



Investigating Temporal and Spatial Changes in Groundwater Pollution in the Yazd-Ardakan Plain Using the Pollution Index of Groundwater (PIG)

Somayeh Soltani Gerdefaramarzi ^{1*}, Zahra Rahmani-Samani ¹

¹ Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resource, Ardakan University, Ardakan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 01 August 2025

Revised: 19 November 2025

Accepted: 24 November 2025

Available Online:

28 November 2025

Keywords:

Groundwater pollution trend

Groundwater Quality Assessment

Pollution Index of Groundwater (PIG)

Groundwater Hydrogeochemistry

Yazd – Ardakan Plain

ABSTRACT

Groundwater is the main source of drinking water in the Yazd–Ardakan plain. As human activities expand, comprehensive quantitative and qualitative evaluations of the aquifer have assumed critical importance in water-resources studies. One of the indicators for evaluating groundwater quality is the Pollution Index of Groundwater (PIG). To investigate the temporal and spatial changes in groundwater quality in the Yazd-Ardakan plain, the PIG index was calculated for the years 2011 and 2021 using water quality data from 27 deep wells within the plain. The parameters included sodium, potassium, calcium, magnesium, chloride, bicarbonate, sulfate, total dissolved solids, salinity, and acidity. The results showed increases in anions, cations, acidity, and salinity, with the average of all chemical parameters except acidity and bicarbonate exceeding the permissible limits recommended by WHO. According to the PIG index in 2011, 51.43% of the total plain area had low and negligible pollution, 9.58% had moderate pollution, 10.83% had high pollution, and 28.16% had very high pollution. Only after ten years, groundwater quality declined so that 24.80% had low and negligible pollution, 23.94% moderate pollution, 9.12% high pollution, and 42.04% very high pollution. In other words, a larger area of the plain fell into the very high pollution category, and the area with low and negligible pollution decreased. According to the results, groundwater quality, especially in the northern and southern parts of the Yazd-Ardakan plain, is in a worse condition compared to other areas of the study region and requires special management and protective measures to improve the quality and quantity of groundwater resources.

* Corresponding author: Somayeh Soltani Gerdefaramarzi

E-mail address: ssoltani@ardakan.ac.ir

How to cite this article: Soltani Gerdefaramarzi, S., & Rahmani-Samani, Z. (2026). Investigating Temporal and Spatial Changes in Groundwater Pollution in the Yazd-Ardakan Plain Using the Pollution Index of Groundwater (PIG). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(1), 114-131. <https://doi.org/10.22067/geoe.2025.94683.1599>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Assessing the health and contamination of groundwater for drinking purposes is of utmost importance because these water resources are a primary source of potable water in many regions worldwide. Groundwater contamination can stem from various factors, including the infiltration of chemicals, microbial pollution, the improper use of fertilizers and agricultural pesticides, and unsanitary wastewater disposal practices, which, if consumed, can lead to various diseases and serious health problems in humans. Therefore, continuous monitoring of groundwater quality and conducting precise tests to identify and control contamination are essential to ensure public health and prevent environmental and health hazards. The Yazd-Ardakan plain, located in the center of the Iranian plateau with a very arid climate and low rainfall, relies primarily on groundwater resources to supply the water needed for the cities located in this plain. Due to excessive extraction and declining water levels, the region's aquifers face challenges such as land subsidence and reduced water quality. The groundwater pollution index is an important indicator in assessing groundwater quality, developed to measure water pollution with the aim of simplifying and standardizing laboratory results. This index is designed to summarize multiple water quality parameters such as pH, anion and cation concentrations, and dissolved solids into a single number, allowing for easy comparison and analysis of pollution levels within a specific range. It was developed in response to the need for quantitative and understandable methods for environmental decision-making and groundwater resource management. The use of composite indices such as PIG has become prevalent in recent decades with the advancement of analytical technologies and the need for rapid assessment of water quality in environmental studies. This index was first proposed by Subba Rao (2012). He showed that potassium, magnesium, calcium, sulfate, sodium, chloride, bicarbonate, as well as total dissolved solids in water and acidity are effective in determining this index. Although this index has been used in many parts of the world to assess groundwater quality, there are few studies in Iran, and those that exist are in the Birjand plain. The aim of this research is to assess the quality of groundwater in the Yazd-Ardakan plain using the PIG index, which has not been evaluated in this region so far. As a result, to investigate the temporal and spatial changes in groundwater quality, zoning maps of each element were drawn using GIS software, the PIG index was calculated for 27 deep wells in the region in 2011 and 2021, and finally, based on the results of the PIG index, the groundwater of the study area was classified in terms of pollution. This comparative information can help to formulate monitoring and management programs for Yazd-Ardakan groundwater resources by considering similar experiences.

Material and Methods

The Yazd-Ardakan Plain is one of the largest plains in Yazd Province. It lies between 53°15' and 54°50' east longitudes and between 31°15' and 32°15' north latitudes. The area of this plain is equal to 11775 square kilometers and includes the cities of Yazd, Ardakan, Meybod, Taft, Askezar and Mehriz. This plain is located in the arid belt of the central plateau of Iran and has an average annual temperature between 12 to 19 degrees Celsius, low and relatively constant relative humidity in the range of 30 to 50 percent, very high evaporation between 220 to 3200 mm per year, and an average annual rainfall of about 107 mm. To conduct this research, registered statistics regarding the water quality of wells in the Yazd-Ardakan plain for the years 2011 and 2021 were initially collected from the Yazd Province Regional Water Company. In this study, to investigate the qualitative parameters of groundwater resources, data from 27 wells with long-term and complete statistical periods and a good distribution in the study area were used, and groundwater quality maps for the years 2011 and 2021 were drawn for each of the chemical variables in the GIS software environment using the IDW interpolation method. The parameters studied in this research include the concentration of anions and cations, calcium, potassium, magnesium, sodium, chloride, bicarbonate, sulfate, acidity, sodium adsorption ratio, total dissolved solids, and electrical conductivity of water.

Results and Discussion

The results indicate that over a 10-year period, the levels of anions and cations, acidity, and salinity have increased, while the quality of the region's groundwater has declined. The average values of all chemical parameters, except for acidity and bicarbonate, exceed the permissible limits recommended by the World Health Organization (WHO). As the zoning results show, the concentration of cations, anions, and salinity in the year 2011 is highest in the north and part of the south of the plain and decreases toward the center of the plain, such that the lowest values are observed in the east, west, and center of the plain. Except for bicarbonate, which shows its highest amount in the east and center of the plain. The highest amounts reported are calcium 478.91, magnesium 283.99, sodium 2600.33, potassium 10.94, chloride 3823.65, bicarbonate 464.82, and sulfate 1998.34 mg per liter, with salinity at 13317.5 micromhos per centimeter. The highest acidity (8.05) and sodium absorption ratio (29.17) are also found in the northern part of the plain. Over the 10-year period, the groundwater quality of Yazd-Ardakan plain shows significant changes, so that the chemical element concentration zoning maps in 2021 compared to 2011 indicate changes. This means that both the maximum values of these parameters have increased, and except for the northern parts and some of the southern plain, the concentration of some elements in the east and center of the basin has also risen. In other words, temporally the groundwater quality of the plain has deteriorated, and spatially, larger areas of the plain have experienced a decline in groundwater quality.

Conclusion

The results of the temporal trend analysis of the PIG index showed that this index has been increasing over time, with a more noticeable increase in the northern part of the plain. Specifically, the well located at Dom Kaftar in the northern area of the plain experienced a significant increase (66%), with the PIG index rising from 6.73 to 11.20. Furthermore, the results indicate that over time, the quality of groundwater in the Yazd-Ardakan plain has deteriorated from the north and south towards the center of the plain. It can be concluded that this decline in quality is attributed to several factors. These include the lowering of the water table due to land use changes and excessive groundwater extraction, alongside a decrease in rainfall and the repeated occurrence of droughts over the 21-year study period.

Acknowledgements

The authors of the article would like to thank the Yazd Regional Water Company for providing the data required for this study.



