



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Determination of the origin and zoning of nitrate contamination in the groundwater of Izeh Plain with a hydrochemical-statistical approach

Seyyed Sajedin Mousavi^{1*}, Amir Saberi nasr², Fatemeh Rahimzadeh³

1, 2, 3. Department of Geology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Article info

Article history

Received: 11 September 2025

Accepted: 24 November 2025

Keywords:

Nitrate, Contamination, hydrochemical-statistical approach, Izeh Plain.



Abstract

Nitrate is one of the most important groundwater contaminants in the world, capable of causing environmental problems and posing risks to human health. This study investigated groundwater quality, nitrate concentration, and its sources in the Izeh Plain aquifer, as well as the impact of land use on this contamination. For this purpose, samples were collected and analyzed from 21 production wells during both the wet and dry seasons of the 2021-2022 hydrological year. The results indicated that the groundwater type is mainly bicarbonate-calcium and bicarbonate-magnesium, and approximately 23.81% of the samples exceeded the permissible nitrate concentration limits set by Iranian drinking water standards and the World Health Organization. Nitrate concentrations in the dry season ranged from 13.40 to 103 mg/L, with an average of 37.31 mg/L, while in the wet season they ranged from 9 to 125.7 mg/L, averaging 34.34 mg/L in the aquifer. Mapping of nitrate distribution confirmed that the areas with the highest contamination are located around the Ab Bandan wetland in the southeast, the southern margin of the Izeh Plain, and the southwest of this city. Integration of ionic ratio data ($\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$, K^+/Cl^- , and Cl^-/Na^+) and factor analysis demonstrate that the primary sources of nitrate in this aquifer stem from excessive use of nitrate fertilizers, and lack of a sewage network and sanitation treatment plant in the region. This finding is further corroborated by the overlap between the land use map and the nitrate zoning map of the area.

Introduction

Groundwater serves as a critical resource for drinking water, agriculture, industry, and ecosystem balance, yet population growth and industrialization have intensified its pollution, particularly in arid and semi-arid regions, necessitating enhanced chemical and ecological management to avert water stress (Zendeabad et al., 2019). Nitrate, highly soluble and mobile in soil, ranks among the most pervasive groundwater contaminants, originating from natural sources like thunderstorms and anthropogenic activities such as nitrate fertilizers, sewage leakage, and waste mismanagement (Jia and Qian, 2025; Mirzaei et al., 2023).

Elevated nitrate levels pose severe health risks, including methemoglobinemia in infants and gastric cancer in adults, prompting the WHO to establish a 50 mg/L threshold for drinking water (WHO, 2011; Rahman

et al., 2021). Global and Iranian studies, including those by Ostvari et al. (2012) in Lordegan Plain, Amarloei et al. (2014) in Ilam, Moghimi (2017) in Ghaemshar Plain link rising nitrate to fertilizers, sewage, and land use, with spatial patterns influenced by soil properties and flow dynamics. Further research by Kalantari et al. (2021) in Gotvand, Mirzaei et al. (2023) in Evan Plain, Zendeabad et al. (2019) in Mashhad, Tian et al. (2020) in China, and Rahman et al. (2021) in India confirms anthropogenic dominance, especially fertilizers, via isotopes, hydrochemistry, and PCA.

In Izeh Plain, groundwater supports irrigation and potable supplies but faces depletion and nitrate pollution from overexploitation, urban expansion, and agriculture since the early 1990s (Naseri and Alijani, 2007; Mehrabi Nejad et al., 2024).

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108361>

*Corresponding author: Seyyed Sajedin Mousavi; E-mail: S.mousavi@scu.ac.ir

How to cite this article: Mousavi, S., Saberi nasr, A., Rahimzadeh, F., 2025. Determination of the origin and zoning of nitrate contamination in the groundwater of Izeh Plain with a hydrochemical-statistical approach. Kharazmi Journal of Earth Sciences 11(2), 488- 516. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108361>



BY NC

Recent droughts and development exacerbate risks, underscoring the need for updated hydrochemical monitoring to reassess nitrate spatiotemporal variations. This study addresses the gap by resampling Izeh wells, analyzing hydrochemical parameters, and applying factor analysis to map nitrate patterns and chemistry relationships.

Study Area

The Izeh Plain is a topographically closed basin (polje) located in the folded Zagros belt of northeastern Khuzestan Province, Iran, at an average elevation of 835 meters. It experiences a semi-arid climate with an average annual precipitation of ~474 mm and significant seasonal temperature variations. Geologically, the plain is a structural depression bounded by anticlines and synclines composed of Cretaceous to Tertiary carbonate formations (e.g., Asmari, Ilam-Sarvak), with Quaternary alluvial deposits filling the basin center.

Hydrogeologically, the system comprises an alluvial aquifer (approx. 170 km²) hydraulically connected to surrounding karstic aquifers. Groundwater recharge occurs primarily at the margins via infiltration from the karst systems, leading to higher hydraulic conductivity (up to 7 m/day) and steeper gradients there. Flow converges towards the central lakes and eastern discharge zone, where finer sediments reduce conductivity (to <0.5

m/day) and lower the water table. Thus, the aquifer's characteristics are fundamentally controlled by its geomorphological setting and complex sedimentology.

Materials and Methods

To evaluate the hydrochemistry of the Izeh Plain aquifer and to examine the spatial and temporal variations of nitrate pollution, 21 production wells, suitably distributed across the plain, were sampled during the 2021-2022 hydrological year in both the dry and wet seasons (Fig. 1). Chemical analysis of major anions and cations, including sulfate, chloride, potassium, sodium, magnesium, calcium, bicarbonate, nitrate, and bromide, was conducted at the Khuzestan Water and Power Organization Laboratory. In the laboratory, calcium, magnesium, chloride, carbonate, and bicarbonate ions were measured by titration; sodium and potassium were analyzed using flame photometry; and sulfate, nitrate, and bromide were assessed with spectrophotometry (UV-Vis model Dr 2800). The pH and electrical conductivity values were also measured on-site using a digital pH meter and conductivity meter (Tables 1 and 2). After determining the groundwater type and facies of the study area using Piper diagrams, nitrate pollution zoning maps for both seasons were drawn for this aquifer to illustrate its spatial and temporal distribution (Fig. 2).

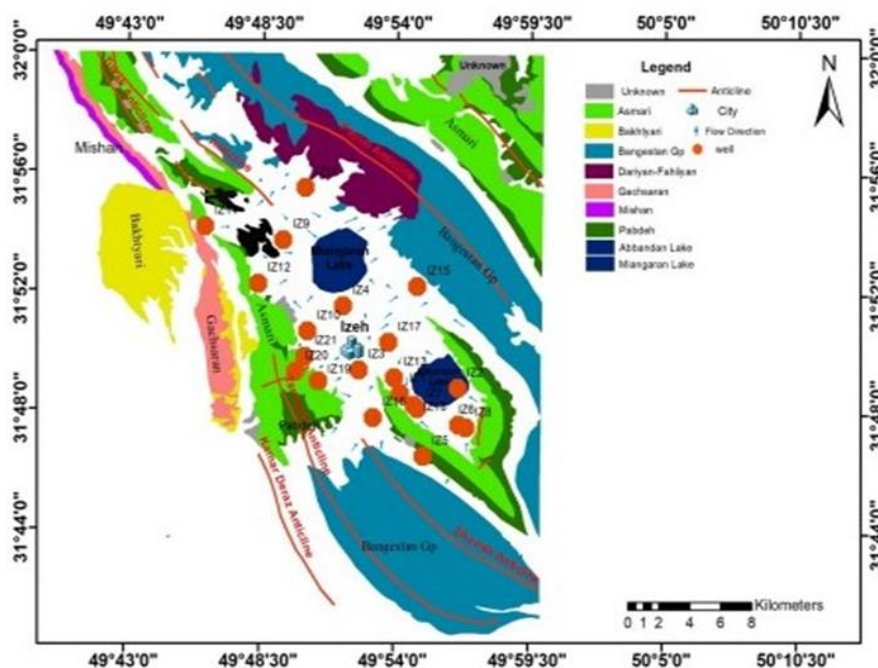


Fig. 1. The map of the geographical location, geology, and positions of 21 production wells in the Izeh Plain (the geological map is adapted from the koh e Asmari map at a scale of 1:100,000, prepared by the National Iranian Oil Company).

Table 1. The results of the descriptive statistical analysis of groundwater samples from the Izeh Plain during the dry season (Rahimzadeh, 2024).

Parameters	pH	EC ($\mu\text{S/cm}$)	TDS mg/L	Br ⁻	No ₃ ²⁻	Na ⁺	k ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Mean	7.8	899.19	566.84	0.28	37.3	35.72	1.75	53.82	77.49
Standard error	0.0	199.34	126.91	0.12	6.57	18.32	0.38	14.02	7.87
Median	7.8	652	399.9	0.07	23.1	15.17	1.17	36.82	67.53
Mode	7.9	2922	4580	0.06	18.9	397.7	1.17	19.08	165.7
Standard	0.3	913.50	581.56	0.54	30.0	83.96	1.75	64.24	36.06
Variance	0.1	834479	338215	0.29	905.	7050.	3.07	4126.	1300.
Kurtosis	-	14.37	14.73	12.5	0.99	19.83	12.4	11.69	1.39
Skewness	-	3.55	3.61	3.45	1.52	4.40	3.25	3.16	1.40
Range	1.1	4352	2771.2	2.31	89.6	396.3	8.21	293.8	126.6
Minimum	7.0	228	150.8	0.06	13.4	1.38	0.39	8.02	39.08
Maximum	8.2	4580	2922	2.37	103	397.7	8.6	301.9	165.7

Continued Table 1.

Parameters	SO ₄ ²⁻ mg/L	CL ⁻	NH ₄	F ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	Li ⁺
Mean	69.10	69.51	2.77	0.47	0.15	0.06	0.06
Standard error	35.61	41.17	0.56	0.07	0.05	7.76E-18	7.76E-18
Median	18.73	13.83	1.08	0.42	0.06	0.06	0.06
Mode	191.20	874.30	1.082	0.22	0.05984	0.06	0.06
Standard deviation	163.21	188.66	2.55	0.33	0.22	3.56E-17	3.56E-17
Variance	26636.14	35590.74	6.51	0.11	0.05	1.26E-33	1.26E-33
Kurtosis	17.90	18.88	-0.43	1.82	10.27	-2.22	-2.22

Skewness	4.14	4.27	1.12	1.38	3.13	-1.08	-1.08
Range	756.54	873.95	7.04	1.29	0.93	0	0
Minimum	0.96	0.35	1.08	0.11	0.06	0.06	0.06
Maximum	757.5	874.3	8.12	1.4	0.99	0.06	0.06

Table 2. The results of the descriptive statistical analysis of groundwater samples from the Izeh Plain during the wet season (Rahimzadeh, 2024).

Parameters	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS mg/L	Br ⁻	NO ₃ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Mean	7.61	932.43	593.70	0.19	34.34	38.274	3.69	55.08	77.73
Standard error	0.08	218.08	139.53	0.10	6.71	17.948	1.35	14.53	9.41
Median	7.6	682	414.77	0.06	22.2	17.47	1.56	30.5	69.94
Mode	7.5	4990	3187.93	0.06	15.3	41.84	0.78	315.20	226.00
Standard deviation	0.36	999.39	639.42	0.45	30.76	82.25	6.20	66.58	43.14
Variance	0.13	998782	408857	0.20	946.48	6764.93	38.40	4432.45	1861.06
Kurtosis	0.80	14.91	14.86	20.41	2.98	19.38	6.61	12.36	6.37
Skewness	-	3.63	3.62	4.49	1.79	4.33	2.74	3.26	2.17
Range	1.6	4741	3023	2.06	125.6	389.72	21.51	306.82	188.53
Minimum	6.8	249	165	0.06	0.1	1.379	0.39	8.39	37.47
Maximum	8.4	4990	3188	2.12	125.7	391.1	21.9	315.2	226

Continued Table 2.

