Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Hydrochemical characterization and health risk assessment of groundwater contamination in birjand plain, eastern iran

Haniye Yaghoubi[1], Reza Jahanshahi[2]✉, Morteza Mozafari[3]

1. M.Sc Student, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: hani.yaghuobi0810@gmail.com
2. Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: rezajahanshahi@ut.ac.ir
3. Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mmozafari@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 19 October 2025
Accepted 10 November 2025

Keywords:
Groundwater, Pollution, Nitrate, Fluoride, Birjand, Water quality, Health index.

ABSTRACT

This study examines the hydrochemistry and contamination levels of groundwater resources in the urban area of Birjand in eastern Iran. Water quality was assessed and pollution sources were identified through sampling 22 wells, 12 qanats and 4 springs. The results showed that electrical conductivity varied from 300 to 8,000 µS/cm, while pH ranged from 7.23 to 8.71. According to the Piper diagram, the dominant hydrochemical facies were chloride, sulphate and bicarbonate types. In some of the samples, the nitrate concentration exceeded the permissible limit of 50 mg/L set by the World Health Organization, indicating the influence of urban wastewater and agricultural effluents. The ionic ratios reveal the influence of halite and gypsum dissolution processes, as well as ion exchange reactions, on the chemical composition of the water. A health risk assessment showed that, while most sources are within the safe range for adults, some wells and qanats pose a higher risk to infants and children. This study aims to provide a scientific framework for understanding the geochemical processes that control water quality, and to identify high-risk areas for the sustainable planning and management of groundwater resources in the Birjand plain.

Introduction

Groundwater is one of the most vital natural resources in arid and semi-arid regions such as eastern Iran, where surface water is scarce and highly seasonal. The quality of groundwater resources in many Iranian cities has been significantly affected by rapid urban expansion, population growth, agricultural intensification, and inadequate wastewater management.. Birjand city, located in South Khorasan province, relies heavily on groundwater for drinking, agricultural, and industrial purposes. However, the increasing concentrations of nitrates, phosphates and fluorides, primarily caused by the infiltration of domestic wastewater and agricultural return flow, have raised serious environmental and public health concerns.. Therefore, assessing the hydrochemical characteristics and contamination levels of groundwater in this region is therefore essential for the sustainable management and protection of this critical resource. The main objectives of this study were to (i) investigate the hydrochemical composition of groundwater in the Birjand aquifer, (ii) determine the spatial distribution of major ions and key pollutants, and (iii) evaluate the suitability of groundwater for drinking and irrigation purposes using standard quality indices.

Materials and Methods

The study area covers the Birjand plain, located in eastern Iran. It hasan average annual

Cite this article: Yaghoubi, H., Jahanshahi, R., Mozafari, M., (2025). Hydrochemical characterization and health risk assessment of groundwater contamination in birjand plain, eastern iran. Journal of Engineering Geology, 19 (3), 348-377. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1019571

© The Author(s).

Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1019571

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

temperature of 16.6°C and a mean annual precipitation of about 146 mm. The region's geology mainly consists of Quaternary alluvial deposits, marls, sandstones, limestones, and volcanic rocks. Two main aquifers were identified within the study area: the northern (Mark) and southern (Birjand) aquifers.

A total of 22 wells, 12 qanats, and 4 springs were selected for sampling. Water samples were collected in pre-cleaned polyethylene bottles and analyzed in the laboratory for physicochemical parameters including pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), major cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}), and anions (HCO_3^{-}, SO_4^{2-}, Cl^{-}, NO_3^{-}, F^{-}, and PO_4^{3-}). Temperature, EC, and pH were measured in situ using portable meters. Hydrochemical facies were determined using Piper and Schuler diagrams. The Wilcox diagram was applied to evaluate water suitability for irrigation. Spatial distribution maps of EC, TDS, nitrate, phosphate, and fluoride were generated using GIS software.

Contamination and health risk assessments were performed using the Hydrochemical Evaluation Index (HEI) and Hazard Quotient (HQ) for nitrate and fluoride ions. The HQ was calculated for three age groups (infants, children, and adults) based on chronic daily intake (CDI) values and reference doses (RfD) from the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) standards.

Results and Discussion

Hydrochemical analyses revealed that groundwater in the study area had EC values ranging from 300 to 8000 µS/cm and pH values between 7.23 and 8.71. The Piper diagram indicated that the dominant water types were Na–Cl, Na–SO_4, and Mg–HCO_3, corresponding to chloride, sulfate, and bicarbonate facies, respectively. These results reflect the combined influence of geological formations, evaporation, and anthropogenic inputs.

Spatial distribution maps revealed that the highest EC and TDS values occurred in the northern and western parts of the study area, while lower values were observed in the south. This pattern indicates increasing mineralization and salinity along the groundwater flow path, largely due to dissolution of evaporitic formations and reduced recharge in the downstream areas.

Nitrate concentrations varied between 0.76 and 111.07 mg/L, with several wells (especially W8, W9, W11, and Q2) exceeding the WHO guideline limit of 50 mg/L for drinking water. Elevated nitrate levels were mainly found near agricultural lands and urban areas where wastewater infiltration and fertilizer application are common. Phosphate concentrations ranged from 0 to 0.341 mg/L, and fluoride concentrations from 0.01 to 0.858 mg/L. Although most fluoride levels were below the permissible limit, some samples in the western zone showed higher concentrations that may pose potential health risks.

The Schuler diagram showed that most water samples were classified from "moderate" to "unacceptable" for drinking, particularly in the northern sector. Based on the Wilcox diagram, the majority of samples were in the S2–C3 to S4–C4 classes, indicating moderate to high salinity and sodium hazards, thus limiting their suitability for irrigation in sensitive crops.

Ion ratio relationships (e.g., Na^{+}/Cl^{-}, Ca^{2+}/Mg^{2+}, and HCO_3^{-}/SO_4^{2-}) suggested that groundwater chemistry is controlled primarily by halite and gypsum dissolution, carbonate weathering, and ion exchange processes between groundwater and aquifer matrix materials.

The calculated HEI values indicated that groundwater pollution is mainly influenced by nitrate and sulfate ions. Health risk assessment results showed that the HQ values for nitrate and fluoride were less than 1 for adults, indicating no significant risk, while for infants and children, HQ values exceeded 1 in several samples, suggesting potential non-carcinogenic risks, particularly from nitrate ingestion.

Conclusions

The study demonstrated that groundwater quality in the Birjand plain has been significantly impacted by both natural and anthropogenic factors. Elevated nitrate levels in parts of the aquifer are mainly due to the infiltration of domestic wastewater and agricultural return flow, while salinity is enhanced by dissolution of evaporitic formations and high evaporation rates. Although most water samples are suitable for irrigation under controlled use, several wells and qanats contain nitrate concentrations exceeding the permissible limits for drinking purposes. The results highlight the urgent need for proper wastewater management, regular water quality monitoring, and fertiliser usage regulation to prevent further groundwater degradation. To ensure the long-term availability of safe groundwater resources in Birjand and similar semi-arid regions, sustainable management strategies are recommended, including artificial recharge and the development of wastewater treatment facilities..

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

ویژگی‌های هیدروشیمیایی و ارزیابی خطر سلامت ناشی از آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت بیرجند، شرق ایران

حانیه یعقوبی[۱]، رضا جهانشاهی[۲]✉، مرتضی مظفری[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hani.yaghuobi0810@gmail.com
۲. دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: rezajahanshahi@ut.ac.ir
۳. دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mmozafari@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

کلیدواژه‌ها:
آب زیرزمینی، آلودگی، نیترات، فلوراید، بیرجند، کیفیت آب، شاخص سلامت.

چکیده

در این پژوهش به بررسی هیدروشیمی و وضعیت آلودگی منابع آب زیرزمینی در محدوده شهر بیرجند پرداخته شده است. به‌منظور تعیین کیفیت آب و شناسایی منشأ آلودگی، از ۲۲ حلقه چاه، ۱۲ رشته قنات و ۴ چشمه نمونه‌برداری شد. نتایج حاصل از تحلیل‌های فیزیکی و شیمیایی نشان داد که هدایت الکتریکی بین ۳۰۰ تا ۸۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و pH بین ۲۳/۷ تا ۸/۷۱ متغیر است. بر اساس نمودار پایپر، تیپ غالب آب‌ها در منطقه کلروره، سولفاته و بی‌کربناته است. در برخی منابع، غلظت نیترات از حد مجاز سازمان بهداشت جهانی (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) فراتر رفته که نشانگر تأثیر فاضلاب شهری و پساب کشاورزی است. نسبت‌های یونی بیانگر نقش فرآیندهای انحلال هالیت و ژیپس و واکنش‌های تبادل یونی در کنترل ترکیب شیمی آب می‌باشد. ارزیابی خطر سلامت نشان داد که هرچند بیشتر منابع برای بزرگسالان در محدوده بی‌خطر قرار دارند، برخی چاه‌ها و قنوات برای نوزادان و کودکان خطرپذیری بالایی دارند. هدف نهایی این پژوهش ارائه یک چارچوب علمی برای درک فرآیندهای زمین‌شیمیایی کنترل‌کننده کیفیت آب و شناسایی مناطق پرخطر جهت برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی دشت بیرجند است.

مقدمه

آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است و نقش حیاتی در توسعه اقتصادی و اجتماعی ایفا می‌کند (Alizadeh, 2006; Ghazban, 2010). در ایران، با توجه به موقعیت اقلیمی خشک و تبخیر بالا، بخش عمده‌ای از نیاز آبی برای شرب، کشاورزی و صنعت از طریق منابع زیرزمینی تأمین می‌شود. سال‌های اخیر، کاهش بارش، بهره‌برداری بی‌رویه و آلودگی ناشی از پساب‌های شهری و کشاورزی منجر به افت سطح آب زیرزمینی و کاهش کیفیت آن شده است (Hoveidi, 2011; Barzanoni and Akbarpour, 2010). مطالعات متعددی در زمینه بررسی کیفیت و ترکیب هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی در نقاط مختلف کشور انجام شده است (Samiee-Rad et al., 2024; Mirzaee et al., 2023; Sarikhani et al., 2020). در محدوده جنوب دشت بیرجند موسوی (Mousavi, 2011) نشان داد که غلظت نیترات در بسیاری از چاه‌ها از حدود مجاز جهانی فراتر رفته و منشأ آن نفوذ فاضلاب‌های خانگی و بازگشت آب آبیاری است. دهرزما و موسوی (Dehrazma and Mousavi, 2014) با استفاده از مدل موازنه جرمی در جنوب بیرجند نشان دادند که هیدروشیمی آبخوان تحت تأثیر انحلال سازندهای تبخیری، واکنش‌های تبادل یونی و تبخیر است. همچنین، شهریاری و همکاران (Shahryari et al., 2011) در شبکه آب شرب

استناد: یعقوبی، ح.، جهانشاهی، ر.، مظفری، م. (۱۴۰۴). ویژگی‌های هیدروشیمیایی و ارزیابی خطر سلامت ناشی از آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت بیرجند، شرق ایران. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۳)، ۳۴۸-۳۷۷. https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1019571

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

بیرجند افزایش غلظت مس و کروم را گزارش کردند که به خوردگی لوله‌ها و نفوذ پساب شهری نسبت داده شد. در سایر مناطق ایران نیز پژوهش‌های مشابهی انجام شده است. احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2018a; 2018b) در ناحیه معدنی اردستان به این نتیجه رسیدند که انحلال کربنات‌ها، واکنش‌های تبخیری و تبادل یونی کنترل‌کننده اصلی کیفیت آب هستند. آقازاده و همکاران (Aghazadeh et al., 2020) با اصلاح مدل DRASTIC و ارائه مدلDRAST-VUL، آسیب‌پذیری آبخوان شهری تبریز را نسبت به آلودگی نیترات تعیین کردند. در همین راستا، چیت‌سازان و همکاران (Chitsazan et al., 2018) با مدل‌سازی آلودگی ناشی از زباله‌های شهری در دشت لور اندیمشک نشان دادند که ورود آلاینده‌های آلی و معدنی به آبخوان‌های کم‌عمق موجب افزایش غلظت کلراید و سولفات شده است. قدیمی و جوادی شریف (Ghadimi and Javadi Sharif, 2019) با تحلیل عاملی در آبخوان اراک، منابع آلودگی نیترات را شناسایی کرده و نقش فعالیت‌های کشاورزی و کاربری اراضی را برجسته کردند. ناصری و علیجانی (Nassery and Alijani, 2007) نیز در دشت ایذه نشان دادند که نفوذ فاضلاب و پساب‌های دامی از عوامل اصلی آلودگی آب زیرزمینی است. پژوهش حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2020) در منطقه نی‌ریز (فارس) نیز بیانگر آن بود که کیفیت منابع آب در نواحی شهری تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی، تبخیر بالا و واکنش‌های تبادل یونی قرار دارد. در پژوهش‌های دیگر، جنبه‌های زمین‌شیمیایی و زمین‌ساختی کیفیت آب مورد توجه قرار گرفته است. دولتی و همکاران (Dolati et al., 2014) و حافظی مقدم و غفوری (Hafezi Moghaddas and Ghafoori, 2017) منشأ تغییرات شیمیایی را فرآیندهای انحلال، تبخیر و تداخل آب شور و شیرین دانسته‌اند. عسکری ملک‌آباد و همکاران (Askari Malekabad et al., 2017; 2020) در منطقه بزمان تأثیر ساختارهای تکتونیکی را بر الگوی شوری نشان دادند. بهادری و همکاران (Bahadori et al., 2019) با تحلیل ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن و هیدروژن در چشمه‌های بزمان، تفاوت چشمه‌های سرد و گرم را شاخصی از عمق گردش آب معرفی کردند. محمودی نژاد و همکاران (Mahmoodinejad et al., 2021) در دشت ساردوئیه کرمان، افزایش فلزات سنگین را ناشی از تبخیر بالا و تماس طولانی آب با سنگ بستر دانستند. مالی و همکاران (Mali et al., 2022) در معدن مس دره‌زار با استفاده از روش‌های شیمی–ایزوتوپی، مدل تهاجم آب به پیت معدن توسعه دادند. از دیدگاه زمین‌ساختی پژوهش‌های جهانشاهی و همکاران (Jahanshahi et al., 2024a; 2024b) نشان دادند که گسل‌های عمیق در پلایای کجی (نهبندان) موجب صعود آب‌های شور از سازندهای تبخیری و تغییر مسیر جریان زیرزمینی شده است. در زمینه خطرات بهداشتی، نادری و همکاران (Naderi et al., 2020) دو سازوکار غنی‌شدگی فلوراید را در چشمه‌های نزدیک آتشفشان‌های غیرفعال جنوب شرق ایران شناسایی کردند و خطر بالای آن را برای کودکان گزارش نمودند. همچنین دامنی و همکاران (Damani et al., 2024) در منطقه سراوان نشان دادند که غلظت بالای یون‌های نیترات و سولفات در برخی منابع، کیفیت آب آشامیدنی را به‌شدت کاهش می‌دهد. از دیدگاه زیست‌محیطی، صالحی (Salehi, 2007) نشان داد که استفاده از فاضلاب شهری برای آبیاری درختان کاج و اقاقیا در جنوب تهران سبب افزایش عناصر معدنی در خاک و آب زیرزمینی می‌شود. پیشانی‌دار و همکاران (Pishanidar et al., 2024) نیز با استفاده از گیاهان شورپسند، امکان حذف شوری و فلزات سنگین از آب‌های لب‌شور را مورد بررسی قرار دادند. در سطح کلان‌تر، با به‌کارگیری GIS در شهر مشهد، نشان داده شد که پراکندگی آلودگی نیترات و آمونیوم با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