بررسی تغییرات زمانی و مکانی آلودگی آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان با استفاده از شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG)

سمیه سلطانی گردفرامری^{۱*}، زهرا رحمانی سامانی^۱

^۱ گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳ کلمات کلیدی: روند آلودگی آب‌های زیرزمینی ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG) هیدروژئوشیمی آب‌های زیرزمینی دشت اردکان - یزد	سفره آب زیرزمینی منبع اصلی آب آشامیدنی در دشت یزد - اردکان است که امروزه با گسترش فعالیت‌های انسانی، ارزیابی کیفی و کمی آن جایگاه ویژه‌ای در مطالعات منابع آب دارد. یکی از شاخص‌های ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی، شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG) است که تلفیقی از پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب می‌باشد. به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان، شاخص PIG برای دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ با داده‌های کیفی آب زیرزمینی ۲۷ چاه عمیق در محدوده دشت شامل یون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلر، بی‌کربنات، سولفات و کل مواد جامد محلول، شوری و اسیدپته محاسبه و نقشه پهنه‌بندی شاخص و یون‌ها برای هر دو سال ترسیم شد. نتایج نشان داد که مقدار آنیون‌ها و کاتیون‌ها، اسیدپته و شوری افزایش و میانگین همه پارامترهای شیمیایی به جز اسیدپته و بی‌کربنات از حد مجاز توصیه شده، توسط سازمان جهانی بهداشت (WHO) بیشتر است. طبق شاخص PIG در سال ۱۳۹۰، ۵۱/۴۳ درصد از کل مساحت دشت دارای آلودگی کم و ناچیز، ۹/۵۸ درصد از مناطق دارای آلودگی متوسط، ۱۰/۸۳ درصد دشت دارای آلودگی زیاد و ۲۸/۱۶ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد بوده است و با گذشت یک دهه کیفیت آب زیرزمینی کاهش یافته است؛ به طوری که ۲۴/۸۰ درصد دارای آلودگی کم و ناچیز، ۲۳/۹۴ درصد آلودگی متوسط، ۹/۱۲ درصد آلودگی زیاد و ۴۲/۰۴ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد است. به عبارت دیگر مساحت بیشتری از دشت جزو طبقه آلودگی خیلی زیاد قرار گرفته است و از مساحت منطقه با آلودگی کم و ناچیز کاسته شده است. با توجه به نتایج به دست آمده کیفیت آب زیرزمینی به ویژه در نواحی شمالی و جنوبی دشت یزد- اردکان، وضعیت نامطلوبی نسبت به سایر مناطق محدوده مطالعاتی دارد و نیازمند اقدامات مدیریتی و حفاظتی ویژه‌ای در زمینه بهبود کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

مقدمه

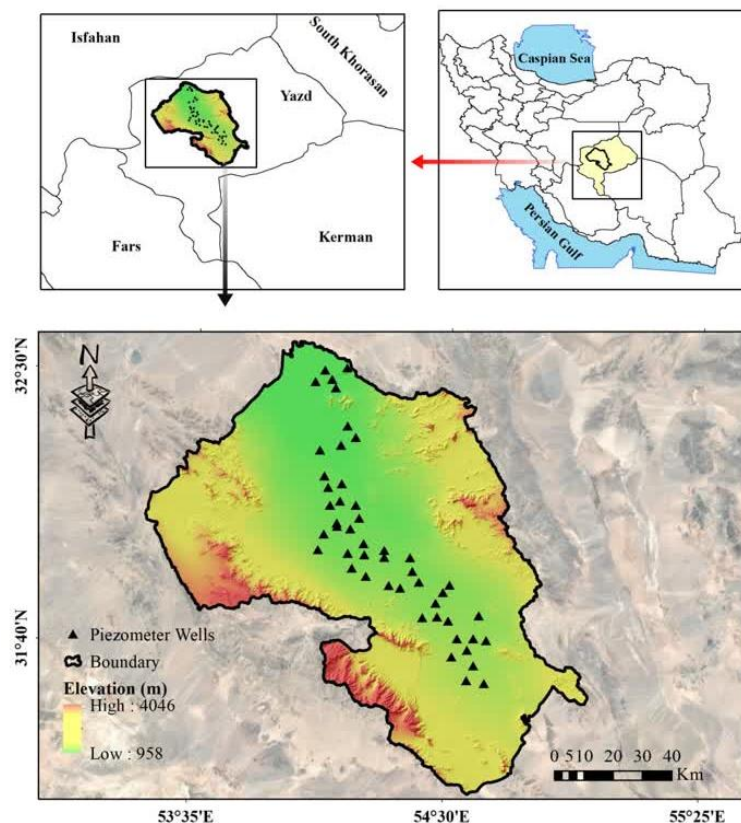
بررسی سلامت و آلودگی آب‌های زیرزمینی برای مصارف آشامیدنی اهمیت بسیار بالایی دارد، زیرا این منابع آبی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب در بسیاری از مناطق جهان هستند. آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند نفوذ مواد شیمیایی، آلودگی‌های میکروبی، استفاده نادرست از کودها و سموم کشاورزی و دفع غیر اصولی فاضلاب‌ها باشد که در صورت مصرف، موجب بروز بیماری‌های گوناگون و مشکلات جدی بهداشتی در انسان‌ها می‌شود (Adimalla, 2021). بنابراین، پایش مداوم کیفیت آب‌های زیرزمینی و انجام آزمایش‌های دقیق به منظور شناسایی و کنترل آلودگی‌ها ضروری است تا سلامت جامعه تضمین شده و از خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی جلوگیری شود (Ehteram & Soltani-Gerdefaramarzi, 2025). دشت یزد - اردکان در مرکز فلات ایران با اقلیم بسیار خشک و بارندگی اندک قرار دارد و تأمین آب مورد نیاز شهرهای واقع در این دشت عمدتاً به منابع آب زیرزمینی وابسته است. سفره‌های آب زیرزمینی منطقه، به دلیل برداشت زیاد و کاهش سطح ایستایی، با مشکلاتی همچون فرونشست زمین و کاهش کیفیت آب روبه‌رو هستند (Ershad-Hosseini, Keshtkar, Hosseini & Afzali, 2021). شاخص آلودگی آب‌های زیرزمینی^۱ یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی است که برای سنجش میزان آلودگی آب با هدف ساده‌سازی و استانداردسازی نتایج آزمایشگاهی توسعه یافته است. این شاخص به‌گونه‌ای طراحی شده که پارامترهای متعددی از کیفیت آب مانند pH، غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها، مواد جامد محلول را در قالب یک عدد واحد خلاصه می‌کند تا بتوان به راحتی میزان آلودگی را در یک بازه مشخص مقایسه و تحلیل کرد. این شاخص در پاسخ به نیاز به روش‌های کمی و قابل فهم برای تصمیم‌گیری‌های محیط زیستی و مدیریت منابع آب زمین توسعه یافته است (Djebassi, Abdeslam & Fehdi, 2021). استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند PIG از دهه‌های اخیر با پیشرفت فناوری‌های تحلیلی و نیاز به ارزیابی سریع کیفیت آب در مطالعات زیست‌محیطی رواج پیدا کرده است. امروزه PIG به عنوان یک ابزار مهم در پژوهش‌ها، پایش کیفیت آب زیرزمینی و برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب در مناطق مختلف جهان به کار می‌رود و امکان شناسایی سریع مناطق آلوده و تعیین اولویت‌های پاک‌سازی را فراهم می‌کند (Akakuru et al., 2022). این شاخص اولین بار توسط سوببا راو (Subba Rao, 2012) مطرح شد. او نشان داد که عناصر پتاسیم، منیزیم، کلسیم، سولفات، سدیم، کلر، بیکربنات، همچنین کل مواد محلول جامد در آب و اسیدیته در تعیین این شاخص مؤثرند (Subba Rao, 2012). هر چند این شاخص در بسیاری از مناطق دنیا برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی استفاده شده است. برای مثال یازیکی کارابولات و همکاران (Yazici-Karabulut, Kocer & Yesilnacar, 2024) در ترکیه، سوببا راو (Subba Rao, 2012)، ورما و سینق (Verma & Singh, 2021)، آدیمالا (Adimalla, 2021)، سونیتا و همکاران (Sunitha, Madhavi & Srinivasa Rao, 2021) و پراساد و همکاران (Prasad et al., 2025) در هندوستان، شوبه و همکاران (Shube et al., 2024) در ایتوپی، سند و همکاران (Sanad et al., 2024) در مراکش، دجباسسی و همکاران (Djebassi et al., 2021) در الجزایر، آکاکورا و همکاران (Akakuru et al., 2022) در نیجریه کیفیت آب زیرزمینی را با PIG بررسی کرده‌اند، اما در ایران مطالعات اندکی در این خصوص و تنها در دشت بیرجند وجود دارد. برای مثال ایزدی و همکاران (Izadi, KhasheiSiuki, Pourreza Bilondi & Hashemi, 2022a) کیفیت شیمیایی آبخوان دشت بیرجند را با PIG بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که آلودگی آبخوان دشت بیرجند به عناصر شیمیایی متوسط بوده و عدم رعایت مصرف بهینه از آب‌های زیرزمینی می‌تواند سبب افزایش آلودگی در آبخوان شود. همچنین راستگو و همکاران (Rastgoo, Nasiri Saleh & KhasheiSiuki, 2023) شاخص PIG را با روش AHP اصلاح کرده و نقشه همپوشانی (LPIG) برای دشت بیرجند تهیه نمودند. آن‌ها دریافتند؛ حدود ۱۷/۱ درصد دشت آلودگی خیلی زیاد داشته و نقاط با آلودگی زیاد و بسیار زیاد عمدتاً نواحی غرب و جنوب غرب آبخوان هستند که به فعالیت‌های کشاورزی مرتبط شده‌اند.

در مورد دشت یزد - اردکان، استفاده از PIG تاکنون گزارش نشده است، هرچند شاخص‌های مشابه در تعدادی از تحقیقات گذشته به کار رفته‌اند. به عنوان مثال قلی‌زاده و همکاران (Gholizadeh et al., 2017) پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری منابع آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان را بر اساس شاخص‌های مخصوص خوردگی آب، بررسی کردند و بیشتر منابع آب منطقه را دارای خوردگی کم تا متوسط گزارش کردند. خسروی و همکاران (Khosravi, Haydari Alamdarloo & Nasabpour, 2018) و سروی صدرآباد و زارع چاهوکی (Sarvi Sadrabad & Zare Chahouki, 2022) با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی^۱، نشان دادند کیفیت کلی آبخوان دشت یزد - اردکان در کلاس متوسط و قابل قبول است. ارشاد حسینی و همکاران (Ershad-Hosseini, 2021) روند تغییرات کیفی آب زیرزمینی در دشت یزد - اردکان را رو به کاهش گزارش کرده و نتیجه گرفتند که این روند در زمان‌های تخلیه یا برداشت نسبت به زمان‌های تغذیه بیشتر بوده که ناشی از کاهش بارش‌ها و پیرو آن کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی بوده است.

