

Research Paper

Analysis of Nitrate Pollution Using Hydrochemical and Stable Isotopes Methods in the SoutheKalantari *he Behbahan Aquifer

Nahid Zarvash¹, Hassan Daneshian², Nasraleh Kalantari^{3*}, Farshad Alijani⁴, Ali Afros⁵, Mohammad Bashti⁶

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz

² Khuzestan Power and Water Authority, Ahvaz, Iran, h.d66@yahoo.com

^{3*} Professor, Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
n.kalantari@scu.ac.ir - nkalantari@hotmail.com

⁴ Associated Professor, Faculty of Earth Sciences, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran.

⁵ Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Iran

⁶ Kohgilouh and Boyer Ahmad Regional Water Company, Yasooj, Iran



10.22125/iwe.2025.500969.1850

Received:
January 21, 2025
Accepted:
June 30, 2025
Available online:
August 4, 2025

Keywords:
**Publication of nitrate,
isotope, Behbahan
underground water,
hydrochemistry**

Abstract

In many arid and semi-arid areas of surface water due to pollution, rainfall deficiency, and intense evaporation as a result of climatic conditions, this precious resource is limited. The defect of this vital resource resulted in groundwater being exploited for different purposes in such areas. Therefore, pollution source detection as a significant subject is necessary. This investigation aimed to evaluate nitrate pollution in shallow wells in the southern part of the Behbahan aquifer using hydrochemical and stable isotopes method. To achieve the goal, 56 samples were collected for major, minor elements and stable isotope analysis. The collected data was interpreted by SPSS and XLSTAT statistical software. The data indicated that the nitrate concentration varies between 3 to 103 mg/l and δD and $\delta^{18}O$ ranges between -17.5 to -3.5 and -5 to 1.75 respectively. Nitrate ion concentration variation and well depth revealed that around Behbahan City and surrounding villages where well depth is below 30 m, the nitrate concentration was between 40 to 103 mg/l, indicating anthropogenic activities including domestic wastewater and manure controlling increasing nitrate concentration.

1. Introduction

Groundwater is a vital resource, essential for providing water for drinking, industrial, and agricultural purposes, as well as for maintaining ecological balance (Gleeson et al., 2020). Rapid population growth, industrial advancements, and increased agricultural activities have contributed to the pollution of water resources. One of the most pressing environmental issues worldwide is nitrate pollution (NO_3^-) in groundwater (Xu et al., 2021). Nitrate contamination in groundwater is increasing in many regions and poses a significant threat to the reliability of drinking water supplies that depend on groundwater (Strebel et al., 1989; Tesoriero et al., 2000). Elevated nitrate levels in groundwater typically originate from chemical

* **Corresponding Author:** Name

Address: Department, University, Country, **Email:** Academic Email
Nahid Zarvash¹, Hassan Daneshian², Nasraleh Kalantari^{3*}, Farshad Alijani⁴, Ali Afros⁵, Mohammad Bashti⁶.
Tel. Number
Analysis of Nitrate Pollution Using Hydrochemical and Stable Isotopes Methods in the SoutheKalantari *he
Behbahan Aquifer

fertilizers, animal manure, urban wastewater, and industrial effluents (Krimsky et al., 2021). Many researchers suggest that multiple hydrochemical indicators and stable isotopes are powerful tools for assessing the hydrogeochemical characteristics of groundwater and identifying potential sources of nitrate pollution (Ramaroson et al., 2020; He et al., 2022;).

2. Materials and Methods

For conducting this research, a total of 56 water samples were collected from various sources in April and May 2021, including 8 surface water samples, 3 agricultural wells, and 45 groundwater samples. The samples were collected in 250 mL bottles for the analysis of major anions and cations and in 60 mL polyethylene bottles specifically for nitrate and stable isotope analysis. Sampling containers were thoroughly rinsed with distilled water and filled at the sampling site after multiple rinses with sample water. In non-flowing wells, pumping was initiated for 15 minutes before sampling. Measurements of water temperature, electrical conductivity (EC), and pH were taken on-site. Samples were analyzed in the Khuzestan Water and Power Organization laboratories and the University of Arak for major ions, nitrate, and stable isotopes. Data analysis was conducted using Excel 2016, XLSTAT 2015, and IBM SPSS 20 software.

3. Results

The composite diagrams results illustrate the impact of domestic wastewater pollution in the Behbahan city areas and surrounding villages, as well as animal waste effluents in the vicinity of wells (WB10, WB11, WB31, WB17). It is noteworthy that the absence of a city sewage system in Behbahan and its surrounding villages, coupled with sewage disposal through absorption wells and relatively shallow wells in the central parts of the plain, increases the possibility of groundwater contamination from sewage and agricultural return flows.

4. Discussion and Conclusion

The proper management of water resources depends on the identification and understanding of the factors affecting the quality and quantity of these resources. To identify the geochemical processes controlling surface and groundwater sources and to evaluate the origins of water pollution in the Behbahan plain, hydrochemical and isotopic methods were employed. In this study, 56 water samples were collected from various resources, including groundwater, surface water (Maroun River), and agricultural network channels. The application of various hydrogeochemical techniques, such as Piper diagrams and ion ratios, indicates that evaporite formation (Ghachsaran) and the Bakhtiari formation significantly influence the chemical composition of water resources, and most of the water exhibits chloride-bicarbonate facies. Discussion and Conclusion The δD ‰ values of groundwater samples ranged from 17.5 to 3.52 and $\delta 18O$ from -5 to 1.75 ‰, while the δD values of surface water samples (Maroun River) ranged from 13.34 to 11.14 ‰ and $\delta 18O$ varied from 3.78 to -3.42. ‰. Additionally, the deuterium values of the Maroun network channels samples ranged from 16.3 to 17.5‰, and $\delta 18O$ values varied from 3.2 to 5‰. In this research, nitrate concentration was plotted against chloride and stable isotopes to identify sources of water contamination.

Variations in nitrate concentration relative to chloride showed that the samples with higher nitrate concentrations are often located in the city of Behbahan and surrounding villages or at the outskirts of the study area. This suggests that urban and rural domestic wastewater has a significant effect on the nitrate concentration in these samples. The samples with nitrate concentrations between 8 and 20 mg/L depict that most of these samples belong to the urban area and are near the Maroon and Khairabad rivers and the maroon irrigation network. This reflects the influence of surface water on these samples. The collected samples from the rivers, the Maroon and Khairabad irrigation networks, as well as the samples from the deep wells, showed very low nitrate concentration, indicating, minimal influence of human activities. The nitrate in these samples is likely derived from natural sources in the region and bacterial activities.

5. Six important references

He, S., Li, P., Su, F., Wang, D. and Ren, X., 2022. Identification and apportionment of shallow groundwater nitrate pollution in Weining Plain, northwest China, using hydrochemical indices, nitrate stable isotopes, and the new Bayesian stable isotope mixing model (MixSIAR). *Environmental pollution*, 298, p.118852.

Mohammadzadeh, H., Eskandari Mayvan, J. and Heydarizad, M., 2020. The effects of moisture sources and local parameters on the $18O$ and $2H$ contents of precipitation in the west of Iran and the east of Iraq. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 72(1), pp.1-15.

Nahid Zarvash , Hassan Daneshian , Nasrallah Kalantari *, Farshad Alijani , Ali Afros5 Mohammad Bashti6.
Analysis of Nitrate Pollution Using Hydrochemical and Stable Isotopes Methods in the SoutheKalantari *he

Tesoriero AJ, Liebscher H, Cox SE (2000) Mechanism and rate of denitrification in an agricultural watershed: electron and mass balance along groundwater flow paths. *Water Resour Res* 36:1545–1559.

Strebel O, Duynisveld WHM, Böttcher J (1989) Nitrate pollution of groundwater in western Europe. *Agr Ecosyst Environ* 26:189–214.

Adimalla N, Qian H, Nandan MJ (2020) Groundwater chemistry integrating the pollution index of groundwater and evaluation of potential human health risk: a case study from hard rock terrain of south India. *Ecotoxicol Environ Saf* 206 (111217).

Zhou Y, Li P, Peiyue Li, Chen M, Dong Z, Lu C (2020) Groundwater quality for potable and irrigation uses and associated health risk in southern part of Gu'an County, North China Plain. *Environ Geochem Health* 43:813–835.

Alex, R., Kitalika, A., Mogusu, E., & Njau, K. (2021). Sources of nitrate in ground water aquifers of the semiarid region of Tanzania. *Geofluids*, 2021, 1-20.

Guo, Z., Yan, C., Wang, Z., Xu, F., Yang, F., 2020. Quantitative identification of nitrate sources in a coastal peri-urban watershed using hydrogeochemical indicators and dual isotopes.

تجزیه و تحلیل آلودگی نیترات با استفاده از روش‌های هیدروشیمیایی و ایزوتوپ‌های پایدار در بخش جنوبی آبخوان بهبهان

ناهید زروش^۱ حسن دانشیان^۲ نصراله کلانتری*^۳ فرشاد علیجانی^۴ علی افروس^۵ محمد باشتی^۶

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

مقاله پژوهشی

چکیده

در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، به علت عدم وجود منابع آب سطحی و یا به دلیل آلودگی، کمبود بارندگی و تبخیر شدید ناشی از تغییرات آب و هوایی این منبع حیاتی در دسترس نمی‌باشد. کمبود این منبع ارزشمند باعث شده تا آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع تأمین آب جهت مصارف مختلف در این مناطق باشد. بنابراین، شناسایی منابع آلاینده برای محافظت از کیفیت منابع آب زیرزمینی موضوعی مهم و ضروری است. هدف این پژوهش بررسی آلودگی نیترات در چاه‌های کم‌عمق بخش جنوبی آبخوان بهبهان با استفاده از روش‌های هیدروشیمیایی و ایزوتوپ‌های پایدار می‌باشد. برای نیل به هدف، تعداد ۵۶ نمونه آب جهت آنالیز آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی، عناصر فرعی و ایزوتوپ‌های پایدار $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ جمع‌آوری شد. نتایج بدست آمده با استفاده از نرم‌افزارهای آماری SPSS و XLSTAT، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. غلظت یون نیترات نمونه‌ها بین ۳ تا ۱۰۳ میلی‌گرم بر لیتر متغیر می‌باشد و مقادیر ایزوتوپی نمونه‌های آب زیرزمینی برای $\delta^2\text{H}$ در محدوده‌ی $\% -17.5$ تا $\% -3.52$ و برای $\delta^{18}\text{O}$ از $\% -5$ تا $\% -1.75$ می‌باشد. تغییرات غلظت نیترات و عمق چاه‌های نمونه‌برداری نشان می‌دهد که در چاه‌های محدوده شهر بهبهان و روستاهای اطراف که عمق آن‌ها کمتر از ۳۰ متر است، غلظت نیترات بین ۴۰ تا ۱۰۳ میلی‌گرم در لیتر متغیر است که این افزایش می‌تواند ناشی از تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد از قبیل فاضلاب خانگی و کود حیوانی باشد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی نیترات، ایزوتوپ، آب زیرزمینی بهبهان، هیدروشیمی