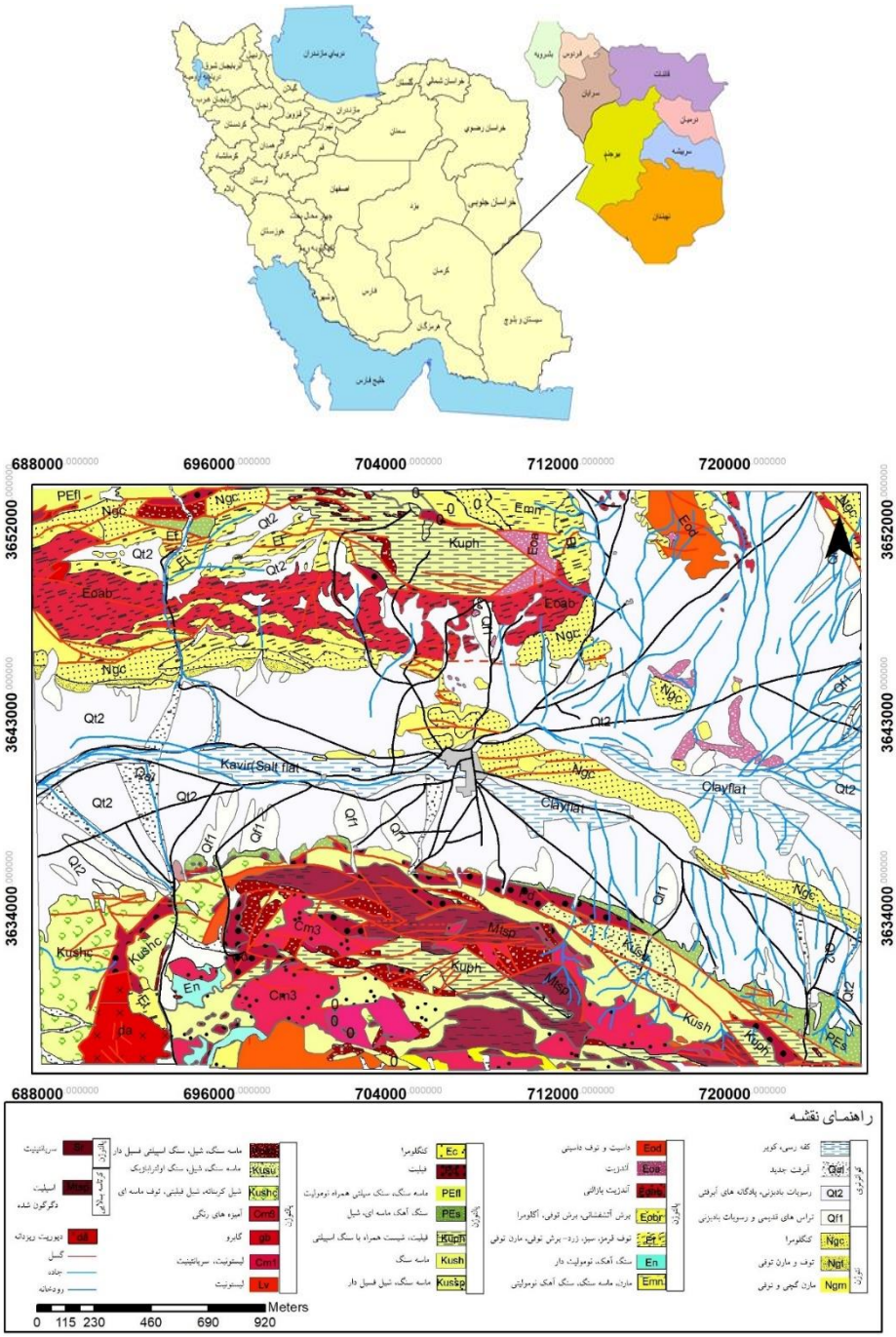
تراکم جمعیت و الگوی توسعه شهری همبستگی بالایی دارد (Jafari Ghariehali et al., 2012). همچنین، شجاعی هم همکاران (Shojaei et al., 2019; 2020) در محدوده سیرجان، آلودگی ناشی از عناصر جزئی و خطر نفوذ آب شور را با استفاده از مدل‌های هیدروشیمیایی و ایزوتوپی بررسی کردند و نشان دادند که ورود آب شور از پلایای نمکی به‌تدریج کیفیت آبخوان را کاهش می‌دهد. مطالعات بین‌المللی و ملی اخیر نیز بیانگر آن است که تنش‌های شهری، برداشت بی‌رویه، و نفوذ فاضلاب‌های تصفیه نشده به‌طور مستقیم بر تغییر ترکیب شیمیایی و افزایش خطر آلودگی آبخوان‌ها اثر می‌گذارند (Jahanshahi et al., 2025a; 2025b). با توجه به مرور جامع مطالعات فوق، می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت آب زیرزمینی در مناطق خشک ایران حاصل برهم‌کنش پیچیده عوامل زمین‌شیمیایی (انحلال و تبخیر)، زمین‌ساختی (گسل‌ها و شکستگی‌ها) و انسانی (فعالیت‌های کشاورزی و شهری) است. با این حال، تاکنون مطالعه‌ای جامع که به‌صورت هم‌زمان به تحلیل هیدروشیمی، منشأ آلودگی و خطر سلامت انسانی در آبخوان بیرجند، به‌ویژه در محدوده شهری، بپردازد انجام نشده است. بنابراین هدف پژوهش حاضر، تحلیل یکپارچه فرآیندهای زمین‌شیمیایی کنترل‌کننده کیفیت آب، شناسایی منشأ آلودگی و ارزیابی خطر سلامت ناشی از نیترات و فلوراید در آب‌های زیرزمینی دشت بیرجند است تا چارچوبی علمی برای مدیریت و پایش پایدار این آبخوان فراهم شود.

منطقه مورد مطالعه

شهر بیرجند مرکز استان خراسان جنوبی در شرق ایران و در ارتفاع ۱۴۷۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است (شکل ۱). متوسط بارندگی سالانه آن ۱۴۶ میلی‌متر بوده و متوسط درجه حرارت سالانه این شهر ۱۶/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. مساحت کلّی گستره حوضه بیرجند ۳۴۰۶/۷۲ کیلومتر مربع است که از این مقدار سهم دشت و ارتفاعات به ترتیب ۹۰۰/۶۳ و ۲۵۰۶/۰۹ کیلومترمربع می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی گستره مورد پژوهش در زون فیلیش شرق ایران قرار دارد. در این منطقه روند عمومی ارتفاعات شرقی- غربی است اما بطرف شرق روند ارتفاعات تغییر کرده و بطور کلی شمال غرب- جنوب شرق شده است. قدیمی‌ترین سازندهای منطقه سردر و جمال است. سازند سردر به سن کربونیفر، این واحد شامل شیل‌های آهکی قرمز_خاکستری رنگ و میان لایه‌های نازک سنگ آهک ماسه‌ای می‌باشد. سازند جمال به سن پرمین شامل سنگ آهک خاکستری تیره همراه با سنگ‌های آهکی رسی و شیلی است. مزوزوئیک منطقه شامل سازندهای سرخ شیل، شتری، شمشک، سنگ آهک ائولیتی، مجموعه‌ای از سنگ‌های آذرین بیرونی و درونی و سنگ‌های آتشفشانی همراه با سنگ‌های رسوبی می‌باشد. سنگ‌های آذرین بیرونی و درونی، سنگ‌های آتشفشانی همراه با سنگ‌های رسوبی به سن کرتاسه پیشین می‌باشند. تشکیلات زمین‌شناسی منطقه در دوران سنوزوئیک شامل سنگ‌های رسوبی و آذرین دگرگونی می‌باشد. فلیش و درون لایه‌های سنگ آهک ، ماسه سنگ قرمز و خاکستری ، کنگلومرا، مارن، سنگ آهکی ریفی، مارن و سنگ آهک، آندزیت به سن پالئوسن- ائوسن پیشین می‌باشد. مجموعه سنگ‌های رسوبی- ولکانیک و آذرین به سن نئوژن که هر یک واحدهای رسوبی و یا ولکانیک بطور مجزا و یا با یکدیگر بصورت متفاوت تشکیل شده است. این واحدها بطور کلی شامل سنگ‌های رسوبی آواری از قبیل ماسه سنگ، کنگلومرا، سیلتستون و سنگ‌های ولکانیکی و آذرین داسیت، ریوداسیت، آندزیت، توف، بازالت می‌باشد. این مجموعه بیشتر در حاشیه ارتفاعات شمالی بیرجند، بخش میانی دشت بیرجند و بصورت پراکنده در بخش‌های مختلف گستره رخنمون دارند. سنگ‌های آندزیت و بازالت آندزیتی به سن نئوژن پسین و کواترنر پیشین و رسوبات تراورتن و مخروط

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

افکنه‌های قدیمی، مخروط افکنه‌های جوان، رسوبات جوان دشت‌ها ، پهنه‌های لای ، پهنه‌های رسی، پهنه‌های نمکی، تپه‌های ماسه بادی و رسوبات بسیار جوان به سن کواترنر بستر آبراهه‌ها و رودخانه‌ها می‌باشد (Aghanabati, 2004) (شکل ۱).