Parameters	HCO ₃ ⁻ mg/L	SO ₄ ²⁻	CL ⁻	NH ₄	F ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	Li ⁺
Mean	311.42	94.99	77.74	2.21	7.15	25.68	0.06	0.06
Standard error	33.06	41.66	45.29	0.86	0.79	18.79	7.8	0.001
Median	259.3	26.9	19.14	1.08	6.46	5.52	0.06	0.06
Mode	572	17.29	970.70	1.08	6.27	5.06	0.06	0.06
Standard	151.50	190.93	207.54	3.93	3.60	86.11	3.555E-	0.006
Variance	22953.0	36455.	43072.	15.4	12.9	7415.2	1.264E-	3.905E-
Kurtosis	-1.18	15.95	19.65	15.3	0.65	20.92	-2.22	5.20
Skewness	0.36	3.85	4.38	3.85	0.81	4.57	-1.08	2.52
Range	471.6	877.54	968.22	17.1	13.4	398.44	0	0.02
Minimum	100.1	3.362	2.48	1.08	1.71	2.76	0.06	0.06
Maximum	571.7	880.9	970.7	18.2	15.2	401.2	0.06	0.08

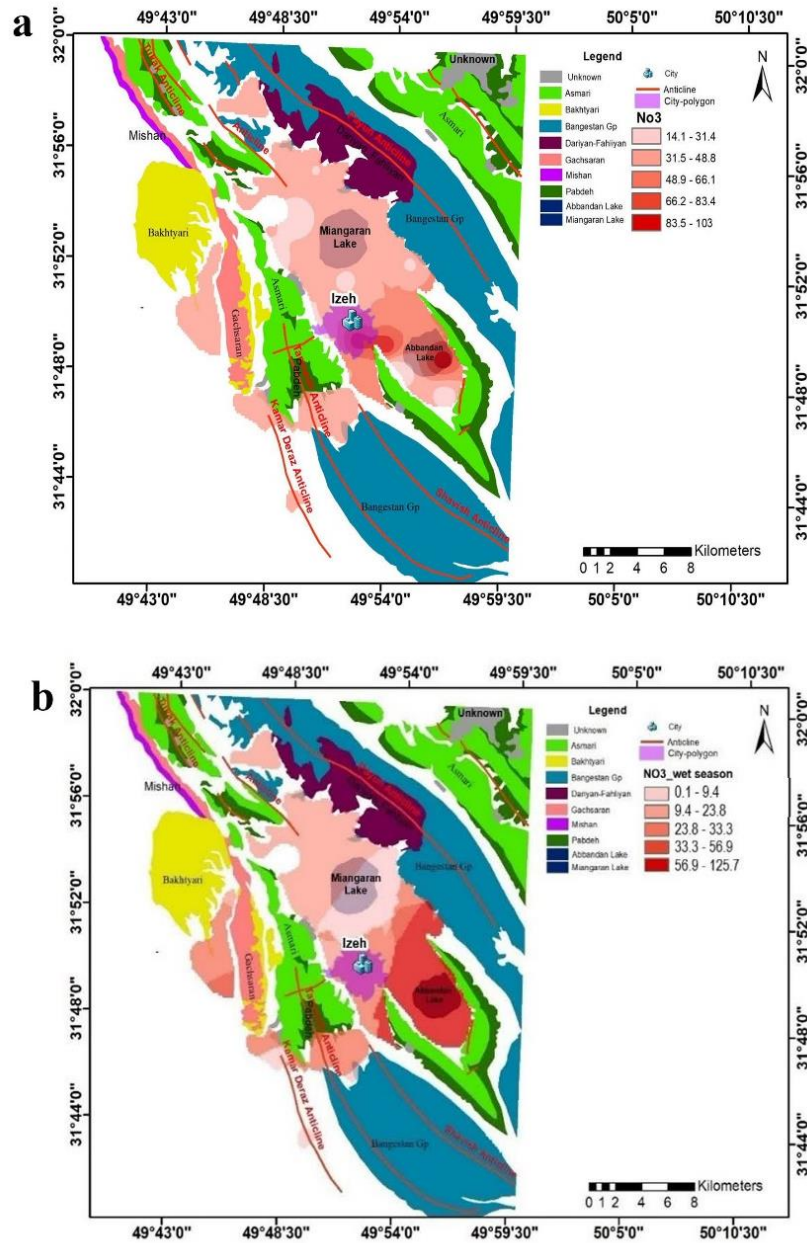


Fig. 2. The zoning map of nitrate contamination in the groundwater of the Izeh Plain. a) Dry and, b) Wet season (Rahimzadeh, 2024).

To assess the normality of the data and their suitability for statistical analyses, the Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) index and Bartlett's test were employed. The results of these statistical tests indicated that the KMO values for the dry season and the wet season were 0.51 and 0.58, respectively. This suggests that the data are appropriate for statistical analyses such as factor analysis, aimed at

identifying the sources of nitrate contamination and the contribution of each factor. Moreover, ionic ratios were utilized in this study.

Results and Discussion

This study presents a comprehensive hydrochemical assessment of groundwater quality in the Izeh aquifer based on physicochemical parameters from 21

production wells analyzed during dry and wet seasons. The groundwater is primarily neutral to alkaline, with pH values ranging between approximately 6.8 and 8.4. Electrical conductivity (EC) and total dissolved solids (TDS) showed notable variability, reflecting significant ion content fluctuations, but generally remained within Iranian drinking water standards except for one well. Major cations were dominated by calcium, while sodium exhibited the greatest concentration variability. Among anions, bicarbonate concentrations were highest, with nitrate levels displaying substantial seasonal and spatial variability; 23.81% of samples exceeded national and international nitrate limits.

Hydrochemical facies identified via Piper diagrams revealed calcium-bicarbonate and magnesium-bicarbonate water types as dominant, with minor occurrences of calcium-chloride and magnesium-chloride types. Spatial mapping using kriging interpolation highlighted elevated nitrate concentrations primarily in the eastern and southern parts of Izeh city, linked to agricultural runoff, livestock activities, and traditional wastewater disposal practices.

Temporal trends showed higher nitrate concentrations in the dry season, attributable to reduced dilution from rainfall. Ion ratio analyses (notably $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ and K^+/Cl^-) indicated that nitrate pollution originates chiefly from anthropogenic sources such as agricultural fertilizers, manure, and sewage. The correlation between nitrate and chloride further reinforced human impact on water quality.

Principal Component Analysis (PCA) extracted three major components explaining 91.47% and 85% of the variance in dry and wet seasons, respectively. These components distinguished between natural salinity factors and anthropogenic influences, confirming agricultural and sewage sources as primary contributors to nitrate contamination.

Land use analysis linked high nitrate zones to agricultural and residential areas, where ammonium-based fertilizers and insufficient sewage management exacerbate groundwater pollution. The dry season intensifies contamination due to higher water extraction

and lower groundwater dilution, highlighting the need for improved wastewater infrastructure and sustainable agricultural practices to protect aquifer quality.

Conclusions




The study investigates groundwater hydrochemistry in Izeh Plain to assess nitrate pollution and human impact on contamination. Samples from 21 wells in dry and wet seasons underwent chemical analysis, showing predominant bicarbonate-calcium and bicarbonate-magnesium water types, with some chloride variations. About 24% of samples exceeded nitrate limits set by the WHO (2011) and the Iranian National standards Organization (2024), with dry season nitrate ranging 13.40–103 mg/L (mean 37.31 mg/L) and wet season ranging 9–125.7 mg/L (mean 34.34 mg/L). Statistical analyses, including PCA and ionic ratios, identified anthropogenic sources as key contributors to nitrate contamination. Ratios such as $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$, K^+/Cl^- , and $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ indicated pollution primarily from agricultural fertilizer and manure use and untreated wastewater discharge through absorption wells. PCA highlighted three major factors affecting groundwater quality, with nitrate levels strongly linked to agricultural and wastewater influences. In the wet season, correlations among bicarbonate, fluoride, potassium, and other parameters further supported these sources. Land use mapping confirmed these human activities correlate with nitrate pollution patterns. To mitigate nitrate contamination, the study recommends adopting soil management practices such as crop rotation, organic fertilizers, and irrigation management, alongside wastewater treatment infrastructure improvements. These measures aim to optimize fertilizer use, enhance soil health, and prevent further groundwater quality degradation.

References

- Amarloei, A., Nazeri, M., Sayehmiri, K., Moradi, H., Khodarahmi, F., 2014. Investigation of nitrate and nitrite levels in groundwater of Ilam city. *Scientific-Research Journal of Ilam University of Medical Sciences* 22, 34-41. (in Persian)

- Iran National Standards Organization, 2024. Drinking water- Physical and chemical specifications. INSO 1053.
- Jia, H., Qian, H., 2025. Groundwater nitrate response to hydrogeological conditions and socioeconomic load in an agriculture dominated area. *Scientific Reports* 15, 1315-1327.
- Kalantari, N., Sheikhzadeh, A., Mohammadi, H., 2021. Investigation of groundwater quality in the Gotvand aquifer with emphasis on nitrate concentration. *Iran-Water Resources Research* 17(1), 228-238. (in Persian)
- Mehrabi Nejad, A., Kalantari, N., Alijani, F., Mousavi, S. F., Mohammadi, H., 2024. Nitrate pollution of the Izeh urban aquifer: Biohazards and local management. *Journal of Aquifer and Qanat* 5 (2), 203-220. (in Persian)
- Mirzaei, S. Y., Chaghazardy, Z., Chitsazian, M., Alijani, F., 2023. Investigation of groundwater quality in the Evan plain aquifer, Khuzestan province, with emphasis on nitrate concentration. *Journal of Engineering Geology* 17(1), 85-103. (in Persian)
- Moghimi, H., 2017. Assessment of hydro-geochemical factors affecting coastal aquifer of Ghaemshar using by factor analysis and clustering. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 3(1), 93-112. (in Persian)
- Naseri, H. R., Alijani, F., 2007. Investigation of pollutant sources in groundwater of the Izeh plain, northeast Khuzestan. *Environmental Sciences* 4(4), 33-46. (in Persian)
- Ostvari, Y., Bigi Harchagani, H., Davoodian, A. R., 2012. Investigation of spatial variations of nitrate in the groundwater of Lordegan plain. *Water and Irrigation Management* 2(1), 55-67. (in Persian)
- Rahimzadeh, F., 2024. Investigating the origin and concentration of nitrate and bromide in groundwater of the Izeh plain with emphasis on their environmental consequences. Master of sciences thesis in environmental geology, Shahid Chamran university of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (in Persian)
- Rahman, A., Mondal, A.C., Tiwari, K.K., 2021. Anthropogenic nitrate in groundwater and its health risks in the view of background concentration in a semiarid area of Rajasthan, India. *Scientific Reports*, 11, 9279.
- Tian, H., Liang, X., Gong, Y., Qi, L., Liu, Q., Kang, Z., Sun, Q., Jin, H., 2020. Health risk assessment of nitrate pollution in shallow groundwater: a case study in China. *Polish Journal of Environmental Studies* 29, 1, 827-839.
- WHO, 2011. Guidelines for drinking-water quality, 4th edn. World Health Organization, Geneva Switzerland. 398-403.
- Zendeabad, M., Cepuder, P., Loiskandl, W., Stumpp, Ch., 2019. Source identification of nitrate contamination in the urban aquifer of Mashhad, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 25, 100618 – 100631.

CRediT authorship contribution statement

 Seyyed Sajedin Mousavi	Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition
 Amir Saberi nasr	Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Data Curation, Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration
 Fatemeh Rahimzadeh	Software, Investigation, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft, Project administration



مقاله پژوهشی

دسترسی آزاد

مجله علوم زمین خوارزمی

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

تعیین منشأ و پهنه‌بندی آلودگی نیترات در آب زیرزمینی دشت ایزه با رویکرد هیدروشیمیایی-آماری

سید ساجدین موسوی^{۱*}، امیر صابری نصر، فاطمه رحیم زاده^۲

۱، ۲، ۳. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

نیترات یکی از مهم‌ترین آلوده‌کننده‌های آب زیرزمینی در سراسر جهان است که می‌تواند مشکلات زیست‌محیطی به همراه داشته باشد و سلامتی انسان‌ها را به خطر بیندازد. در این پژوهش، کیفیت آب زیرزمینی، غلظت و منشأ نیترات در آبخوان دشت ایزه و نیز تأثیر کاربری اراضی بر این آلودگی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از آب ۲۱ چاه بهره‌برداری در دو فصل تر و خشک سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۰ نمونه‌برداری شد و مورد آنالیز قرار گرفتند. نتایج این آنالیزها نشان دادند که تیپ آب زیرزمینی عمدتاً بی‌کربناته-کلسیک-مینریک است و حدود ۲۳/۸۱ درصد نمونه‌ها دارای غلظت فراتر از مقدار مجاز استاندارد آب شرب ایران و سازمان بهداشت جهانی است. مقدار نیترات در فصل خشک بین ۱۳/۴۰ تا ۱۰۳ (میانگین ۳۷/۳۱) میلی‌گرم در لیتر و در فصل تر بین ۹ تا ۱۲۵/۷ (میانگین ۳۴/۳۴) میلی‌گرم در لیتر در این آبخوان متغیر است. ترسیم نقشه پهنه‌بندی نیترات مؤید آن هستند که نواحی دارای بیشترین مقدار آلودگی در اطراف تالاب آب‌بندان در جنوب شرق و حاشیه جنوبی دشت ایزه و جنوب غربی این شهر قرار دارند. تلفیق داده‌های نسبت‌های یونی Cl^-/Na^+ و K^+/Cl^- ، NO_3^-/Cl^- و نیز تحلیل عاملی مبین آن است که منشأ نیترات در این آبخوان عمدتاً ناشی از استفاده بی‌رویه از کودهای نیترا، انباشت فضولات حیوانی و نبود شبکه فاضلاب و تصفیه خانه بهداشتی در این منطقه است. این موضوع با انطباق نقشه کاربری اراضی منطقه با نقشه پهنه‌بندی نیترات نیز تأیید شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳

واژه‌های کلیدی

نیترات، آلودگی، رویکرد آماری-هیدروشیمیایی، دشت ایزه.



