

بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی با تاکید بر منشا و تعیین شاخص آلودگی نترات با استفاده از روش های هیدروشیمیایی و تکنیک های آماری چند متغیره در بخش جنوبی آبخوان بهبهان استان خوزستان

نصراله کلاتری^۱، ناهید زروش^{۲*}، فرشاد علیجانی^۳، حسن دانشیان^۴، محمد باشتی^۵

۱- استاد دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استاد دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران.

۴- کارشناس سازمان آب و برق خوزستان، اهواز، ایران.

۵. کارشناس شرکت آب منطقه ای کهگیلویه و بویراحمد، یاسوج، ایران.

* نویسنده مسئول: na.zarvash@yahoo.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲

چکیده

آب زیرزمینی از جمله مهمترین منابع تأمین کننده آب شرب و کشاورزی در اکثر مناطق جهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک هست، ولی کیفیت آن عمدتاً به دلیل فعالیت های انسان زاد از قبیل تولید زباله های خانگی و صنعتی و همچنین استفاده بیش از حد از کودهای شیمیایی به شدت رو به کاهش است و به یک مشکل اساسی در سراسر جهان تبدیل شده است. از این رو شناسایی منابع آلاینده ها برای محافظت از کیفیت منابع آب زیرزمینی از موضوعات مهمی است که در دهه های اخیر مورد توجه محققان و پژوهشگران قرار گرفته است. هدف این پژوهش ارزیابی آلودگی نترات و شناسایی منشاء و مؤلفه های تأثیرگذار بر کیفیت منابع آب زیرزمینی به کمک روش های هیدرو شیمیایی و روش های آماری از جمله نمودارهای ترکیبی هیدرو شیمیایی، تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) و تجزیه و تحلیل خوشه سلسله مراتبی (HCA)، است. به همین منظور تعداد ۶۳ نمونه از منابع آب سطحی و زیرزمینی منطقه جمع آوری گردید و با استفاده از نرم افزارهای آماری SPSS و XLSTAT، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که غلظت یون نترات بین ۳ تا ۱۰۳ میلی گرم بر لیتر متغیر هست. نتایج همچنین نشان داد که مهمترین منشاء آلودگی نترات فاضلاب شهری و فعالیت های کشاورزی در منطقه هستند، به طوری که بیشترین آلودگی نمونه ها در سطح شهر بهبهان، محدوده های نزدیک شهر و در روستاهای اطراف مشاهده شده است. نتایج حاصل از تکنیک های آماری چند متغیره نشان داد که نمونه ها در سه گروه مجزا قرار دارند و سه مؤلفه اصلی با استفاده از روش PCA استخراج شد که مهمترین مؤلفه تأثیرگذار بر کیفیت منابع آب منطقه مربوط به عوامل انسان زاد هست. ارزیابی نمودارهای ترکیبی مختلف، مهمترین منشاء نترات را ناشی از فاضلاب شهری تشخیص داد. همچنین تغییرات عمقی نترات نشان داد که در عمق های کمتر از ۲۰ متر آب چاه ها تحت تأثیر آلودگی ناشی از فاضلاب شهری هستند ولی در عمق های بیشتر نقش فعالیت های انسان زاد کاهش می یابد. ارزیابی شاخص آلودگی نترات نیز نشان داده است که بیشترین آلودگی مرتبط با نمونه های WB12، WB18، WB17 و R7 هست و متأثر از فعالیت های انسان زاد است. محدوده شهر بهبهان دارای شاخص آلودگی متوسط هست که منعکس کننده نقش فعالیت های انسان زاد در منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه هست.

کلیدواژه: آلودگی نترات، بهبهان، تحلیل آماری چند متغیره، روش PCA، شاخص آلودگی نترات.