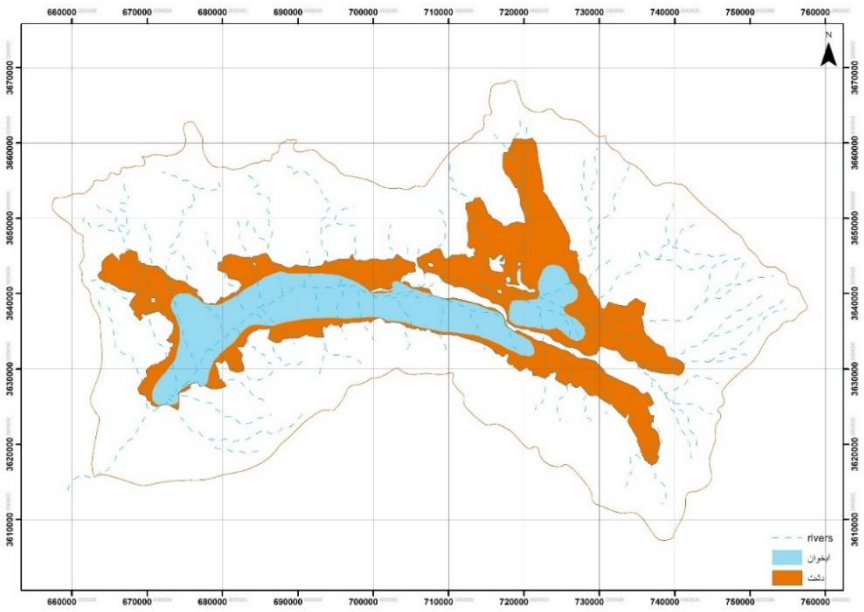


شکل ۱. موقعیت و نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی

Fig. 1. Location and geological map of the study area

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

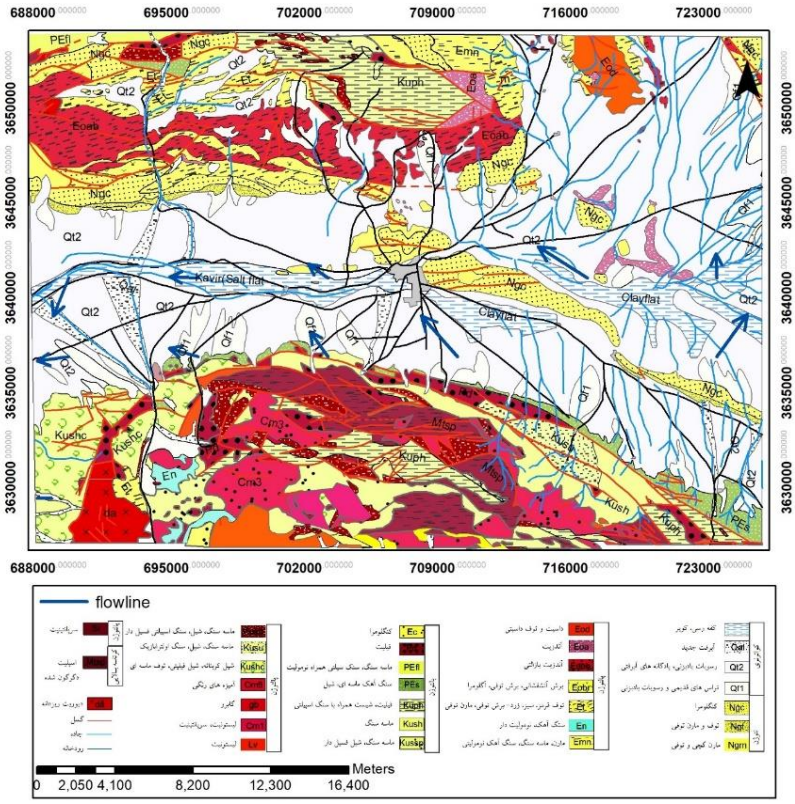
محدوده مطالعاتی بیرجند در شمال حوضه آبریز کویر لوت واقع شده است. در این حوضه رودخانه‌های شور، پل‌باغ، بنددره، بندعمرشاه و چهارده جریان دارند. رودخانه شور در دشت بیرجند جریان دارد و تنها رود دائمی حوضه آبریز کویر لوت می‌باشد. آب این رودخانه به دلیل عبور از نمکزار شور و تلخ می‌باشد به همین دلیل برای کشاورزی مناسب نیست. جهت جریان رودخانه شرقی_غربی و در جنوب غربی منطقه جریان دارد. گستره بیرجند دارای دو آبخوان می‌باشد که شامل آبخوان مرک (شمال) با وسعت۵۳/۷۲ کیلومترمربع و آبخوان بیرجند (جنوب) با وسعت ۲۷۷/۸۰ کیلومتر مربع است (شکل ۲). آبخوان اصلی بیرجند در بخش مرکزی و نیمه جنوبی و غربی حوضه آبریز محدوده واقع شده است. تغذیه آبخوان از شرق و ارتفاعات شمالی، که در غرب و جنوب غربی محـدوده تخلیه می‌گردد. آبخوان محـدوده بیرجند از نوع آزاد و ناهمگن با ضخامت آبرفت در بخش شرقی حدود۱۰۰ متر می‌باشد ولی به علت بالا آمدن سنگ کف و شیب زیاد آن، لایه آبدار تشکیل نشده است. جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان بیرجند تقریباً از جنوب به شمال و همچنین از شرق به سمت غرب می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۲. نقشه آبخوان مرک و بیرجند در دشت بیرجند

Fig. 2. Map of the Merk and Birjand aquifers in the Birjand plain

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]



شکل ۳. جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان بیرجند

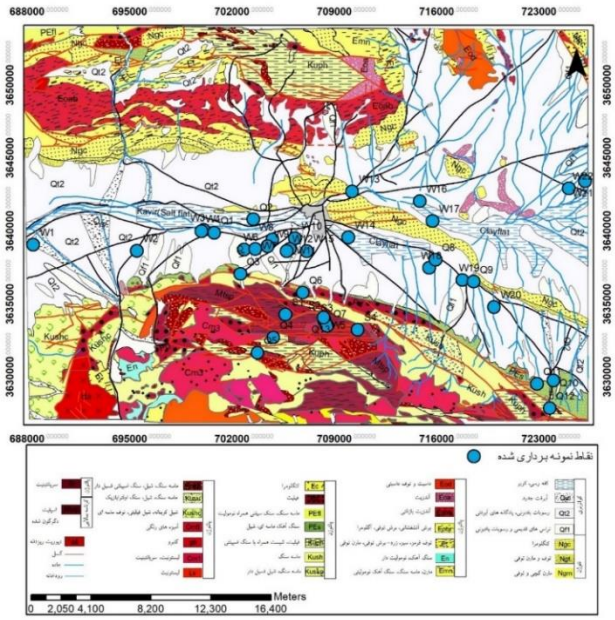
Fig. 3. Direction of groundwater flow in the Birjand aquifer

مواد و روش‌ها

در این تحقیق برای بررسی کیفیت و آلودگی منابع آب زیرزمینی، از ۲۲ حلقه چاه بهره‌برداری، ۱۲ رشته قنات، ۴ دهنه چشمه و یک محل از رودخانه در محدوده شهر بیرجند (شکل ۴)، اقدام به نمونه‌برداری آب شد. در زمان نمونه‌برداری از ظروف پلی‌اتیلن یک لیتری تمیز استفاده شده است. نمونه‌های برداشت شده در آزمایشگاه هیدروشیمی شرکت آب و فاضلاب شهری استان سیستان و بلوچستان مورد آنالیز قرار گرفتند. همچنین پارامترهای هدایت الکتریکی، دما و pH آب در محل نمونه‌برداری اندازه گرفته شده‌اند (شکل ۵). غلظت یون‌های اصلی و فرعی با استفاده از روش‌های استاندارد تعیین شد. آنالیز یون‌های نیترات، فلوراید، فسفات و سولفات با بهره‌گیری از دستگاه اسپکتروفتومتر انجام گرفت. نیترات در طول موج ۲۲۰ نانومتر، فلوراید با روش اسپاندز در طول موج ۵۷۰ نانومتر، فسفات با استفاده از معرف مولیبدات آمونیوم در طول موج ۶۹۰ نانومتر، و سولفات با معرف باریم‌کلراید در طول موج ۴۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شدند. برای هر آنالیز، منحنی استاندارد با محلول‌های مرجع تهیه و دقت دستگاه پیش از هر سری آزمون با نمونه شاهد کنترل شد. غلظت سدیم و پتاسیم با دستگاه فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری گردید. استانداردهای ۲ تا ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر برای کالیبراسیون دستگاه آماده شد و در صورت بالاتر بودن غلظت از حد استاندارد، نمونه‌ها رقیق شدند. یون‌های کلسیم و منیزیم به روش تیترسنجی کمپلکسومتری با محلول استاندارد EDTA (۰۱/ مولار) و معرف مورکسید تعیین گردیدند. کلرور نیز با روش آرژانتومتری و استفاده از نیترات نقره

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

۰۱۴۱/ نرمال و شناساگر کرومات پتاسیم اندازه‌گیری شد. آزمون قلیائیت به روش تیترسنجی با اسید سولفوریک ۰۲/ نرمال و شناساگرهای فنل‌فتالئین و برموکروزول‌گرین انجام شد. تمام مراحل آنالیز بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد APHA و با کنترل دقت و صحت نتایج از طریق بلانک، تکرار نمونه‌ها و استفاده از استانداردهای بین آزمایشگاهی انجام گرفت. نتایج اندازه‌گیری یون‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.



شکل ۴. پراکندگی نقاط نمونه‌برداری از منابع آب در محدوده مورد مطالعه

Fig. 4. Distribution of sampling points from water sources in the study area



شکل ۵. نمایی از عملیات نمونه‌برداری از منابع آب منطقه مورد مطالعه

Fig. 5. Sampling from water resources in the study area

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

جدول ۱. خصوصیات فیزیکوشیمیایی هدایت الکتریکی (میکروموهس بر سانتی‌متر)، دما (سانتی‌گراد) و یون‌ها (میلی‌گرم در لیتر) در نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه

Table 1. Physicochemical characteristics including electrical conductivity (µmhos/cm), temperature (°C), and ion concentrations (mg/L) in the water samples from the study area.

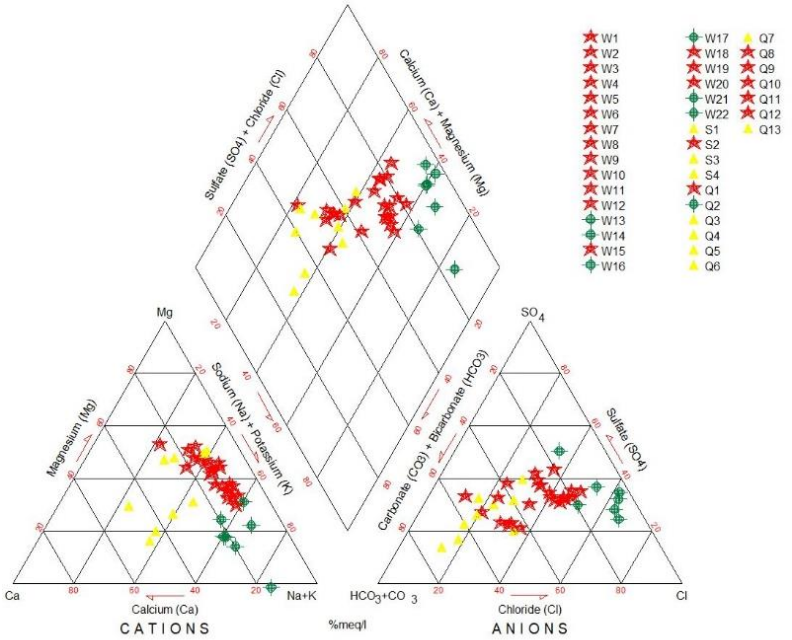
Cod	EC	pH	T	K	Na	Mg	Ca	SO4	Cl	HCO3	F	NO3	PO4
W1	1604	7.74	17	5	161	83	43	270	248	281	0.24	14	0.231
W2	2810	7.49	24.6	4	347	120	68	620	385	373	0.81	42	0.158
W3	1946	7.62	16.2	5	200	106	52	319	322	281	0.66	20	0.336
W4	1933	7.68	24.5	5	200	101	58	320	335	287	0.60	19	0.006
W5	1489	7.57	23	3	139	87	41	231	198	344	0.51	16	0.024
W6	1551	7.38	18.8	3	150	90	43	214	122	529	0.57	22	0.013
W7	1234	7.52	21.8	3	109	74	39	123	158	319	0.43	18	0.017
W8	2170	7.68	23	5	300	100	46	372	359	251	0.40	111	0.024
W9	1665	7.70	22.5	4	200	78	45	263	261	276	0.37	54	0.109
W10	2440	7.67	22.9	5	258	141	49	429	445	246	0.47	30	0.025
W11	1898	7.72	22.5	5	238	92	40	286	308	293	0.41	84	0.006
W12	1215	7.85	20.2	3	100	82	37	142	132	377	0.40	24	0.053
W13	8000	7.29	21.5	40	1000	234	460	1440	1907	169	0.78	29	0
W14	3750	7.54	22	8	412	206	95	479	961	210	0.86	20	0.064
W15	2300	7.59	23.1	5	238	122	46	346	376	266	0.40	45	0.021
W16	4410	7.47	24.8	22	807	46	114	959	483	364	0.50	11	0.219
W17	2640	7.70	22.2	16	404	72	57	505	540	167	0.49	22	0.249
W18	1718	7.75	22	5	218	70	46	300	251	289	0.29	17	0.038
W19	1683	7.63	22.7	5	215	71	40	322	225	308	0.81	19	0.031
W20	1748	7.91	22.5	6	218	68	39	331	230	315	0.52	22	0.027
W21	3810	7.23	25.2	16	546	87	176	531	885	191	0.50	23	0.05
W22	1664	7.42	26.4	11	258	27	62	258	323	211	0.50	18	0.014
S1	832	7.66	12.9	3	50	42	56	119	67	235	0.15	15	0.107
S2	1516	7.31	10.1	8	81	95	75	240	65	502	0.64	96	0.016
S3	435	7.66	16.6	1	37	12	42	36	28	174	0.35	12	0
S4	597	7.83	6.8	1	33	20	52	72	40	190	0.23	7	0.019
Q1	891	8.40	14.9	6	107	40	26	161	73	207	0.52	10	0.242
Q2	7330	7.67	23	35	931	252	330	1223	1773	230	0.75	79	0.341
Q3	572	7.74	13.9	2	50	12	57	39	29	254	0.79	3	0
Q4	1288	7.66	14.4	5	91	82	65	217	82	427	0.24	15	0
Q5	416	7.79	13.8	1	33	15	32	39	49	110	0.21	8	0.031
Q6	836	8.50	17.8	3	75	53	22	124	82	194	0.31	7	0.044
Q7	865	7.79	13.1	3	55	54	50	102	57	345	0.28	7	0.033
Q8	1922	8.18	21.5	9	258	70	47	386	242	351	0.78	23	0.044
Q9	2100	7.81	20.5	5	258	94	40	454	248	378	0.61	20	0.02
Q10	1510	7.87	15.9	5	119	101	56	169	182	450	0.22	31	0.004
Q11	1503	7.94	16.4	5	129	93	54	254	134	437	0.52	17	0.014
Q12	1324	7.93	16	4	109	74	58	153	160	378	0.27	26	0.025
Q13	893	8.72	22.7	4	81	58	20	168	87	176	0.29	1	0.051

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

نتایج و بحث

هیدروشیمی

بر اساس نمودار پایپر (شکل ۶) رخساره منابع آب منطقه مورد مطالعه در جدول ۲ و نقشه‌های توزیع پراکندگی (شکل ۷) ارائه شده است. بر این اساس شش تیپ آب در محدوده شهر بیرجند وجود دارد. از کل منابع آب منطقه مورد مطالعه، ۱۲ چاه و یک قنات دارای تیپ NaCl، چهار چاه و دو قنات دارای تیپ $NaSO_4$، دو چاه دارای تیپ MgCl، چهار چاه و سه چشمه و هفت قنات دارای تیپ $MgHCO_3$، دو چشمه و دو قنات دارای تیپ $CaHCO_3$ و تنها قنات شماره یک دارای تیپ $NaHCO_3$ می‌باشد. با توجه به نقشه پراکندگی تیپ منابع آب در محدوده مورد مطالعه، تیپ‌های غالب در جنوب منطقه بی کربناته، در شرق محدوده سولفاته و در محدوده شهر و به سمت غرب محدوده تیپ کلروره می‌باشد.