^۱ دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران ایمیل na.zarvash@yahoo.com

^۲ کارشناس سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران ایمیل h.d66@yahoo.com

^۳ استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران ایمیل nkalantari@hotmail.com n.kalantari@scu.ac.ir

^۴ استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، ایمیل: Falijani2000@yahoo.co.uk

^۵ استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، ایران

^۶ کارشناس شرکت آب منطقه ای کهگیلویه و بویر احمد، یاسوج ایران



مقدمه

آب‌های زیرزمینی اغلب یک منبع آبی مهم برای شرب، کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی هستند (Bian et al., 2016). تخمین زده می‌شود که بیش از ۱/۵ میلیارد نفر در سراسر جهان برای امرار معاش خود به آب‌های زیرزمینی وابسته هستند (He et al., 2021). همچنین آب‌های زیرزمینی قابل اعتمادترین و ضروریترین منبع آب شیرین در مناطق نیمه‌خشک و خشک محسوب می‌شوند (Adimalla and We, 2019). امروزه توسعه اقتصاد و گسترش شهرنشینی و تشدید فعالیت‌های انسانی بر کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی تأثیر منفی گذاشته است (Li et al., 2017). به دلیل تغییرات آب و هوایی و افزایش شهرنشینی، تقریباً یک سوم تا نیمی از جمعیت شهری جهان با کمبود آب مواجه است (He et al., 2021). در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک، منابع آب سطحی به دلیل آلودگی، کمبود بارندگی و شدت تبخیر، محدود و عمدتاً ناکافی هستند (Khmila et al., 2021). در نتیجه استفاده از آب زیرزمینی به طور چشمگیری در این مناطق افزایش یافته است (Zhou et al., 2020). آب زیرزمینی یک منبع ارزشمند است که مدیریت و حفاظت از آن برای تضمین تامین آب برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی و حفظ تعادل اکولوژیکی امری ضروری است (Gleeson et al., 2020). رشد سریع جمعیت و پیشرفت صنایع مختلف و افزایش کاربری کشاورزی باعث افزایش آلودگی منابع آب شده است. امروزه علاوه بر آلودگی‌های میکروبی، آلودگی شیمیایی نیز از جمله مسائل مهم در بحث بهداشت آب می‌باشد. یکی از نگران‌کننده‌ترین مشکلات زیست محیطی در سراسر جهان آلودگی نیترات (NO_3^-) آب‌های زیرزمینی است (Xu et al., 2021). آلودگی نیترات آب‌های زیرزمینی در بسیاری از نقاط جهان، رو به افزایش است و یک تهدید جدی برای تامین آب آشامیدنی متکی بر آب‌های زیرزمینی است (Tesoriero et al., 2000; Strebel et al., 1989).

از اوایل دهه ۱۹۶۰، افزایش غلظت نیترات (NO_3^-) آب‌های زیرزمینی از طریق منابع انسانی منعکس‌کننده یک مشکل جهانی برای استانداردهای کیفیت آب است (Widory et al., 2004). به طوری که آلودگی نیترات (NO_3^-) در آب‌های زیرزمینی به یکی از نگران‌کننده‌ترین مشکلات محیط زیستی در سطح جهان تبدیل شده است (Xu et al., 2021).

مقدار بالای نیترات در آب زیرزمینی معمولاً از کودهای شیمیایی، کودهای حیوانی، فاضلاب شهری و فاضلاب صنعتی نشأت می‌گیرد (Krimsky et al., 2021). بنابراین شناسایی و طبقه‌بندی منابع بالقوه نیترات (NO_3^-) در آب‌های زیرزمینی برای کنترل آلودگی آب‌های زیرزمینی از اهمیت زیادی برخوردار است. منابع طبیعی (NO_3^-) منجر به غلظت‌های نسبتاً کم معمولاً کمتر از ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر نیترات در آب‌های زیرزمینی می‌شود (Panno et al., 2006).

غلظت (NO_3^-) آب‌های زیرزمینی به طور قابل توجهی در سراسر جهان، به ویژه در مناطق کشاورزی، در نتیجه فعالیت‌های انسانی افزایش یافته است (Li et al., 2021). بسیاری از محققان پیشنهاد کرده‌اند که روش‌های هیدروشیمیایی و استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار و همچنین روش‌های آماری لیزارهای قدرتمندی برای ارزیابی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی و شناسایی منابع بلقوه (NO_3^-) آب‌های زیرزمینی هستند (He et al., 2022; Ramarosan et al., 2020; Weitzman et al., 2021).

زریاب و همکاران در سال ۱۴۰۱ به شناسایی منشأ و سهم نسبی نیترات در آبخوان شرقی کابل با استفاده از نمایانگرهای ایزوتوپی و مدل BSIMM پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که فاضلاب انسانی و کودهای حیوانی نقش عمده در افزایش غلظت نیترات آب زیرزمینی دشت کابل دارد. ترسیم نمودار نسبت NO_3^-/Cl در مقابل Cl در آبخوان دشت کابل نیز نشان می‌دهد که فاضلاب شهری منبع اصلی نیترات در آبخوان مذکور است. نتایج ایزوتوپی

شناسایی منبع نیترات از طریق تکنیک هیدروشمیایی نشان داد که بیشتر نیترات از طریق پساب های فاضلاب یا پسماندهای آلی مانند کود دامی منشاء می گیرند (Alex et al., 2021).

منابع آب زیرزمینی در کشورهای نظیر ایران که در منطقه خشک و نیمه خشک واقع شده و بیشتر بخشهای آن فاقد منابع آب سطحی قابل توجه میباشد، از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین، شناسایی و تفکیک منابع بالقوه آلودگی منابع آب جهت کنترل مؤثر کیفیت آب های زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. دشت بهبهان به دلیل شبکه آبیاری فعال در منطقه دچار افزایش سطح آب زیرزمینی است (دانشیان و کلانتری، ۱۳۹۷) به طوری که در بخش های میانی دشت عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی کم شده و منابع آب زیرزمینی را در معرض آلاینده های موجود در سطح زمین قرار داده است. به همین منظور مطالعه حاضر با هدف شناسایی یکی از مهمترین منابع بالقوه آلودگی آب های زیرزمینی یعنی نیترات در بخش جنوبی آبخوان بهبهان انجام شده است. به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، از روش های هیدروشمیایی، روش های آماری و همچنین ایزوتوپ های پایدار استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش اطلاعات مهمی جهت ارزیابی، پیشگیری و مهار آلودگی نیترات به منظور مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و اتخاذ تصمیم های اساسی در جهت مدیریت مؤثر کیفیت آب زیرزمینی فراهم می کند

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

دشت بهبهان با مختصات طول جغرافیایی $50^{\circ} 04'$ تا $50^{\circ} 24'$ شرقی و عرض جغرافیایی $30^{\circ} 30'$ تا $30^{\circ} 51'$ شمالی در بخش جنوب شرقی استان خوزستان (جنوب غربی ایران) واقع شده است. متوسط درجه حرارت منطقه مورد مطالعه $24/33$ درجه سانتی گراد می باشد، و متوسط سالیانه ی ریزش های جوی 342 میلی متر است. آبخوان بهبهان از نوع آزاد است و جنس رسوبات آن، آبرفتی

پایدار نیز نشان داد که فاضلاب شهری نقش اصلی در آلودگی آب زیرزمینی به نیترات دارد.

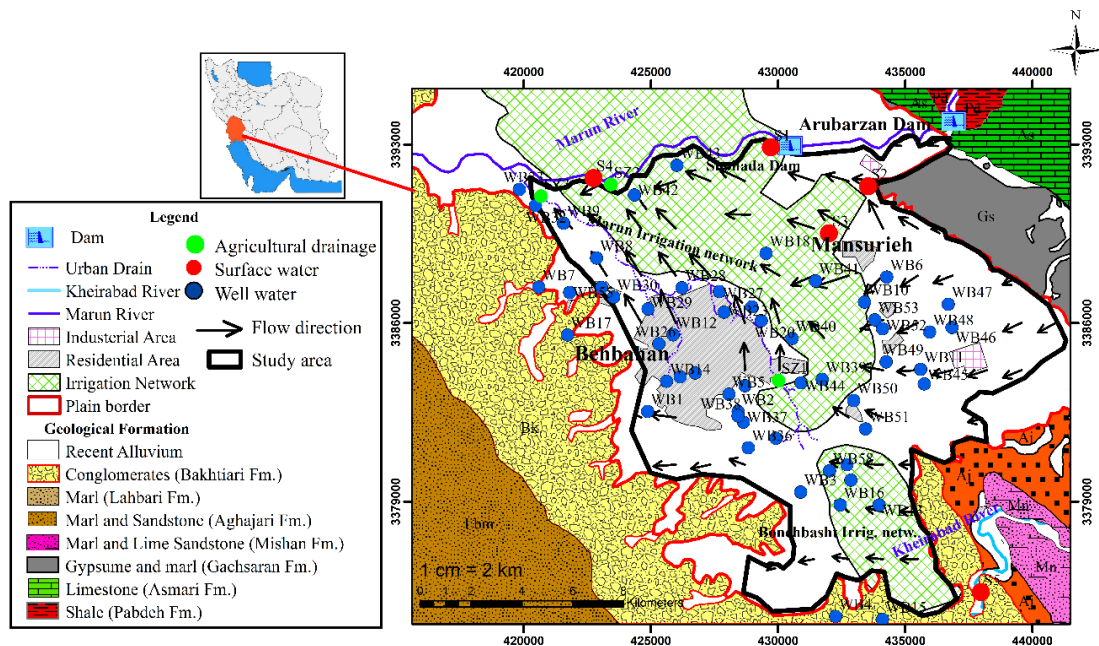
دانشیان و همکاران در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی آب زیرزمینی منطقه شهری بهبهان با تلفیق روش های هیدروژئولوژیکی، هیدروشمیایی و ایزوتوپی به منظور ارزیابی تاثیر منابع مختلف تغذیه بر تکامل شیمیایی سفره آب شهری دشت بهبهان پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که تکامل هیدروشمیایی در آبخوان اساسا توسط انحلال گچ و تا حدودی توسط هالیت کنترل می شود، همچنین NO_3^- آلاینده اصلی آب های زیرزمینی دشت بهبهان عنوان شد. در این مطالعه بر اساس خصوصیات ایزوتوپ های پایدار پنج منبع تغذیه متمایز برای آبخوان بهبهان شناسایی شد. محمد زاده و اسکندری در سال ۱۳۹۷ با استفاده از تکنیک های هیدروشمیایی و ایزوتوپی به شناخت ویژگی های منابع آب محدوده پاوه و جوانرود در استان کرمانشاه پرداختند. نتایج آنها نشان داد که ترکیب شیمیایی منابع آبی تحت تاثیر سازند های آهکی منطقه است.