با وجود مطالعات انجام‌شده در دشت یزد - اردکان، بیشتر پژوهش‌ها بر شاخص‌های تک‌بعدی یا ارزیابی‌های مقطعی کیفیت آب زیرزمینی متمرکز بوده‌اند و کمتر به تحلیل‌های بلندمدت و یکپارچه پرداخته‌اند. همچنین، استفاده از شاخص‌های ترکیبی مانند PIG که قادر به تلفیق پارامترهای مختلف کیفیت آب در یک چارچوب استاندارد و قابل مقایسه است، در این منطقه تاکنون گزارش نشده است. این مطالعه با بهره‌گیری از شاخص PIG و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی در بازه ده‌ساله (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰) برای ۲۷ چاه عمیق در دشت یزد - اردکان، شکاف موجود در ارزیابی‌های جامع را پر می‌کند. شاخص PIG با یکپارچه‌سازی پارامترهای کلیدی نظیر pH، غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها، و مواد جامد محلول، امکان ارزیابی دقیق‌تر و سریع‌تر وضعیت آلودگی آبخوان را فراهم می‌کند و ابزار مؤثری برای شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی ارائه می‌دهد. تحلیل روندهای ده‌ساله این مطالعه، برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً مقطعی بوده‌اند، الگوهای بلندمدت تغییرات کیفیت آب را آشکار می‌سازد و به درک بهتر تأثیر عوامل محیطی و انسانی مانند کاهش بارش و برداشت بیش‌ازحد از آبخوان کمک می‌کند. این رویکرد نوآورانه، ارزش افزوده‌ای در بهبود برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان ایجاد می‌کند و می‌تواند به عنوان الگویی برای سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مورد استفاده قرار گیرد.

منطقه مورد مطالعه

دشت یزد - اردکان یکی از گسترده‌ترین دشت‌های استان یزد است که در طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی واقع شده است. مساحت حوزه این دشت برابر با ۱۱۷۷۵ کیلومتر مربع است و شهرستان‌های یزد، اردکان، میبد، تفت، اشکذر و مهریز را در بر می‌گیرد. این دشت در کمربند خشک فلات مرکزی ایران قرار داشته و دارای متوسط دمای سالیانه بین ۱۲ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی پایین و نسبتاً ثابت در بازه ۳۰ تا ۵۰ درصد، تبخیر بسیار زیاد بین ۲۲۰ تا ۳۲۰۰ میلی‌متر در سال و بارش متوسط سالانه حدود ۱۰۷ میلی‌متر است (Ershad-Hosseini et al., 2021). منطقه مورد مطالعه، رودخانه دائمی ندارد و آب‌های سطحی تنها شامل رواناب‌های فصلی و أحياناً چشمه‌هایی با دبی کم در کوهپایه‌ها می‌باشد. جریان‌ات عمده رودخانه‌های مناطق، منحصر به جریان‌ات سیلابی است که از باران‌های شدت‌دار و بیش‌تر در مناطق کوهستانی پدیدار می‌شود. در منطقه مورد مطالعه از قدیم‌الایام استفاده از منابع آب‌های زیرزمینی به وسیله قنات انجام می‌گرفته است که بعدها از طریق حفر چاه‌های عمیق و نیمه عمیق نیز این عمل میسر گردیده است و جهت عمومی آب زیرزمینی از جنوب به سمت شمال منطقه است (Khosravi et al., 2018). شکل ۱ موقعیت دشت یزد - اردکان و چاه‌های پی‌زومتری منطقه را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت دشت یزد - اردکان و چاه‌های پیزومتری

Fig. 1. Location of the Yazd-Ardakan Plain and piezometric wells

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

برای انجام این پژوهش ابتدا از سازمان آب منطقه‌ای استان یزد آمارهای ثبت شده کیفیت آب چاه‌های دشت یزد - اردکان برای سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ جمع‌آوری گردید. در این پژوهش جهت بررسی پارامترهای کیفی منابع آب زیرزمینی از آمار ۲۷ حلقه چاه که دارای دوره آماری طولانی مدت و کامل بودند و پراکندگی مناسبی در منطقه مورد مطالعه داشتند، استفاده گردید و نقشه کیفیت آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ برای هر یک از متغیرهای شیمیایی در محیط نرم‌افزار GIS با استفاده از روش میان‌یابی IDW ترسیم شد. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل؛ غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها، کلسیم، پتاسیم، منیزیم، سدیم، کلر، بی‌کربنات، سولفات بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر، اسیدیته، نسبت جذب سدیم، مواد جامد محلول در آب بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و هدایت الکتریکی آب بر حسب میکروموس بر سانتیمتر می‌باشد. هم‌چنین از آمار ۶۶ چاه پیزومتری موجود در دشت استفاده گردید تا تغییرات سطح آب زیرزمینی در سال‌های آماری مورد مطالعه، بررسی شود.

شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG)

شاخص PIG عددی است که برای بیان میزان آلودگی آب زیرزمینی نسبت به استانداردهای کیفی آب آشامیدنی طراحی شده است. تعیین کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص PIG طبق نظریه سوببا راو (Subba Rao, 2012) شامل ۵ مرحله زیر می‌باشد:

مرحله اول: تعیین وزن نسبی (Rw)

وزن نسبی هر پارامتر با توجه به تأثیر آن بر سلامت انسان تخصیص داده می‌شود و دامنه عددی آن بین ۱ (کمترین نقش) تا ۵ (بیشترین نقش) می‌باشد. این مقادیر توسط سوببا راو (Subba Rao, 2012) طبق جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر وزن نسبی

Table 1- Relative weight values

PH	TDS	Cl	K	Na	Ca	Mg	HCO ₃	SO ₄	پارامتر شیمیایی Qualitative parameter
5	5	4	1	4	2	2	3	5	وزن نسبی Relative weight (Rw)
8	1000	250	12	200	75	50	250	250	مقدار مجاز (Ds) Standard of WHO

مرحله دوم: تعیین پارامتر وزن (Wp)

برای ارزیابی نسبی هر یک از متغیرهای شیمیایی مؤثر بر کیفیت آب از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$W_p = \frac{R_w}{\sum R_w} \quad (1)$$

مرحله سوم: تعیین غلظت (Sc)

Sc از تقسیم غلظت هر پارامتر (C) بر مقدار مجاز آن طبق استاندارد کیفیت آب آشامیدنی (Ds) از حد مجاز استاندارد سازمان جهانی بهداشت (WHO) استفاده می‌شود رابطه (۲).

$$S_c = \frac{C}{D_s} \quad (2)$$

مرحله چهارم: تعیین کیفیت کلی آب (Ow)

برای تعیین کیفیت کلی آب، وزن هر پارامتر در مقدار مربوطه مطابق رابطه (۳) ضرب می‌شود.

$$O_w = W_p \times S_c \quad (3)$$

مرحله پنجم: محاسبه شاخص PIG رابطه (۴)

$$PIG = \sum O_w \quad (4)$$

و در نهایت شاخص PIG طبق مقادیر ارائه شده توسط سوببا راو (Subba Rao, 2012) و جدول ۲ طبقه‌بندی می‌گردد.

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص PIG

Table 2- Classification of PIG index

طبقه‌بندی	آلودگی ناچیز	آلودگی کم	آلودگی متوسط	آلودگی زیاد	آلودگی خیلی زیاد
Classification	Insignificant pollution	Low pollution	Moderate pollution	High pollution	Very high pollution
Range of PIG	PIG < 1.0	1.0 to 1.5	1.5 to 2.0	2.0 to 2.5	PIG > 2.5

نتایج و بحث

آماره‌های توصیفی کیفیت آب زیرزمینی

آماره‌های توصیفی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان در دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ در جدول ۳ ارائه شده است. غلظت یون‌ها و کل مواد جامد محلول بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و هدایت الکتریکی بر حسب میکروموس بر سانتی‌متر است. همانطور که جدول نشان می‌دهد در طول ۱۰ سال مقدار آنیون‌ها و کاتیون‌ها، اسیدیته و شوری افزایش و کیفیت آب زیرزمینی منطقه کاهش یافته است. میانگین همه پارامترهای شیمیایی به جز اسیدیته و بی کربنات از حد مجاز توصیه شده توسط سازمان جهانی بهداشت (WHO) بیشتر است. کاهش کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، می‌تواند ناشی از کاهش بارش، تأثیر رخساره‌های ژئومورفولوژی موجود و همچنین بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی برای مصارف کشاورزی، صنعت، شرب و بهداشت باشد.