شکل ۶. نمودار پایپر و تیپ شیمیایی نمونه‌های آب در منطقه مورد مطالعه

Fig. 6. Piper diagram and chemical type of water samples in the study area

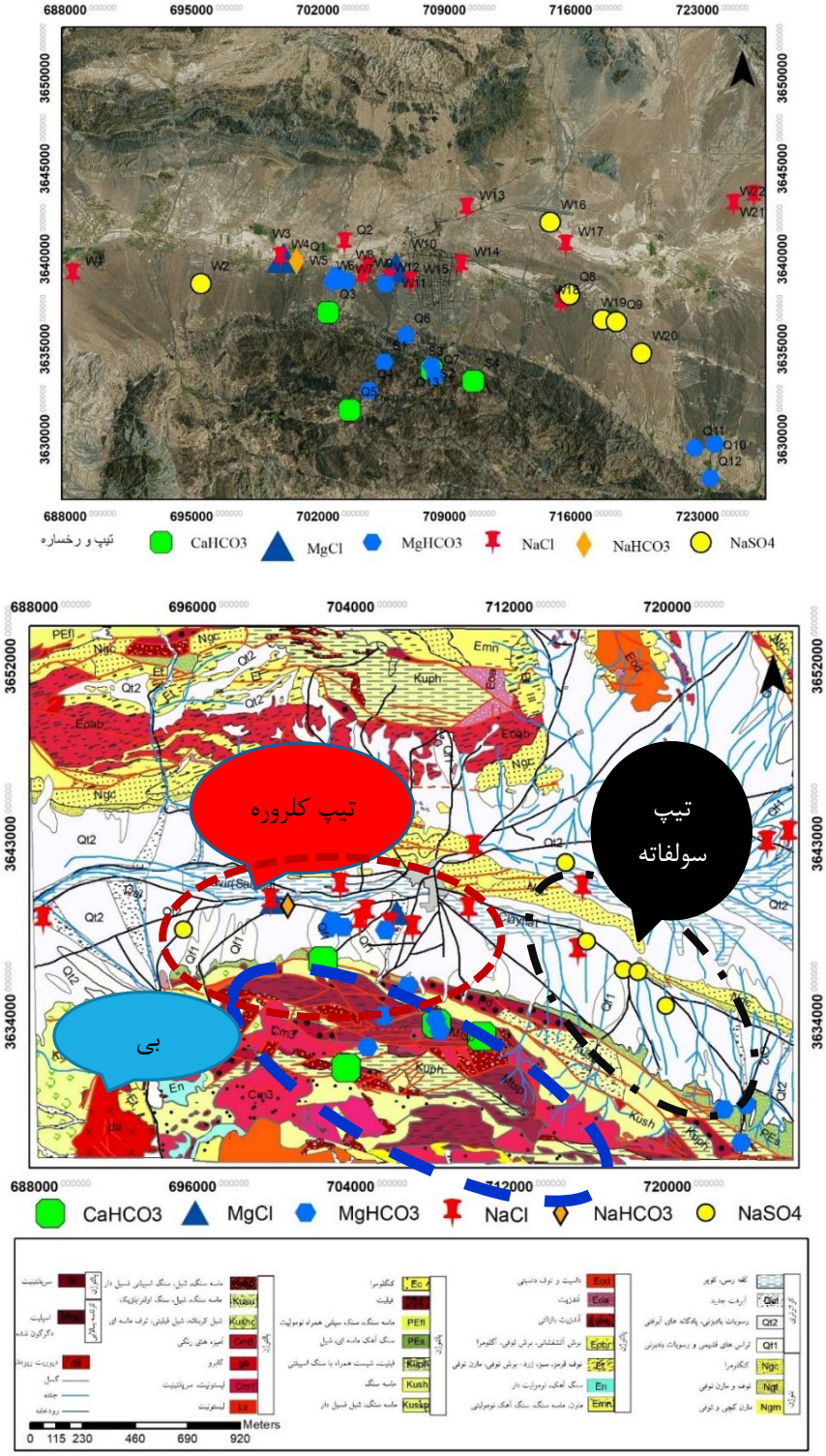
جدول ۲. تیپ منابع آب محدوده مورد مطالعه

Table 2. Types of water resources in the study area

Water Type	Sample name	Water Type	Sample name	Water Type	Sample name	Water Type	Sample name
Mg_HCO_3	Q4	Na_SO_4	W20	Na_Cl	W11	Na_Cl	W1
Ca_HCO_3	Q5	Na_Cl	W21	Mg_HCO_3	W12	Na_SO_4	W2
Mg_HCO_3	Q6	Na_Cl	W22	Na_Cl	W13	Mg_Cl	W3
Mg_HCO_3	Q7	Na_HCO_3	S1	Na_Cl	W14	Na_Cl	W4
Na_SO_4	Q8	Mg_HCO_3	S2	Na_Cl	W15	Mg_HCO3	W5
Na_SO_4	Q9	Ca_HCO_3	S3	Na_SO_4	W16	Mg_HCO_3	W6
Mg_HCO_3	Q10	Ca_HCO_3	S4	Na_Cl	W17	Mg_HCO_3	W7
Mg_HCO_3	Q11	Na_HCO_3	Q1	Na_Cl	W18	Na_Cl	W8
Mg_HCO_3	Q12	Na_Cl	Q2	Na_SO_4	W19	Na_Cl	W9
Mg_HCO3	Q13	Ca_HCO_3	Q3			Mg_Cl	W10

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

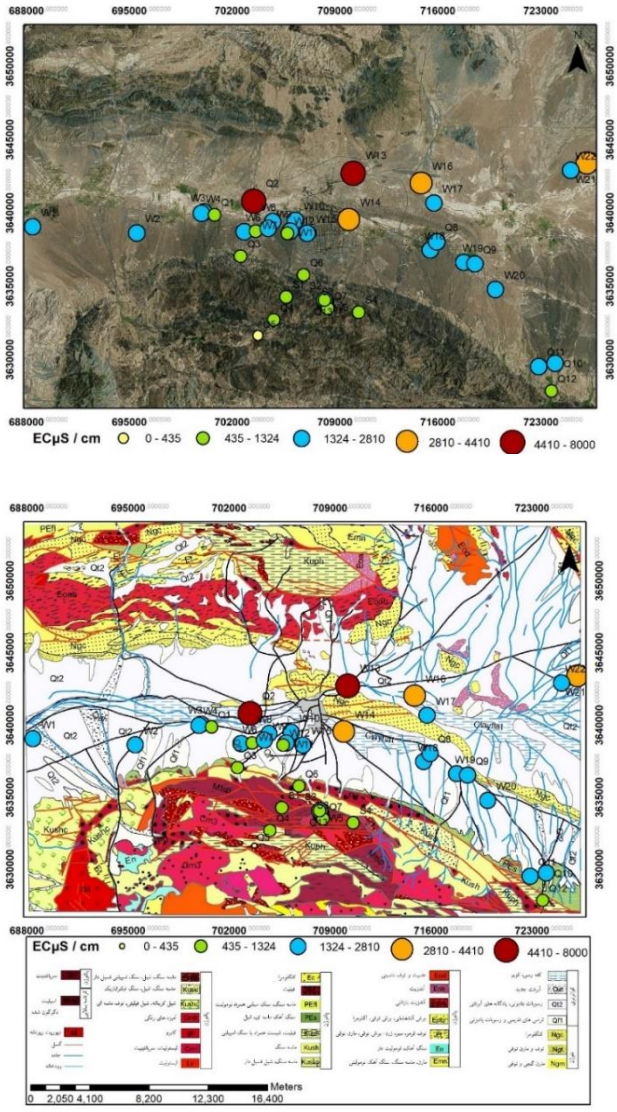
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]



شکل ۷. نقشه توزیع پراکندگی تیپ و رخسار منابع آب منطقه مورد مطالعه

Fig. 7. Distribution map of the type of water resources in the study area

پراکندگی مقادیر هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در محدوده مورد مطالعه در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، غلظت هدایت الکتریکی حدوداً بین ۳۰۰ تا ۸۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است. بیشترین غلظت در چاه شماره ۱۳ با مقدار۸۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در شمال منطقه مورد مطالعه و کمترین مقدار در قنات شماره پنج به میزان ۳۳۸ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در جنوب منطقه قرار دارد. مقادیر هدایت الکتریکی از جنوب منطقه به سمت شمال رو به افزایش است و در چاه‌ها بیشتر از قنات و چشمه‌ها است. جنوب منطقه مورد به طور کلی مقدار هدایت الکتریکی در شمال، غرب، شرق منطقه مورد مطالعه به دلیل وجود رسوبات دانه ریز، کنگلومرا، مارن توفی، مارن گچی، توف مارنی، ماسه سنگ و بالا بودن سنگ کف در حال افزایش است.

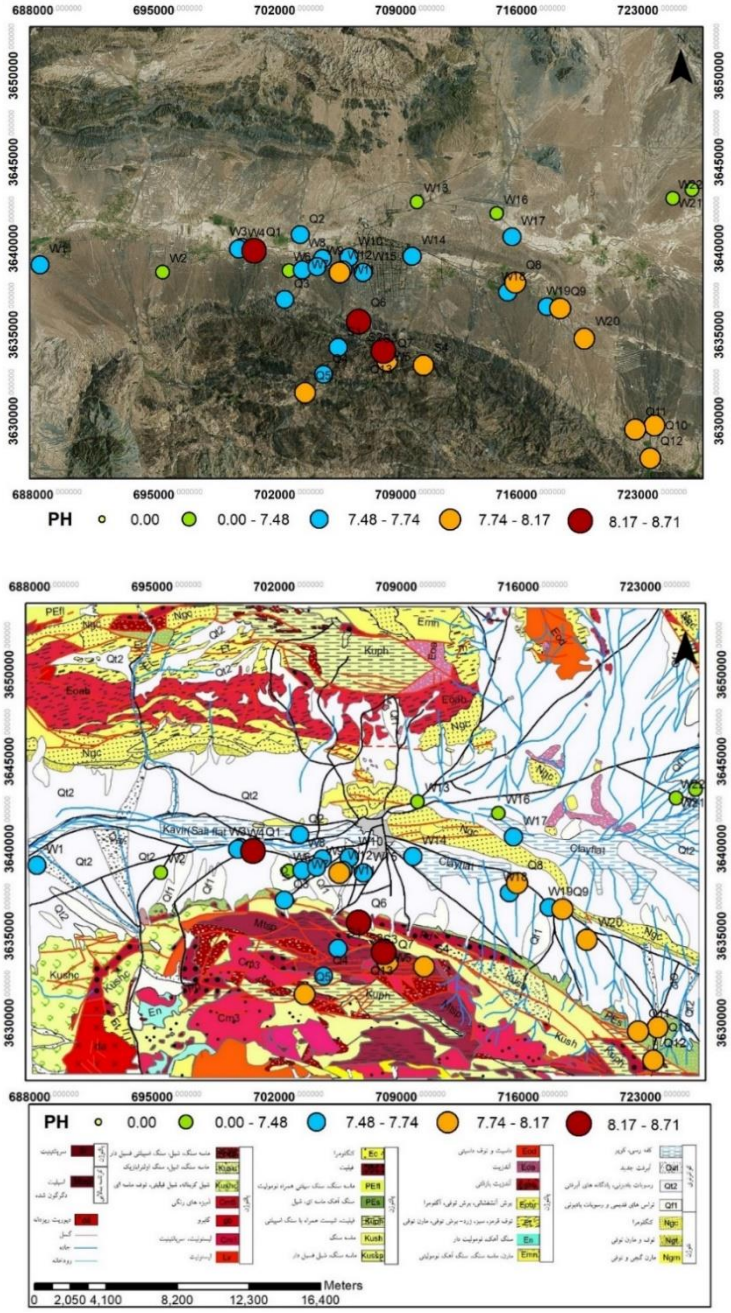


شکل ۸. پراکندگی هدایت الکتریکی در محدوده مطالعاتی

Fig. 8. Electrical conductivity distribution in the study area

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

نقشه پراکندگی مقدار pH منابع آب در منطقه مورد مطالعه در شکل ۹ نشان داده شده است. این پارامتر در محل نمونه‌برداری منابع آب بین ۷/۲۳ تا ۸/۷۱ متغیر بود. بیشترین مقدار در مخزن بنددره به میزان ۸/۷۱ و کمترین مقدار در چاه شماره ۲۱ به میزان ۷/۲۳ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود میزان pH از جنوب به شمال روبه کاهش است و احتمالاً به دلیل کاهش در میزان بی‌کربنات و کربنات در منابع آب باشد.