راماروسون و همکاران در سال ۲۰۲۰ آلودگی نیترات آب های زیرزمینی در شهر آتانهاریو-ماداگاسکار را با استفاده از هیدروشمی و تحلیل چندمتغیره مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که همه نمونه های آب دارای غلظت نیترات بالاتر از مقدار استاندارد 50 میلی گرم در لیتر (NO_3^-) تعیین شده توسط سازمان بهداشت جهانی هستند. همچنین فعالیت های انسان زاد از جمله فاضلاب های انسانی، منابع اصلی آلودگی نیترات آب های زیرزمینی هستند (Ramaroson et al., 2020).

الکس و همکاران در سال ۲۰۲۱ به شناسایی منابع نیترات در سفره های آب زیرزمینی در منطقه نیمه خشک تانزانیا پرداختند نتایج حاصل حاکی از آن است که آلودگی NO_3^- بیشتر در فصل مرطوب مشاهده می شود و دلیل آن بارندگی است که باعث تسریع رواناب سطحی و نفوذ آلودگی به منابع آب زیرزمینی می شود. در این مطالعه

مربع در نیمه جنوبی دشت بهبهان قرار گرفته است. جهت جریان آب زیرزمینی در بخش جنوبی آبخوان بهبهان از حواشی شرق و جنوب دشت بهبهان به طرف رودخانه مارون است. شکل (۱) نقشه زمین شناسی و موقعیت ایستگاه های نمونه برداری را نشان می دهد.

و عمدتاً دانه درشت و حاوی ذرات رس، سیلت و مارن، می باشد. این رسوبات نامتراکم، فضای مناسبی را برای وقوع و انتقال آلودگی به آب های زیرزمینی را فراهم می آورند. رودخانه مارون به عنوان زهکش اصلی منطقه، دشت بهبهان را به دو نیمه شمالی و جنوبی تقسیم کرده است که منطقه مورد مطالعه با مساحتی نزدیک به ۱۳۰ کیلومتر



شکل (۱): نقشه زمین شناسی و موقعیت ایستگاه های نمونه برداری

بار با آب نمونه شستشو و سپس نمونه برداری انجام شد. اندازه گیری های صحرائی شامل دمای آب، هدایت الکتریکی (EC، pH) در محل و توسط دستگاه پرتابل HQ14D شرکت HACH ایالات متحده امریکا انجام گرفت. نمونه ها جهت آنالیز یون های عمده، نیترات و ایزوتوپ های پایدار به ترتیب به آزمایشگاه سازمان آب و برق خوزستان و آزمایشگاه دانشگاه اراک ارسال شدند. در آزمایشگاه سازمان آب و برق خوزستان، یونهای کلسیم، منیزیم کلرید، کربنات و بیکربنات به روش تیتراسیون، سدیم و پتاسیم به روش شعله سنجی و سولفات و نیترات به روش اسپکتروفتومتر (Vis-UV مدل Dr 2800) مورد اندازه گیری قرار گرفتند. نمونه های مربوط به ایزوتوپ های

به منظور انجام این پژوهش تعداد ۵۶ نمونه آب از منابع مختلف (۸ نمونه آب سطحی، ۳ نمونه زه آب کشاورزی و ۴۵ نمونه منابع آب زیرزمینی) جهت آنالیز آنیونها و کاتیونهای اصلی در بطری های ۲۵۰ میلی لیتری و برای نیترات و ایزوتوپ در بطری های پلی اتیلن ۶۰ میلی لیتری طی یک دوره در مهرماه ۱۴۰۱ جمع آوری شد. نحوه انتخاب چاه های نمونه برداری به گونه ای صورت گرفت که علاوه بر اینکه همه منطقه را پوشش دهد، در جهت جریان آب زیرزمینی به سمت خروجی منطقه نیز باشد تا روند تغییرات کیفی منابع آب به خوبی تجزیه و تحلیل گردد. جهت نمونه برداری، ظروف به خوبی با آب مقطر شستشو داده شدند و در محل نمونه برداری نیز چند

$$\delta = \frac{(R_{\text{sample}} - R_{\text{SMOW}})}{R_{\text{SMOW}}} \times 10^3$$

در ادامه غلظت کل آنیونها و کاتیونهای چاههای نمونه برداری شده برحسب میلی اکی والان بر لیتر سنجیده شد و میزان درصد خطا محاسبه گردید. حداکثر میزان خطا ۱/۵ درصد بدست آمد که از حد مجاز (۵درصد) خطا کمتر بوده است و این میزان خطا قابل قبول می باشد. به منظور نرمال بودن داده ها جهت انجام روشهای آماری از روش آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و برای تحلیل های آماری (تحلیل عاملی) از کایزر (Kaiser) استفاده گردید. تجزیه و تحلیل نتایج با استفاده از نرم افزارهای Excel 2016، XLSTAT 2015.1 و IBM SPSS 20 انجام شد. در جدول ۱ خلاصه اطلاعات پارامترهای هیدروشیمیایی نمونه های آب زیرزمینی ارائه شده است.

آب به دلیل حساسیت بالای نمونه بردار یه های ایزوتوپی، درب نمونه ها به خوبی پلمپ، و تا زمان ارسال به آزمایشگاه دانشگاه اراک جهت آنالیز در یخچال نگهداری شدند. در این مطالعه از نسبت O18/O16 و H2/H1 که مربوط به چرخه آب است، استفاده شده است. این ایزوتوپها اغلب برای مطالعات هیدروژئولوژیکی، مطالعه بارش، تغذیه آب زیرزمینی، تبادل آب زیرزمینی و سطحی و توصیف سیستم جریان استفاده می شوند. تغییرات مکانی و زمانی ایزوتوپهای هیدروژن و اکسیژن در بارندگیها تحت تاثیر منابع رطوبت، ارتفاع، دما، مقدار بارش، عرض جغرافیایی و فاصله از دریا می باشد. تغییرات مکانی و زمانی ایزوتوپهای پایدار بارش وابسته به تجزیه ایزوتوپ همراه با تبخیر از اقیانوس و تراکم بخار آب در طول انتقال در اتمسفر می باشد. فراوانی ایزوتوپی یک نمونه با اندیس δ (انحراف ایزوتوپی) بیان می شود که با استفاده از رابطه زیر تعیین می شود.

جدول (۱): خلاصه اطلاعات پارامترهای هیدروشیمیایی نمونه های آب

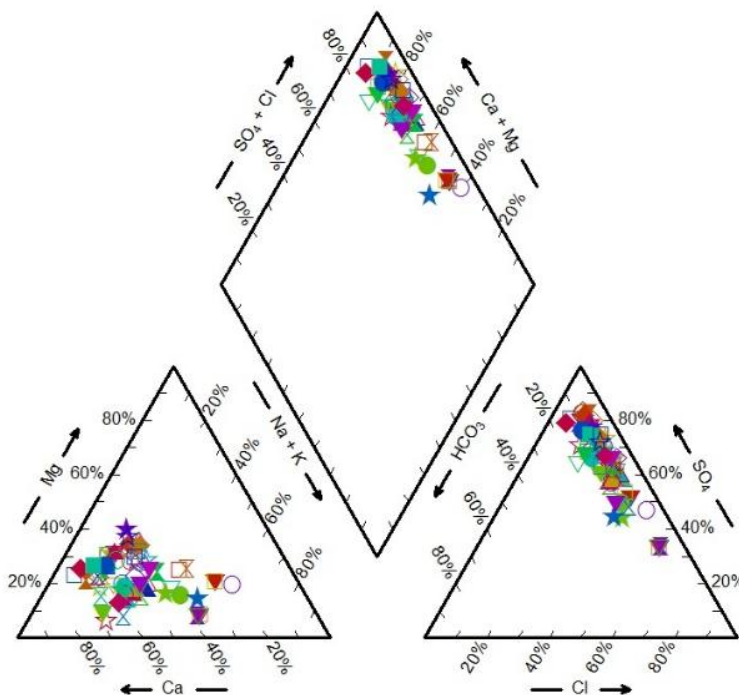
Variable	Minimum	Maximum	Mean	Std. deviation
T	۲۰	۲۹/۵	۲۵/۴	۲/۳
ECus/cm	۱۶۸۲	۶۶۱۰	۳۵۷۶	۱۰۴۷
TDS mg/l	۱۰۹۳	۴۲۹۶	۲۳۶۸	۶۸۹
Na meq/l	۱۶۰۰	۳۳	۱۱	۶
K meq/l	۰/۵۱	۰/۹۵	۰/۲	۰/۱
Ca meq/l	۸/۴	۰/۳۶	۲۱/۵	۷
Mg meq/l	۲/۲	۲۴	۹/۷	۵/۴
Cl meq/l	۱/۵	۲۵/۸	۱۰/۶	۵/۳
HCO3 meq/l	۲	۶/۵	۳/۹	۱
SO4 meq/l	۸/۳	۵۱	۲۷	۱۱
NO3 mg/l	۳/۳	۱۰۳	۳۷/۶	۲۶
F mg/l	۰/۳	۲	۱	۰/۴۶
Br mg/l	۰/۰۵	۱	۰/۴	۰/۲
pH	۶/۶	۸	۷	۰/۳
O ^{۱۸} δ	-۵	۱/۷۵	-۳/۶	۰/۹
δ H2	-۱۷/۵	۳/۵۴	-۱۱/۴	۴