مقدمه

آلودگی‌ها در آب‌های زیرزمینی محسوب می‌شود (Jia and Qian, 2025; Zendehbad et al., 2019; Naseri and Nakhaee, 2015). درک منشأ و میزان غلظت این آنیون می‌تواند به مدیریت و حفاظت بهینه از آب زیرزمینی کمک کند. نیترات ممکن است به‌طور طبیعی در اثر طوفان‌های تندری و نیتروژن جو وارد آب زیرزمینی شوند. همچنین، فعالیت‌های انسانی مانند افزایش استفاده از کودهای نیتراتی در کشاورزی، چاه‌های جذبی، فاضلاب، مدیریت نامناسب زباله‌ها و ... نیز می‌توانند منجر به افزایش غلظت نیترات در آب زیرزمینی شوند (Mirzaei et al., 2023; Chaudhary et al., 2025). به دلیل اثرات زیان‌آور غلظت‌های بالای نیترات روی انسان، معمولاً غلظت این آنیون در آئین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های ملی و بین‌المللی برای ارزیابی کیفیت

آب‌های زیرزمینی نقش حیاتی در تأمین آب شرب، کشاورزی، صنعت و حفظ تعادل اکوسیستم‌های گیاهی و جانوری دارند. رشد روزافزون جمعیت و صنعتی شدن جوامع منجر به آلودگی این منابع در برخی نقاط جهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک شده است. از سوی دیگر، افزایش تقاضای آب در این مناطق موجب شده است تا مدیریت و حفظ شرایط شیمیایی و اکولوژیکی مناسب آب‌های زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد تا از بروز و تشدید تنش‌های آبی جلوگیری به عمل آید (Zendehbad et al., 2019). نیترات به دلیل حلالیت بالا در آب و عدم تثبیت در لایه‌های خاک، یکی از گسترده‌ترین

DOI <https://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108361>*نویسنده مسئول: سید ساجدین موسوی S.mousavi@scu.ac.irاستناد به این مقاله: موسوی، س.، صابری نصر، ا.، رحیم زاده، ف. (۱۴۰۴). تعیین منشأ و پهنه‌بندی آلودگی نیترات در آب زیرزمینی دشت ایزه با رویکرد هیدروشیمیایی-آماری. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۱، شماره ۲، صفحه ۴۸۸ تا ۵۱۶. <https://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.108361>

زهکشی، نشت فاضلاب خانگی و استفاده از کودهای شیمیایی است. از سوی دیگر، میرزایی و همکاران (Mirzaei et al., 2023) با بررسی کیفیت آب زیرزمین دشت اوان در استان خوزستان، افزایش غلظت نیترات را مورد توجه ویژه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات غلظت نیترات در این آبخوان متأثر از اندازه ذرات خاک، عمق آب زیرزمینی و استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی است. همچنین، زنده باد و همکاران (Zendeabad et al., 2019) با تعیین نسبت‌های ایزوتوپی پایدار نیترات و هیدروشیمی ترکیبات اصلی، منشأ آلودگی نیترات و مسیرهای احتمالی انتقال آن در آبخوان شهر مشهد را مورد شناسایی قرار دادند. تیان و همکاران (Tian et al., 2020) آلودگی آب زیرزمینی منطقه لیان‌هوشان چین به نیترات را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این پژوهش با بکارگیری تحلیل مؤلفه اصلی نشان داد که آلودگی نیترات در این منطقه عمدتاً ناشی از استفاده بی‌رویه کودهای شیمیایی در اراضی کشاورزی است. رحمان و همکاران (Rahman et al., 2021) منشأ غلظت نیترات در آب زیرزمینی منطقه نیمه خشک راجستان هند و نیز اثرات احتمالی آن بر سلامتی مردم این منطقه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق مؤید آن بود که آلودگی ایجاد شده عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی بود. همچنین، زارع صفت و همکاران (Zaresefat et al., 2023) به ارزیابی آلودگی منابع آب زیرزمینی منطقه بجستان و یونسی در خراسان رضوی پرداختند و با استفاده از روش‌های درون‌یابی، الگوی زمانی و مکانی این آلودگی را تعیین کردند. مظفری زاده و سجادی (Mozafarizadeh and Sajadi, 2023) آلودگی شیمیایی آب زیرزمینی دشت برازجان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان‌دهنده آلودگی شدید آب زیرزمینی در بخش جنوبی این دشت بود که منشأ آن فعالیت‌های کشاورزی، چاه‌های جذبی و مرغداری‌ها بوده است. کلانتری و همکاران (Kalantari et al., 2024) نمودارهای هیدروشیمیایی، تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) و خوشه‌بندی سلسله مراتبی (HCA) جهت تعیین منشأ آلودگی نیترات در بخش جنوبی آبخوان بهبهان بکارگرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد که فاضلاب‌های شهری بیشترین نقش را در این

آب مورد توجه ویژه قرار گرفته است. ورود درازمدت آب با غلظت بالای نیترات به بدن انسان می‌تواند خطر سلامتی به همراه داشته باشد که در بچه‌ها مسبب بیماری مهمتوگلوبینمیا (سندرم بچه آبی) و در بزرگسالان سرطان معده است (Rahman et al., 2021). به همین دلیل سازمان بهداشت جهانی (WHO) حداکثر سطح آلودگی نیترات در آب آشامیدنی را 50 mg/L تعیین کرده است (WHO, 2011). مطالعات مختلفی در سراسر دنیا و ایران نشان‌دهنده افزایش غلظت نیترات در آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک در اثر فعالیت‌های انسانی است. استواری و همکاران (Ostvari et al., 2012) با نمونه‌برداری از چاه‌های کشاورزی دشت لردگان، تغییرات و الگوی مکانی نیترات در آب زیرزمینی این منطقه را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین، عمارلویی و همکاران (Amarloei et al., 2014) میزان نیتريت و نیترات در آب زیرزمینی شهر ایلام را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد اگرچه مقدار این آنیون‌ها در تعداد اندکی از چاه‌ها، بالاتر از استاندارد سازمان بهداشت جهانی است، اما کنترل مستمر کیفیت آب زیرزمینی با توجه به نوع کاربری اراضی در این منطقه ضروری است. مقیمی (Moghimi, 2017) با بکارگیری تحلیل عاملی و خوشه‌بندی، وضعیت هیدروشیمیایی آبخوان دشت قائم شهر را مورد بررسی قرار داد. نتایج این تحقیق نشان داد که منشأ افزایش نیترات در این دشت عمدتاً به دلیل استفاده بی‌رویه از کودهای ازته است. درخور و شبان (Darkhor and Shaban, 2018) آبخوان یاسوج را از نظر میکروبی و غلظت نیترات بررسی و مشخص کردند که حضور آبرفت درشت دانه، نشت از فاضلاب خانگی و کودهای شیمیایی عوامل مؤثر در افزایش غلظت نیترات در این آبخوان هستند. کلانتری و همکاران (Kalantari et al., 2021) با بررسی کیفیت آب زیرزمینی دشت گتوند، وضعیت غلظت نیترات را در این آبخوان مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که توزیع مکانی یون نیترات در این آبخوان متأثر از جهت جریان آب زیرزمینی است. تحلیل آماری انجام شده نشان داد که تغییرات غلظت یون نیترات در این آبخوان تابع عواملی مانند اندازه ذرات خاک، عمق آب زیرزمینی، شبکه آبیاری و

مختلف، آگاهی از الگوی مکانی و زمانی تغییرات غلظت نیترات و نیز شناسایی منشأ نیترات با بکارگیری نسبت‌های یونی و تحلیل عاملی (PCA) صورت گرفته است. در نهایت، نتایج بدست آمده از دو روش نسبت‌های یونی و تحلیل آماری با بکارگیری نقشه کاربری اراضی مورد صحت‌سنجی قرار گرفت.

منطقه مورد مطالعه

دشت ایذه با ارتفاع متوسط ۸۳۵ متر از سطح دریا در شمال شرق استان خوزستان و در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۴۹°۴۳' تا ۴۹°۵۷' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۱°۴۶' تا ۳۲°۰۰' شمالی واقع شده است (شکل ۱). در فاصله سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۹ متوسط دمای سردترین ماه سال (دی) و گرم‌ترین ماه سال (مرداد) به ترتیب ۴۳/۹ و ۳۳/۰۶ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. همچنین، بر اساس داده‌های ایستگاه هواشناسی ایذه در این دوره متوسط بارندگی سالانه ۴۷۴/۲ میلی‌متر بوده است. حداقل تبخیر در دی‌ماه و حداکثر آن در تیرماه به ترتیب ۱۱/۲۷ و ۴۴۷/۵۸ میلی‌متر بوده است (نقل از [Rahimzadeh, 2024](#)). بر اساس طبقه‌بندی دومارتن اقلیم منطقه نیمه خشک است.

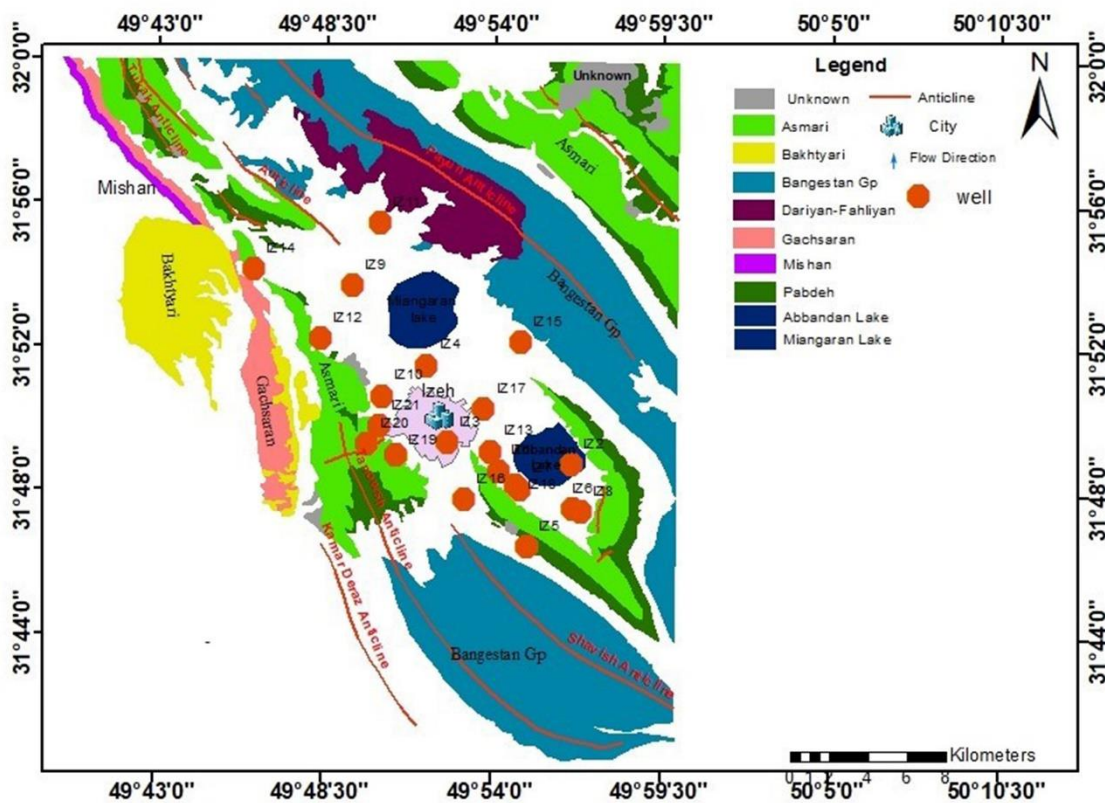
از نظر زمین‌ریخت‌شناسی دشت ایذه یک پولیه است که در پهنه زاگرس چین‌خورده و زیر پهنه ایذه قرار گرفته است. این پولیه که یک حوضه آبگیر بسته است به موازات روند زاگرس کشیده شده است، به طوری که از شمال و شرق توسط ارتفاعات متشکل از سازندهای ایلام-سروک و داریان-فهلپیان (تاق‌دیس پیون) و از غرب و جنوب توسط ارتفاعات متشکل از سازند آسماری (تاق‌دیس چال خشک و ناودیس نعل اسبی) احاطه شده است. دو دریاچه میانگرن و آب‌بندان در این دشت وجود دارند که آب آن‌ها توسط پونرها به آبخوان‌های کارستی مجاور دشت تخلیه می‌شوند. از نظر چینه‌شناسی نهشته‌های به سن کرتاسه تا عهد حاضر در محدوده مطالعاتی رخنمون دارند. آهک‌های ضخیم لایه سازند داریان-فهلپیان قدیمی‌ترین رخنمون‌های سنگی در این منطقه هستند که روی آن‌ها نهشته‌های سازندهای کژدمی، ایلام-سروک، گورپی، پابده، آسماری، گچساران و بختیاری و رسوبات کواترنر

آلودگی دارند. چادری و همکاران ([Chaudhary et al., 2025](#)) با جمع‌آوری و بررسی کارهای تحقیقاتی مرتبط با آلودگی نیترات از سراسر جهان، مروری بر منشأ، اثرات سلامتی و اقدامات اصلاحی جهت به حداقل رساندن پیامدهای منفی این آلودگی انجام دادند.

آب‌های زیرزمینی در دشت ایذه عمدتاً برای آبیاری مزارع و باغ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین، بخش قابل‌توجهی از آب شرب مناطق روستایی و برخی از مناطق شهری از این منابع تأمین می‌شود. در سال‌های اخیر، دشت ایذه با چالش‌های جدی در زمینه منابع آبی روبرو بوده است. گسترش روزافزون مناطق شهری و روستایی و توسعه کشاورزی و صنعتی در این منطقه منجر به افزایش تقاضا آب شده است. این امر منجر به کاهش شدید سطح آب‌های زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه و آلودگی منابع آبی از اوایل دهه ۷۰ شمسی شده است. در این شرایط نیترات به یکی از رایج‌ترین آلاینده‌های آب زیرزمینی در این منطقه تبدیل شده است. ناصری و علیجانی ([Nasari and Alijani, 2007](#)) با بررسی داده‌های هیدروشیمی چاه‌های حفر شده در دشت ایذه، تغییرات مکانی و زمانی آلاینده‌های موجود از جمله نیترات را مورد مطالعه قرار دادند که نتایج آن نشان داد که مقدار بالای نیترات در این آبخوان، ناشی از فعالیت‌های کشاورزی است. در این مطالعه تعیین منشأ نیترات بر اساس داده‌های هیدروشیمیایی و نقشه کاربری اراضی انجام شده است و استفاده از نسبت‌های یونی و تحلیل عاملی در شناسایی منشأ نیترات مورد توجه قرار نگرفته است. همچنین، محرابی نژاد و همکاران ([Mehrabi Nejad et al., 2024](#)) به محاسبه شاخص‌های کیفیت آب، خطر سلامتی و آلودگی نیترات به ارزیابی خطرات زیستی آلودگی نیترات در آبخوان شهری ایذه پرداختند. با این حال، با توجه به خشک‌سالی‌های چند ساله اخیر و نیز گسترش کشاورزی و توسعه شهر ایذه در طی سال‌های گذشته لازم است با پایش مداوم شرایط هیدروشیمی این آبخوان و نیز بکارگیری نسبت‌های یونی جدید و تحلیل‌های آماری، وضعیت آن از نظر آلودگی به نیترات مجدداً مورد بررسی قرار گیرد. به همین دلیل در این تحقیق مجدداً نمونه‌برداری از چاه‌های منطقه با هدف بررسی تغییرات پارامترهای هیدروشیمی

مرکز، شمال، شرق و شمال‌شرق و جنوب‌شرق دانه‌ریز (رس، رس - سیلنتی و رسی - ماسه‌ای) می‌شود و درصد ذرات دانه درشت آن‌ها کاهش می‌یابد. با این وجود، رسوبات ماسه‌ای و گراولی در برخی نواحی در اعماق نیز قابل مشاهده‌اند.