جدول ۳- آمار توصیفی پارامترهای کیفیت آب

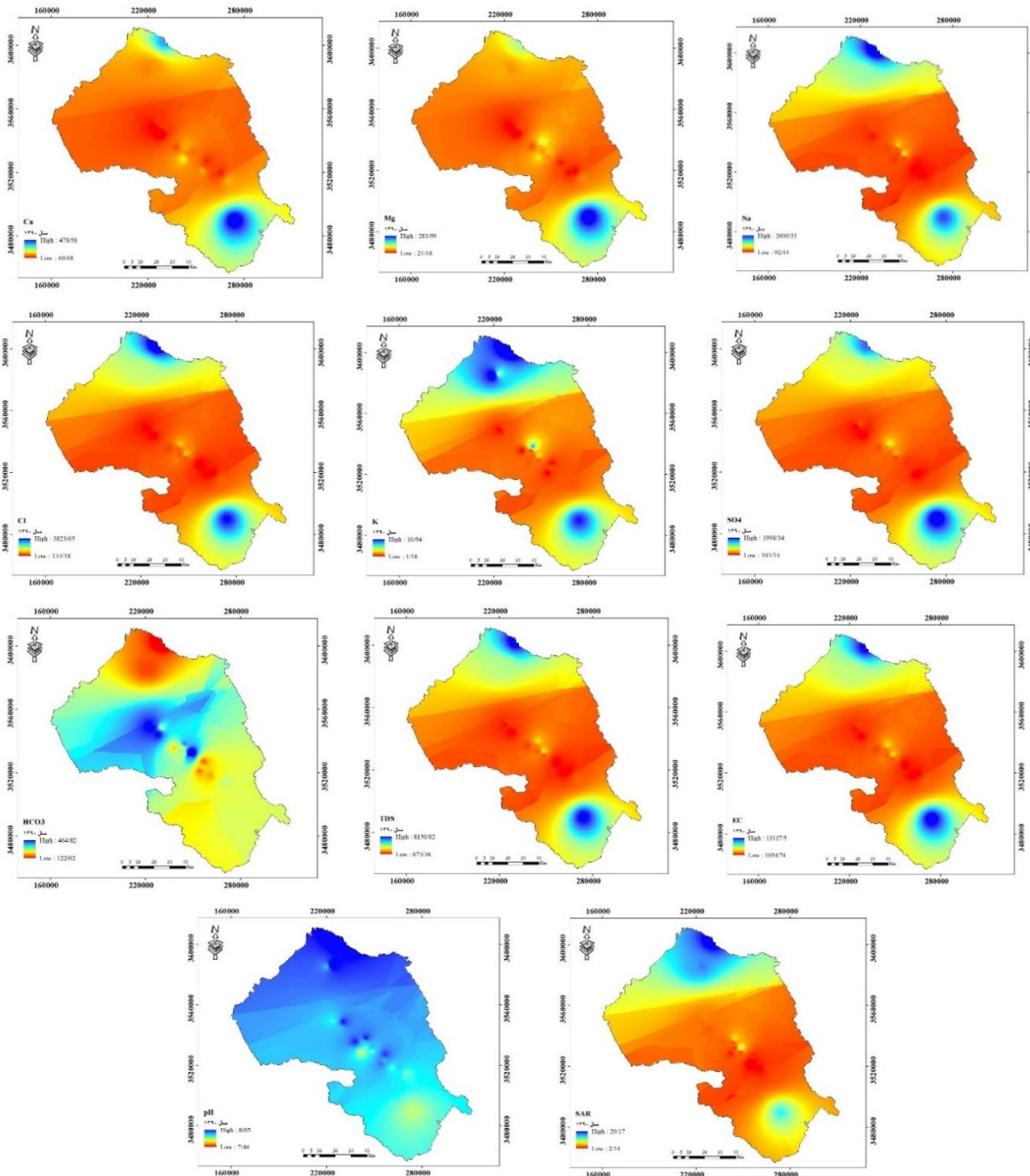
Table 3- Descriptive statistics of water quality parameters

2011						
	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Skewness	Kurtosis
SO ₄	99.84	1998.72	535.08	486.79	1.55	2.27
Cl	128.45	4935.00	1082.88	1261.68	1.79	2.86
HCO ₃	122.00	468.48	239.30	86.17	0.88	0.35
pH	7.40	8.06	7.72	0.17	0.07	-0.63
TDS	670.00	9820.00	2774.88	2626.49	1.41	1.18
SAR	2.10	29.18	9.22	8.28	1.38	0.80
EC	1045.00	15340.00	4365.61	4175.21	1.43	1.18
K	1.17	12.90	4.15	3.58	1.20	0.19
Na	89.93	2951.36	672.20	791.05	1.76	2.53
Mg	20.88	426.12	98.23	93.83	2.20	5.37
Ca	40.00	479.00	164.22	127.72	1.38	0.773
2021						
SO ₄	102.24	2488.32	686.82	609.78	1.22	1.31
Cl	136.15	5685.12	1391.59	1591.04	1.48	1.51
HCO ₃	136.64	473.36	227.51	89.27	1.09	0.54
pH	6.89	8.15	7.51	0.31	0.44	-0.32
TDS	253.00	11180.00	3223.30	3169.10	1.17	0.31
SAR	1.57	24.03	8.57	7.00	1.17	0.01
EC	976.00	17210.00	5153.11	4809.15	1.14	0.26
K	1.17	10.17	3.55	2.52	1.49	1.75
Na	65.09	5334.72	866.04	1168.84	2.60	8.05
Mg	17.04	984.96	199.46	221.95	2.01	5.14
Ca	44.80	1073.28	256.66	247.88	1.70	3.44