نمودار پایپر

نمودار پایپر (۱۹۴۴) برای نشان دادن و درک لنوع رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی ارائه شده است، در این پژوهش از نمودار پایپر جهت تعیین تیپ و رخساره منابع آبی با استفاده از غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والن بر لیتر در محیط نرم افزار AqQA استفاده شده است. شکل ۲ توزیع رخساره نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار تغییرات آنیون‌ها و کاتیون‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب به صورت $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ و $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ است. به طور کلی نمودار پایپر نمونه‌های آب زیرزمینی دشت بهبهان منعکس کننده تیپ و رخساره غالب سولفات-کلسیک می باشد

بحث و نتایج

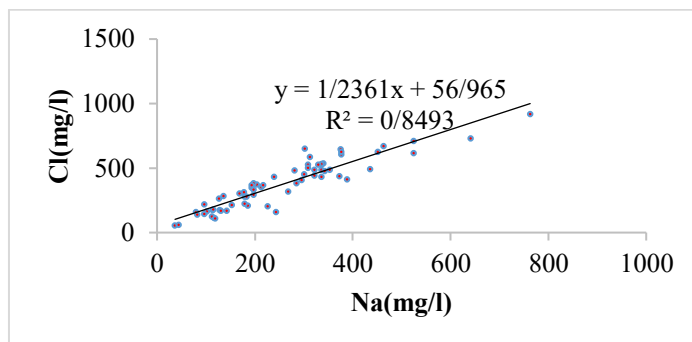
تکامل ترکیب هیدروشیمیایی آب های زیرزمینی بین آب زیرزمینی و محیطی که در آن در گردش است، برهمکنش دائمی وجود دارد که منجر به تعادل بین ترکیب خاک، سنگ و ترکیب آب می‌شود. ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی توسط عوامل زیادی از جمله ترکیب آب تغذیه ای، کانی تشکیل دهنده سفره آبدار، شرایط اقلیمی و فعالیت‌های انسانی کنترل می‌شود. برهمکنش آب‌های زیرزمینی با این عوامل منجر به تشکیل رخساره‌های هیدروشیمیایی متفاوتی می‌شود که می‌تواند با موقعیت زمین شناسی، آب و هوا و توپوگرافی همبستگی داشته باشد. در این مطالعه برای شناسایی مکانیسم کنترل هیدروشیمیایی آب های زیرزمینی از دیاگرام پایپر استفاده شده است.



شکل (۲): نمودار پایپر نمونه های آب منطقه مورد مطالعه

تبادل یونی و تبادل یونی معکوس

جمله‌های حالت است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، اکثر نمونه‌ها روی خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند. با توجه به وجود سازندهای تبخیری در منطقه مورد مطالعه، حالت یکی از اصلی‌ترین منابع تولید کننده این عناصر در منابع آب منطقه است. وجود تعدادی از نمونه‌ها در بالا و پایین خط ۱:۱ منعکس کننده منابع دیگر از جمله تبادل یونی و تبادل یونی معکوس برای یون سدیم است (شکل ۳).



شکل (۳): نمودار ترکیبی تبادل یونی نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه

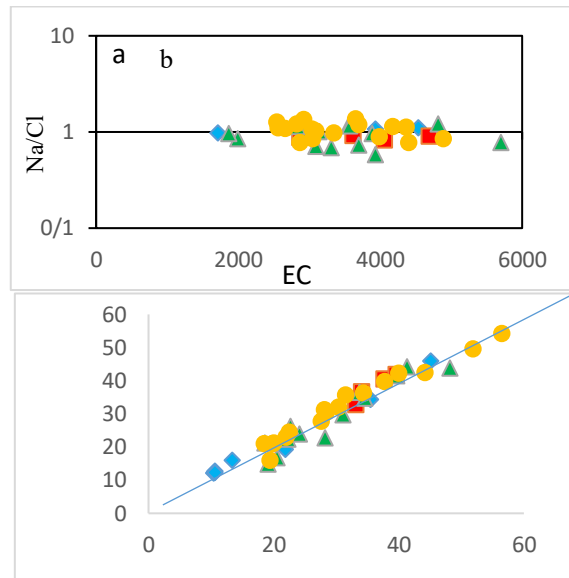
فرایندهای انحلال کلسیت، دولومیت و ژپس می‌باشند. نمونه‌هایی که در امتداد خط در مقادیر کمتر از 5 meq/l واقع شده باشند، نشان دهنده انحلال کلسیت و دولومیت می‌باشند و اگر بیشتر از این مقدار باشند انحلال ژپس و انیدریت فرایند غالب در ایجاد ترکیب شیمیایی می‌باشد. اکثر نمونه‌های آب دشت زیر خط ۱:۱ و در بیشتر از 10 meq/l واقع شده‌اند که با توجه به زمین‌شناسی منطقه نشان‌دهنده تاثیر انحلال ژپس همزمان با پدیده تبادل یونی در ترکیب شیمیایی آب منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

جهت نمایش فرایندهای تبادل یونی و تبادل یونی معکوس در آبخوان دشت بهبهان، سه نمودار ترکیبی با استفاده از توابع بین متشکله‌های شیمیایی متاثر از فرایند تبادل یونی تهیه گردیده است. ارزیابی نمودار سدیم در برابر کلرید یکی از مهمترین روش‌های ارزیابی نقش عوامل موثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی است. به طوری که نسبت ۱:۱ این عناصر نشان دهنده انحلال سنگهای تبخیری از

در شکل ۴ (a) نمودار Na/Cl در مقابل EC برای نمونه‌های آب زیرزمینی دشت بهبهان ارائه شده است. نمونه‌هایی که در بالای خط Na/Cl=1 واقع شده‌اند، منشأ دوگانه دارند یعنی علاوه بر انحلال حالت، ترکیب شیمیایی آنها، می‌توانند تحت تاثیر تبادل یونی قرار گرفته باشند. لذا با توجه به شکل ۴ (a)، در نمونه‌های مورد مطالعه پدیده تبادل یونی و تبادل یونی معکوس دیده می‌شود. در شکل ۴ (b) نمودار دو متغیره $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ در مقابل $HCO_3^- + SO_4^{2-}$ نشان داده شده است. خط ۱:۱ نشان دهنده

روش تحلیل عاملی (PCA)

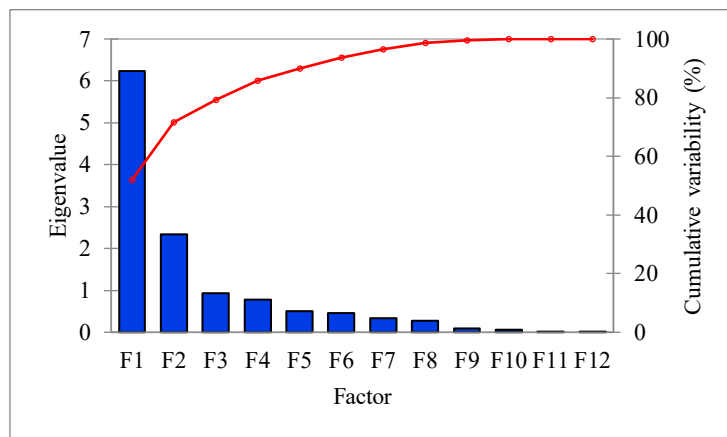
جهت ایجاد یک ساختار در یک مجموعه چند متغیره و به منظور تحلیل عامل‌های اصلی برای شناخت ساختارهای پنهان به کار گرفته می‌شود. این روش بر مبنای مؤلفه‌هایی که بردار ویژه بزرگتر یا مساوی ۱ باشد، استوار است (Belkhir et al., 2011). در این مطالعه به منظور ارزیابی تعداد عوامل اصلی تأثیرگذار بر کیفیت منابع آب زیرزمینی از روش PCA استفاده گردید. بر اساس پارامترهای فیزیکی شیمیایی (۱۲ پارامتر) ۳ فاکتور اصلی و مهم شناسایی گردید (شکل ۵). همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود ۱۲ فاکتور استخراج شد که سه فاکتور اول بیشترین تأثیر را بر کیفیت منابع آب منطقه دارند. در شکل ۶ نمودار بایوپلات مجموع دو عامل اول برای نمونه‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های آب در ۳ گروه توزیع شده‌اند.



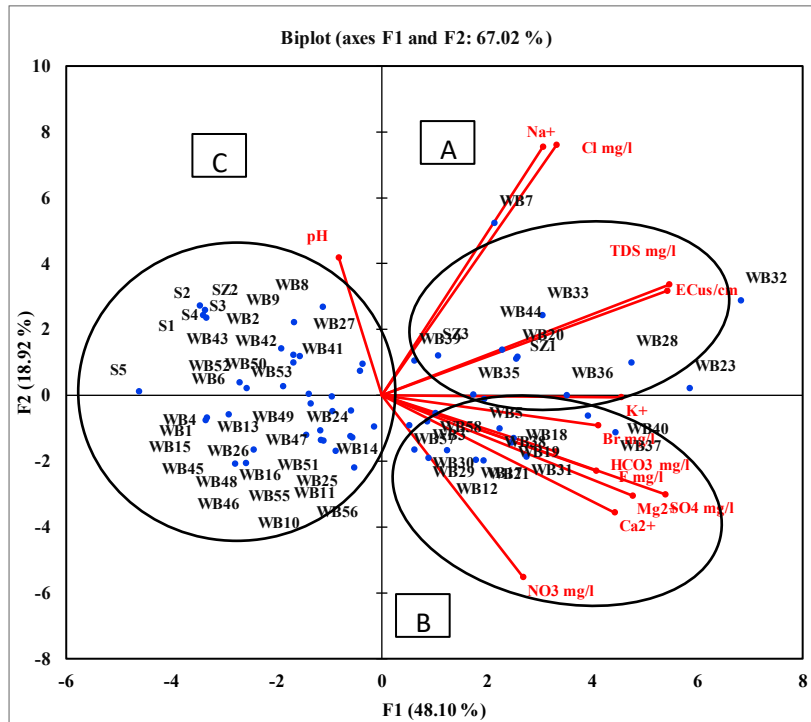
شکل (۴): نمودار ترکیبی a: Na/Cl در مقابل EC و b: $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ در مقابل $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$

شناسایی منشأ نیترات

به منظور ارزیابی منشأ نیترات از روش‌های آماری، هیدروشیمی و ایزوتوپ‌های پایدار استفاده گردید که در ادامه ارائه شده است.