قرار گرفته‌اند. نهشته‌های عهد حاضر شامل واریزه‌ها و رسوبات آبرفتی هستند (شکل ۱). آبخوان دشت ایذه حدود ۱۷۰ کیلومتر مربع وسعت دارد. بر اساس نتایج لاگ چاه‌های اکتشافی و مطالعات ژئوفیزیکی، در حاشیه دشت اندازه رسوبات در بخش‌های جنوبی، جنوب غربی و غرب بخصوص در اعماق نسبتاً دانه درشت است. اما در اعماق کم به سمت



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی و محل ۲۱ چاه بهره‌برداری در دشت ایذه (نقشه زمین‌شناسی با اقتباس از نقشه کوه آسماری با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ شرکت ملی نفت تهیه شده است).

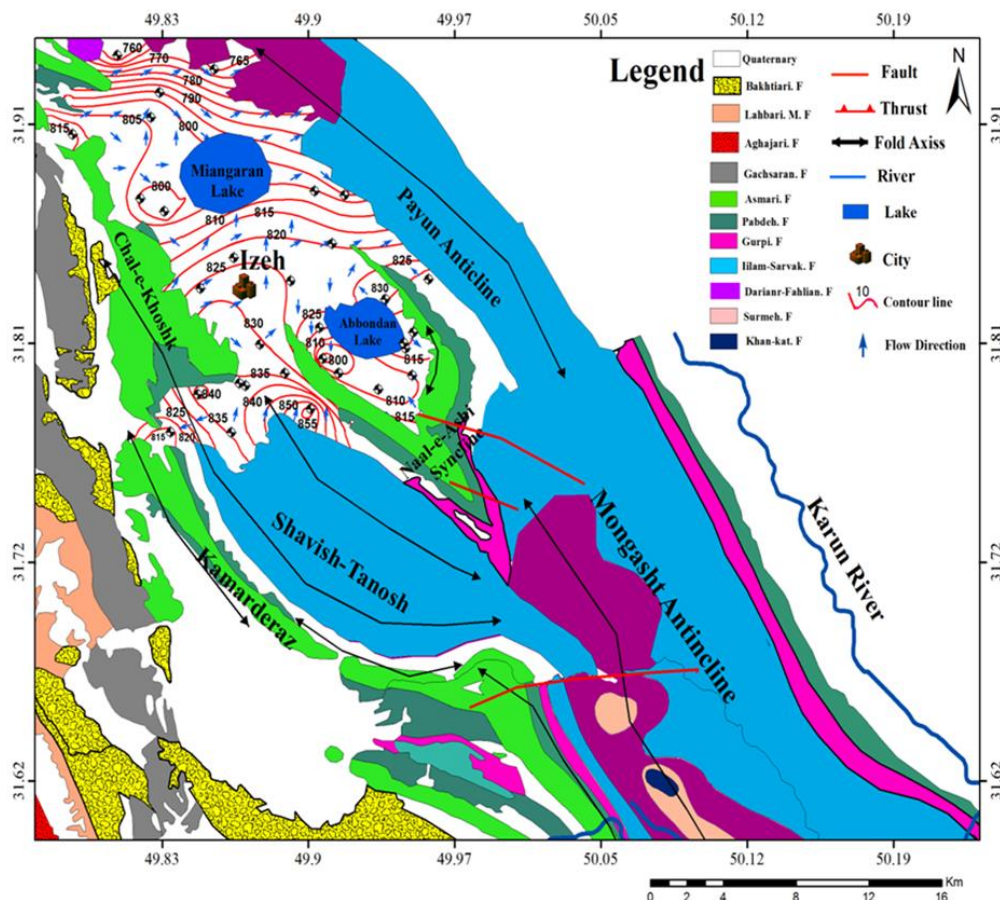
Fig. 1. The map of the geographical location, geology, and positions of 21 production wells in the Izeh Plain (the geological map is adapted from the Koh e Asmari map at a scale of 1:100,000, prepared by the National Iranian Oil Company).

این مقدار به ۷ متر در روز می‌رسد و در محدوده تالاب آب‌بندان به کمتر از ۰/۵ متر در روز کاهش می‌یابد. شیب هیدرولیکی در حاشیه‌های دشت در مجاورت با سازندهای آهکی، بیشتر از سایر نواحی است و به تدریج به سمت مرکز دشت و دریاچه‌ها کاهش می‌یابد. بنظر می‌رسد ریزدانه شدن رسوبات در نیمه جنوبی دشت و به تبع آن کاهش سرعت جریان می‌تواند منجر به تجمع آلودگی‌ها به‌ویژه نیترات در این محدوده

این آبخوان در بخش‌های حاشیه‌ای که از طرف آبخوان کارستی آهک آسماری تغذیه می‌شود، از آبدهی بیشتری نسبت به بخش‌های دیگر آن برخوردار است، اما به سمت دریاچه میانگران و مرکز دشت به دلیل روند افزایشی رسوبات سیلنتی - رسی آبدهی چاه‌ها کاهش می‌یابد. مقدار هدایت هیدرولیکی آبخوان آبرفتی دشت ایذه به دلیل تنوع در دانه‌بندی رسوبات به طور قابل توجهی متغیر است. در حاشیه دشت،

تخلیه‌ای شرقی تغییر می‌کند (Sajadi, 2022). جهت جریان آب زیرزمینی در دشت ایذه از حواشی جنوبی، جنوب غربی و غربی به سمت تالاب‌ها و آهک‌های کارستی ایلام - سروک در شرق دشت است (شکل ۲).

شود. برعکس در بخش‌هایی که رسوبات درشت دانه هستند و هدایت هیدرولیکی و سرعت جریان زیاد است، پتانسیل رقیق‌سازی و انتقال بالاتر خواهد بود. تراز آب زیرزمینی نیز از حدود ۸۵۵ متر در مناطق تغذیه‌ای حواشی جنوبی و غربی دشت تا کمتر از ۷۶۰ متر در منطقه



شکل ۲- نقشه جهت جریان آب زیرزمینی در دشت ایذه (Sajadi, 2022).

Fig. 1. The map of the groundwater flow direction in the Izeh Plain (Sajadi, 2022).

آب مورد نظر شستشو داده شد. برخی از خصوصیات فیزیکوشیمیایی آب مانند pH، EC و دما در محل نمونه‌برداری و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری شد.

آنالیز شیمیایی آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی نظیر سولفات، کلر، پتاسیم، سدیم، منیزیم، کلسیم، بی‌کربنات، نیترات و برمید در آزمایشگاه سازمان آب و برق خوزستان انجام گردید. برای تعیین غلظت کاتیون‌های اصلی ابتدا نمونه‌های آب فیلتر شده و با اسید نیتریک

مواد و روش‌ها

به منظور ارزیابی هیدروشیمی آبخوان دشت ایذه و بررسی تغییرات مکانی و زمانی آلودگی نیترات از تعداد ۲۱ چاه بهره‌برداری با توزیع مناسب در سطح این دشت در سال آبی ۱۴۰۰-۱۴۰۱ در دو فصل خشک و تر نمونه‌برداری شده است (شکل ۱). قبل از نمونه‌برداری، ظروف پلی‌اتیلن با استفاده از روش اسیدشویی استریل و سه بار نیز با

pH آن‌ها به زیر ۲ آورده شد سپس یون‌های کلسیم، منیزیم، کلرید، کربنات و بی‌کربنات به روش تیتراسیون، سدیم و پتاسیم به روش شعله سنجی تعیین غلظت شدند. آنیون‌های اصلی آب از جمله سولفات و نیترات و برمید به روش اسپکتروفتومتری (UV-Vis مدل Dr2800) مورد سنجش قرار گرفته است (جداول ۱ و ۲). تمام نمونه‌ها از زمان نمونه‌برداری تا آزمایش، با استفاده از یخ ژله‌ای در دمای زیر ۴ °C نگهداری شدند. پس از تعیین تیپ و رخساره آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه با استفاده از نمودارهای پایپر، نقشه پهنه‌بندی آلودگی به نیترات در هر دو فصل برای این آبخوان جهت آگاهی از توزیع مکانی و زمانی آن ترسیم شده است.

جدول ۱- نتایج تحلیل آماری توصیفی نمونه‌های آب زیرزمینی دشت ایزه در فصل خشک (Rahimzadeh, 2024).

Table 1. The results of the descriptive statistical analysis of groundwater samples from the Izeh Plain during the dry season (Rahimzadeh, 2024).

Parameters	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS	Br ⁻	NO ₃ ²⁻	mg/L			
						Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Mean	7.82	899.19	566.84	0.28	37.31	35.72	1.75	53.82	77.49
Standard error	0.07	199.34	126.91	0.12	6.57	18.32	0.38	14.02	7.87
Median	7.89	652	399.9	0.07	23.1	15.17	1.17	36.82	67.53
Mode	7.96	2922	4580	0.06	18.9	397.70	1.173	19.08	165.70
Standard deviation	0.31	913.50	581.56	0.54	30.09	83.96	1.75	64.24	36.06
Variance	0.10	834479.9	338215.5	0.29	905.54	7050.09	3.07	4126.41	1300.65
Kurtosis	-0.33	14.37	14.73	12.57	0.99	19.83	12.45	11.69	1.39
Skewness	-0.62	3.55	3.61	3.45	1.52	4.40	3.25	3.16	1.40
Range	1.13	4352	2771.2	2.31	89.6	396.32	8.21	293.88	126.62
Minimum	7.09	228	150.8	0.06	13.4	1.38	0.39	8.02	39.08
Maximum	8.22	4580	2922	2.37	103	397.7	8.6	301.9	165.7

ادامه جدول ۱-

Continued Table 1.

Parameters	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CL ⁻	NH ₄	F ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	Li ⁺
Mean	340.65	69.10	69.51	2.77	0.47	0.15	0.06	0.06
Standard error	27.38	35.61	41.17	0.56	0.07	0.05	7.76E-18	7.76E-18
Median	358.8	18.73	13.83	1.08	0.42	0.06	0.06	0.06
Mode	55.90	191.20	874.30	1.082	0.22	0.05984	0.06	0.06
Standard deviation	125.45	163.21	188.66	2.55	0.33	0.22	3.56E-17	3.56E-17
Variance	15737.84	26636.14	35590.74	6.51	0.11	0.05	1.26E-33	1.26E-33
Kurtosis	-0.91	17.90	18.88	-0.43	1.82	10.27	-2.22	-2.22
Skewness	0.01	4.14	4.27	1.12	1.38	3.13	-1.08	-1.08
Range	422.9	756.54	873.95	7.04	1.29	0.93	0.00	0.00
Minimum	133	0.96	0.35	1.08	0.11	0.06	0.06	0.06
Maximum	555.9	757.5	874.3	8.12	1.4	0.99	0.06	0.06

جدول ۲- نتایج تحلیل آماری توصیفی نمونه‌های آب زیرزمینی دشت ایذه در فصل تر (Rahimzadeh, 2024).

Table 2. The results of the descriptive statistical analysis of groundwater samples from the Izeh Plain during the wet season (Rahimzadeh, 2024).

Parameters	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS	Br ⁻	NO ₃ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Mean	7.61	932.43	593.70	0.19	34.34	38.274	3.69	55.08	77.73
Standard error	0.08	218.08	139.53	0.10	6.71	17.948	1.35	14.53	9.41
Median	7.6	682	414.77	0.06	22.2	17.47	1.56	30.5	69.94
Mode	7.5	4990	3187.93	0.06	15.3	41.84	0.78	315.20	226.00
Standard deviation	0.36	999.39	639.42	0.45	30.76	82.25	6.20	66.58	43.14
Variance	0.13	998782	408857	0.20	946.48	6764.93	38.40	4432.45	1861.06
Kurtosis	0.80	14.91	14.86	20.41	2.98	19.38	6.61	12.36	6.37
Skewness	-0.09	3.63	3.62	4.49	1.79	4.33	2.74	3.26	2.17
Range	1.6	4741	3023	2.06	125.6	389.72	21.51	306.82	188.53
Minimum	6.8	249	165	0.06	0.1	1.379	0.39	8.39	37.47
Maximum	8.4	4990	3188	2.12	125.7	391.1	21.9	315.2	226

ادامه جدول ۲-

Continued Table 2.