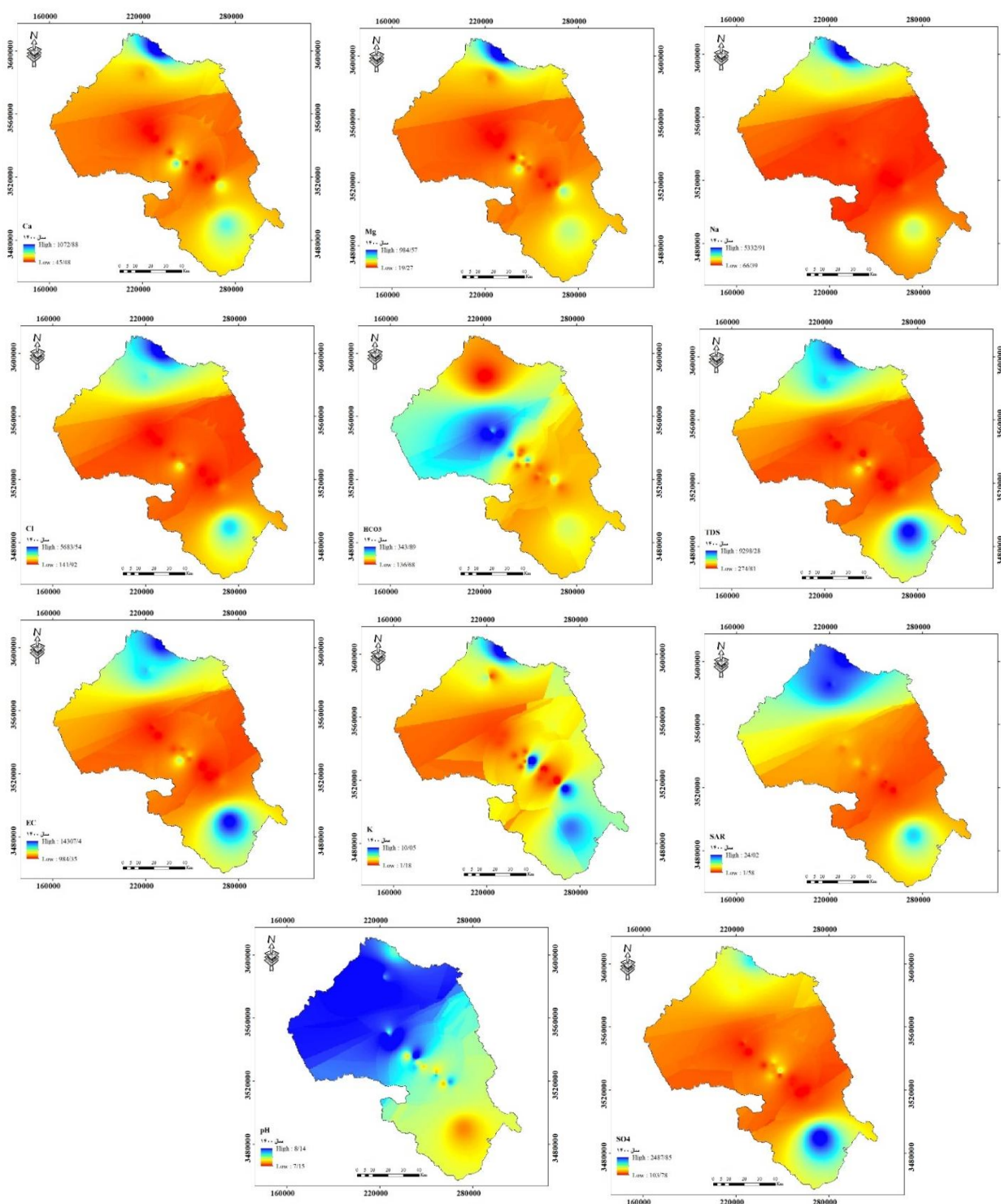
توزیع مکانی غلظت یون‌ها

نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای مورد بررسی شامل غلظت کاتیون‌ها، سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم، آنیون‌ها، کلر، بی‌کربنات، سولفات، شوری و اسیدیته و مواد جامد محلول در سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ برای دشت یزد - اردکان به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. همانطور که نتایج پهنه‌بندی نشان می‌دهد غلظت کاتیون‌ها، آنیون‌ها و شوری در سال ۱۳۹۰ در شمال و بخشی از جنوب دشت بیشترین است و به سمت مرکز دشت کاهش یافته به طوری که کمترین مقادیر آن در شرق، غرب و مرکز دشت مشاهده می‌شود. به جز بی‌کربنات که بیشترین مقدار آن در شرق و مرکز دشت دیده می‌شود. بیشترین مقدار کلسیم ۴۷۸/۹۱، منیزیم ۲۸۳/۹۹، سدیم ۲۶۰۰/۳۳، پتاسیم ۱۰/۹۴، کلر ۳۸۲۳/۶۵، بی‌کربنات ۴۶۴/۸۲ و سولفات ۱۹۹۸/۳۴ میلی گرم بر لیتر، شوری ۱۳۳۱۷/۵ میکروموس بر سانتیمتر گزارش می‌شود. بیشترین مقادیر اسیدیته (۸/۰۵) و نسبت جذب سدیم (۲۹/۱۷) نیز در شمال دشت وجود دارد. با گذشت زمان ۱۰ ساله کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد اردکان تغییرات محسوسی نشان می‌دهد؛ به طوری که نقشه‌های پهنه‌بندی غلظت عناصر شیمیایی در سال ۱۴۰۰ (شکل ۳) نسبت به سال ۱۳۹۰ تغییراتی را نشان می‌دهد. به این معنی که هم مقادیر حداکثر این پارامترها افزایش یافته است و هم به جز بخش‌های شمالی و بخشی از جنوب دشت، غلظت برخی عناصر در شرق و مرکز دشت نیز افزایش یافته است. به عبارت دیگر از نظر زمانی کیفیت آب زیرزمینی دشت رو به کاهش بوده است و هم از نظر مکانی مساحت‌های بیشتری از دشت با کاهش کیفیت آب زیرزمینی مواجه شده‌اند. بیشترین میزان کلسیم ۱۰۷۲/۸۸، منیزیم ۹۸۴/۵۷، سدیم ۵۳۳۲/۹۱، پتاسیم ۱۰/۰۵، کلر ۵۶۸۳/۵۴، بی‌کربنات ۳۴۳/۸۹ و سولفات ۲۴۸۷/۸۵ میلی گرم بر لیتر در سال ۱۴۰۰ مشاهده گردید و باعث شد حداکثر شوری آب زیرزمینی در این دشت به ۱۴۳۰۷/۴ میکروموس بر سانتیمتر برسد، به عبارت دیگر در بازه ۱۰ ساله آب زیرزمینی دشت حدود ۷/۵ درصد شورتر شده است.

نتایج نشان می‌دهد که یون‌های مهم و تأثیرگذار بر شوری و کاهش کیفیت آب زیرزمینی مانند سدیم و کلر، کلسیم، منیزیم و سولفات تغییرات بیشتری در دهه مورد بررسی نشان داده‌اند. تحلیل ارائه شده در مورد کیفیت آب زیرزمینی این دشت، بر اساس نتایج مطالعات مختلف، نشان‌دهنده توزیع مکانی ناهمگن کیفیت آب است که عمدتاً تحت تأثیر عوامل زمین‌شناسی، هیدرولوژیکی و انسانی قرار دارد.



شکل ۲- پهنه‌بندی غلظت کاتیون‌ها، آنیون‌ها، شوری، مواد جامد محلول، pH و نسبت جذب سدیم در دشت یزد-اردکان در سال ۱۳۹۰
 Fig.2. Zoning of the concentration of cations, anions, salinity, dissolved solids, pH and SAR in the Yazd-Ardakan plain in 2011



شکل ۳- پهنه‌بندی غلظت کاتیون‌ها، آنیون‌ها، شوری، مواد جامد محلول، pH و نسبت جذب سدیم در دشت یزد - اردکان در سال ۱۴۰۰
Fig. 3. Zoning of the concentration of cations, anions, salinity, dissolved solids, pH and SAR in the Yazd-Ardakan plain in 2021

تغییرات سطح آب زیرزمینی

سطح آب زیرزمینی در ۶۶ چاه پیژومتری واقع در دشت یزد - اردکان در دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ (شکل ۴) نشان دهنده کاهش قابل توجه سطح آب زیرزمینی در طول یک دهه است. نوسانات مشابه در هر دو خط (پیک‌ها و دره‌ها در موقعیت‌های مشابه) نشان‌دهنده تغییرات مکانی طبیعی در دشت است، مانند تفاوت‌های زمین‌شناسی، نرخ پمپاژ محلی یا نفوذپذیری خاک. با این حال، جابه‌جائی دو منحنی، تخلیه سیستماتیک منابع آب زیرزمینی را تأیید می‌کند. این نمودار شواهدی بصری از روند کاهشی طولانی مدت در منطقه، ارائه می‌دهد، که با داده‌های زمانی - مکانی از مطالعات محلی همخوانی دارد. برای مثال، تحقیقات نشان می‌دهد که دشت یزد - اردکان در سال‌های اخیر کاهش قابل توجهی در سطح آب تجربه کرده است، که عمدتاً به دلیل خشکسالی و برداشت بی‌رویه آب برای کشاورزی و مصارف شهری است (Khosravi et al., 2018; Khajavi, Soltani-Gerdefaramarzi & Gheysouri, 2025). این کاهش معمولاً نتیجه ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی است. کاهش سطح آب زیرزمینی نه تنها کمیت را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه می‌تواند کیفیت آب زیرزمینی را نیز کاهش دهد. این تأثیرات اغلب به دلیل دسترسی به لایه‌های عمیق‌تر آبخوان، که معمولاً دارای غلظت بالاتر آلاینده‌ها هستند، یا کاهش تغذیه آبخوان که منجر به غلظت مواد محلول می‌شود، رخ می‌دهد.

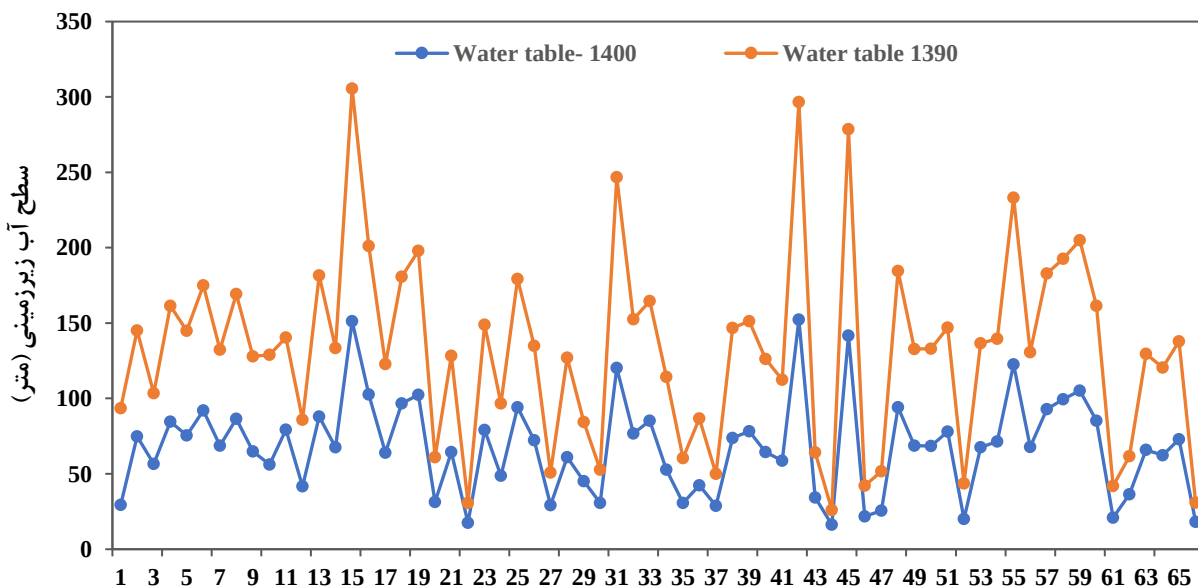
نتایج شاخص کیفیت آب زیرزمینی

مقادیر شاخص PIG در دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ در ۲۷ چاه مورد بررسی در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق با این نتایج، تقریباً در ۵۸ درصد چاه‌های مورد بررسی در این دشت، مقدار شاخص PIG افزایش یافته است. بیشترین میزان افزایش شاخص در پایین‌ترین نقطه دشت از نظر ارتفاعی یعنی منطقه چاه افضل اردکان و دم گفتار است. شاخص PIG برای چاه‌های واقع در شمال دشت یزد - اردکان شامل چاه عیش آباد، قاسم آباد اردکان، نظام آباد، ترک آباد، چاه افضل، دم گفتار و شیخ ابوالقاسم واقع در میبد) همچنین چاه خیرآباد شرکا در جنوب دشت نیز در هر دو سال مورد بررسی دارای شاخص PIG بالا و کیفیت پایین آب زیرزمینی می‌باشد.