شکل ۹. پراکندگی مقدار pH در منطقه مورد مطالعه

Fig. 8. The pH distribution in the study area

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

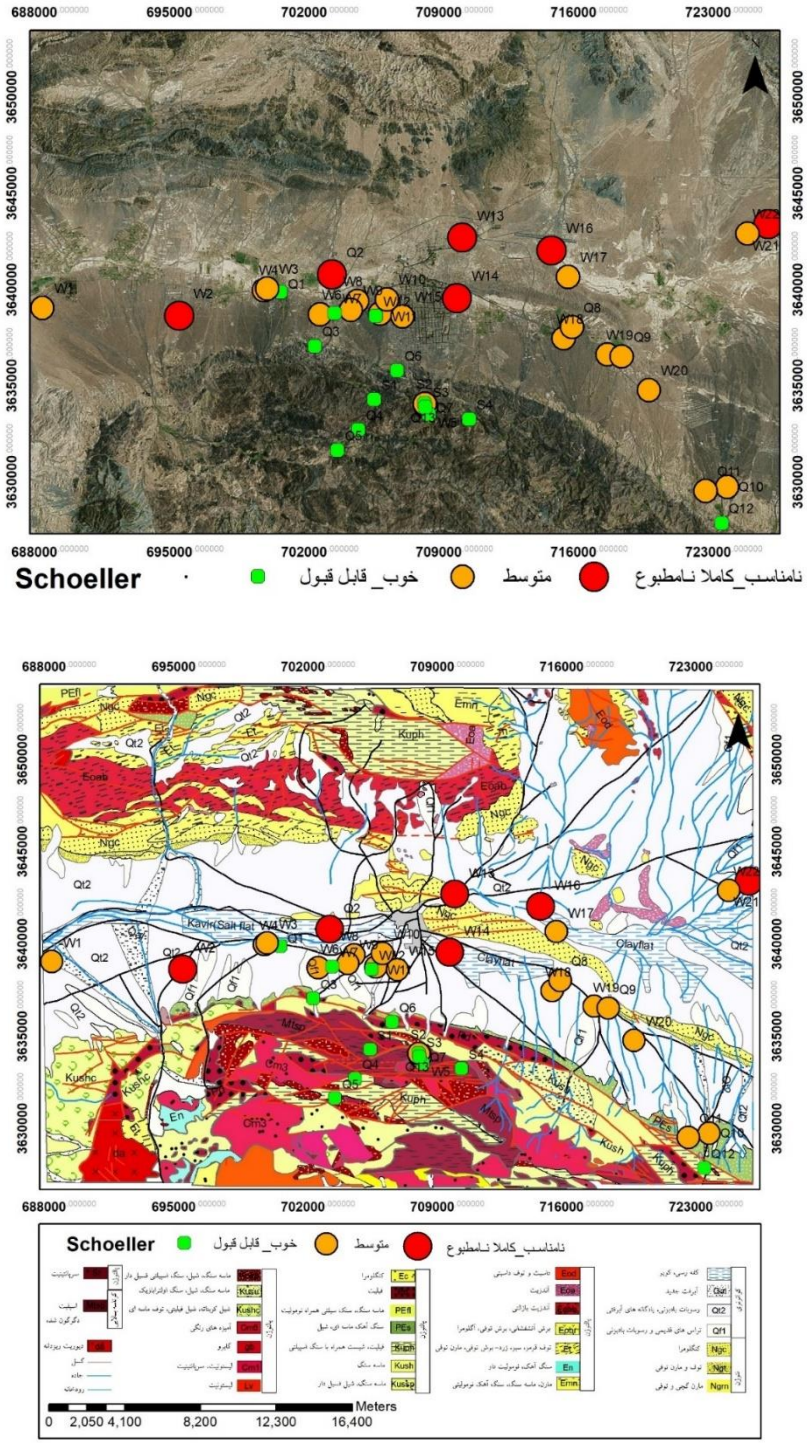
پراکندگی غلظت املاح حل شده در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، غلظت املاح حل شده در منطقه مورد مطالعه بین ۲۰۲/۸ تا ۶۳۶۶ میلی‌گرم در لیتر است. بیشترین غلظت املاح حل شده در چاه شماره ۱۳ و کمترین میزان در قنات شماره۵ می‌باشد. حداکثر مجاز غلظت املاح حل شده در منابع آبی ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد که در محدوده مطالعاتی مقدار آن در چاه‌های شماره۱۳، ۱۶، ۲۱ و قنات شماره ۲ از استاندارد مجاز بیشتر می‌باشد. غلظت املاح حل شده با هدایت الکتریکی رابطه مستقیم دارد. همانطور که در نقشه پراکندگی مشاهده می‌شود روندی تقریباً مشابه به هدایت الکتریکی دارد. با توجه به نقشه، این پارامتر از جنوب به سمت شمال افزایش می‌یابد و مقدار آن در ارتفاعات کمتر از دشت است. عواملی نظیر تغذیه از سازندهای تبخیری، کاهش نزولات جوی، بالا آمدن سطح آب زیرزمینی و به دنبال آن تبخیر، مدت زمان تماس آب زیرزمینی با سازندهای مختلف و دوری و نزدیکی منطقه تغذیه و تخلیه نقش مهمی در غلظت کل املاح حل شده آب زیرزمینی دارند. مقایسه نتایج با پژوهش‌های حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2020) و آقازاده و همکاران (Aghazadeh et al., 2020) نشان می‌دهد که در مناطق خشک، الگوی تغییر کیفیت آب تابعی از عمق آبخوان، نوع سنگ میزبان و شدت بهره‌برداری است.

کیفیت آب

ارزیابی کیفیت منابع آب برای مصارف شرب بر اساس دیاگرام لگاریتمی شولر نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها از لحاظ شرب در محدوده‌ی قابل قبول تا متوسط قرار می‌گیرند. نمونه‌هایی که دارای غلظت زیاد یون سدیم و کلراید هستند در محدوده کاملاً نامطبوع قرار گرفته‌اند و می‌تواند تأیید کننده تیپ سدیم کلروره آب باشد. بر اساس شکل ۱۰ از جنوب به سمت مرکز و شمال دشت، آب زیرزمینی به حالت نامطلوبی نزدیک‌تر می‌شود.

نمودار ویلکوکس کاربردی‌ترین نمودار برای تعیین و طبقه‌بندی آب زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی می‌باشد این نمودار برای نمونه‌های محدوده مطالعاتی ترسیم شده و در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به نمودار نمونه‌های محدوده در رده‌های S1C2, S1C3, S2C3, S2C4, S3C4, S4C4 قرار گرفته‌اند. نمونه‌هایی که در رده‌های S1C2, S1C3 قرار گرفته‌اند در جنوب و غرب محدوده می‌باشند (شکل ۱۱).

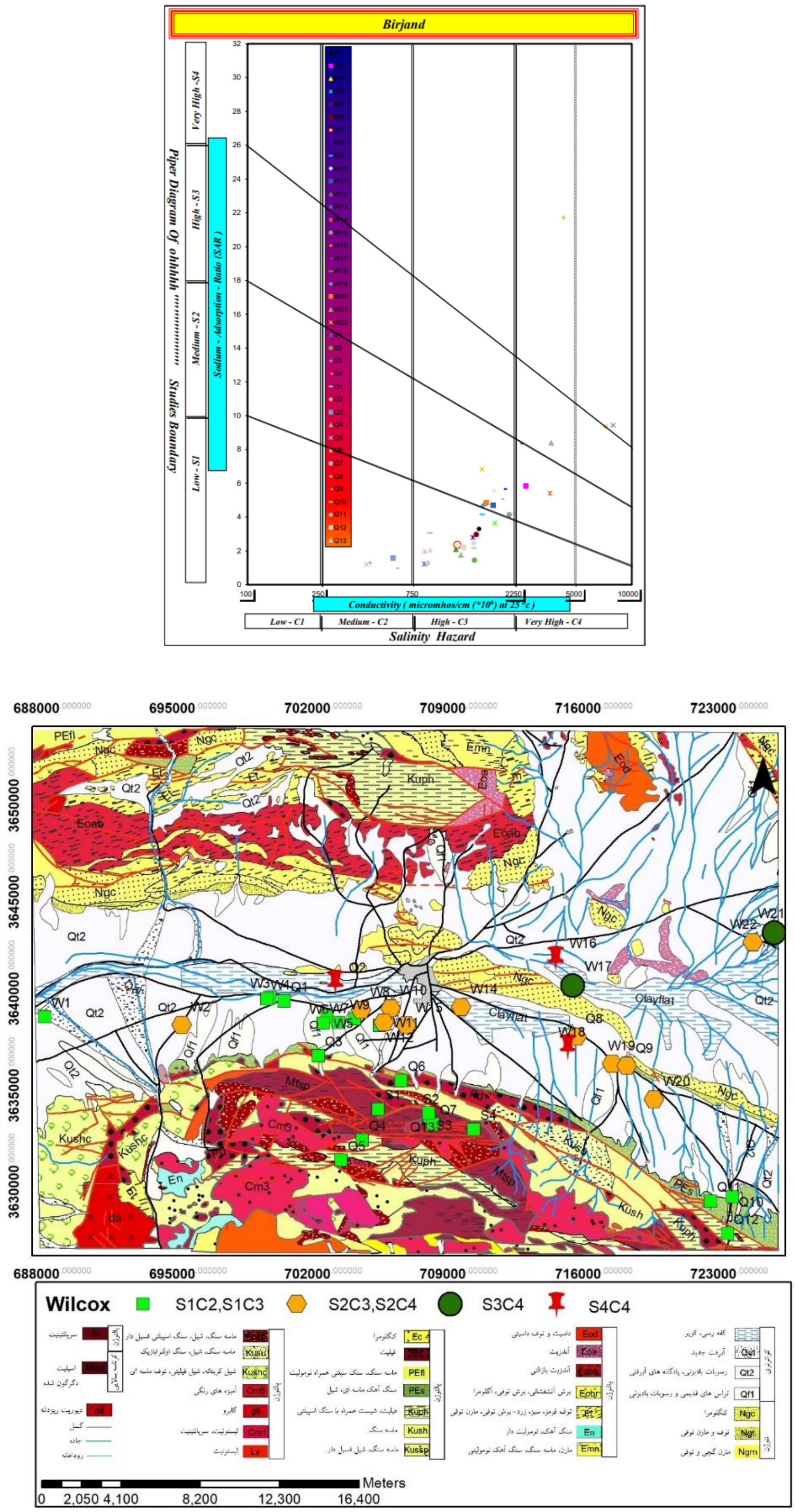
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]



شکل ۱۰. پراکندگی نوع منابع آب بر اساس دیاگرام شولر

Fig. 10. Distribution of water resources based on Schuler diagram

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

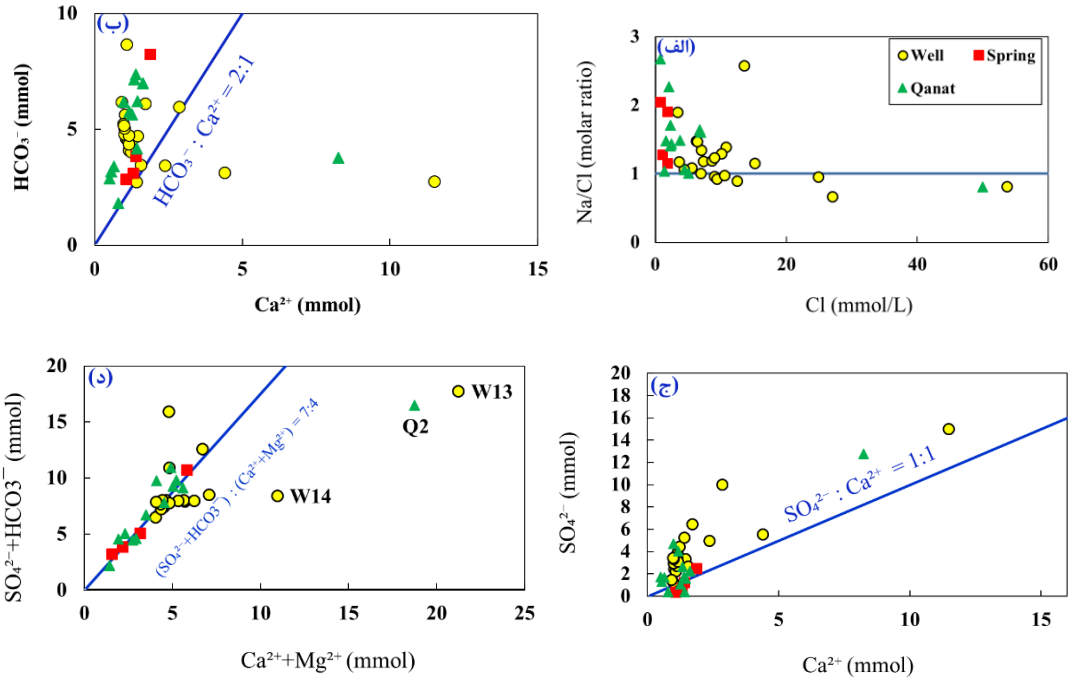


شکل ۱۱. نمودار ویلکوکس منابع آب منطقه مورد مطالعه و پراکندگی نوع منابع آب بر اساس آن

Fig. 11. Wilcox plot of water resources in the study area and the distribution of water resource types based on it

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

برای شناسایی فرآیندهای کنترل کننده منابع آب همانند انحلال و تبادل یونی مؤثر از نسبت‌های یونی استفاده شده است (شکل ۱۲). با توجه به شکل نسبت مولی سدیم به کلراید در مقابل کلراید نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها روی خط یا بالای خط Na/Cl=1 قرار گرفته‌اند، که می‌توان گفت علاوه بر انحلال هالیت، واکنش‌های هوازدگی سیلیکات نیز سدیم را وارد منابع آب کرده است. نسبت‌های مختلف یون‌های کلسیم، منیزیم، سولفات و بیکربنات در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که انحلال همزمان کلسیت، دولومیت و ژیپس در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه رخ داده است.