شکل (۵): نمودار اسکری پلات و درصد تغییرات بردار ویژه عامل‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه.



شکل (۶): نمودار بایوپلات نمونه های مورد مطالعه

نمودار ترکیبی NO_3/Cl

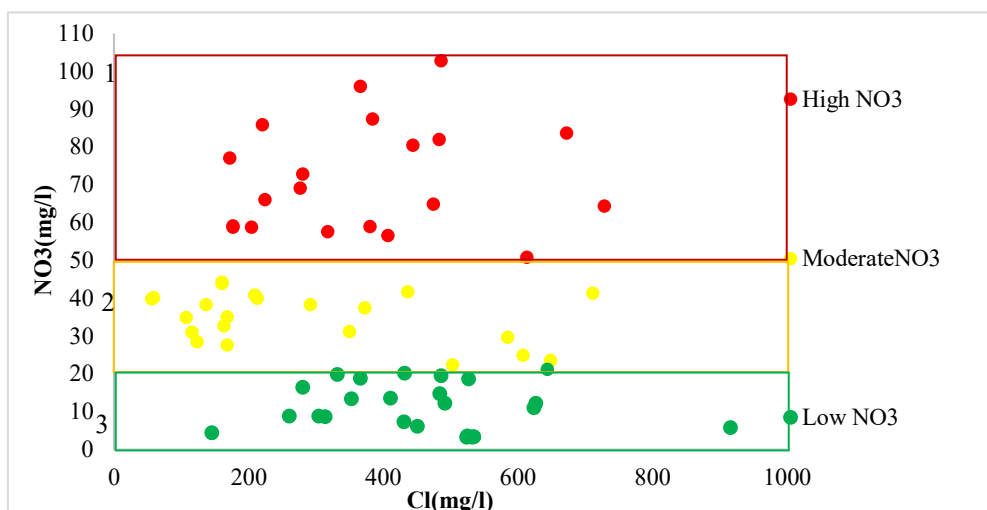
از آنجایی که یون کلرید تحت تأثیر فرآیندهای شیمیایی و میکروبیولوژی قرار نمی‌گیرد، یکی از شاخص‌های مناسب برای شناسایی آلودگی فاضلاب شهری و پساب دامی از کودهای شیمیایی در آب‌های زیرزمینی است. در شکل ۷ تغییرات غلظت نیترات در برابر کلرید در سه گروه مختلف ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌هایی که دارای مقدار نیترات بیشتر از ۵۰ میلی گرم بر لیتر هستند (گروه ۱)، اغلب در محدوده شهر بهبهان و اطراف روستاهای منطقه و یا در خروجی منطقه مورد مطالعه واقع شده‌اند. ارزیابی نمونه‌هایی که غلظت نیترات آنها بین ۲۰ تا ۵۰ میلی گرم بر لیتر است (گروه ۲)، نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌های آب چاه‌هایی که در خارج از محدوده شهری و در نزدیکی شبکه مارون قرار دارند که منعکس کننده تأثیر فعالیت‌های کشاورزی و کودهای حیوانی در این نمونه‌ها می‌باشد. گروه سه که شامل نمونه آب‌های سطحی و چاه‌های کم عمق که تحت تأثیر آب‌های سطحی قرار دارند

همانطور که مشاهده می‌شود، در گروه A مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار یون‌های کلرید و سدیم هستند که با توجه به لیتولوژی منطقه منعکس کننده تأثیر سازندهای تبخیری و رسوبات دانه‌ریز رسی در منطقه مورد مطالعه است. در گروه B نیترات، سولفات، فلورید و برمید در یک جهت قرار دارند که نشان‌دهنده منشأ مشابه برای این یون‌ها است. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌هایی که در گروه B قرار گرفته‌اند دارای مقدار نیترات بالایی می‌باشند. در گروه C که نمونه‌های شبکه خیرآباد، نمونه‌های اطراف محدوده مورد مطالعه و آب‌های سطحی قرار دارند مقدار نیترات کمتری دارند. به‌طور کلی شواهد موجود نشان می‌دهد که نمونه‌های داخل شهر و اطراف آن و همچنین نزدیک به مناطق روستایی محدوده مطالعاتی دارای مقدار نیترات بیشتری هستند. بنابراین، آلودگی NO_3 بیشتر ناشی از فعالیت‌های انسانی و فاضلاب‌های شهری می‌باشد.

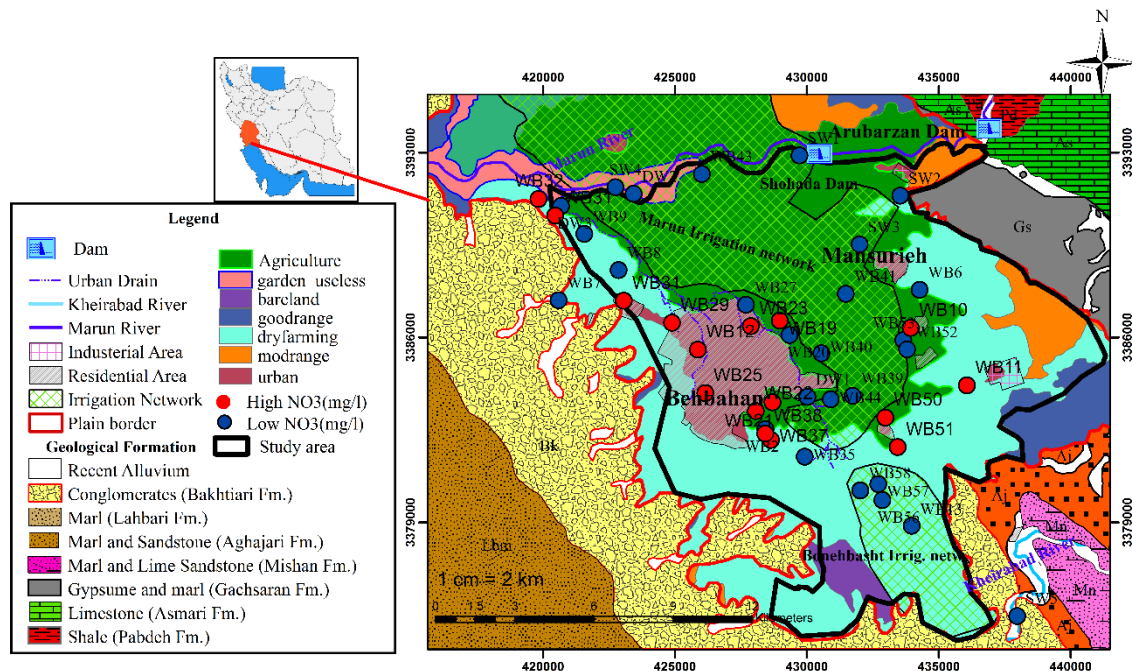


(نیتрат بین ۳ تا ۲۰ میلی گرم بر لیتر) بر روی نقشه کاربری اراضی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود پراکندگی نمونه‌ها در سطح محدوده مطالعاتی با تغییرات مقدار نیترات همخوانی دارد. نمونه‌های با غلظت بیشتر نیترات، در محدوده شهر بهبهان و یا در مکانهای روستایی با فعالیتهای، دامداری و صنعتی قرار گرفته است.

و همچنین نمونه‌هایی که از چاه عمیق برداشت شده اند نشان دهنده غلظت بسیار کم نیترات هستند، که تاثیر ناچیز فعالیتهای انسان زاد، در این گروه از نمونه‌ها را نشان می دهد. منشأ نیترات در این گروه به احتمال زیاد ناشی از منابع طبیعی منطقه و فعالیتهای باکتریایی می باشد. در شکل ۸ پراکندگی نمونه‌هایی با میزان نیترات بیشتر از حد استاندارد (بیشتر از ۵۰ میلی گرم بر لیتر) و نیترات کمتر



شکل (۷): نمودار تغییرات کلرید در برابر نیترات در گروه‌های مختلف منابع آب محدوده مطالعاتی



شکل (۸): نقشه کاربری اراضی و پراکنندگی نمونه ها و تغییرات غلظت نیترات نمونه های آب در محدوده مطالعاتی