Parameters	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CL ⁻	NH ₄	F ⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	Li ⁺
Mean	311.42	94.99	77.74	2.21	7.15	25.68	0.06	0.06
Standard error	33.06	41.66	45.29	0.86	0.79	18.79	7.8	0.001
Median	259.3	26.9	19.14	1.08	6.46	5.52	0.06	0.06
Mode	572	17.29	970.70	1.08	6.27	5.06	0.06	0.06
Standard deviation	151.50	190.93	207.54	3.93	3.60	86.11	3.555E-17	0.006
Variance	22953.073	36455.23	43072.2	15.46	12.97	7415.26	1.264E-33	3.905E-05
Kurtosis	-1.18	15.95	19.65	15.30	0.65	20.92	-2.22	5.20
Skewness	0.36	3.85	4.38	3.85	0.81	4.57	-1.08	2.52
Range	471.6	877.54	968.22	17.14	13.49	398.44	0.00	0.02
Minimum	100.1	3.362	2.48	1.08	1.71	2.76	0.06	0.06
Maximum	571.7	880.9	970.7	18.22	15.2	401.2	0.06	0.08

صورتی که آزمون بارتلت معنادار باشد ($P\text{-value} < 0/05$)، انجام تحلیل عاملی بر روی داده‌ها توجیه‌پذیر است. استفاده همزمان از این دو شاخص، پایه مناسبی برای تصمیم‌گیری در مورد انجام تحلیل عاملی برای داده‌های هیدروشیمیایی آبخوان می‌باشد. نتایج این دو شاخص مؤید آن است که داده‌های حاضر برای تحلیل‌های آماری مانند تحلیل عاملی جهت تعیین منشأ آلودگی نیترات و میزان نقش هر عامل مناسب هستند. علاوه بر این، در این تحقیق نسبت‌های یونی نیز برای تعیین منشأ این آلودگی بکار گرفته شدند. در نهایت، با انطباق نقشه کاربری

برای بررسی نرمال بودن داده‌ها و کفایت نمونه‌ها در تحلیل‌های آماری به‌ویژه در تحلیل عاملی اکتشافی از شاخص کایزر-مایر-الکین (Kaiser-Mayer-Olkin) استفاده شده است. مقدار عددی این شاخص بین صفر و یک متغیر است. مقادیر بزرگ‌تر از $0/5$ مؤید کفایت مطلوب داده‌ها و مقادیر کمتر از $0/5$ نشان‌دهنده نامناسب بودن داده‌ها برای تحلیل عاملی است. نتایج این بررسی‌های آماری نشان داد که شاخص KMO داده‌ها برای فصل خشک $0/51$ و برای فصل تر $0/58$ است آزمون بارتلت (Bartlett test) نیز به منظور بررسی معناداری همبستگی بین متغیرهای مختلف هیدروشیمیایی بکار گرفته شدند. در

اراضی با نقشه پراکندگی آلودگی نیترات، نقش کاربری‌های مختلف در آلودگی آبخوان مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

ارزیابی هیدروشیمیایی آبخوان

نتایج تحلیل آماری توصیفی پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های آب حاصل از ۲۱ چاه بهره‌برداری در آبخوان ایذه برای فصل تر و خشک در جدول (۱) آورده شده است. مقدار pH نمونه‌ها در فصل خشک بین ۷/۴۱ تا ۸/۲۲ با میانگین ۷/۸۲ و در فصل تر بین ۶/۸۰ تا ۸/۴۰ و میانگین ۷/۶۱ است، که نشان‌دهنده ماهیت نسبتاً خنثی تا قلیایی آب زیرزمینی است. مقادیر هدایت الکتریکی (EC) آب زیرزمینی در فصل خشک بین ۲۲۸ تا ۴۵۸۰ $\mu\text{S}/\text{cm}$ و میانگین و انحراف معیار آن به ترتیب برابر با ۸۹۹/۱۹ و ۹۱۳/۵۰ در فصل تر بین ۲۴۹ تا ۷۹۹۰ $\mu\text{S}/\text{cm}$ با میانگین و انحراف معیار به ترتیب ۹۳۲/۴۳ و ۹۹۹/۳۹ متغیر است. مقدار کل مواد جامد محلول (TDS) به عنوان یکی از شاخص‌های مهم بیان‌کننده غلظت مواد شیمیایی محلول، در فصل خشک در بازه ۱۵۱ تا ۲۹۲۲ با میانگین و انحراف معیار به ترتیب ۵۶۶/۸۴ و ۵۶/۵۸۱ و در فصل تر بین ۱۶۵ تا ۳۱۸۷/۹۳ و میانگین و انحراف معیار به ترتیب ۵۹۳/۷۰ و ۶۳۹/۴۲ میلی‌گرم در لیتر تغییر می‌کند. افزایش TDS و EC در فصل تر می‌تواند ناشی از تجمع آلودگی و املاح در سطح و نیمرخ خاک در اثر تبخیر پس از خشک‌سالی‌های اخیر باشد که منجر به شستشوی آن‌ها به درون آبخوان در اوایل فصل مرطوب و افزایش این دو پارامتر در چاه‌های محدوده شهر ایذه و نقاط تخلیه آبخوان می‌شود. در برخی چاه‌ها در فصل تر به دلیل قرارگیری آن‌ها بر اساس استاندارد ۱۰۵۳ کیفیت آب آشامیدنی ایران (Iran National Standards Organization, 2024) از نظر مقدار TDS به استثنای نمونه IZ15 (کولفرج) تمام نمونه‌ها در محدوده حداکثر مجاز قرار می‌گیرند.

از میان کاتیون‌های اصلی آب در نمونه‌های بررسی شده در فصل‌های خشک و تر، کلسیم با میانگین ۷۷/۴۹ و ۷۷/۷۳ و انحراف معیار ۳۶/۰۶ و ۴۳/۱۴ میلی‌گرم بر لیتر کاتیون غالب بوده و پتاسیم در فصل خشک و تر به ترتیب با میانگین ۸/۲۱ و ۳/۶۹ و انحراف معیار ۱/۷۵ و ۶/۲۰ میلی‌گرم بر لیتر کمترین مقدار در بین کاتیون‌ها را دارا می‌باشد. علاوه بر این، بیشترین دامنه تغییرات مربوط به سدیم برای هر دو فصل خشک و تر به ترتیب مقدار ۳۹۶/۳۲ و ۳۸۹/۷۲ میلی‌گرم بر لیتر دارد. در فصل خشک و تر از بین آنیون‌های اصلی، بی‌کربنات با میانگین ۳۴۰/۶۵ و ۳۱۱/۴۲ میلی‌گرم بر لیتر بیشترین میانگین و برای فصل خشک سولفات با میانگین ۶۹/۱۰ میلی‌گرم بر لیتر و در فصل تر کلر با مقدار ۷۷/۷۴ میلی‌گرم بر لیتر کمترین میانگین را دارا هستند. مقادیر غلظت نیترات در فصل خشک بین ۱۳/۴۰ تا ۱۰۳ و میانگین آن برابر با ۳۷/۳۱ و در فصل تر بین ۹ تا ۱۲۵/۷ با میانگین ۳۴/۳۴ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. بیشترین غلظت نیترات در فصل خشک متعلق به چاه‌های شماره ۲ و ۳ ایذه (در اطراف شهر ایذه)، روستای کلدوزخ (IZ13)، روستای کهنشور (IZ16) و روستای گنجشگیر (IZ17) و در فصل تر چاه‌های شماره ۲ و ۳ ایذه، روستای کله ضرب (IZ14)، روستای کهنشور (IZ16) و روستای گنجشگیر (IZ17) بوده است. همچنین، شاخص خطر سلامت (Hazard Quotient) نیترات و نیتريت که بصورت نسبت مجموع غلظت نیترات و نیتريت در نمونه‌های آب این چاه‌ها به غلظت مجاز محاسبه شده، بیشتر از یک بوده است. این وضعیت نشان‌دهنده آن است که ۲۳/۸۱ درصد از نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی از نظر غلظت نیترات، بالاتر از حدود مجاز دستورالعمل استاندارد ملی ایران و سازمان بهداشت جهانی (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) و آژانس محیط زیست آمریکا (۱۰ میلی‌گرم در لیتر) قرار دارند.

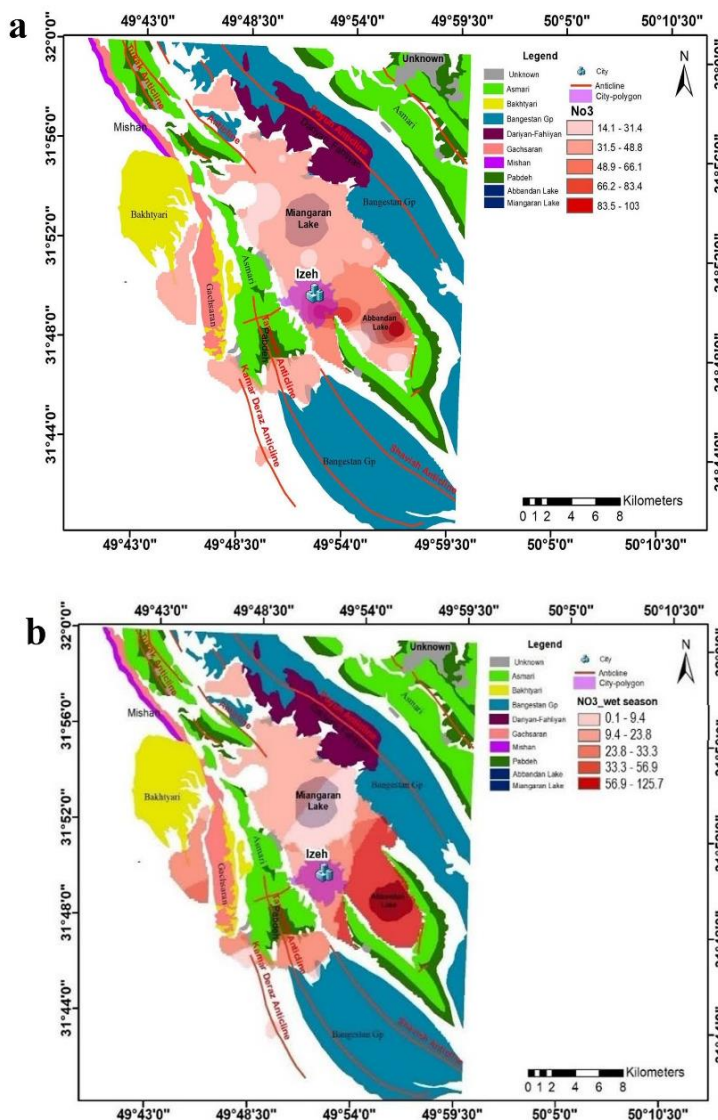
بر اساس نتایج حاصل از نمودار پایپر برای دو فصل خشک و تر، تیپ آب عمدتاً بیکربناته-کلسیک و بیکربنات منیزیک و تعداد محدودی از چاه‌ها در رده کلروره-کلسیک و کلروره-منیزیک قرار می‌گیرند.

توزیع مکانی و زمانی نیترات

شناخت توزیع مکانی هر یک از پارامترهای هیدروشیمیایی به منظور آگاهی از وضعیت کمی آن‌ها در سطح آبخوان ضروری است. این موضوع را می‌توان با استفاده از نقشه‌های درون‌یابی شده مورد ارزیابی قرار داد. از آنجا که ماهیت فضایی داده‌های آلودگی نیترات در سطح آبخوان تحت تأثیر عواملی نظیر منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای آلودگی، ناهمگنی هیدروژئولوژیکی آبخوان و جریان آب زیرزمینی است، روش درون‌یابی کریجینگ به دلیل قابلیت تخمین خطای معیار، مدل‌سازی ناهمسانگردی و ساختار فضای و انعطاف‌پذیری در استفاده از داده‌های دارا توزیع نرمال و غیر نرمال در این پژوهش بکار گرفته شده است. به همین دلیل، نقشه پهنه‌بندی غلظت نیترات به روش درون‌یابی کریجینگ در نرم افزار Arc GIS 10.4 برای دو فصل خشک و تر ترسیم گردید (شکل ۳). بر اساس نقشه‌های شکل ۳، محدوده‌های

دارای مقدار بالای نیترات عمدتاً در نواحی شرقی و جنوبی شهر ایزه و ناودیس نعل اسبی پراکنده بودند. این آلودگی می‌تواند ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و دامداری مستقر در این مناطق باشد. همچنین، دفع سنتی فاضلاب به روش چاه‌های جذبی نقش مهمی در افزایش غلظت نیترات در اطراف شهر و مناطق روستایی ایفا می‌نمایند.

نمودارهای جعبه‌ای در شکل ۴، تغییرات زمانی (در قالب سری زمانی) غلظت نیترات در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه را طی دو فصل خشک و تر سال آبی ۱۴۰۱ نشان می‌دهند. بر اساس این نمودار، تغییر زمانی مشخصی در افزایش غلظت نیترات در سطح منطقه مورد مطالعه قابل مشاهده است. میانگین غلظت نیترات در چاه‌های منطقه در شرایط خشک به طور قابل توجهی بالاتر از شرایط مرطوب است. این موضوع ناشی از تأثیر مستقیم بارندگی و رواناب‌های ناشی از آن بر کاهش غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی در فصل مرطوب است (Samghany et al., 2024).



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی آلودگی به نیترات آب زیرزمینی در دشت ایذه. (a) فصل خشک و (b) فصل تر (Rahimzadeh, 2024).

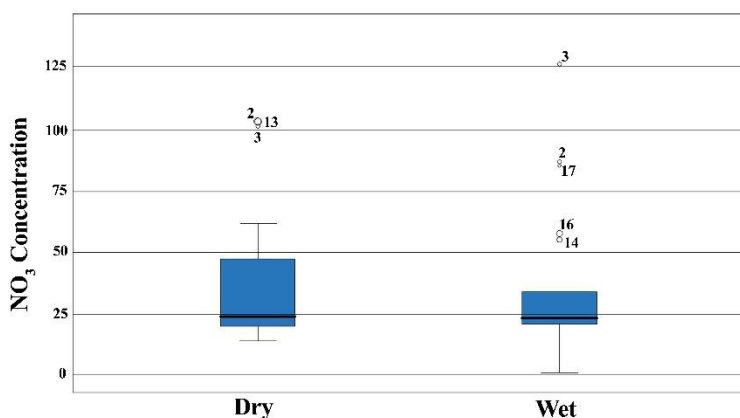
Fig. 3. The zoning map of nitrate contamination in the groundwater of the Izeh Plain. a) Dry season and, b) Wet season (Rahimzadeh, 2024).