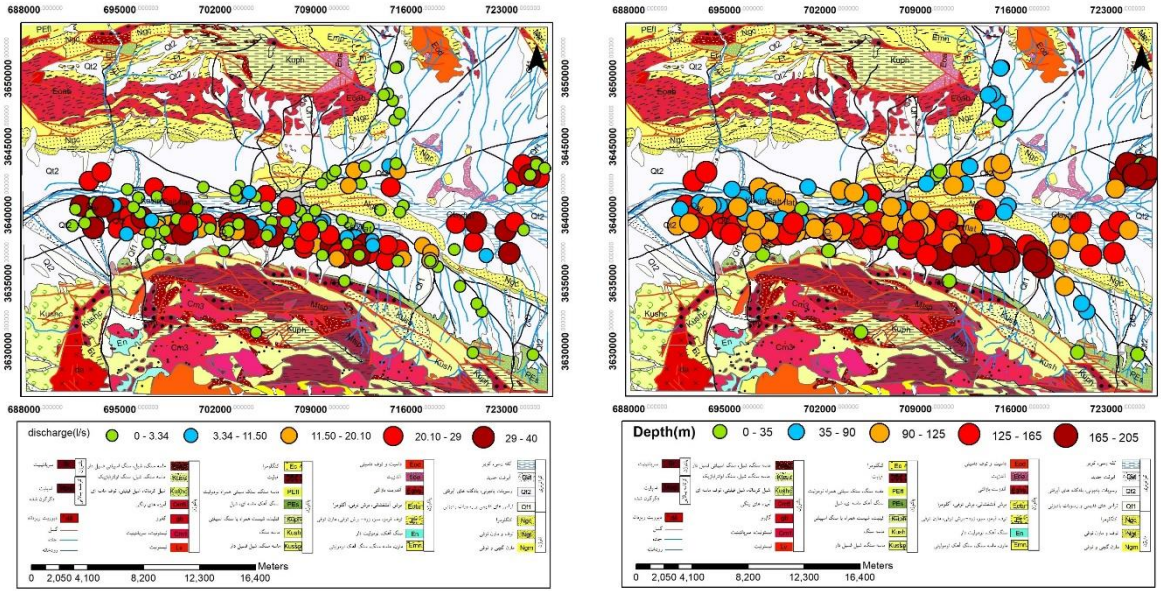


شکل ۱۲. نسبت‌های مختلف یونی منابع آب منطقه مطالعاتی

Fig. 12. Various ionic ratios of water resources in the study area

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود چاه‌های با عمق بیشتر در جنوب و شرق آبخوان قرار دارند و به سمت غرب این عمق کاهش یافته است که به احتمال زیاد به دلیل بالا آمدن سنگ کف آبخوان رخ داد است. با این وجود، میزان نرخ پمپاژ آب برداشتی از آبخوان به سمت غرب افزایش یافته است. لذا سبب افت بیشتر سطح ایستابی و درنتیجه کاهش کیفیت آب زیرزمینی خواهد شد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

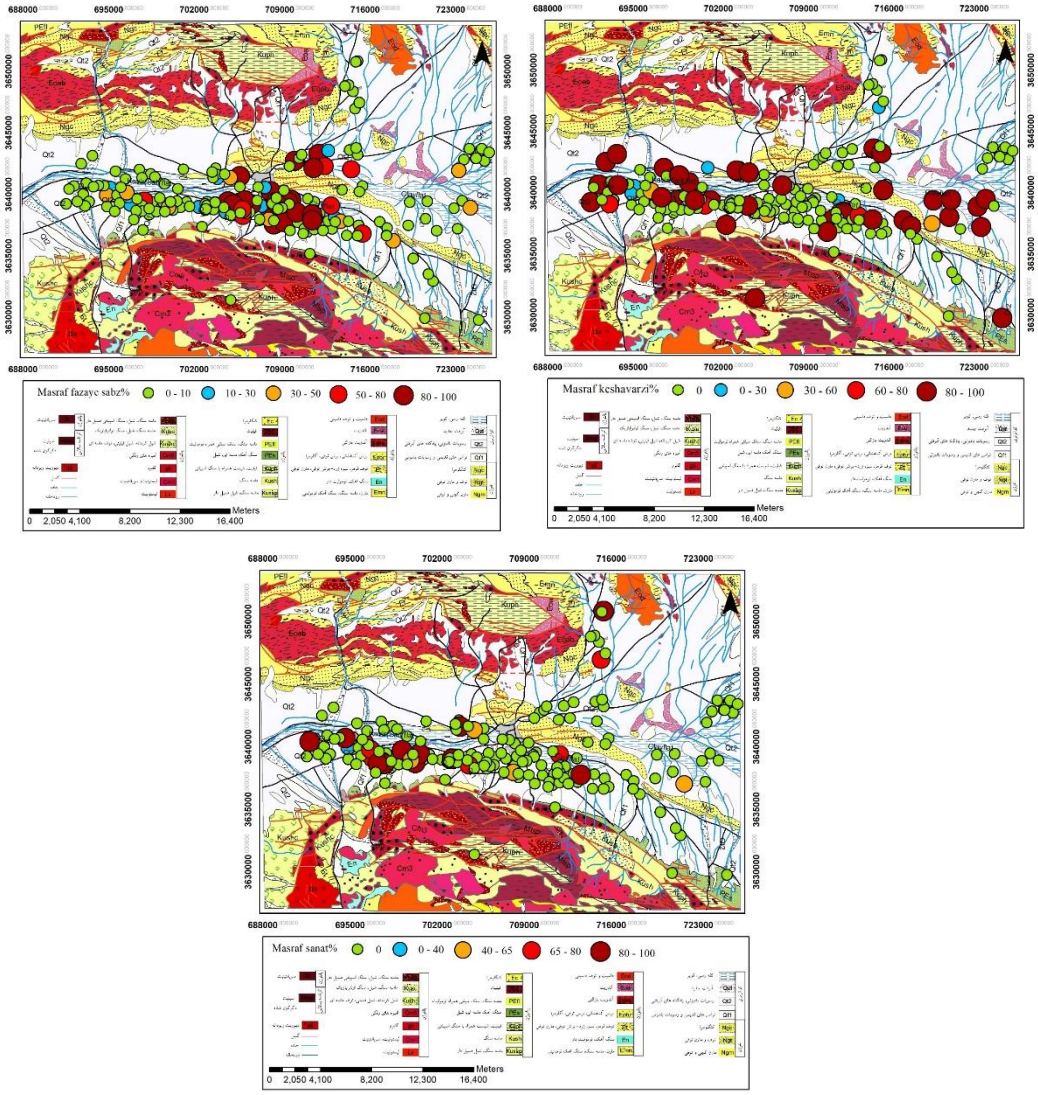


شکل ۱۳. نقشه پراکندگی عمق و نرخ پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری در گستره مورد مطالعه

Fig. 13. Distribution map of depth and pumping rate of exploition wells in the study area

بر اساس شکل ۱۴ مشاهده می‌شود منابع آب زیرزمینی محدوده شهر چندان جهت مصارف کشاورزی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. در حالی‌که چاه‌های شرق و غرب محدوده شهر حدود ۱۰۰ درصد کاربری کشاورزی دارند. همچنین در این شکل دیده می‌شود چاه‌های محدوده شهر عمدتاً کاربری آبیاری فضای سبز دارند و منابع آب با کاربری صنعت در غرب شهر و در انتهای مسیر حرکت آب واقع شده‌اند. لذا آلودگی‌های احتمالی حاصل از تغذیه آبخوان در محدوده شهر بیرجند، در نتیجه آبیاری فضای سبز ایجاد خواهد شد و محل منشأ آلودگی حاصل از آب برگشتی کشاورزی عمدتاً در ورودی و خروجی آبخوان بیرجند واقع شده‌اند و در مرکز آبخوان احتمال ورود آلودگی کشاورزی پایین می‌باشد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]



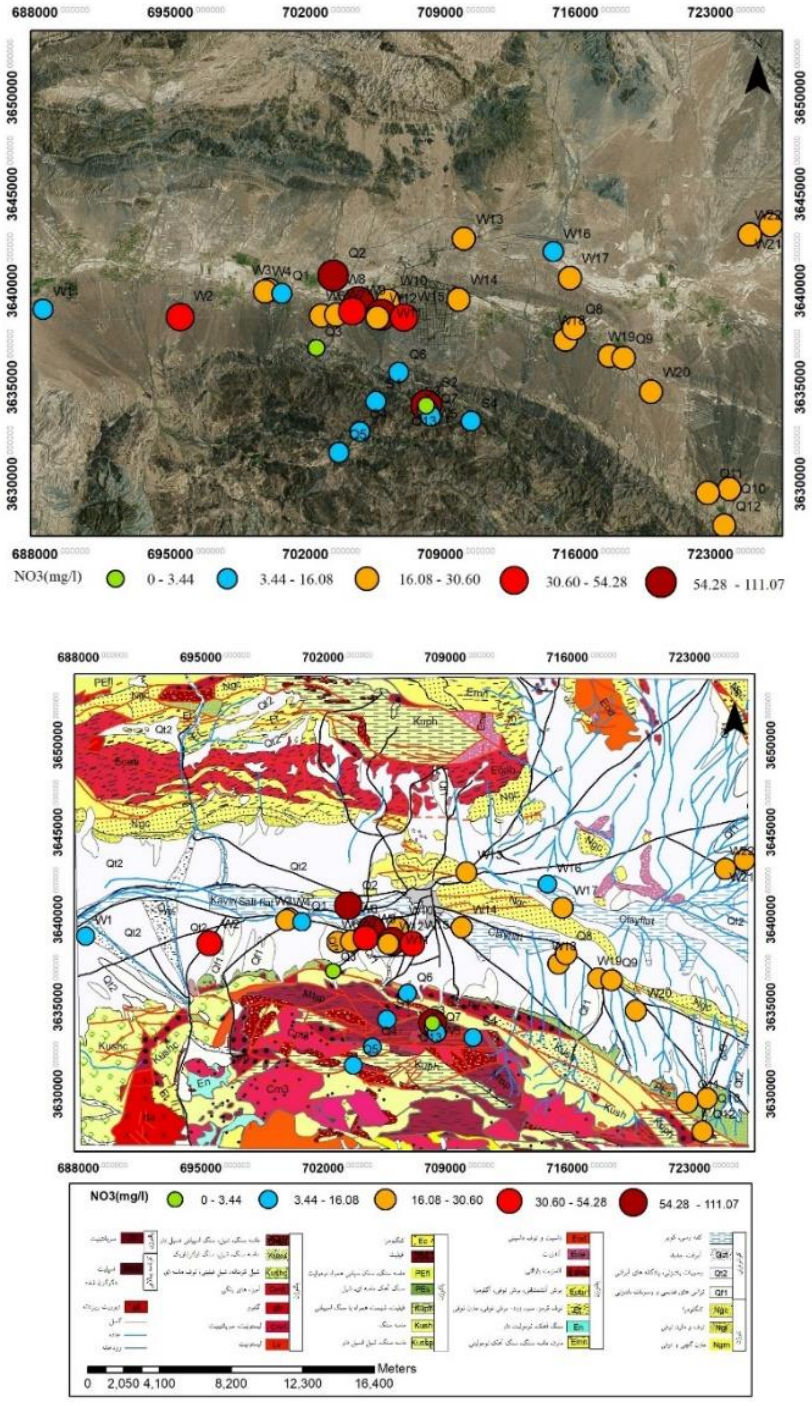
شکل ۱۴. نقشه پراکندگی درصد مصارف آب برداشتی در بخش کشاورزی، فضای سبز و صنعت از منابع موجود در گستره مورد مطالعه

Fig.14. Distribution map of the percentage of water consumption in the agricultural, green area and industrial sectors from groundwater resources in the study area

آلودگی آب

مقادیر اندازه‌گیری شده نیترات در شکل ۱۵ نشان می‌دهد، غلظت نیترات در منابع آب این منطقه بین ۰/۷۶ تا ۱۱۱/۰۷میلی‌گرم در لیتر است. بیشترین مقدار در چاه شماره هشت و کمترین آن در قنات شماره سه و مخزن سد بنددره به ترتیب به میزان ۳/۴۵ و ۰/۷۶ میلی‌گرم در لیتر دیده می‌شود. بر اساس حداکثر مجاز غلظت نیترات آب شرب (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) استاندارد بهداشت جهانی، در محدوده مطالعاتی آب چاه‌های شماره ۱۱، ۹ و ۸ و قنات شماره ۲ از حد استانداردهای بهداشت جهانی بالاتر بوده و نشانه ناسالم بودن این منابع است. همانطور که در نقشه پراکندگی مشاهده می‌شود در غرب و نزدیک به شهر و مناطقی که کشاورزی زیاد است غلظت نیترات هم بیشتر می‌باشد. با توجه به نقشه جهت جریان غلظت نیترات به سمت جهت جریان در حال افزایش است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

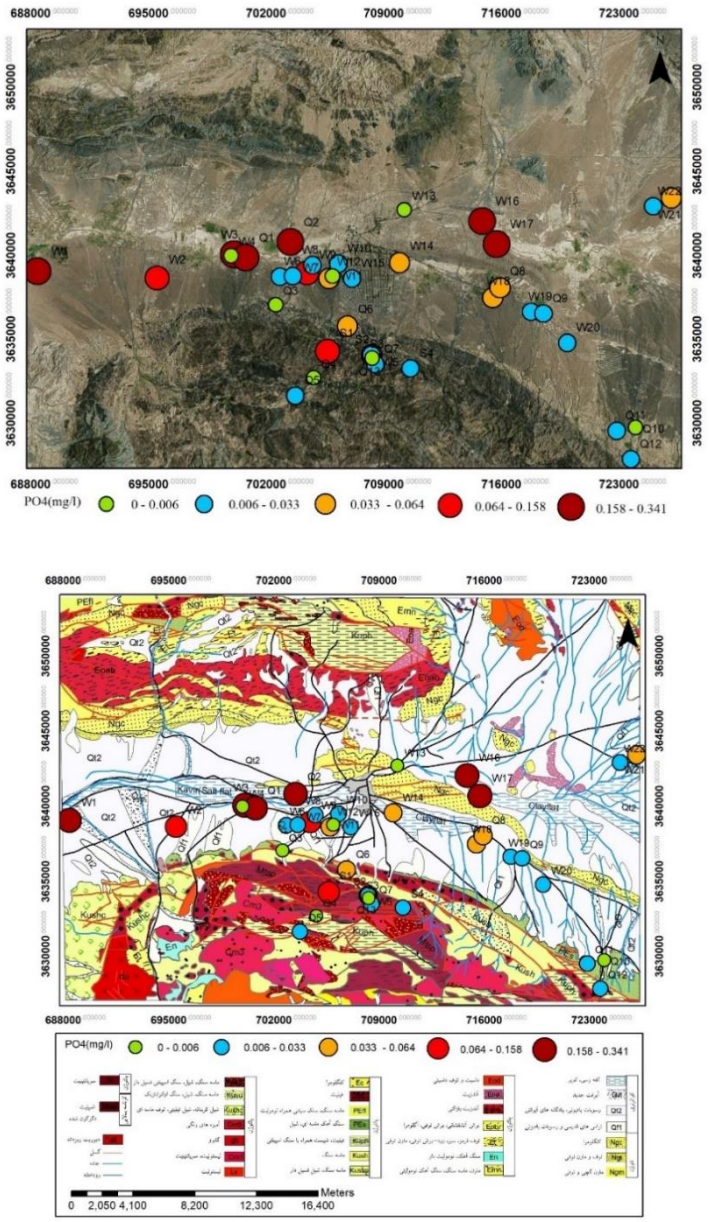


شکل ۱۵. نقشه پراکندگی نیترات در محدوده مورد مطالعه

Fig. 15. Nitrate distribution map in the study area

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

شکل ۱۶ پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری شده فسفات در محدوده مطالعاتی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، غلظت فسفات در این منطقه بین صفر و ۰/۳۴۱ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. با توجه به نقشه در چاه‌های شماره ۱، ۳، ۱۶ و ۱۷ و قنات ۱ و ۲ بیشترین مقدار مشاهده می‌شود.