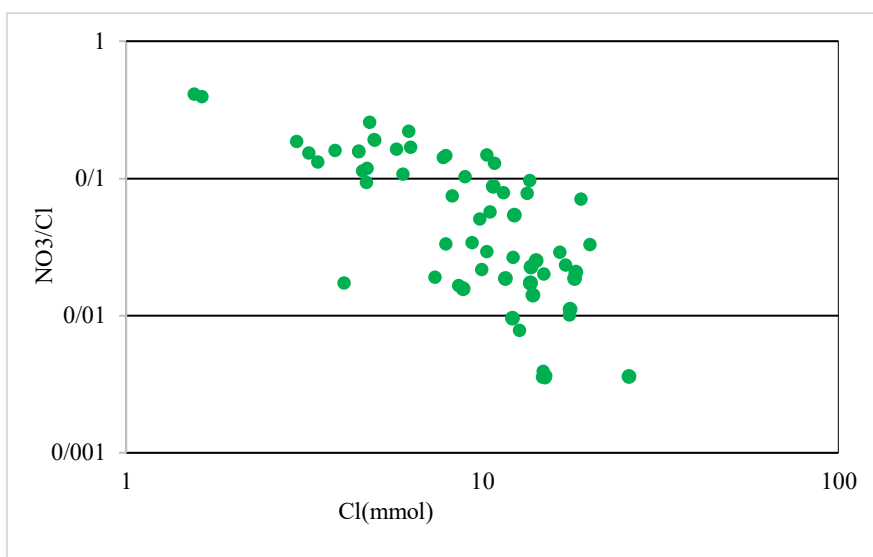
نسبت $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ در برابر غلظت Cl^- ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش مقدار Cl^- میزان $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ کم می شود که می تواند منعکس کننده تاثیر آلودگی فاضلاب خانگی در محدوده شهر بهبهان و روستا های اطراف باشد. نبود شبکه فاضلاب شهری در سطح شهرستان بهبهان و روستاهای اطراف و دفع فاضلاب از طریق چاه های جذبی و همچنین عمق نسبتاً کم برخورد به سطح آب در بخش های میانی دشت (بین ۵ تا ۱۰ متر)، امکان آلودگی منابع آب زیرزمینی از طریق فاضلاب و آب های برگشتی کشاورزی را افزایش می دهد. معمولاً کلرید حاصل از کودهای شیمیایی با افزایش قابل توجهی در غلظت NO_3^- همراه است، در نمونه های مورد مطالعه این مورد مشاهده نمی شود و در اکثر نمونه ها غلظت زیاد کلرید با NO_3^- نسبتاً کم همراه است. مقدار غلظت بسیار کم نیترات در آب های سطحی و آب های زیرزمینی عمیق با مقدار کلرید بالا منعکس کننده تاثیر منابع طبیعی از جمله

نسبت $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$

نسبت های هیدروشیمیایی مانند نسبت مولی $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ در مقابل Cl^- (mol/L) برای تشخیص منابع آبی مختلف دارای NO_3^- استفاده می شوند (Widory et al., 2005). افزایش Cl^- ناشی از کودهای شیمیایی با افزایش میزان غلظت NO_3^- همراه است (Martinez et al., 2021). از سوی دیگر، کودهای شیمیایی دارای نسبت $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ بالا با غلظت های کلرید کم هستند (Xia et al., 2017). به طور کلی آلودگی ناشی از کودهای حیوانی و فاضلاب، مقادیر Cl^- بالا و نسبت مولی $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ پایین دارند و نسبت مولی $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ است در حالی که نسبت مولی $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ در آلودگی ناشی از فعالیتهای کشاورزی و استفاده از کودهای شیمیایی از ۰/۱ تا ۱۰ متغیر است (She et al., 2024). همبستگی بسیار ضعیف بین نیترات و کلرید می تواند نقش فاضلاب و کودهای حیوانی به عنوان منبع اصلی نیترات در منابع آب را تایید کند (Alex et al., 2021). در شکل ۹ تغییرات



زمین شناسی منطقه، و نیتروژن آلی خاک می‌باشند
(Guo et al., 2020).



شکل (۹): نمودار تغییرات غلظت کلرید در برابر NO_3/Cl در نمونه های مورد مطالعه

رابطه بین غلظت نیترات و عمق چاه

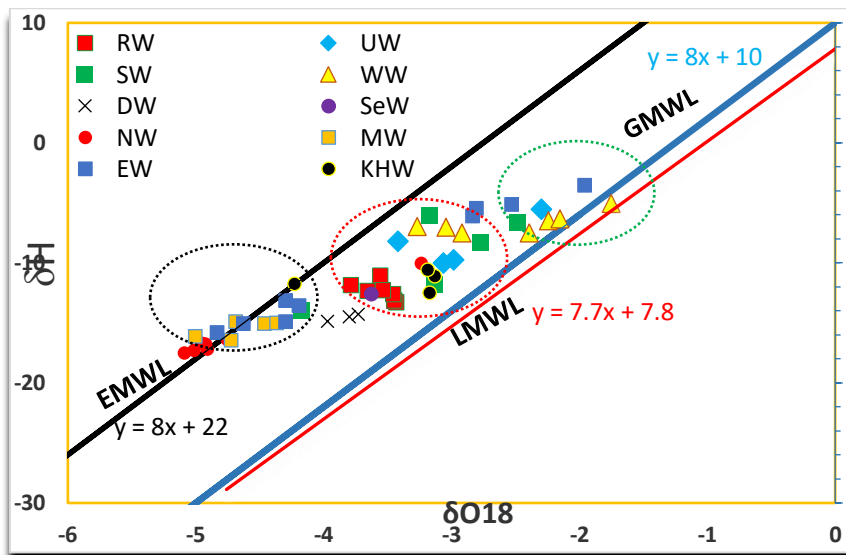
رابطه بین غلظت نیترات و عمق چاه‌های نمونه برداری به منظور ارزیابی تاثیر فعالیتهای انسان زاد مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۱۰). همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه‌هایی که تحت تاثیر آبهای سطحی قرار دارند و دارای عمق میانگین ۱۳ متر هستند (WB13, WB20, WB9, WB2, WB41, WB6, WB56, WB5, WB58, WB35, WB40, WB52, WB39, WB4, WB44) دارای مقدار نیترات بین ۷ تا ۲۵ میلی‌گرم در لیتر می‌باشند. با توجه به نقشه کاربری اراضی (شکل ۸)، موقعیت این چاه‌ها (رنگهای آبی) در منطقه مورد مطالعه نشان دهنده این است که اکثر این چاه‌ها در محدوده شبکه مارون و شبکه خیرآباد و تعدادی نیز در محدوده رودخانه مارون قرار گرفته و تحت تاثیر آبهای سطحی قرار دارند؛ بنابراین مقدار نیترات در این نمونه‌ها نسبتاً کم می‌باشد. اما در نمونه‌هایی که در محدوده شهر بهبهان و روستاهای اطراف قرار گرفته‌اند و عمق آنها کمتر از ۲۰ متر است، غلظت نیترات بین ۴۰ تا ۱۰۳ میلی‌گرم در لیتر متغیر است

که این امر ناشی از تاثیر فعالیتهای انسان زاد در افزایش مقدار نیترات در منابع آب منطقه می‌باشد. همچنین در سه نمونه از چاه‌هایی که دارای عمقی بین ۹۰ تا ۱۸۰ متر هستند (WB7, WB8, WB28) مقدار نیترات به شدت کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد که در عمق‌های زیاد تاثیر آلودگی نیترات ناشی از فعالیتهای انسانی کاهش می‌یابد.



گروه اول را نشان می‌دهد. گروه سوم که نمونه آب چاه‌های اطراف شبکه و اطراف شهر بهبهان را شامل می‌شود، غنی شدگی $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ را نشان می‌دهند. نمونه چاه‌هایی که در قسمت غربی و در سمت خروجی محدوده مطالعاتی واقع شده‌اند (WB7, WB8, WB9, WB17) دارای بیشترین غنی شدگی $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ هستند که نشان‌دهنده تأثیر تبخیر در طول مسیر حرکت آب زیرزمینی از سمت محل تغذیه تا محل تخلیه می‌باشد.

مطالعه می‌باشد. این دسته از نمونه‌ها دارای بیشترین تهی‌شدگی (Depletion) نسبت به بقیه نمونه‌ها هستند. گروه دوم که شامل نمونه‌های آب سطحی (رودخانه مارون و خیرآباد نمونه زه آب کشاورزی منطقه) و نمونه چاه‌های شبکه خیرآباد و اکثر نمونه‌های چاه‌های شهری می‌باشند که در میانه خط جوی جهانی و مدیترانه‌ای واقع شده که دارای شیب خط کمتری نسبت به گروه اول هستند و غنی شدگی در ایزوتوپ‌های سنگین $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ نسبت به

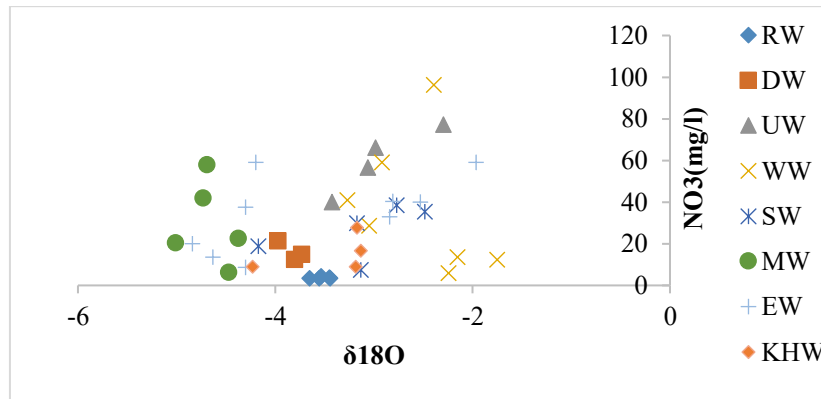


شکل (۱۱): نمودار پراکنش $\delta^2\text{H}$ در برابر $\delta^{18}\text{O}$ نمونه‌های آب زیرزمینی، شبکه آبیاری و رودخانه بر روی نمودارهای خط جوی جهانی و مدیترانه‌ای (RW: آب سطحی، DW: زه آب کشاورزی، UW: نمونه شهری، WW: نمونه‌های بخش غربی، SW: نمونه‌های بخش جنوبی، MW: نمونه‌های شبکه مارون، EW: نمونه‌های بخش شرقی، KHW: نمونه‌های شبکه خیرآباد)

مارون (MW) به دلیل نفوذ آب از شبکه آبیاری دارای تهی شدگی می‌باشند و میانگین مقدار نیترات در چاه‌هایی که در میانه شبکه قرار دارند (WB40, WB41, WB42, WB43) ۲۲ میلی گرم در لیتر است، اما در چاه WB19 که بین شهر و شبکه مارون قرار گرفته است افزایش غلظت نیترات چشمگیر است. نمونه‌های شهری نسبت به نمونه چاه‌های سطح شبکه مارون دارای غنی شدگی هستند و غلظت نیترات نیز در آنها بیشتر می‌باشد. در نمونه آب چاه‌های غرب منطقه مورد مطالعه سه چاه (WB7, WB8, WB9) دارای غنی شدگی هستند و مقدار