هوازگی کانی‌ها و تأثیر آلودگی‌های برون‌زا را تعیین کرد (Yang et al., 2025). برای تعیین منشأ یون نیترات در آب زیرزمینی از نسبت‌های یونی مختلفی استفاده می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها NO_3^-/Cl^- و K^+/Cl^- می‌باشند (Guo et al., 2020; Yang et al., 2025).

منشایابی نیترات با نسبت‌های یونی

نسبت‌های یونی هیدروشیمیایی به دلیل سادگی، هزینه کم و کارایی بالا به عنوان اولین گام در مطالعات منشایابی نیترات در آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با تعیین و تحلیل نسبت‌های یونی گوناگون، می‌توان منشأ ترکیبات هیدروشیمیایی، فرآیندهای

این راستا، مقادیر این نسبت‌ها برای آب زیرزمینی آبخوان دشت ایذه محاسبه شده‌اند (جدول ۳).



شکل ۴- نمودار جعبه‌ای نیترات آب زیرزمینی دشت ایذه برای فصل خشک و تر.

Fig. 4. The box plot of groundwater nitrate concentrations in the Izeh Plain for the dry and wet seasons.

در آب‌های زیرزمینی می‌شوند. مقادیر بالاتر نسبت $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ نشان‌دهنده سهم قابل توجه نیترات با منشأ کشاورزی است. علاوه بر این، فاضلاب و پساب‌ها معمولاً با نسبت بالاتر Cl^-/Na^+ مشخص می‌شوند (Yang et al., 2025; Liu et al., 2021; Wang et al., 2023). همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، از آنجائیکه نمونه‌های آب‌های زیرزمینی دشت ایذه عمدتاً در فصل تر و خشک به محدوده فعالیت‌های کشاورزی نزدیک هستند، منشأ نیترات می‌تواند در این آبخوان کودهای غیرآلی مورد استفاده در اراضی کشاورزی باشد. همچنین، مقادیر بالای Cl^- و نسبت پایین $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ معمولاً نشان‌دهنده ورودی پساب و فاضلاب است، در حالی که ورودی‌های کشاورزی با نسبت بالای $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ و مقادیر پایین Cl^- مشخص می‌شوند (Yu et al., 2020). مطابق شکل ۶، نمونه‌های آب زیرزمینی دشت ایذه در هر دو فصل خشک و تر متمایل به سمت محدوده ورودی‌های کشاورزی و فاضلاب و پساب هستند. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی دشت ایذه ناشی از این دو منشأ است.

بر اساس جدول ۳، نسبت‌های یونی نمونه‌های آب برخی از چاه‌ها $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ و K^+/Cl^- کمتر از یک است و افزایش غلظت کلرید، می‌تواند دلیلی به غیر از فعالیت‌های انسانی داشته باشد. این افزایش ممکن است با انحلال هالیت و سیلوپیت در سازند تبخیری گچساران و یا فاضلاب انسانی در ارتباط باشد. اما در بعضی از نقاط مانند چاه‌های IZ6، IZ5، IZ8، IZ12، IZ14، IZ16، IZ19، IZ20 و IZ21 در فصل تر و نیز چاه‌های IZ6 تا IZ12، IZ14، IZ16 و IZ19 تا IZ21 در فصل خشک مقدار نسبت یونی $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ بیشتر از یک است. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی مانند استفاده از کودهای کشاورزی، فضولات حیوانی و فاضلاب در کاهش کیفیت آب زیرزمینی این منطقه است. بنظر می‌رسد فرآیند اصلی افزایش نیترات در آب‌های زیرزمینی ایذه ناشی از اکسیداسیون آمونیوم موجود در کودهای غیرآلی است که به سرعت از سطح به درون آبخوان شسته می‌شوند.

به طور کلی، فعالیت‌های انسانی مانند رهاسازی فاضلاب و پساب‌ها و فعالیت‌های کشاورزی منجر به غنی‌شدگی یون‌های NO_3^- و Cl^-

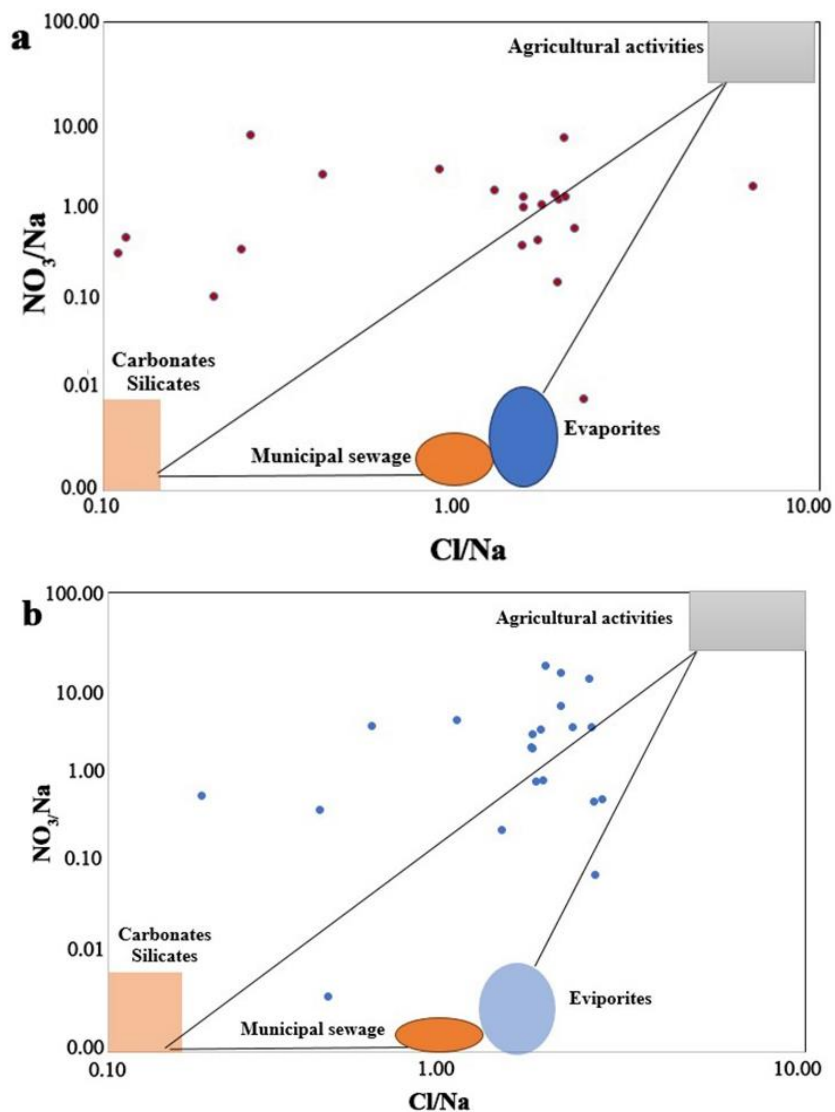
جدول ۳- نسبت‌های یونی $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ و K^+/Cl^- محاسبه شده برای نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت ایذه در هر دو مرحله نمونه‌برداری (Rahimzadeh, 2024).

Table 3. The $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ and K^+/Cl^- ion ratios calculated for the groundwater samples of the Izeh Plain aquifer in both sampling stages (Rahimzadeh, 2024).

Well No.	Dry season		Wet season	
	K^+/Cl^-	$\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$	K^+/Cl^-	$\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$
IZ1	0.13	0.30	0.08	0.48
IZ2	0.29	0.72	0.02	0.94
IZ3	0.03	0.91	0.04	0.94
IZ4	0.10	0.11	0.02	0.19
IZ5	0.06	1.06	0.05	0.96
IZ6	0.20	3.53	0.33	7.20
IZ7	0.01	0.12	0.12	1.02
IZ8	0.12	1.93	0.13	1.27
IZ9	0.13	0.01	0.6	5.55
IZ10	0.03	0.82	0.07	1.06
IZ11	0.08	0.61	0.17	2.73
IZ12	0.09	1.00	0.12	1.26
IZ13	0.01	0.13	0.02	0.35
IZ14	0.04	1.70	0.05	1.70
IZ15	0.00	0.02	0.00	0.02
IZ16	0.11	2.37	0.11	3.64
IZ17	0.29	0.70	0.11	0.48
IZ18	0.13	0.29	0.08	0.48
IZ19	0.29	5.11	1	24.35
IZ20	0.11	3.87	0.25	6.98
IZ21	0.21	2.74	0.3	3.06

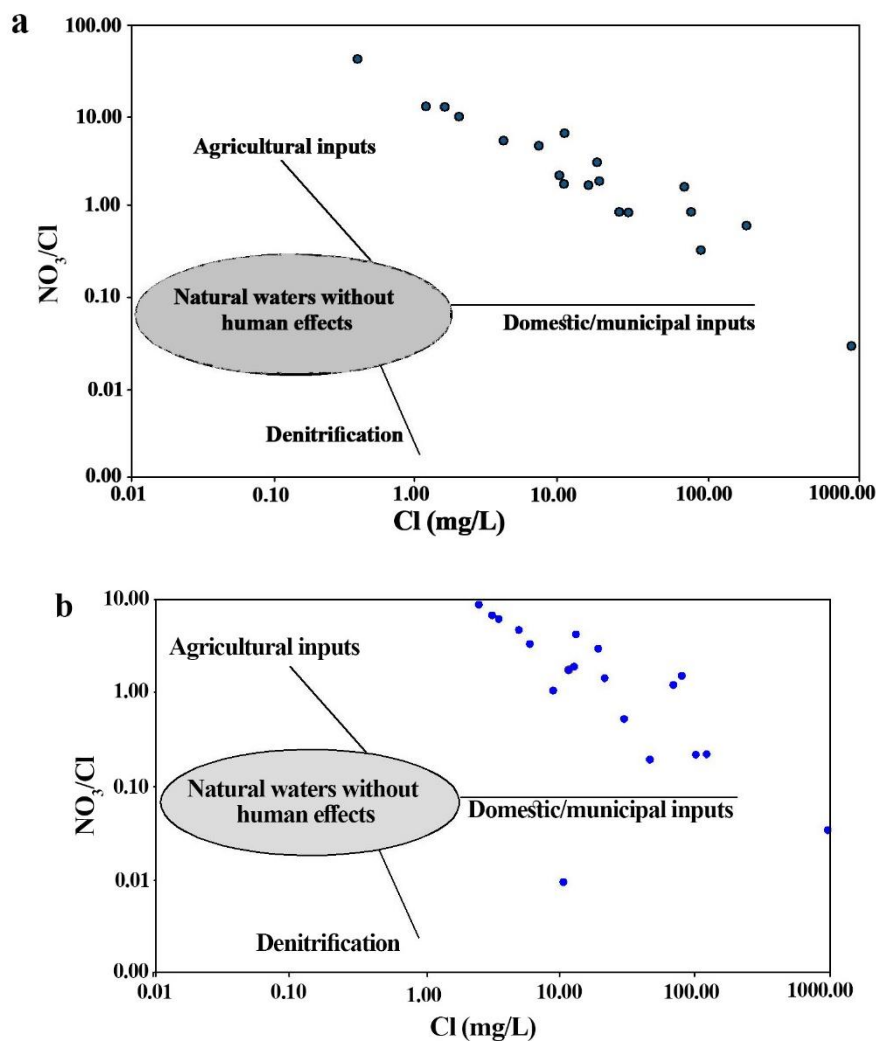
از سوی دیگر، همبستگی قوی بین غلظت نیترات و کلرید در آب زیرزمینی و نیز افزایش آن‌ها نسبت به بیکربنات نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی در کیفیت منابع آب زیرزمینی است (Liu et al., 2003; Zhang et al., 2023). به همین منظور نمودار پراکنش و همبستگی بین نسبت مجموع نیترات و کلرید به بی‌کربنات با TDS برای نمونه‌های آب زیرزمینی دشت ایذه برای هر دو فاز نمونه‌برداری ترسیم گردید و مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۷).

از سوی دیگر، همبستگی قوی بین غلظت نیترات و کلرید در آب زیرزمینی و نیز افزایش آن‌ها نسبت به بیکربنات نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی در کیفیت منابع آب زیرزمینی است (Liu et al., 2003; Zhang et al., 2023).



شکل ۵- نسبت‌های یونی $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ و Cl^-/Na^+ که نشان‌دهنده منشأ نیترات در نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت ایذه در هر دو مرحله نمونه‌برداری هستند. (a) فصل خشک و (b) فصل تر.

Fig. 5. The $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ and Cl^-/Na^+ ionic ratios indicating the source of nitrate in groundwater samples from the Izeh Plain aquifer during both sampling stages: a) Dry season and b) Wet season.

