر شده از مقاله، مورد تأیید هر سه نویسنده است.

منابع

- Abu-Khalaf, N., Khayat, S., & Natsheh, B. (2013). Multivariate Data Analysis to Identify the Groundwater Pollution Sources in Tulkarm Area / Palestine. In Science and Technology (Vol. 3, Issue 4, pp. 99–104). <https://doi.org/10.5923/j.scit.20130304.01>
- Amini, H., Ashrafzadeh, A., & Khaledian, M. (2024). Enhancing groundwater salinity estimation through integrated GMDH and geostatistical techniques to minimize Kriging interpolation error. *Earth Science Informatics*, 17(1), 283–297. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01157-7>
- Amiri-Bourkhani, M., Khaledian, M. R., Ashrafzadeh, A., & Shahnazari, A. (2017). The temporal and spatial variations in groundwater salinity in mazandaran plain, Iran, during a long-term period of 26 years. *Geofizika*, 34(1). <https://doi.org/10.15233/gfz.2017.34.4>
- Azadeh Ranjbar, S. (2025). Groundwater Management Framework Based on Artificial Intelligence. University of Tehran.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe, K. J., & Tchobanoglous, G. (2012). *MWH's water treatment: principles and design* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- El Bilali, A., Taleb, A., & Brouziyne, Y. (2021). Groundwater quality forecasting using machine learning algorithms for irrigation purposes. *Agricultural Water Management*, 245, 106625. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106625>
- Faraji, Z., Kaviani, A., & Ashrafzadeh, A. (2017). Assessment of GRACE satellite data for estimating the groundwater level changes in Qazvin province. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(2), 463–476. <https://doi.org/10.22059/ije.2017.61482>
- Farnia, E., Ghorbani, K., & Salarijazi, M. (2018). Evaluation of the Empirical Bayesian Kriging method in ground water level zoning. *Water and Soil Conservation*, 25(1), 165–182. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.12528.2723> (in Persian)
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (4th ed.). Prentice-Hall, Inc.
- Fotamy, M. J., Kholghi, M., Abdeh, A., & Roostaei, M. (2023). The Performance of the Evidence Weighting in GIS for Determining the Effective Factors on the Land Subsidence in Qazvin Plain. *Iran-Water Resources Research*, 19(3).
- Gökçekuş, H., Kassem, Y., & Rizza, T. (2025). Groundwater quality assessment for irrigation in coastal region (Güzelyurt), Northern Cyprus and importance of empirical model for predicting groundwater

- quality (electric conductivity). *Environmental Earth Sciences*, 84(8), 224. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12190-8>
- Hussein, E. E., Derdour, A., Zerouali, B., Almaliki, A., Wong, Y. J., Ballesta-de los Santos, M., Minh Ngoc, P., Hashim, M. A., & Elbeltagi, A. (2024). Groundwater Quality Assessment and Irrigation Water Quality Index Prediction Using Machine Learning Algorithms. *Water (Switzerland)*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/w16020264>
- Jalali, M., Karami, S., & Marj, A. F. (2016). Geostatistical Evaluation of Spatial Variation Related to Groundwater Quality Database: Case Study for Arak Plain Aquifer, Iran. *Environmental Modeling & Assessment*, 21(6), 707–719. <https://doi.org/10.1007/s10666-016-9506-6>
- Mahmoudpour, H., Janatrostami, S., & Ashrafzadeh, A. (2023). Optimal Design of Groundwater Quality Monitoring Network Using Aquifer Vulnerability Map. *Water Resources Management*, 37(2), 797–818. <https://doi.org/10.1007/S11269-022-03404-W>
- Mohammed, M. A. A., Szabó, N. P., Mikita, V., & Szűcs, P. (2025). Tracking the spatiotemporal evolution of groundwater chemistry in the Quaternary aquifer system of Debrecen area, Hungary: integration of classical and unsupervised learning methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(11), 6884–6903. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36175-z>
- Mohammed, M. A., Khleel, N. A., Szabó, N. P., & Szűcs, P. (2023). s40808-022-01638-6.pdf. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2), 2501–2516. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01638-6>
- Pappaka, R. K., Somagouni, S. G., Chinthala, K., & Nakkala, A. B. (2024). Appraisal of groundwater quality for suitability of drinking and irrigation purposes of pandameru river basin, anantapur district, AP, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 17(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11827-x>
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Transactions of the American Geophysical Union (Trans. American Geophysical Union)*, 25(6), 914–928.
- Piroozfar, P., Alipour, S., Modabberi, S., & Cohen, D. (2018). Hydrogeochemical investigation and water quality assessment in the Sarough watershed, Takab minig district. *Geosciences*, 106(February), 13–28.
- Salari, M. (2024). Investigating groundwater quality using water quality indicators for drinking, agriculture and industry (Case study: Shiraz plain). *Journal of Environmental Science Studies*, 8(4), 7574–7586. (in Persian)
- Schoeller, H. (1962). *L'eaux souterraines*. Masson.
- Sunkari, E. D., Abu, M., Bayowobie, P. S., & Dokuz, U. E. (2019). Hydrogeochemical appraisal of groundwater quality in the Ga west municipality, Ghana: Implication for domestic and irrigation purposes. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 501–511. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.02.002>
- Torkamanitombeki, H., & Khamchiyan, M. (2025). Investigating the Quality of Surface Water at Hydrometric Stations in the Study Area of Sarni Dam, Minab County, for Various Uses Using Aq.QA Software. *Journal of Environmental Studies*, 50(4), 413–434. <https://doi.org/10.22059/jes.2025.372054.1008479> (in Persian)
- Wilcox, L. (1955). Classification and use of irrigation waters (No. 969). US Department of Agriculture.