در شکل ۱۲ نمودار ترکیبی ایزوتوپ پایدار و نیترات ترسیم شده است همانطور که مشاهده می‌شود، تغییرات غلظت نیترات کاملاً متغیر است، به طوری که مواد مغذی آلی خاک و بارش نمی‌تواند منشأ اصلی برای NO_3^- در آبی‌زمینی کم عمق منطقه مورد مطالعه باشند، و احتمالاً نشان دهنده تأثیر منابع انسانی است. غلظت نیترات آب‌های زیرزمینی توسط عوامل متعددی به‌ویژه توسط آب تغذیه‌کننده آبخوان از طریق ناحیه غیراشباع کنترل می‌شود. تغییرات غلظت NO_3^- در مقابل $\delta^{18}\text{O}$ شکل ۱۲ نشان می‌دهد که چاه‌های واقع در محدوده شبکه آبیاری

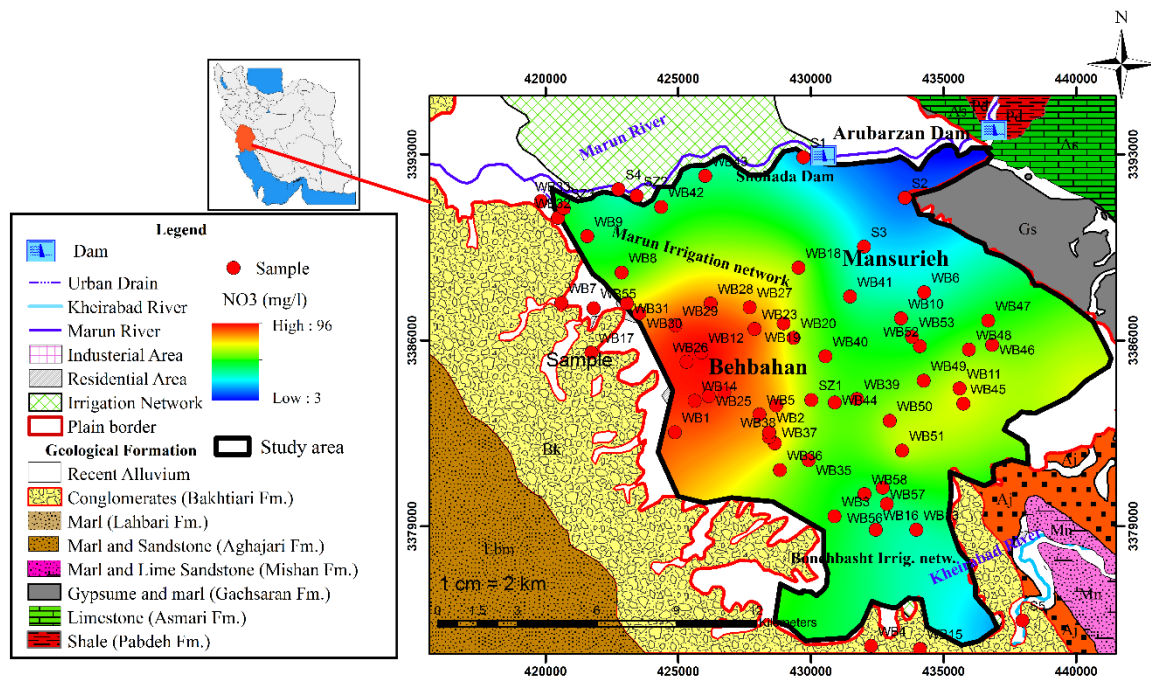
نیترات آنها کم می‌باشد. چنانچه قبلا ذکر شد این چاه‌ها دارای عمق بیشتر از ۷۰ متر هستند و خصوصیات کیفی آنها تحت تاثیر آب‌های زیرزمینی قدیمی تر قرار دارند.



شکل (۱۲): نمودارهای ترکیبی $\delta^{18}O$ و نیترات در چاه‌های منطقه مورد مطالعه

شمالی و شمال شرق دشت و در نزدیکی روستای منصوریه و همچنین در بخش جنوب در نزدیکی رودخانه خیرآباد می‌باشد به طور کلی فاضلاب شهرستان بهبهان و کودهای حیوانی از عمده دلایل بالا بودن نیترات به شمار می‌رود.

در شکل ۱۳ نقشه تغییرات مکانی نیترات منطقه مورد مطالعه ترسیم گردید همانطور که مشاهده می‌شود میزان نیترات در آب زیرزمینی نواحی شهری بهبهان مخصوصا در بخش غربی شهر بهبهان و به سمت خروجی دشت بیشترین مقدار است. کمترین میزان نیترات نیز مربوط به نواحی



شکل (۱۳): نقشه تغییرات مکانی نیترات منطقه مورد



نتیجه گیری

نیترات یکی از رایج‌ترین آلاینده‌ها در آب‌های زیرزمینی در مقیاس جهانی است که تهدیدی جدی برای منابع آب محسوب می‌شود. آلودگی آب‌های زیرزمینی با نیترات‌ها عمدتاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و همچنین شهرنشینی است. بسیاری از محققان با استفاده از روش‌های هیدروشیمی و ایزوتوپ پایدار آلودگی منابع آب با نیترات را مورد ارزیابی قرار دادند به طور مثال وی و همکاران در سال ۲۰۲۴ با استفاده از روش‌های هیدروشیمیایی و تکنیک‌های ایزوتوپ محیطی به تجزیه و تحلیل منابع آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی کم عمق منطقه وانژ در چین پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی کم عمق از منابع متعدد از جمله فاضلاب شهری و کودهای کشاورزی منشأ می‌گیرند (Wei et al., 2024). وی و همکاران در سال ۲۰۲۲ نیز با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار محیطی ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$) نشان دادند که کیفیت آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. با این حال، تأثیر عوامل انسانی از اهمیت بیشتری برخوردار بود. نتایج همچنین نشان داد که نیترات در آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه عمدتاً ناشی از عوامل انسانی، به ویژه کود حیوانی، فاضلاب و فعالیت‌های کشاورزی بود (He et al., 2022). الکو و همکاران در سال ۲۰۲۴ با استفاده از روش‌های هیدروشیمیایی و ایزوتوپی به ارزیابی آلودگی نیترات در قسمت شرقی دلتای نیجر پرداختند که نتایج آنها نشان داد، منابع آب زیرزمینی منطقه دچار آلودگی بوده و این آلودگی از پساب فاضلاب ناشی می‌شود (Aleku et al., 2024). در این پژوهش، از روش‌های هیدروشیمی و ایزوتوپ‌های پایدار به منظور برای شناسایی منشأ نیترات، در آب زیرزمینی آبخوان دشت بهبهان استفاده گردید که نتایج حاصل به طور مختصر در ادامه ارائه شده است. ارزیابی نسبت NO_3/Cl در برابر -

Cl^- نشان داد که با افزایش مقدار Cl^- میزان NO_3/Cl کم می‌شود این امر تأثیر آلودگی فاضلاب خانگی در محدوده شهر بهبهان و روستاهای اطراف، و پسابهای دامی در محدوده چاه‌های (WB10, WB31, WB17) را منعکس می‌کند. نبود شبکه فاضلاب شهری در سطح شهرستان بهبهان و روستاهای اطراف و دفع فاضلاب از چاه‌های جذبی و همچنین عمق نسبتاً کم برخورد به سطح آب در بخش‌های میانی دشت، امکان آلودگی منابع آب زیرزمینی از فاضلاب و آبهای برگشتی کشاورزی را افزایش می‌دهند. رابطه بین غلظت نیترات و عمق چاه‌های نمونه برداری، نمونه‌ها را در سه گروه مجزا دسته بندی می‌کند. در گروه یک که شامل چاه‌هایی با عمق میانگین ۱۳ متر هستند، تحت تأثیر تغذیه از آبهای سطحی قرار گرفته و مقدار نیترات آنها بین ۷ تا ۲۵ میلی گرم در لیتر می‌باشند اکثر این چاه‌ها در محدوده شبکه مارون و شبکه خیرآباد و تعدادی نیز در محدوده رودخانه مارون قرار دارند. در گروه ۲ چاه‌هایی که در محدوده شهر بهبهان و روستاهای حومه قرار گرفته‌اند و عمق آنها کمتر از ۲۰ متر است، غلظت نیترات در آنها بین ۴۰ تا ۱۰۳ میلی گرم در لیتر متغیر است که منعکس کننده تأثیر فعالیت‌های انسان زاد در آلودگی منابع آب به نیترات می‌باشد. گروه سه که شامل سه نمونه از چاه‌هایی با عمقی بین ۹۰ تا ۱۸۰ متر (WB7, WB8, WB27) هستند مقدار نیترات به شدت کاهش یافته است، این امر نشان دهنده آن است که با افزایش عمق چاه‌ها تأثیر فعالیت‌های انسان زاد در آلودگی منابع آب به نیترات ناچیز است. تغییرات غلظت NO_3^- در مقابل $\delta^{18}\text{O}$ نشان می‌دهد که چاه‌های واقع در محدوده شبکه آبیاری مارون (MW) به دلیل نفوذ آب از شبکه آبیاری دارای تهی شدگی می‌باشند و میانگین مقدار نیترات در چاه‌هایی که در میانه شبکه قرار دارند (WB40, WB41, WB42, WB43) ۲۲ میلی گرم در لیتر است، اما در چاه‌هایی که بین شهر و شبکه مارون قرار گرفته است افزایش غلظت نیترات

نبود شبکه فاضلاب شهری در سطح شهرستان بهبهان و روستاهای اطراف و دفع فاضلاب از طریق چاه های جذبی دلیل اصلی آلودگی منابع آب زیرزمینی در منطقه است. بنابراین برای کاهش آلودگی نیترات در منطقه مورد مطالعه لازم است که دفع فاضلابهای شهری و روستایی مدیریت شود و با احداث تصفیه خانه و مدیریت فاضلابهای خانگی از آلوده شدن بیشتر منابع آب منطقه جلوگیری شود.