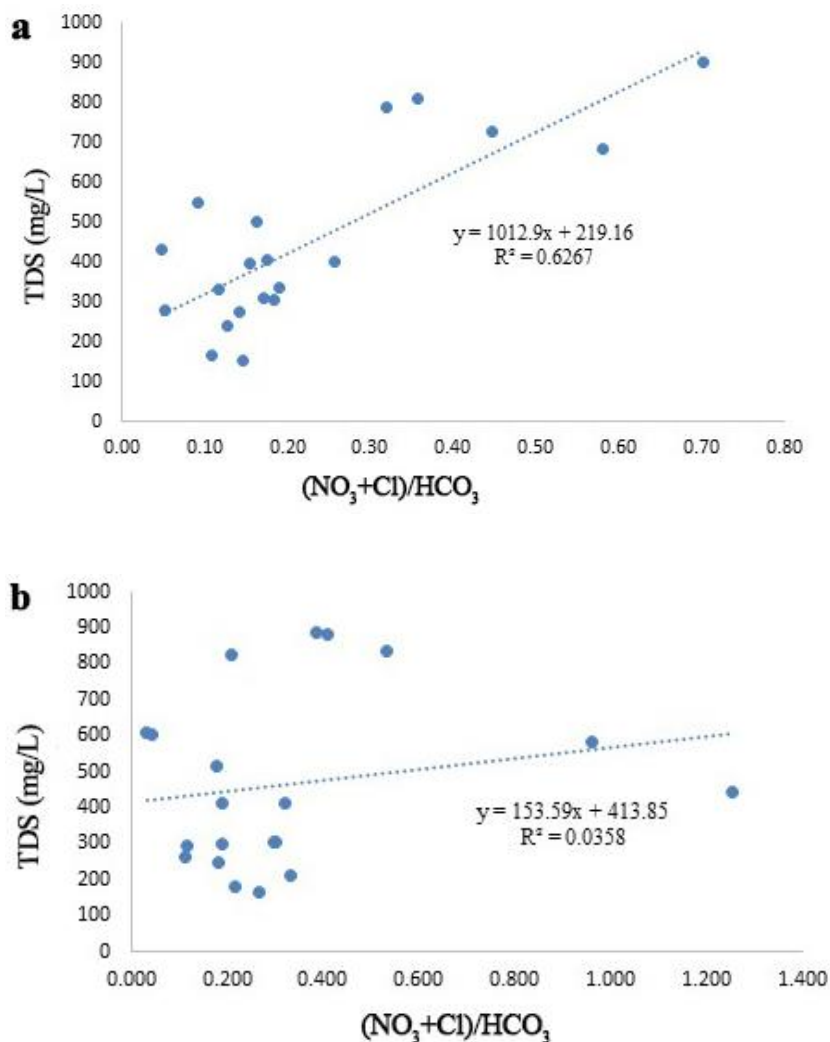


شکل ۶- نمودار رابطه بین نسبت یونی $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ با Cl^- که نشان‌دهنده منشأ نیترات در نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت ایذه در هر دو مرحله نمونه‌برداری هستند. (a) فصل خشک و (b) فصل تر.

Fig. 6. The diagram illustrates the relationship between the $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ and Cl^- ionic ratios, indicating the source of nitrate in groundwater samples from the Izeh Plain aquifer during both sampling phases: a) Dry season and b) Wet season.

سطح دشت و نفوذ آلاینده‌ها به آبخوان نسبت داد. همبستگی بسیار ضعیف بین این پارامترها در فصل تر مبین آن است آلودگی آبخوان در این فصل کمتر تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی است.

با توجه به نمودارهای شکل‌های ۷ دو پارامتر یاد شده در فصل خشک دارای ضریب همبستگی پیرسون (r) حدود ۰/۷۹ و در فصل تر حدود ۰/۱۹ را نشان می‌دهند. بیشتر بودن نسبت مجموع نیترات و کلر به بیکربنات به‌ویژه در فصل خشک را می‌توان به فعالیت‌های انسانی در



شکل ۷- نمودار نسبت $(NO_3 + Cl)/HCO_3$ در مقابل TDS نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان دشت ایذه در هر دو مرحله نمونه‌برداری. الف) فصل خشک و ب) فصل تر (Rahimzadeh, 2024).

Fig. 7. The diagram of $NO_3^- + Cl^-/HCO_3^-$ ratio vs. TDS of groundwater samples from the Izeh Plain aquifer during both sampling stages. a) Dry season and b) Wet season (Rahimzadeh, 2024).

می‌تواند مؤلفه یا منشأ کشاورزی (شامل NO_3^- , K^+ , Ca^{2+}) را از مؤلفه فاضلاب/شور (شامل Na^+ , Mg^{2+} , Cl^-) جدا کند (Wu et al., 2022).

در این تحقیق، با نرمال‌سازی پارامترهای هیدروشیمیایی با استفاده از روش کایزر-مایر-الکین و چرخش متعامد واریانس سه مؤلفه اصلی (PCA) استخراج شد. در این تحلیل، تمامی مؤلفه‌هایی که واریانس بزرگ‌تر از متغیرهای استاندارد شده اصلی

منشایابی نیترات با تحلیل آماری

تعیین منشأ نیترات با استفاده از نسبت‌های یونی به تنهایی نمی‌تواند از دقت مناسب برخوردار باشد. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به‌طور گسترده برای توصیف رابطه میان پارامترهای کیفیت آب و شناسایی منابع احتمالی آن‌ها به کار گرفته می‌شود. برای مثال، PCA

جدول ۴- b ماتریس مؤلفه‌های چرخش یافته را برای فصل خشک نشان می‌دهد. در این ماتریس هر ستون معرف یک عامل است. مقادیر هر ستون نشان‌دهنده بارهای عاملی هر متغیر با یک عامل هستند. عامل اول که بیشترین تأثیر را بر کیفیت آب‌های منطقه با درصد واریانس ۴۹/۳۷ بر عهده دارد، اگرچه با پارامترهای SO_4 ، Br ، Cl ، Na ، Mg ، Ca و TDS و EC دارای ارتباط مستقیم قوی است، اما با NO_3 ارتباط معکوس ضعیفی دارد. عامل دوم در کیفیت آب نمونه‌های برداشت شده که حدود ۱۵٪ از واریانس داده‌ها را تحت پوشش قرار می‌دهد، بیانگر ارتباط معناداری را با نترات نشان نمی‌دهد. اما عامل سوم حدود ۱۴٪ از واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کند، با نترات ارتباط مستقیم دارد که نشان‌دهنده آن است که نترات در منطقه مورد مطالعه عمدتاً منشأ کشاورزی دارد.

داشتند، در تحلیل‌ها باقی ماندند. جدول‌های ۴ و ۵ نتایج مقدار ویژه و واریانس متناظر با عامل‌ها را به ترتیب در فاز اول و فاز دوم نشان می‌دهد.

مقدار ویژه اولیه برای هر یک از عامل‌ها در قالب مجموع واریانس تبیین شده برآورد می‌شود. واریانس تبیین شده بر حسب درصدی از کل واریانس و درصد تجمعی است. درصد واریانس هر یک از عوامل نشان‌دهنده اهمیت آن عامل در هیدروشیمی منطقه است. نتایج حاصل از تحلیل عاملی در جدول‌های ۴ و ۵ نشان‌دهنده وجود سه عامل معنادار و مؤثر در کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه است که این عوامل در فصل خشک حدود ۹۱/۴۷ درصد و در فصل تر حدود ۸۵ درصد از مجموع کل واریانس را در بر دارند.

جدول ۴- نتایج تحلیل عاملی منشأ نترات در آبخوان دشت ایذه برای فصل خشک. (a) عامل‌های استخراجی و مقادیر واریانس آن‌ها و (b) عوامل مؤثر و وزن نهایی نرمال شده پس از چرخش واریماکس (Rahimzadeh, 2024).

Table 4. The results of factor analysis for the sources of nitrate in the aquifer of the Izeh Plain during the dry season. a) Extracted factors and their variance values, and b) Influential factors and the final normalized weights after varimax rotation (Rahimzadeh, 2024).

Component	Total Variance Explained			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	Initial Eigenvalues % of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	7.548	53.917	53.917	6.913	49.378	49.378
2	2.583	18.452	72.368	2.153	15.379	64.757
3	1.607	11.477	83.846	2.067	14.767	79.524
4	1.072	7.655	91.501	1.677	11.977	91.501
5	0.488	3.485	94.986			
6	0.232	1.657	96.643			
7	0.181	1.290	97.934			
8	0.142	1.015	98.949			
9	0.126	0.903	99.852			
10	0.012	0.088	99.940			
11	0.007	0.053	99.993			
12	0.001	0.005	99.998			
13	0.000	0.001	99.999			
14	7.539E-5	0.001	100.000			

a)

Parameters	Rotated Component Matrix		
	1	2	3
TDS	0.959	0.221	0.166
EC	0.956	0.220	0.185
pH	0.067	0.004	-0.488
Br	0.928	-0.034	0.067
NO ₃	-0.009	0.187	0.921
Na	0.985	0.075	-0.034
K	0.146	0.718	0.357
Mg	0.911	0.379	0.118
Ca	0.626	0.057	0.659
HCO ₃	0.170	0.720	0.549
SO ₄	0.978	0.138	-0.080
Cl	0.991	0.052	0.067
NH ₄	-0.057	0.007	-0.102
F	0.174	0.901	-0.122

b)

که با آمونیوم ارتباط معکوس دارد و با سایر پارامترها ارتباط متوسط و ضعیف دارد. عامل دوم که حدود ۲۵ درصد از واریانس داده‌ها رو در برمی‌گیرد، دارای ارتباط مستقیم با نیترات است که مؤید منشأ عمدتاً کشاورزی و دامداری و نیز فاضلاب نیترات در آب زیرزمینی منطقه است. عامل سوم حدود ۹ درصد از واریانس کل داده‌ها را تشکیل می‌دهد که ارتباط ضعیفی با نیترات دارد.

بر اساس جدول ۵، سه عامل معنی‌دار در کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در فصل تر وجود دارد. عامل اول که حدود ۵۰/۷۳ درصد از واریانس داده‌ها را تبیین می‌کند، شامل ارتباط مستقیم قوی بین پارامترهای هدایت الکتریکی، مواد جامد محلول، منیزیم، کلسیم، سولفات، کلر، سدیم و برمید است. با توجه به پارامترهای موجود در این عامل، آن را می‌توان به عنوان اندیس شوری آب زیرزمینی قلمداد نمود

جدول ۵- نتایج تحلیل عاملی منشأ نیترات در آبخوان دشت ایذه برای فصل تر. a) عامل‌های استخراجی و مقادیر واریانس آن‌ها و b) عوامل مؤثر و وزن نهایی نرمال شده پس از چرخش واریماکس (Rahimzadeh, 2024).

Table 5. The results of factor analysis for the sources of nitrate in the aquifer of the Izeh Plain during the wet season. a) Extracted factors and their variance values, and b) Influential factors and the final normalized weights after varimax rotation (Rahimzadeh, 2024).

Component	Total Variance Explained			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	Initial Eigenvalues % of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	8.297	55.315	55.315	7.610	50.734	50.734
2	3.022	20.147	75.463	3.706	24.710	75.443
3	1.448	9.656	85.118	1.451	9.675	85.118
4	0.903	6.020	91.139			
5	0.791	5.274	96.413			
6	0.410	2.731	99.144			
7	0.059	0.396	99.540			
8	0.043	0.288	99.828			
9	0.013	0.087	99.914			
10	0.008	0.056	99.970			
11	0.003	0.022	99.992			
12	0.001	0.006	99.998			
13	.000	.001	99.999			
14	5.408E-5	.000	100.000			
15	2.494E-5	.000	100.000			

a)

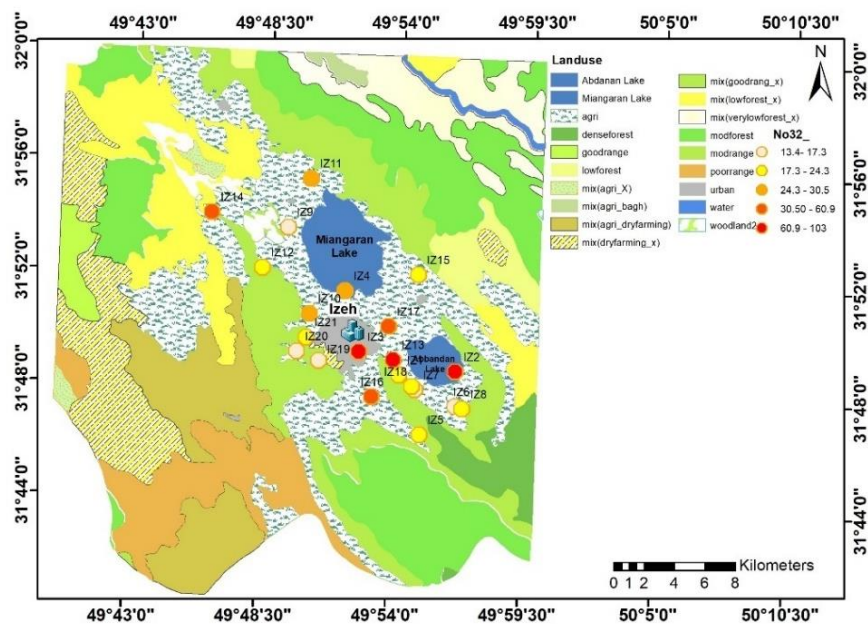
Parameters	Rotated Component Matrixa		
	1	2	3
TDS	0.971	0.234	0.000
EC	0.970	0.235	-0.006
pH	0.113	0.294	0.762
Mg	0.935	0.346	0.013
Ca	0.879	0.252	-0.047
HCO ₃	0.135	0.754	0.233
SO ₄	0.975	0.111	-0.033
Cl	0.990	-0.010	-0.012
NH ₄	-0.098	-0.060	0.635
F	0.242	0.892	0.285
Li	0.300	0.842	-0.116
Na	0.991	0.037	0.030
Br	0.987	0.003	-0.001
K	-0.004	0.907	-0.085
NO ₃	0.048	0.641	-0.555

b)

بررسی نقش کاربری اراضی در افزایش غلظت نیترات

انواع کاربری اراضی تأثیرات متفاوتی بر کیفیت آب زیرزمینی به‌ویژه در ارتباط با غلظت نیترات دارند. در شکل ۸ نقاط دارای غلظت نیترات بیش از حد مجاز استاندارد آب آشامیدنی ایران (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) برای دو فصل خشک و تر در دشت ایذه را نشان می‌دهد. همانطور که پیش‌تر بیان شد، غلظت‌های بالای نیترات عمدتاً در نواحی جنوبی، جنوب‌شرقی و مرکز دشت در حاشیه جنوبی شهر ایذه پراکنده شده‌اند. بر اساس شکل‌های ۸ و ۹ کاربری اراضی این محدوده‌ها عمدتاً شامل

زمین‌های زراعی و مناطق مسکونی هستند. این الگوی فضایی با نسبت-های یونی محاسبه شده برای چاه‌های این محدوده‌ها همخوانی دارد. این موضوع تأیید می‌کند که نیترات موجود در آب زیرزمینی عمدتاً از کودهای آمونیومی (NH_4^+)، نفوذ فاضلاب و کودهای دامی منشأ می‌گیرد. در مناطق زراعی، کودهای نیتروژنه در آب حل شده و سپس توسط گیاهان به‌صورت یون آمونیوم در خاک جذب می‌شوند. نیتروژن مازاد که توسط گیاهان جذب نمی‌شود، ممکن است به نیترات (NO_3) اکسید شده و به درون سیستم آب زیرزمینی نشت کند.