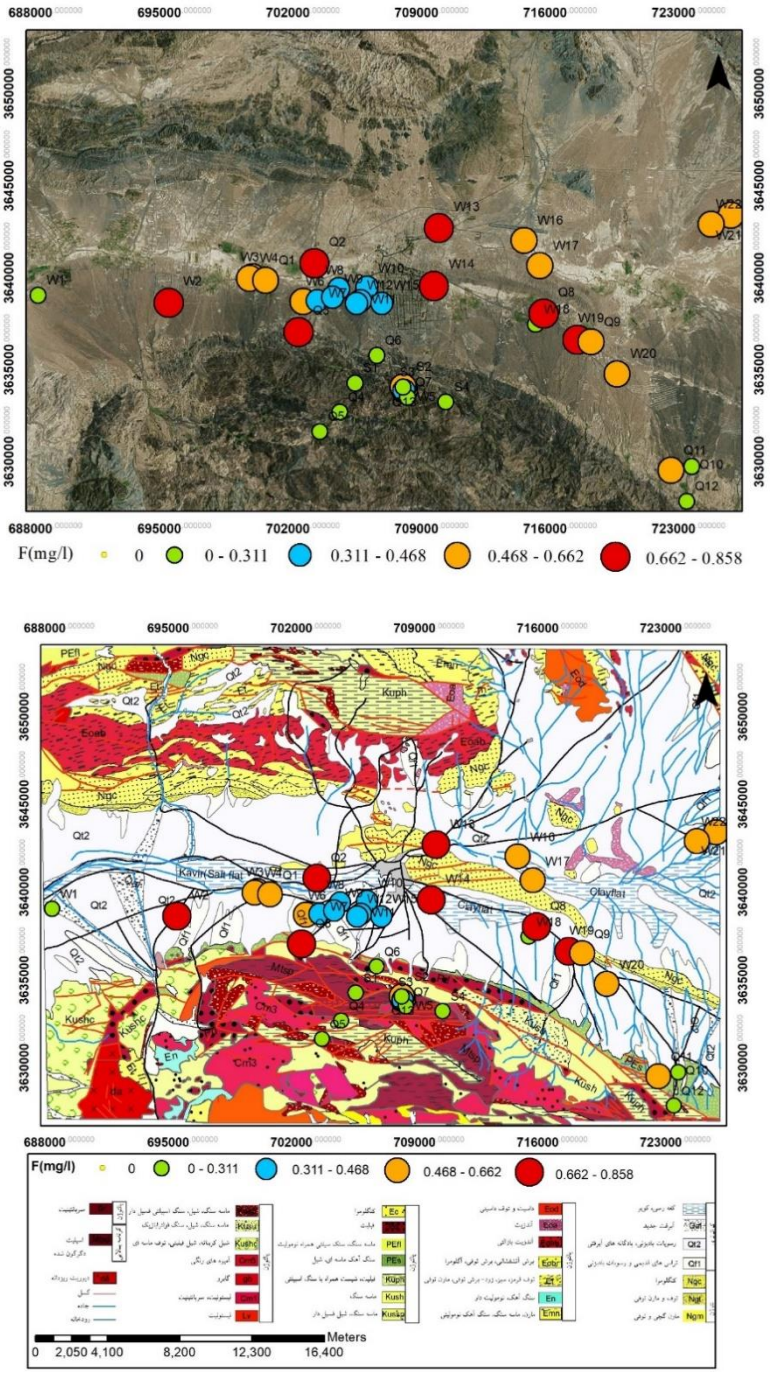
شکل ۱۶. نقشه پراکندگی فسفات در محدوده مطالعاتی

Fig. 16. Phosphate distribution map in the study area

شکل ۱۷ میزان غلظت فلوراید در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. حداقل و حداکثر میزان غلظت فلوراید به ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۸۵۸ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. بیشترین مقدار آن در چاه‌های شماره ۲، ۱۴ و ۱۹ مشاهده می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]



شکل ۱۷. نقشه پراکندگی یون فلوراید در محدوده مورد مطالعه

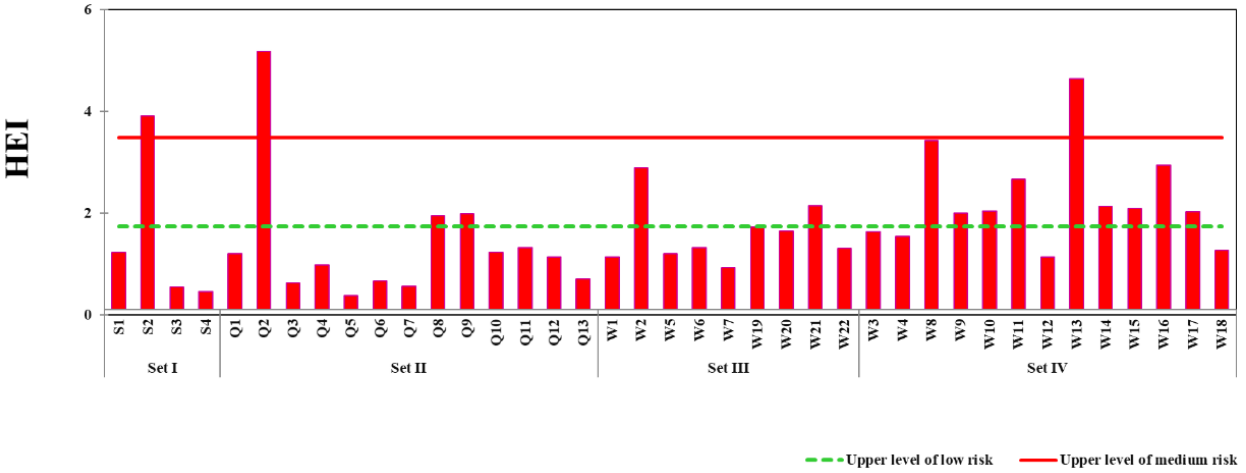
Fig. 17- Fluoride ion dispersion map in the study area

شاخص ارزیابی آلودگی یک کیفیت کلی از یون‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد و بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود. در این تحقیق یون‌های نیترات، نیتریت، فسفات، سولفات و فلوراید مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

$$HEI = \sum_i^n \frac{M_i}{S_i} \qquad (۱)$$

در رابطه بالا M_i و S_i به ترتیب مقدار غلظت اندازه‌گیری شده و حداکثر غلظت مجاز استاندارد پارامترiام هستند. با توجه به این شاخص اگر غلظت یک یون بالاتر از حد مجاز

استاندارد مربوطه باشد($M_i > 1$) آب نمی‌تواند برای آشامیدن استفاده شود. بر این اساس شاخص مربوطه برای منابع آب محاسبه شده و در شکل ۱۸ ارائه شده است و مشاهده می‌شود آلودگی در نمونه چاه‌های کشاورزی بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۸. نمودار شاخص آلودگی منابع آب در منطقه مورد مطالعه

Fig. 18. Water resource pollution index chart in the study area

برای بررسی سطح خطر نیترات و فلوراید در منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از رابطه (۲) و (۳) استفاده شده است، که خطر این یون‌ها برای رده سنی‌های نوزاد، کودک و بزرگسال محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است.

$$CDI = \frac{C_{F^-}.NO_3^- * DI * F * ED}{BW * AT} \quad (۲)$$

$$HQ = \frac{CDI}{RFD} \quad (۳)$$

در این رابطه CDI مقدار متوسط دریافتی یون نیترات و فلوراید، C غلظت یون در آب بر حسب میلی‌گرم در لیتر، DI میزان مصرف روزانه‌ی آب، F دفعات مواجه، ED طول مدت مواجه، BW جرم بدن، AT متوسط زمان مواجه برای بروز اثرات غیر سرطانی و RFD دوز مرجع استفاده شده است. پارامترهای مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است.

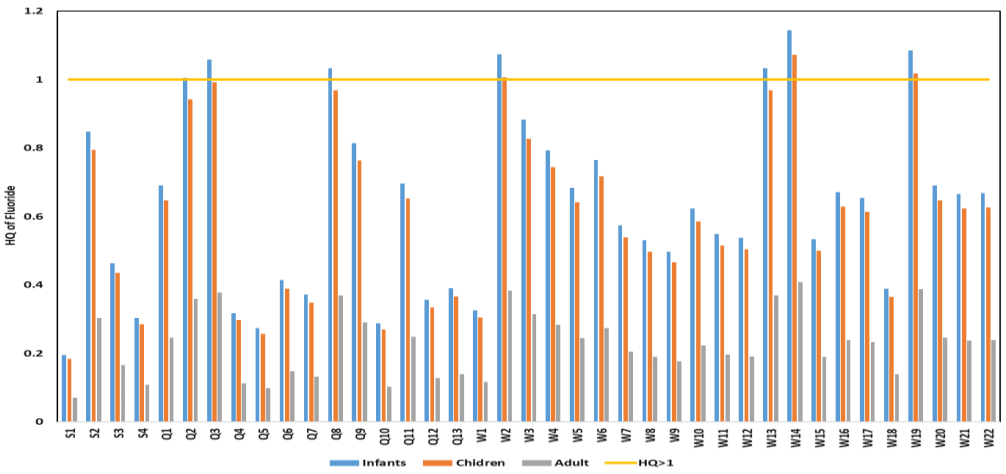
جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده جهت محاسبه خطر یون‌های نیترات و فلوراید

Table 3. Parameters used to calculate the risk of nitrate and fluoride ions

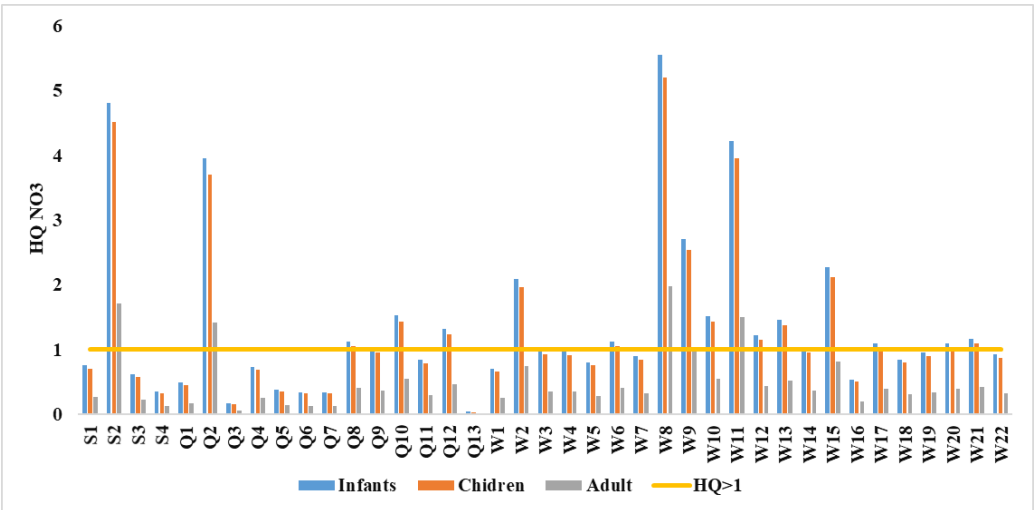
RFD(mg/kg/day)		AT(day)	F(day/year)	BW(Kg)	ED(years)	DI(L/day)	Age Group
Fluoride	Nitrate						
0.06	1.6	365	365	10	1	0.8	Adult
0.06	1.6	3650	365	20	10	1.5	Child
0.06	1.6	14600	365	70	40	2	Infant

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

نتایج ارزیابی تهدید سلامت فلوراید مربوط به چاه‌های نمونه‌برداری شده نشان می‌دهد که چاه‌های شماره۲،۱۴،۱۹ و قنات شماره ۳ برای رده سنی کودک و نوزاد، قنات شماره ۸ و چاه شماره ۱۳ برای رده سنی نوزاد خطر بالایی دارد (شکل ۱۹). نتایج ارزیابی تهدید سلامتی نیترات مربوط به منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که در ۵ نمونه برای رده سنی بزرگسال و ۵۰ درصد نمونه‌ها برای رده سنی نوزاد و کودک خطر بالایی دارند (شکل ۲۰). ارزیابی خطر سلامت نیز نشان داد که هرچند بیشتر نمونه‌ها برای بزرگسالان بی‌خطرند، اما برای کودکان و نوزادان در چند منبع آب (به‌ویژه در غرب محدوده شهری) خطرپذیری بالا مشاهده می‌شود. این یافته با نتایج نادری و همکاران (Naderi et al., 2020) درباره اثرات فلوراید و دامنی و همکاران (Damani et al., 2024) درباره نیترات در نواحی جنوب شرق ایران مطابقت دارد.



شکل ۱۹. نمودار ارزیابی تهدید سلامت فلوراید رده‌های سنی بزرگسال، کودک و نوزاد
Fig. 19. Fluoride health threat assessment chart for adult, child, and infant age groups



شکل ۲۰. نمودار ارزیابی تهدید سلامت نیترات رده‌های سنی بزرگسال، کودک و نوزاد
Fig. 20. Nitrate health threat assessment chart for adult, child, and infant age groups

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

به‌منظور شناسایی فرآیندهای اصلی کنترل‌کننده ترکیب شیمی آب زیرزمینی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بر اساس غلظت یون‌های اصلی و پارامترهای فیزیکی انجام شد (جدول ۴). دو مؤلفه اول مجموعاً حدود ۷۵٪ از واریانس کل داده‌ها را توضیح می‌دهند.