نقشه پهنه‌بندی شاخص PIG نیز در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به این شکل و طبق طبقه‌بندی ارائه شده توسط سوببا راو (Subba Rao, 2012)، در سال ۱۳۹۰ مناطق شرقی، غربی و مرکز دشت دارای آب زیرزمینی با آلودگی کم و ناچیز و با کیفیت بوده است که حدوداً ۵۱/۴۳ درصد از مساحت دشت را به خود اختصاص داده است. مناطق شمالی و جنوبی دشت با مساحت ۲۸/۱۶ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد می‌باشند. ۱۰/۸۳ درصد و ۲۸/۱۶ درصد از مساحت دشت نیز به ترتیب دارای آلودگی متوسط و زیاد می‌باشند. با گذشت زمان در دوره ۱۰ ساله نتایج شاخص PIG هم از نظر زمانی و هم از نظر مکانی در سال ۱۴۰۰ متفاوت از سال ۱۳۹۰ است. به عبارت دیگر مساحت بیشتری از دشت جزء طبقه آلودگی خیلی زیاد قرار گرفته است و از مساحت منطقه با آلودگی ناچیز کاسته شده است. نتایج پهنه‌بندی شاخص PIG در سال ۱۴۰۰، حاکی از این است که ۲۴/۸۰ درصد دارای آلودگی کم و ناچیز، ۲۳/۹۴ درصد آلودگی متوسط، ۹/۱۲ درصد آلودگی زیاد و ۴۲/۰۴ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد است. لازم به ذکر است که بیشترین مساحت دشت با آلودگی خیلی زیاد در قسمت شمال دشت قرار گرفته است.

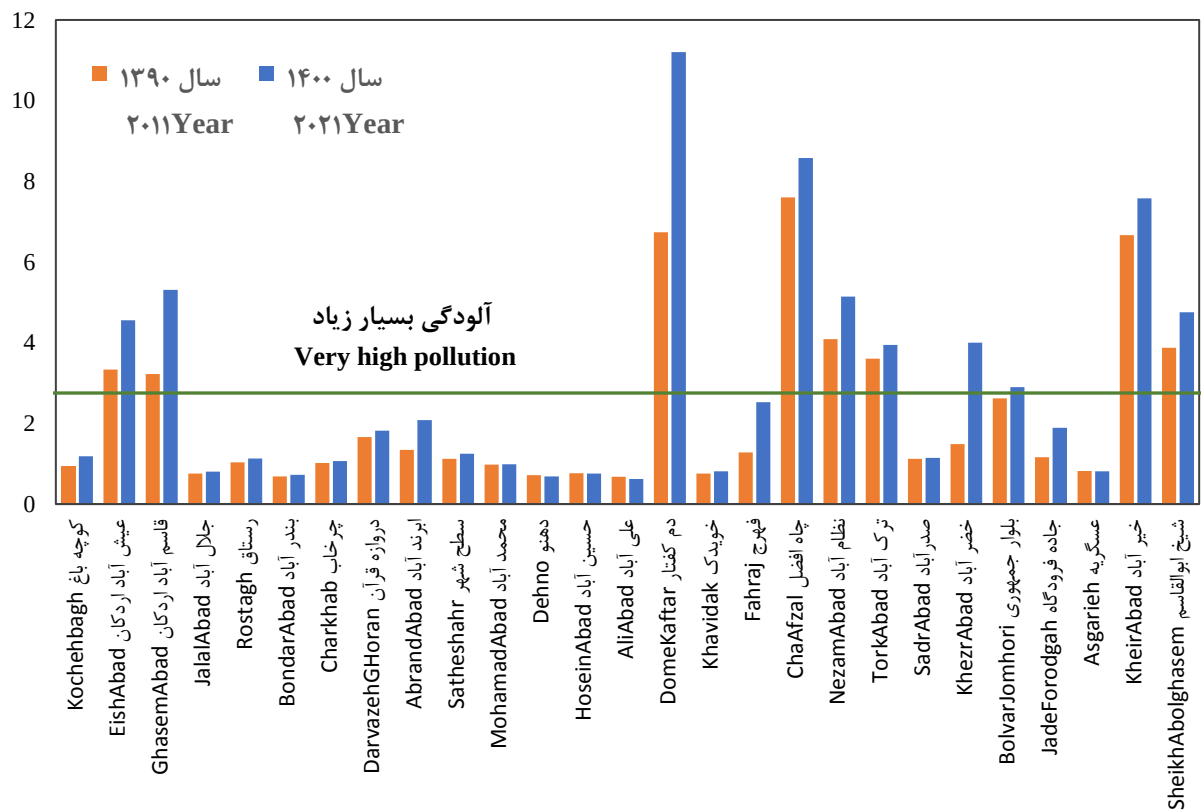
خروجی آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان عمدتاً در بخش شمالی آن قرار دارد، جایی که ارتفاع نسبت به سطح دریا کمترین مقدار را دارد (افت سطح آب از بیش از ۱۰۰ متر در جنوب به کمتر از ۱۰ متر در شمال). این موقعیت توپوگرافیکی باعث می‌شود شمال دشت به عنوان محل تجمع نهایی جریان آب زیرزمینی عمل کند، که در نتیجه تمام آلاینده‌ها، نمک‌ها و مواد محلول از بخش‌های بالادست (جنوب و مرکز) به این منطقه منتقل و انباشته شوند. این پدیده، که به عنوان «جمع شدن آلاینده‌ها در محل خروجی» شناخته می‌شود، اصلی‌ترین دلیل کیفیت پایین آب در شمال منطقه مطالعاتی است. همچنین جهت جریان آب زیرزمینی از جنوب شرقی به شمال غربی است و شیب ملایم دشت (از جنوب به شمال) باعث می‌شود آلاینده‌ها در شمال رسوب کنند.

عوامل طبیعی مانند تبخیر بالا در منطقه خشک دشت یزد - اردکان، نفوذ آب شور از نواحی شورزار و تپه‌ماهورهای شمالی، و کاهش نفوذپذیری لایه‌های رسوبی در شمال، شوری را تشدید می‌کند. مقادیر TDS در شمال اغلب بیش از ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و می‌تواند نشان‌دهنده نفوذ آلاینده‌های انسانی یا طبیعی باشد (Heidari, Ekrami & Nasabpour, 2015). از طرف دیگر گسترش اراضی کشاورزی و شهری در مرکز و شمال منجر به استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی و نفوذ فاضلاب شده، که آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد. تغییرات کاربری اراضی از دهه‌های گذشته، مانند تبدیل مراتع به کشاورزی، کیفیت را در شمال بدتر کرده است (Khajavi et al., 2025). منطقه جنوب دشت یزد - اردکان از نظر زمین شناسی دارای سازندهای نمک‌دار نئوژن و رسوبات تبخیری-تخریبی است که باعث شده کیفیت آب زیرزمینی در این قسمت پایین بوده و شوری بالای آب زیرزمینی در این ناحیه گزارش شود (Mehrshahi & Mehrnahad, 2006). کیفیت آب زیرزمینی در این دشت بر اساس شاخص‌هایی مانند شاخص کیفیت آب زیرزمینی، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد محلول، نسبت جذب سدیم، و غلظت یون‌هایی مانند سدیم، کلر، کلسیم و منیزیم ارزیابی می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که کیفیت کلی آب در دشت یزد - اردکان متوسط تا نامناسب است و روند زمانی آن نزولی بوده است. برای مثال، میانگین GQI از حدود ۷۷/۶۹ در سال ۱۳۸۲ به ۷۲/۲۶ در سال ۱۳۹۰ کاهش یافته، که این کاهش عمدتاً به دلیل افزایش شوری و آلاینده‌ها است. همچنین، افت سطح آب زیرزمینی در چهار دهه اخیر حدود ۰/۵ متر در سال بوده و تخلیه سالانه منابع آب حدود ۵۶۴ میلیون مترمکعب است (۸۲٪ برای کشاورزی)، که این برداشت بیش از حد منجر به نفوذ آب شور و کاهش کیفیت شده است (Khosravi et al., 2018).