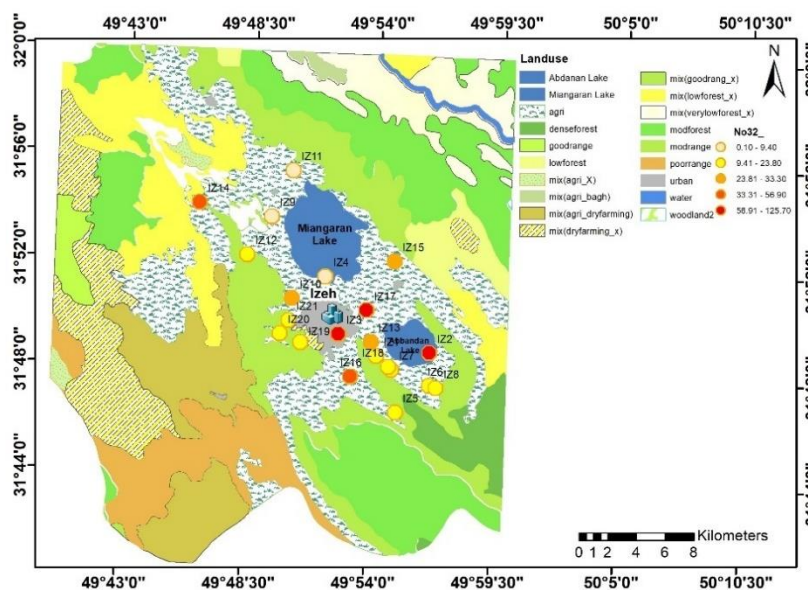
شکل ۸- نقشه ارتباط کاربری اراضی و غلظت نترات آبخوان دشت ایذه در فصل خشک (Rahimzadeh, 2024).

Fig. 8. The map of the relationship between land use and nitrate concentration in the aquifer of the Izeh Plain during the dry season (Rahimzadeh, 2024).

نتیجه‌گیری

رخساره آب در این آبخوان عمدتاً بیکربناته-کلسیک و بیکربنات منیزیک و تعداد محدودی از چاه‌ها در رده کلروره-کلسیک و کلروره-منیزیک هستند که ۲۳/۸۱ درصد از نمونه‌ها دارای غلظت نترات فراتر از حد مجاز استاندارد آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی و ایران می‌باشند. در این نمونه‌ها مقادیر غلظت نترات در فصل خشک بین ۱۳/۴۰ تا ۱۰۳ و میانگین آن برابر با ۳۷/۳۱ و در فصل تر بین ۹ تا ۱۲۵/۷ با میانگین ۳۴/۳۴ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است.

پژوهش حاضر وضعیت هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی دشت ایذه را از منظر آلودگی به نترات و نقش فعالیت‌های انسانی در ایجاد این آلودگی را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این تحقیق از ۲۱ چاه بهره‌برداری در دو فصل خشک و مرطوب نمونه‌برداری شده و مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. نتایج این تجزیه شیمیایی مؤید آن است تیپ و



شکل ۹- نقشه ارتباط کاربری اراضی و غلظت نیترات آبخوان دشت ایذه در فصل تر (Rahimzadeh, 2024).

Fig. 9. The map of the relationship between land use and nitrate concentration in the aquifer of the Izeh Plain during the wet season (Rahimzadeh, 2024).

فصل تر نیز ارتباط مستقیم بین بی‌کربنات، فلوراید، لیتیم، پتاسیم، کل ذرات جامد، هدایت الکتریکی و نیترات مؤید منشأ عمدتاً کشاورزی، فضولات حیوانی و فاضلاب است. این موضوع با بررسی و هم‌پوشانی با نقشه کاربری اراضی منطقه در دو فصل تر و خشک تأیید گردید. نتایج حاصل از منشایابی نیترات در پژوهش حاضر، نتایج بدست آمده توسط ناصری و علیجانی (Nasari and Alijani, 2007) در ارتباط با منشأ آلودگی نیترات در این دشت را تأیید می‌کند.

به منظور کاهش غلظت نیترات در این آبخوان، از طریق مدیریت بهینه خاک (شامل خاک‌ورزی مناسب، تناوب زراعی و استفاده از کود سبز)، استفاده از کودهای آلی و بیولوژیک، مدیریت آبیاری و آموزش کشاورزان توصیه می‌شود. این روش‌ها به بهبود ساختار خاک، تعیین دقیق نیازهای گیاهان و کاهش مصرف بی‌رویه کودها کمک می‌کنند. همچنین، طراحی و اجرای شبکه فاضلاب و تصفیه آن می‌بایست در اولویت توسعه زیرساخت‌های این منطقه قرار داشته باشد.

ابزارهای آماری (تحلیل مؤلفه اصلی) و نسبت‌های یونی به منظور تعیین نقش عوامل انسانی مختلف بکار گرفته شده است. تعیین منشأ یون نیترات با استفاده از نسبت‌های یونی $\text{NO}_3^-/\text{K}^+/\text{Cl}^-$ ، $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ و $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ مبین آن است که فعالیت انسانی باعث کاهش کیفیت آب زیرزمینی شده است. استفاده بی‌رویه از کودهای نیتراته و دامی در اراضی کشاورزی منطقه و نیز دفع فاضلاب روستایی و شهری از طریق چاه‌های جذبی نقش مهمی در افزایش غلظت نیترات در این منطقه را داشته‌اند.

تحلیل مؤلفه اصلی نیز نشان داد که در فصول خشک و تر سه عامل نقش اصلی را در تغییر کیفیت آب زیرزمینی ایفا می‌کنند. در فصل خشک و تر به ترتیب مؤلفه‌های سوم و دوم ارتباط مستقیمی با مقدار نیترات در آبخوان مورد مطالعه دارند. نتایج این تحلیل آماری نیز مؤید آن است که بار مثبت زیاد تا کم NO_3^- ، Ca ، HCO_3^- ، K ، EC ، TDS ، Mg و Cl نشان‌دهنده آن است که مقدار بالای نیترات ناشی از چند منشأ انسانی از جمله فعالیت‌های کشاورزی و نفوذ فاضلاب است. در

قدردانی

بدینوسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (SCU.EG1404.28667) در انجام این

تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین، نویسندگان از زحمات کارکنان سازمان آب و برق خوزستان به‌ویژه دکتر ماجدی که همکاری در جهت نمونه‌برداری و آنالیز نمونه‌ها را فراهم آورده‌اند، کمال تشکر را دارند.

References

- Amarloei, A., Nazeri, M., Sayehmiri, K., Moradi, H., Khodarahmi, F., 2014. Investigation of nitrate and nitrite levels in groundwater of Ilam city. *Scientific-Research Journal of Ilam University of Medical Sciences* 22, 34-41. (in Persian)
- Chaudhary, I.J., Chauhan, R., Kale, S.S., Gosavi, S., Rathore, D., Dwivedi, V., Singh, S., Yadav, V.K., 2025. Groundwater nitrate contamination and its effect on human health: a review. *Water Conservation Science and Engineering* 10, 33-43.
- Darkhor, M., Shaban, M., 2018. Investigation of microbial and nitrate pollution in groundwater aquifers. *Environmental Science Studies* 3(1), 607-618. (in Persian)
- Guo, Zh., Yan, Ch., 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.
- Iran National Standards Organization, 2024. Drinking water-Physical and chemical specifications. INSO 1053.
- Jia, H., Qian, H., 2025. Groundwater nitrate response to hydrogeological conditions and socioeconomic load in an agriculture dominated area. *Scientific Reports* 15, 1315-1327.
- Kalantari, N., Sheikhzadeh, A., Mohammadi, H., 2021. Investigation of groundwater quality in the Gotvand aquifer with emphasis on nitrate concentration. *Iran-Water Resources Research* 17(1), 228-238. (in Persian)
- Kalantari, N., Zarvash, N., Alijani, F., Daneshian, H., Bashti, M., 2024. Investigating the quality of groundwater resources with emphasis on the origin and determining the nitrate pollution index using hydrochemical methods and multivariate statistical techniques in the southern part of Behbahan aquifer in Khuzestan province. *Hydrogeology* 9(1), 40-56. (in Persian)
- Liu, C.W., Lin, K.H., Kuo, Y.M., 2003. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a black foot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment* 313, 77-89.
- Liu, J., Peng, Y., Li, C., Gao, Z., Chen, S., 2021. Characterization of the hydrochemistry of water resources of the weibeï plain, Northern China, as well as an assessment of the risk of high groundwater nitrate levels to human health. *Environmental Pollution* 268, 115947. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115947>.
- Mehrabi Nejad, A., Kalantari, N., Alijani, F., Mousavi, S. F., and Mohammadi, H., 2024. Nitrate pollution of the Izeh urban aquifer: Biohazards and local management. *Journal of Aquifer and Qanat* 5 (2), 203-220. (in Persian)
- Mirzaei, S. Y., Chaghazary, Z., Chitsazian, M., Alijani, F., 2023. Investigation of groundwater quality in the Evan plain aquifer, Khuzestan province, with emphasis on nitrate concentration. *Journal of Engineering Geology* 17(1), 85-103. (in Persian)
- Moghimi, H., 2017. Assessment of hydro-geochemical factors affecting coastal aquifer of Ghaemshar using by factor analysis and clustering. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 3(1), 93-112. (in Persian)
- Mozafarizadeh, J., Sajjadi, Z., 2023. Investigation of chemical pollution in groundwater of the Borazjan plain. *The Southern Medical Journal* 17(5), 927-937. (in Persian)
- Naseri, H. R., Alijani, F., 2007. Investigation of pollutant sources in groundwater of the Izeh plain, northeast Khuzestan. *Environmental Sciences* 4(4), 33-46. (in Persian)
- Naseri, H., Nakhaee, M., 2015. Simulation of nitrate transport in groundwater: Lenjanat plain, Isfahan. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 1(1), 89-106. (in Persian)
- Ostvari, Y., Bigi Harchagani, H., Davoodian, A. R., 2012. Investigation of spatial variations of nitrate in the groundwater of Lordegan plain. *Water and Irrigation Management* 2(1), 55-67. (in Persian)
- Rahimzadeh, F., 2024. Investigating the origin and concentration of nitrate and bromide in groundwater of the Izeh plain with emphasis on their environmental consequences. Master of sciences thesis in environmental geology, Shahid Chamran university of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (in Persian)

- Rahman, A., Mondal, A.C., Tiwari, K.K., 2021. Anthropogenic nitrate in groundwater and its health risks in the view of background concentration in a semiarid area of Rajasthan, India. *Scientific Reports*, 11, 9279.
- Sajadi, Z., 2022. Comprehensive hydrological study of the west limb of Mongasht karstic anticline and the Naal-e-Asbi syncline, Izeh, Khuzestan. PhD. thesis in hydrogeology, Shahid Chamran university of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (in Persian)
- Samghany, S., Nassery, H.R., Kayhomayoon, Z., Alijani, F., 2024. Effects of the April 2019 flood of the Karkheh and Dez rivers on groundwater quantity and quality in the Shush plain. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 10(2), 307-328. (in Persian)
- Tian, H., Liang, X., Gong, Y., Qi, L., Liu, Q., Kang, Z., Sun, Q., Jin, H., 2020. Health risk assessment of nitrate pollution in shallow groundwater: a case study in China. *Polish Journal of Environmental Studies* 29, 1, 827-839.
- Wang, D., Li, P., Yang, N., Yang, C., Zhou, Y., Li, J., 2023. Distribution, sources and main controlling factors of nitrate in a typical intensive Agricultural region, northwestern China: Vertical Profile Perspectives. *Environmental Resources* 237, 116911.
- WHO, 2011. Guidelines for drinking-water quality, 4th edn. World Health Organization, Geneva Switzerland. 398-403.
- Wu, J., Li, P., Qian, H., 2022. Hydrochemical characterization and nitrate source identification in groundwater of the Hebei Plain, China. *Environmental Earth Sciences* 81(4), 123.
- Yang, Ch., Chen, S., Dong, J., Zhang, Y., Wang, Y., Kang, W., Zhang, X., Liang, Y., Fu, D., Yan, Y., Yang, Sh., 2025. Hydrochemical characteristics, controlling factors, and high nitrate hazards of shallow groundwater in an urban area of southwestern China. *Toxics* 13, 516-535.
- Yu, Y., Jin, ZH., Chu, G., Zhang, J., Wang, Y., Zhao, Y., 2020. Effects of valley reshaping and damming on surface and groundwater nitrate on the Chinese Loess Plateau. *Journal of Hydrology* 584, 124702. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124702>.
- Zaresefat, M., Hosseini, S., Ahrari Roudi, M., 2023. Addressing nitrate contamination in groundwater: the importance of spatial and temporal understandings and interpolation methods. *Water* 15, 4220.
- Zhang, L., Dong, D., Lv, S., Zhang, J., Yan, M., Han, G., Li, H., 2023. Hydrochemical characterization and quality assessment of groundwater in the southern plain of Hebei province, China. *Water* 15, 3791-3792.
- Zendeabad, M., Cepuder, P., Loiskandl, W., Stumpp, Ch., 2019. Source identification of nitrate contamination in the urban aquifer of Mashhad, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 25, 100618 – 100631.