چشمگیر است. نمونه های شهری نسبت به نمونه چاه های سطح شبکه مارون دارای غنی شدگی است و غلظت نیترات نیز در آنها بیشتر می باشد. رصد چاه های کم عمق در محدوده شهر بهبهان و روستا های اطراف نشان داد که منبع اصلی نیترات در گستره مورد مطالعه شامل فاضلاب انسانی و حیوانی است. نقشه تغییرات مکانی مقدار نیترات منابع آب نشان می دهد که میزان نیترات در آب زیرزمینی نواحی شهری بهبهان مخصوصاً در بخش غربی شهر بهبهان و به سمت خروجی دشت بیشترین مقدار است.

تشکر و قدر دانی

این پژوهش با حمایت سازمان آب و برق خوزستان و دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا شده است. بدین وسیله از کارشناسان پرسنل مربوطه که ما را در انجام این پژوهش یاری کردند صمیمانه تشکر می نمایم.

منابع

محمدزاده، ح.، اسکندری، ع. ۱۳۹۷. استفاده از تکنیکهای هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی به منظور فهم بهتر ویژگیهای منابع آبی مهم محدوده های مطالعاتی پاره و جوانرود، استان کرمانشاه. مجله هیدروژئولوژی تبریز، دوره سوم، شماره ۱، ۸۰-۹۸.

دانشیان، ح.، کلانتری، ن. ۱۳۹۷. ارزیابی کارکرد شبکه های آبیاری در بالآمدگی سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت بهبهان). آکو هیدرولوژی، ۱۳۵-۱۴۸.

زریاب، ع.، ناصری، ح.، ر. علیجانی، ف. ۱۴۰۱. شناسایی منشأ و سهم نسبی نیترات در آبخوان شرقی کابل با استفاده از نمایانگرهای ایزوتوپی و مدل BSIMM. فصلنامه علوم محیطی، ۲۲(۴)، ۵۵۷-۵۷۰.

Aleku, D.L., Dähnke, K. and Pichler, T., 2024. Source, transport, and fate of nitrate in shallow groundwater in the eastern Niger Delta. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(56), pp.65034-65050.

Alex, R., Kitalika, A., Mogusu, E., & Njau, K. 2021. Sources of nitrate in ground water aquifers of the semiarid region of Tanzania. *Geofluids*, 2021, 1-20.

Adimalla, N., & Wu, J. 2019. Groundwater quality and associated health risks in a semi-arid region of south India: Implication to sustainable groundwater management. *Human and ecological risk assessment: an international journal*, 25(1-2), 191-216.

Bian, J.M., Liu, C.H., Zhang, Z.Z., Wang, R., Gao, Y., 2016. Hydro-geochemical characteristics and health risk evaluation of nitrate in groundwater. *Pol. J. Environ. Stud.* 25 (2), 521-527.

Belkhir, L., Boudoukha, A., Mouni, L. 2011. A multivariate statistical analysis of groundwater chemistry data. *International Journal of Environmental Research* 5(2):537-544.

Furi, P. 2011. Hydrochemical characterization of complex volcanic aquifers in a continental rifted zone: the middle Awash basin. *Hydrogeol J* 20:385-400.

Fritz, P. Fontes, J.C., 1980. Introduction. In: Fritz P, Fontes JC (eds) *Handbook of environmental isotope geochemistry*, 1st edn. Elsevier, Amsterdam, pp 1-19.



Gleeson, T., Cuthbert, M., Ferguson, G., & Perrone, D. 2020. Global groundwater sustainability, resources, and systems in the Anthropocene. *Annual review of earth and planetary sciences*, 48 , 431-463.

Guo, Z., Yan, C., Wang, Z., Xu, F., Yang, F., 2020. Quantitative identification of nitrate sources in a coastal peri-urban watershed using hydrogeochemical indicators and dual isotopes together with the statistical approaches. *Chemosphere* 243, 125364.

Han, D.M., Liang, X., Jin, M.G., Currell, M.J., Song, X.F. and Liu, C.M., 2010. Evaluation of groundwater hydrochemical characteristics and mixing behavior in the Daying and Qicun geothermal systems, Xinzhou Basin. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189(1-2), pp.92-104.

He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. 2021. Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature communications*, 12 (1), 1-11.

He, S., Li, P., Su, F., Wang, D. and Ren, X., 2022. Identification and apportionment of shallow groundwater nitrate pollution in Weining Plain, northwest China, using hydrochemical indices, nitrate stable isotopes, and the new Bayesian stable isotope mixing model (MixSIAR). *Environmental pollution*, 298, p.118852.

Jasechko, S. Global Isotope Hydrogeology—Review. *Rev. Geophys.* 2019, 57, 835–965.

Khmila, K., Trabelsi, R., Zouari, K., Kumar, U.S. (۲۰۲۱). Application of geochemical and isotopic tracers for the evaluation of groundwater quality in the irrigated area of the Sbiba plain (Central West Tunisia). *Agr Ecosyst Environ* ۲۱۳:۱۰۷۲۹۸.

Krinsky, L.S., Lusk, M.G., Abeels, H., Seals, L., (۲۰۲۱). Sources and concentrations of nutrients in surface runoff from waterfront homes with different landscape practices. *Sci. Total Environ.* ۷۵۰, ۱۴۲۳۲۰.

Kumar, P.S., Elango, L., James, E., 2014. Assessment of hydrochemistry and groundwater quality in the coastal area of South Chennai, India. *Arab J Geosci* 7:2641–2653.

Li, P., Karunanidhi, D., Subramani, T., Srinivasamoorthy, K., (۲۰۲۱). Sources and consequences of groundwater contamination. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* ۸۰(۱), ۱–۱۰.

Li, P., Tian, R., Xue, C., & Wu, J. 2017. Progress, opportunities, and key fields for groundwater quality research under the impacts of human activities in China with a special focus on western China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 13224-13234.

Mohammadzadeh, H., Eskandari Mayvan, J. and Heydarizad, M., 2020. The effects of moisture sources and local parameters on the 18O and 2H contents of precipitation in the west of Iran and the east of Iraq. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 72(1), pp.1-15.

Marques, J.M., Eggenkamp, H.G., Graça, H., Carreira, P.M., Jose, Matias M, Mayer B, Nunes D (2010) Assessment of recharge and flowpaths in a limestone thermomineral aquifer system using environmental isotope tracers (Central Portugal). *Isotopes Environ Health Stud* 46:156–165.

Martínez J A T; Mora A ; Mahlknecht J ; Daessle L W; , Aviles P A C; , Rogelio Ledesma-Ruiz R L.2021. Estimation of nitrate pollution sources and transformations in groundwater of an intensive livestock-agricultural area (Comarca Lagunera), combining major ions, stable isotopes and MixSIAR model. *Environmental Pollution* 269 (2021) 115445.

Piper, A.M., 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water- analyses. *Trans. Am. Geophys. Union* 25 (6), 914–928.

Parnell, A.C., Inger, R., Bearhop, S. and Jackson, A.L., 2010. Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. *PloS one*, 5(3), p.e9672.

Panno, S. V., Hackley, K. C., Hwang, H. H., Greenberg, S. E., Krapac, I. G., Landsberger, S., & O'Kelly, D. J. 2006. Characterization and identification of Na-Cl sources in ground water. *Groundwater*, 44(2), 176-187.



Ramaroson, V., Randriantsivory, J.R., Rajaobelison, J., Fareze, L.P., Rakotomalala, C.U., Razafitsalama, F.A. and Rasolofonirina, M., 2020. Nitrate contamination of groundwater in Ambohidrapeto–Antananarivo–Madagascar using hydrochemistry and multivariate analysis. *Applied Water Science*, 10(7), pp.1-13.

She, W., Jiao, Y., Lu, R., Chai, Y., Chen, F., Shen, J., Zhang, H., Liao, H. and Xu, Q.E., 2024. Quantification of Nitrate Sources and Its Spatial Heterogeneity by Dual Isotopes. *Ecosystem Health and Sustainability*, 10, p.0201.

Strebel, O.W.H.M., Duynisveld, W.H.M. and Böttcher, J., 1989. Nitrate pollution of groundwater in western Europe. *Agriculture, ecosystems & environment*, 26(3-4), pp.189-214.

Sappa, G., Vitale, S. and Ferranti, F., 2018. Identifying karst aquifer recharge areas using environmental isotopes: A case study in central Italy. *Geosciences*, 8(9), p.351.

Tijani, M.N. and Abimbola, A.F., 2003. Groundwater chemistry and isotope studies of weathered basement aquifer: a case study of Oke-Ogun area, SW-Nigeria. *Africa Geoscience Review*, 10(4), pp.373-388.

Tesoriero, A.J., Liebscher, H. and Cox, S.E., 2000. Mechanism and rate of denitrification in an agricultural watershed: Electron and mass balance along groundwater flow paths. *Water resources research*, 36(6), pp.1545-1559.

Widory, D., Petelet-Giraud, E., N'egrel, P., Ladouche, B., 2005. Tracking the sources of nitrate in groundwater using coupled nitrogen and Boron isotopes: A Synthesis. *Environ. Sci. Technol.* 39 (2), 539–548.

Weitzman, J.N., Brooks, J.R., Mayer, M.P., Rugh, W.D., Compton, J.E., 2021. Coupling the dual isotopes of water ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) nitrate ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$): a new framework for classifying current and legacy groundwater pollution. *Environmental Research Letter*, 16, 045008. .

Xia, Y., Li, Y., Zhang, X. and Yan, X., 2017. Nitrate source apportionment using a combined dual isotope, chemical and bacterial property, and Bayesian model approach in river systems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(1), pp.2-14.

Xu, G., Su, X., Yuan, Z., Ji, L., Li, N., Liang, H. 2021. Nitrogen behavior during artificial groundwater recharge through ponds: a case study in Xiong'an New Area. *Environ. Geochem. Health*.

Zhou, Y., Li, P., Peiyue, L., Chen, M., Dong, Z., Lu, C. 2020. Groundwater quality for potable and irrigation uses and associated health risk in southern part of Gu'an County, North China Plain. *Environ Geochem Health* 43:813–835.

Wei, X., Zhou, Y., Ran, L., Chen, M., Zou, J., Fan, Z. and Fu, Y., 2024. Sources and Transformation of Nitrate in Shallow Groundwater in the Three Gorges Reservoir Area: Hydrogeochemistry and Isotopes. *Water*, 16(22), p.3299