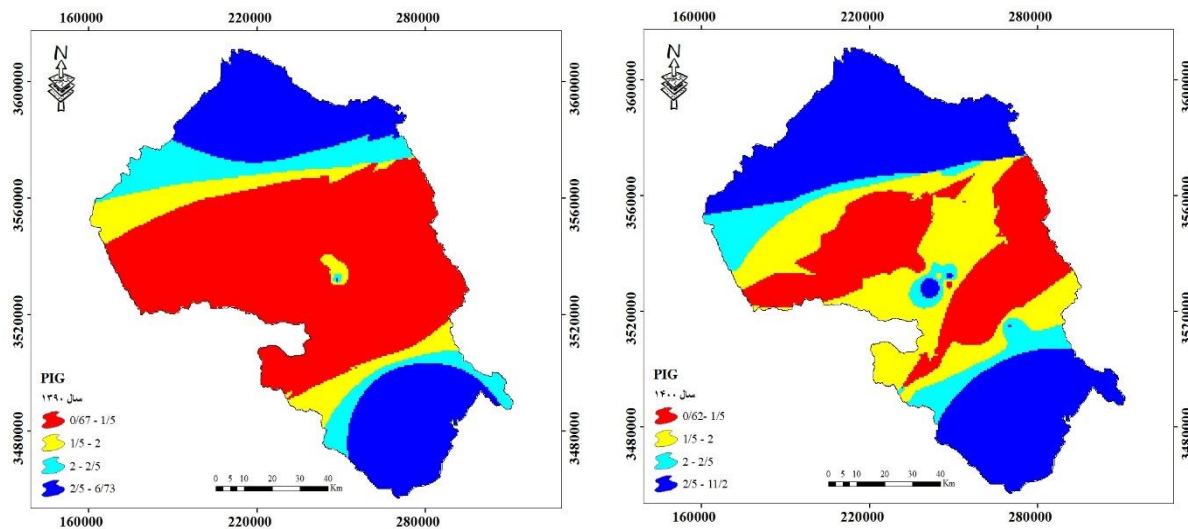
شکل ۴- سطح آب زیرزمینی در ۶۶ چاه پیزومتری در دشت یزد - اردکان در دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰

Fig. 4. Groundwater surface in 66 piezometric wells in the Yazd-Ardakan plain in 2011 and 2021



شکل ۵- مقادیر شاخص PIG در دو سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ در ۲۷ چاه مورد بررسی

Fig. 5. PIG index values for 2011 and 2021 years in study wells



شکل ۶- پهنه‌بندی شاخص PIG در سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۰ در دشت یزد اردکان

Fig. 6. Zoning of the PIG index for 2011 and 2021 in the Yazd-Ardakan plain

نتیجه گیری

دشت یزد - اردکان یکی از مهم ترین حوضه های آب زیرزمینی در استان یزد ایران است که با مساحتی حدود ۱۱۷۷۱ کیلومتر مربع، بخش عمده ای از جمعیت استان را در خود جای داده و نقش حیاتی در تأمین آب برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شرب ایفا می کند. این دشت در یک منطقه خشک و نیمه خشک واقع شده و با چالش های جدی مانند برداشت بی رویه، افت سطح آب و کاهش کیفیت آب زیرزمینی روبه رو است. تحلیل ارائه شده در مورد کیفیت آب زیرزمینی این دشت، بر اساس نتایج مطالعات مختلف، نشان دهنده توزیع مکانی ناهمگن کیفیت آب است که عمدتاً تحت تأثیر عوامل زمین شناسی، هیدرولوژیکی مانند جهت جریان آب زیرزمینی از جنوب شرقی به شمال غربی و شیب ملایم دشت و عوامل انسانی مانند گسترش اراضی کشاورزی و شهری در مرکز و شمال دشت منجر به استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی و نفوذ فاضلاب شده، که غلظت آلاینده ها را افزایش می دهد. همچنین تغییرات کاربری اراضی از دهه های گذشته، مانند تبدیل مراتع به کشاورزی، کیفیت آب زیرزمینی را کاهش داده است. در این پژوهش، از شاخص آلودگی آب زیرزمینی (PIG) مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد، که داده های کیفیت آب (کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلر، بی کربنات، سولفات، مواد جامد محلول، اسیدیته و شوری) را به شکل قابل فهم بیان می دارد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که منابع آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان در قسمت غرب و شرق دارای بهترین کیفیت و در شمال دشت و بخشی از جنوب دارای کمترین کیفیت است. خروجی آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان در شمال قرار گرفته که دارای کمترین ارتفاع نسبت به سطح دریاست و کیفیت پایین آب زیرزمینی این منطقه به دلیل جمع شدن تمام آلاینده ها در این منطقه است. اما ناحیه غرب دشت یزد - اردکان به دلیل محل ورودی آب های حوضه تفت - نصرآباد به دشت دارای بهترین کیفیت است (Khosravi et al., 2018). لازم به ذکر است که کیفیت آب زیرزمینی حوضه تفت - نصرآباد به علت بارش مناسب و شرایط محیطی مناسب از کیفیت بالائی برخوردار است. نتایج بررسی روند زمانی تغییرات شاخص PIG نشان داد که این شاخص با گذشت زمان در حال افزایش است، و این افزایش در منطقه شمال دشت بیشتر مشهود است. به طوری که چاه قرار گرفته در دم گفتار در منطقه شمال دشت افزایش قابل توجهی داشته است (۶۶ درصد) و شاخص PIG از ۶/۷۳ به ۱۱/۲۰ رسیده است. یکی از دلایل آلودگی بیشتر شمال دشت نسبت به مرکز و غرب و شرق، موقعیت جغرافیایی و ارتفاعی این قسمت است. خروجی آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان در شمال قرار گرفته که دارای کمترین ارتفاع نسبت به سطح دریاست و کیفیت پایین آب زیرزمینی این منطقه به دلیل جمع شدن تمام آلاینده ها در این منطقه است. طبق شاخص PIG در سال ۱۳۹۰، ۵۱/۴۳ درصد از کل مساحت دشت دارای آلودگی کم و ناچیز، ۹/۵۸ درصد از مناطق دارای آلودگی متوسط، ۱۰/۸۳ درصد دشت دارای آلودگی زیاد و ۲۸/۱۶ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد بوده است و با گذشت یک دهه کیفیت آب زیرزمینی کاهش یافته است؛ به طوری که ۲۴/۸۰ درصد دارای آلودگی کم و ناچیز، ۲۳/۹۴ درصد آلودگی متوسط، ۹/۱۲ درصد آلودگی زیاد و ۴۲/۰۴ درصد دارای آلودگی بسیار زیاد است. هم چنین نتایج نشان می دهد که با گذشت زمان کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان از سمت شمال و جنوب به سمت مرکز دشت کاسته شده است. منطقه جنوبی دشت یزد - اردکان از نظر زمین شناسی غنی از سازنده های نمک دار دوران نئوژن و رسوبات تبخیری - تخریبی است. این سازنده ها شامل لایه های گچی، نمکی و رسوبی تبخیری هستند که در اثر فرآیندهای تبخیر در محیط های خشک تشکیل شده اند و باعث حل شدن نمک ها در آب زیرزمینی می شوند. نتیجه این ساختار زمین شناسی، شوری بالای آب (EC بالا و SAR نامناسب) و کیفیت پایین برای مصارف کشاورزی و شرب است. خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2018) با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) نتایج مشابهی را گزارش کردند و آنها نقش کاربری اراضی و فعالیت های انسانی را در کاهش کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان واضح گزارش کردند. آنها نشان دادند که قسمت غرب و شمال دشت یزد اردکان به ترتیب بهترین و بدترین کیفیت آب زیرزمینی را داراست و با گذشت زمان مساحت بیشتری از دشت با کاهش کیفیت آب زیرزمینی مواجه شده است. هم چنین گسترش دو ناحیه با کاهش کیفیت آب زیرزمینی را در مرکز و جنوب دشت یزد اردکان در سال ۱۳۹۰ گزارش کردند.

ارشاد حسینی و همکاران (Ershad-Hosseini et al., 2021) و خواجوی و همکاران (Khajavi et al., 2025) نیز نشان دادند که غلظت پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت یزد - اردکان روند افزایشی داشته و منابع آب زیرزمینی در این دشت به سمت کاهش کیفیت گرایش پیدا کرده اند. آنها نتیجه‌گیری کردند که این کاهش کیفیت به کاهش سطح ایستابی ناشی از تغییرات کاربری و پیرو آن برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و همچنین کاهش میزان بارندگی در بازه ۲۱ ساله و وقوع پی در پی پدیده خشکسالی در دهه‌های اخیر برمی‌گردد. روند افزایشی غلظت پارامترهای مؤثر بر کیفیت منابع آب زیرزمینی در این دشت با نتایج بررسی روند غلظت پارامترهای تأثیرگذار بر شرایط کیفی منابع آب زیرزمینی حاصل از پژوهش‌های صاحب جلال و همکاران (Sahebjalal, Dehghany & Tabatabaezade, 2013)؛ قلی‌زاده و همکاران (Gholizadeh et al., 2017)؛ رفیع شریف آباد و همکاران (Rafi Sharifabad et al., 2017)؛ خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2018)؛ ارشاد حسینی و همکاران (Ershad-Hosseini et al., 2021)؛ ایزدی و همکاران (Izadi et al., 2022a, b)؛ محمودی و عرفانی (Mahmodi & Erfanian, 2022) و نیز نادری اشکفتکی و همکاران (Naderi Eshkaftaki, Mirabbasi & Nasr Esfahani, 2023) مطابقت داشت. بر اساس روند نزولی بارش در بازه زمانی منتهی به دهه ۱۳۹۰ و کاهش سطح آب منابع آب زیرزمینی در دشت یزد - اردکان (Omidvar, Zareh & Ebrahimi, 2016; Ershad-Hosseini et al., 2021; Khajavi et al., 2025) می‌توان بیان داشت که برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی و پیرو آن کاهش سطح منابع آب زیرزمینی و همچنین کاهش میزان بارندگی، وقوع پدیده خشکسالی و در نتیجه افت سطح آب زیرزمینی افزایش غلظت پارامترهای کیفی و کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی را به دنبال داشته است. از سوی دیگر با توجه به نتایج به دست آمده معلوم شد کیفیت آب زیرزمینی به ویژه در نواحی شمالی و جنوبی دشت یزد - اردکان، وضعیت نامطلوبتری نسبت به سایر مناطق محدوده مطالعاتی دارد و نیازمند اقدامات مدیریتی و حفاظتی ویژه‌ای در زمینه بهبود کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی می‌باشد. برای مقابله با این مشکلات، مدیریت یکپارچه منابع آب ضروری است. کاهش برداشت، وضع قوانین سخت‌گیرانه برای جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز و کاهش برداشت بیش از حد، افزایش ورودی آب به آبخوان از طریق روش‌های طبیعی یا مصنوعی، استفاده از روش‌های آبیاری کارآمد، بازچرخانی و تصفیه آب، استفاده از فناوری‌های نوین در بخش کشاورزی و صنعت، پایش مداوم با ابزارهایی مانند GIS و مدل‌های یادگیری ماشین جهت پیش‌بینی کیفیت آب، همچنین، انتقال آب از حوضه‌های مجاور و حفاظت از منابع آب ورودی‌های غربی آبخوان، می‌تواند کمک کند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از شرکت آب منطقه‌ای یزد برای در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