مؤلفه اول (PC1) با مقادیر بالای EC، Na^+، Cl^-، SO_4^{2-} و K^+ مشخص می‌شود و بیانگر اثر فرآیندهای انحلال سازندهای تبخیری (هالیت و ژیپس) و تبخیر–تغلیظ در نواحی شمالی و غربی دشت است.

مؤلفه دوم (PC2) با ضرایب مثبت HCO_3^- و NO_3^- و ضرایب منفی pH و PO_4^{3-} همراه است و به‌خوبی نقش تبادل یونی Ca–Na و ورود آلاینده‌های انسانی (پساب شهری و کودهای نیتروژن‌دار) را نشان می‌دهد.

در نتیجه، تحلیل PCA تأیید می‌کند که کیفیت آب زیرزمینی دشت بیرجند حاصل برهم‌کنش سه عامل اصلی است: ۱- انحلال و تبخیر سازندهای تبخیری، ۲- واکنش‌های تبادل یونی و ۳- ورود آلودگی‌های نیترات و فسفات ناشی از فعالیت‌های انسانی.

جدول ۴. بارهای عاملی مؤلفه‌های اصلی حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای پارامترهای فیزیکوشیمیایی آب زیرزمینی دشت بیرجند

Table 4. Factor loadings of principal components (PCA) for physicochemical parameters of groundwater in the Birjand Plain

Parameter	PC1	PC2
EC	**0.37**	-0.02
Na	**0.36**	-0.07
Cl	**0.36**	-0.09
SO_4	**0.36**	-0.03
K	**0.35**	-0.14
Ca	**0.33**	-0.08
Mg	**0.31**	0.17
HCO_3	-0.06	**0.63**
NO_3	0.13	**0.45**
pH	-0.17	-0.43
F	0.21	0.21
PO_4	0.13	-0.33
T	0.18	0.05
Variance (%)	**55.21**	**11.80**

نتیجه‌گیری

پژوهش نشان می‌دهد که در محدوده شهر بیرجند شیمی آب آبخوان تحت تأثیر زمین‌شناسی منطقه است به طوری که در قسمت شمالی منابع آب دارای یون و املاح بیشتری نسبت به بخش جنوبی می‌باشد. در بین منابع آب موجود، چشمه‌ها دارای کیفیت بهتر بوده و قنات و چاه‌ها از این نظر در رتبه بعدی قرار دارند. در ارتباط با چاه‌ها، با افزایش عمق بر مقدار شوری افزوده می‌شود. همچنین در امتداد جریان آب زیرزمینی (از شرق به سوی غرب) بر مقدار یون‌های آب افزوده می‌شود. آنالیز نیترات و فسفات نشان می‌دهد که شیمی آب در این بخش بیشتر متأثر از فعالیت کشاورزی، شهری و صنعتی است. فعالیت کشاورزی در بخش پیرامونی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

شهر و تکمیل نبودن سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری و وجود چاه‌های دفع فاضلاب خانگی در ناحیه شهری در تخریب کیفیت آب نقش مهمی داشته است. از نظر استفاده در شرب، بیشتر منابع آبی موجود در گستره مورد مطالعه در محدوده قابل قبول تا متوسط قرار دارند. همچنین با تحلیل داده‌های منابع آب برای کشاورزی توسط نمودار ویلکاکس نشان داده شد که بیشتر منابع آبی برای کشاورزی مناسب هستند. با توجه به نسبت سدیم به کلراید در مقابل کلراید، می‌توان گفت که منشأ سدیم منابع آب علاوه بر انحلال هالیت، واکنش‌های هوازدگی سیلیکات‌های سدیم دار نیز می‌باشد. نسبت‌های مختلف یون‌های کلسیم، منیزیم، سولفات و بیکربنات نیز نشان داد که انحلال همزمان کلسیت، دولومیت و ژیپس در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه رخ داده است. اندیس آلودگی منابع آب چاه‌های کشاورزی و تعدادی از قنات‌ها، بالاتر از شاخص مقدار مجاز برای آب آشامیدنی می‌باشد. نتایج ارزیابی خطر سلامت فلوراید نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها برای رده‌ی سنی بزرگسال خطری ندارد اما تعدادی از قنات‌ها و چاه‌ها برای رده‌های سنی نوزاد و کودک وضعیت مطلوبی ندارند و همچنین نتایج ارزیابی خطر سلامت نیترات نشان داد که در تعدادی از نمونه‌ها برای رده‌های سنی بزرگسال، کودک و نوزاد وضعیت مطلوبی ندارند. در نهایت برای مدیریت پایدار آبخوان بیرجند پیشنهاد می‌شود ۱.پایش فصلی و سالانه نیترات و فلوراید در چاه‌ها و قنوات تداوم یابد. ۲. ایجاد کمربند حفاظتی در اطراف مناطق تغذیه آبخوان جهت جلوگیری از نفوذ پساب‌های خانگی و کشاورزی انجام شود و ۳. بهبود شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری و کنترل چاه‌های جذبی در محدوده شهر در دستور کار قرار گیرد.

قدردانی

بدین‌وسیله از شرکت آب و فاضلاب استان سیستان و بلوچستان جهت همکاری در آنالیزها نمونه‌های آب و شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی به جهت در اختیار گذاشتن اطلاعات و داده‌ها سپاسگزاری می‌شود.

References

Alizadeh, A. (2006). Principles of applied hydrology. Imam Reza (A.S.) University Press. (In Persian)

Askari Malekabad, F., R., Jahanshahi, R., & Mali, S. (2017). Hydrochemical characteristics of groundwater in the Bazman, Iranshahr and Espake area, southeast of Iran. Quaternary Journal of Iran, 3(3), 289-99. (In Persian)

Askari Malekabad, F., Jahanshahi, R., & Bagheri, R. (2020). Characterization of the Bazman geothermal field, southeast Iran. Geopersia, 10(2), 405–418.

Bahadori, D., Jahanshahi, R., Dehghani, V., & Mali, S. (2019). Variations of stable oxygen and hydrogen isotope ratios in the cold and thermal springs of the Bazman volcanic area (southeast Iran). Environmental Earth Sciences, 78, 663.

Barzanoni, S., & Akbarpour, A. (2010). Evaluation of microbial and chemical quality of drinking water in the villages of Birjand city. In 4th Conference and Exhibition on Environmental Engineering. (In Persian)

Aghanabati, A. (2004). Geology of Iran. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran. (In Persian)

Aghazadeh, N., Chitsazan, M., Mirzaei, Y., & Ebrahimi, H. (2020). Modifying DRASTIC Model (DRAST-VUL) to determine groundwater vulnerability in an urban aquifer. Journal of Watershed Engineering and Management, 13(4), 690–703. (In Persian)

Ahmadi, S., Jahanshahi, R., Moeini, V., & Mali, S. (2018a). Assessment of hydrochemistry and heavy metals pollution in the groundwater of Ardestan mineral exploration area, Iran. Environmental Earth Sciences, 77, 212.

Ahmadi, S., Jahanshahi, R., Moeini, V., & Mali, S. (2018b). Evaluation of groundwater resources quality in the Ardestan mining area, Isfahan province, Iran. Quaternary Journal of Iran, 3(4). (In Persian)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

Bazman, Iranshahr, and Espake area, southeast Iran. Quaternary Journal of Iran, 3(3). (In Persian)

Chitsazan, M., Naderi, A., & Mizban, Y. (2018). Groundwater contamination modeling by municipal solid waste using MODPATH numerical code: Case study in Lour Andimeshk Plain unconfined aquifer, Khuzestan, Iran. Advanced Applied Geology Journal, 8(2), 73–85. (In Persian)

Damani, H., Jahanshahi, R., Bagheri, S., & Mirbalouchzehi, M. R. (2024). The effective factors on the groundwater quality in the Saravan area, south Iran. Journal of Irrigation and Water Engineering, 14(4), 199–221. (In Persian)

Dehrazma, B., & Mousavi, M. (2014). Investigation on the quality of groundwater resources of south of Birjand plain using mass balance techniques. Modares Civil Engineering Journal, 14(1), 15–28. (In Persian)

Dolati, J., Lashkari-Pour, G., & Hafezi Moghaddas, N. (2014). Investigating the factors affecting the Zahedan aquifer hydrogeochemistry using factor analysis, saturation indices, and composite diagrams. Water and Soil, 28(4), 679–694. (In Persian)

Ghadimi, F., & Javadi Sharif, P. (2019). Determination of the source of groundwater pollution in Arak aquifer by stage factor analysis. Journal of Range and Watershed Management, 72(3), 801–818. (In Persian)

Ghazban, F. (2010). Environmental geology. University of Tehran Press. (In Persian)

Hafezi Moghaddas, N., & Ghafoori, M. (2017). Environmental geology. Shahrood University of Technology Press. (In Persian)

Hosseini, M. S., Jahanshahi, R., Asadi, N., & Nasiri, M. A. (2020). Qualitative study of groundwater resources in the Hassanabad-Dehchah, northeast of Neyriz, Fars province. Hydrogeology, 5(1), 150–165. (In Persian)

Hoveidi, H. (2011). Identification, prevention, and control of environmental pollution. Khaniran Publications. (In Persian)

Jafari Ghariehali, A., Kazemi, G., Hafezi Moghaddas, N., & Mousavi Astarabadi, S. (2012). Application of GIS in the study of groundwater pollution in urban areas (Case study: Mashhad city). Iran Water Resources Research, 8(2), 80–88. (In Persian)

Jahanshahi, R., Allahdadi, A., & Mali, S. (2025a). Hydrogeological and environmental assessment of groundwater quality under urban stress: A case study from Zahedan, Iran. Environmental Geochemistry and Health, 47(9), 341.

Jahanshahi, R., Mahmoodinejad, N., & Mali, S. (2025b). Hydrogeochemistry and groundwater origin in the Sarduiyeh area, Iran. Geopersia. (In press). https://doi.org/10.22059/geope.2025.390781.648810

Jahanshahi, R., Mirkazemi, S. N., Partabian, A., & Biabangard, H. (2024a). The effect of hydrogeological and tectonic factors on groundwater resources nearby the Kaji salt playa, Nehbandan. Journal of Irrigation and Water Engineering, 15(2), 11–142. (In Persian)

Jahanshahi, R., Navardi, M., Asadi, N., & Mirbalouchzehi, M. R. (2024b). Hydrogeochemical evolution in the aquifer of Iranshahr plain. Ferdowsi Civil Engineering, 37(4), 35–48. (In Persian)

Mahmoodinejad, N., Jahanshahi, R., & Mali, S. (2021). The distribution and contamination of minor ions and elements in the water resources of the Sarduiyeh plain, Kerman province, Iran. Journal of Advanced Applied Geology, 12(2), 238–258. (In Persian)

Mali, S., Jafari, H., Jahanshahi, R., & Bagheri, R. (2022). Groundwater source identification and invasion model of Dareh-Zar Copper Mine in central Iran by chemo-isotopic techniques. Mine Water and the Environment, 41, 921–937.

Mirzaee, S. Y., Chaghazardi, Z., Chitsazan, M., & Alijani, F. (2023). Investigating the groundwater quality of Evan Plain aquifer in Khuzestan province with emphasis on nitrate concentration. Journal of Engineering Geology, 17(1), 85-106. (In Persian)

Mousavi, M. (2011). Geochemical investigation of groundwater contamination in the southern Birjand plain [Master's thesis, Shahrood University of Technology]. (In Persian)

Naderi, M., Jahanshahi, R., & Dehbandi, R. (2020). Two distinct mechanisms of fluoride enrichment and associated health risk in springs water near an

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]

inactive volcano, southeast Iran. Ecotoxicology and Environmental Safety, 195, 110503.

Nassery, H. R., & Alijani, F. (2007). Pollution sources of groundwater in Izeh Plain, northeast of Khuzestan. Advanced Environmental Sciences, 4(4), 33–46. (In Persian)

Pishanidar, S., Jahanshahi, R., & Mirbalouchzehi, M. R. (2024). Reducing salinity and heavy metals in brackish water using halophyte plants. Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering, 57(1), 240–259. (In Persian)

Salehi, A. (2007). Growth and mineral element concentration of Tehran pine and acacia trees irrigated with municipal wastewater in the green spaces of southern Tehran [Master's thesis, Tarbiat Modares University]. (In Persian)

Samiee-Rad, S., Forghani, G., & Jafari, H. (2024). Assessment of hydrochemical characteristics and quality of the Garmabdasht River, Golestan Province, NE Iran. Journal of Engineering Geology, 18(3), 450-478. (In Persian)

Sarikhani, R., Jamshidi, A., & Ghasemi Dehnavi, A. (2020). Salinity, Chemistry, and Quality of Groundwater in Robat-Khorramabad Plain, West of Iran. Journal of Engineering Geology, 14(5). 85-112. (In Persian)

Shahryari, T., Moashary, N., & Sharifzadeh, G. (2011). Concentrations of chromium and copper in groundwater and the drinking water distribution network of Birjand (2009–2010). Journal of Birjand University of Medical Sciences, 18(1), 62–67. (In Persian)

Shojaei, S. B, Jahanshahi, R., & Mali, S. (2019). Evaluating the trace elements contamination and corrosive potential in the groundwater of south and southwest of Sirjan city, Iran. Journal of Natural Environment Hazards, 8(21). (In Persian)

Shojaei, S., Jahanshahi, R., Mali, S., & Nasiri, M. A. (2020). Destruction of groundwater quality and the risk of saltwater intrusion in aquifers near Sirjan salt playa, Iran. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 100(6), 647–661.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.2.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1019571]