- Adimalla, N. (2021). Application of the entropy weighted water quality index (EWQI) and the pollution index of groundwater (PIG) to assess groundwater quality for drinking purposes: a case study in a rural area of Telangana State, India. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 80(1), 31-40. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00800-4>
- Akakuru, O. C., Eze, C. U., Okeke, O. C., Opara, A. I., Usman, A. O., Iheme, O., ... & Iwuoha, P. O. (2022). Hydrogeochemical evolution, water quality indices, irrigation suitability and pollution index of groundwater (PIG) around Eastern Niger Delta, Nigeria. *International Journal of Energy and Water Resources*, 6(3), 389-411. <https://doi.org/10.1007/s42108-021-00162-0>

- Djebassi, T., Abdeslam, I., & Fehdi, C. (2021). Groundwater quality assessment, using pollution index of groundwater (PIG) from a semi-arid basin, Tebessa region (north-east of Algeria). *Journal of Materials and Environmental Science*, 2508(8), 1046-1056. <http://www.jmaterenvironsci.com/Journal/vol12-8.html>
- Ehteram, M., & Soltani-Gerdefaramarzi, S. (2025). Advanced hybrid frameworks for water quality index prediction. *Ain Shams Engineering Journal*, 16(8), 103478. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103478>
- Ershad-Hosseini, M., Keshtkar, A., Hosseini, S., & Afzali, A. (2021). Analysis of temporal trend of groundwater quality using nonparametric Mann-Kendall and Sen's methods (Case study: Yazd-Ardakan Plain). *Geography and Environmental Planning*, 32(4), 87-106. [In Persian] <https://doi.org/10.22108/gep.2021.127620.1404>
- Gholizadeh, A., Mokhtari, M., Naimi, N., Shiravand, B., Ehrampoush, M. H., Miri, M., & Ebrahimi, A. (2017). Assessment of corrosion and scaling potential in groundwater resources; a case study of Yazd-Ardakan Plain, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 5, 59-65. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.04.002>
- Heidari, E., Ekrami, M., & Nasabpour, S. (2015). Temporal and Spatial Study Groundwater Quality Using Geostatistical (Casestudy: Yazd – Ardakan Plain). *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 4(6), 63-70. [In Persian] https://deej.kashanu.ac.ir/jufile?ar_sfile=1064228
- Izadi, N., KhasheiSiuki, A., Pourreza Bilondi, M., & Hashemi, S. R. (2022b). Presenting a New Index of Pollution and Ecology Risk of Groundwater (PERG). *Environment and Water Engineering*, 8(2), 278-290. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.290702.1581>
- Izadi, N., Khashei Siuki, A., Pourreza Bilondi, M., & Hashemi, R. (2022a). Evaluation of chemical pollution of Birjand plain aquifer using groundwater pollution index (PIG). *Journal of Aquifer and Qanat*, 2(2), 24-32. [In Persian] https://jaaq.birjand.ac.ir/article_2194.html
- Khajavi, Z., Soltani-Gerdefaramarzi, S., & Gheysouri, M. (2025). The impact of land use on the quality and quantity of groundwater in the Yazd-Ardakan plain. *Extension and Development of Watershed Management*, 13(50), 52-60. [In Persian] https://www.wmji.ir/article_729965.html
- Khosravi, H., Haydari Alamdarloo, E., & Nasabpour, S. (2018). Investigation of Spatial-Temporal changes of Yazd-Ardakan Plain Groundwater Quality Using GQI. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 26(104), 35-44. [In Persian] <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.30516>
- Mahmodi, M., & Erfanian, M. (2022). Water Quality Assessment of Surface and Ground Water Resources in Naghadeh- Oshnavieh Plain. *Environmental Researches*, 13(25), 33-50. [In Persian] https://www.iraneiap.ir/article_158574.html
- Mehrshahi, D., & Mehrnahad, H. (2006). Morphotectonic forms resulting from the operation of the North Yazd fault. *Geography*, 4(11), 21-31. [In Persian] https://mag.iga.ir/article_704313.html?lang=en
- Naderi Eshkaftaki, M., Mirabbasi, R., & Nasr Esfahani, M. A. (2023). Investigation of Temporal and Spatial Variations of Groundwater Quality in Sefiddasht Plain and Suitability Evaluation for Agricultural Use. *Hydrogeology*, 7(2), 91-108. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.61186/jehe.10.3.221>
- Omidvar, K., Zareh, M., & Ebrahimi, R. (2016). The Effect of Recent Droughts on Groundwater Resources in Yazd-Ardakan Plain. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 10(5), 622-635. [In Persian] https://idj.iaid.ir/article_55428_en.html
- Prasad, M., Sunitha, V., Balaji, E., Reddy, B. M., Sudharshan Reddy, Y., & Kumar, B. P. (2025). Application of Water Quality Index, Hierarchical Cluster Analysis, Pollution Index of Groundwater and Geospatial Technologies in Evaluating the Water Quality: A Study from Mangampeta Barytes Mine Area, South India. In *Groundwater Resource Management Planning Strategies: A Geospatial Approach: Volume 1* (pp. 745-774). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88870-0_29
- Rafi Sharifabad, J., Nohegar, A., Zehtabian, G., & Gholami, H. (2017). Tracking temporal and spatial changes in underground water quality for potable and agricultural purpose (Case study: Yazd-Ardakan Plain). *Desert Management*, 5(9), 107-119. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jdmal.2017.27853>

- Rastgoo, M., Nasiri Saleh, F., & Khashei Siuki, A. (2023). Evaluation of groundwater quality for drinking purpose in birjand aquifer using PIG index and modified LPIG index based on AHP method. *New Research in Sustainable Water Engineering*, 1(2), 57-73. [In Persian] <https://doi.org/10.22103/nrswe.2023.20384.1016>
- Sahebjalal, E., Dehghany, F., & Tabatabaezade, M. S. (2013). Investigating Spatio-Temporal Variations of Groundwater Quality Using Kriging Method. *Journal of Water and Soil Science*, 17(65), 51-61. [In Persian] <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-1688-fa.html>
- Sanad, H., Mouhir, L., Zouahri, A., Moussadek, R., El Azhari, H., Yachou, H., ... & Dakak, H. (2024). Assessment of groundwater quality using the pollution index of groundwater (PIG), nitrate pollution index (NPI), water quality index (WQI), multivariate statistical analysis (MSA), and GIS approaches: A case study of the Mnasra Region, Gharb Plain, Morocco. *Water*, 16(9), 1263. <https://doi.org/10.3390/w16091263>
- Sarvi Sadrabad, H., & Zare Chahouki, A. (2022). Study of the Efficiency of Groundwater Quality Index to Evaluate the Long-term Effects of Inter-Basin Water Transfer Using Non-Parametric Methods and GIS (Case Study Yazd-Ardakan Aquifer). *Water and Soil*, 35(6), 804-791. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.2021.71571.1073>
- Shube, H., Karuppanan, S., Haji, M., Paneerselvam, B., Kawo, N., Mechal, A., & Fekadu, A. (2024). Appraising groundwater quality and probabilistic human health risks from fluoride-enriched groundwater using the pollution index of groundwater (PIG) and GIS: a case study of adama town and its vicinities in the central main Ethiopian rift valley. *RSC Advances*, 14(41), 30272-30285. <https://doi.org/10.1039/D4RA02890B>
- Subba Rao, N. (2012). Evaluation of groundwater quality using pollution index of groundwater (PIG) in Visakhapatnam, India: A GIS approach. *Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2(5), 1-8. <https://doi.org/10.1002/hyp.8456>
- Sunitha, V., Madhavi, P., & Srinivasa Rao, V. (2021). Groundwater quality evaluation for drinking purposes using PIG index and GIS: A case study from Andhra Pradesh, India. *Environmental Earth Sciences*, 80(4), 189-197. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09461-4>
- Verma, A., & Singh, N. B. (2021). Evaluation of groundwater quality using pollution index of groundwater (PIG) and non-carcinogenic health risk assessment in part of the Gangetic Basin. *Acta Geochimica*, 40(3), 419-440. <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00446-y>
- Yazici-Karabulut, B., Kocer, Y., & Yesilnacar, M. I. (2024). Bottled water quality assessment through entropy-weighted water quality index (EWQI) and pollution index of groundwater (PIG): A case study in a fast-growing metropolitan area in Türkiye. *International Journal of Environmental Health Research*, 34(1), 61-72. <https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2130880>