مقدمه

افزایش یافته است. که این امر باعث افزایش غلظت NO_3 در آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی شده است (Merchan et al., 2020). سازمان بهداشت جهانی (WHO) میزان غلظت NO_3 برای آب آشامیدنی را کمتر از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر تعیین کرده است (WHO, 2011). مطالعات متعددی در ارتباط با آلودگی نیتрат در منابع آب زیرزمینی انجام گرفته است که عمدتاً به ارزیابی میزان نیترات، فرآیند ژئوشیمیایی مؤثر بر آن و تعیین منشأ آلودگی نیترات پرداخته‌اند:

(Bahrami et al., 2020; Zhang et al., 2018; Rawat et al., 2019; Mir et al., 2019; Ramarosan et al., 2020; Ducci et al., 2019; Sun et al., 2018; Ogrinc et al., 2019).

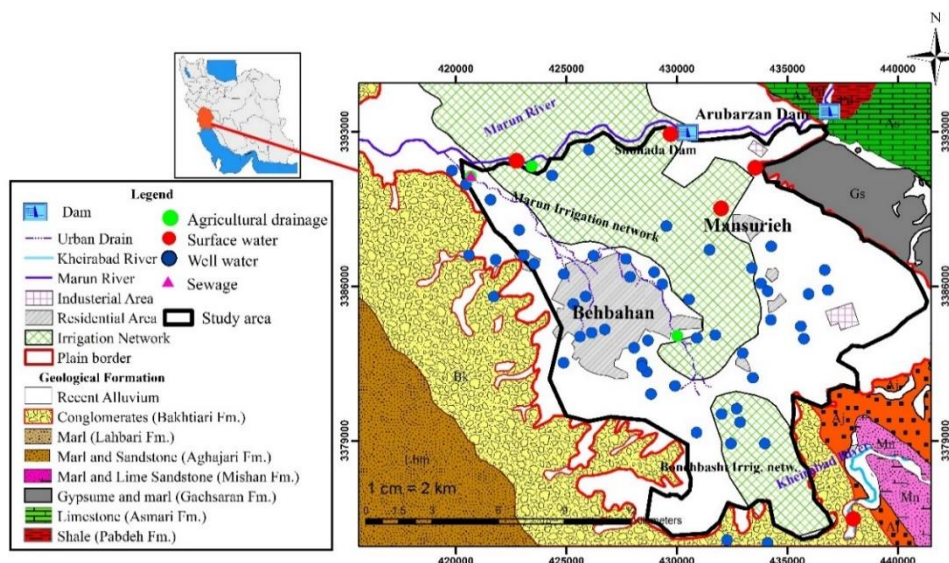
در بسیاری از مطالعات به منظور تحلیل داده‌های کمی و کیفی جمع‌آوری شده از آب‌های سطحی و منابع زیرزمینی از تکنیک‌های آماری چند متغیره استفاده می‌شود (Ramarosan et al., 2020). اکثر روش‌های آماری چند متغیره، جهت دسته‌بندی نمونه‌های آب زیرزمینی برای بررسی تطابق بین متغیره‌ها و مکان‌های نمونه برداری آب مورد استفاده قرار می‌گیرند (Cloutier et al., 2008). در این مطالعه از روش‌های هیدروشیمیایی و آماری جهت ارزیابی و تشخیص منشأ نیترات در منابع آب زیرزمینی منطقه استفاده شده است.

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 سالیانه ریزش‌های جوی در محدوده مطالعاتی ۳۴۲ میلی‌متر است. متوسط درجه حرارت دشت برابر $24/33$ درجه سانتی‌گراد است. این محدوده در جنوب شرقی استان خوزستان واقع شده است. آبخوان بهبهان از نوع آزاد است و جنس رسوبات آن، آبرفتی و عمدتاً دانه درشت و حاوی ذرات رس، سیلت و مارن می‌باشد. رودخانه مارون به‌عنوان زهکش اصلی منطقه، دشت بهبهان را به دو نیمه شمالی و جنوبی تقسیم کرده است که منطقه مورد مطالعه با مساحتی نزدیک به 130 کیلومترمربع در نیمه جنوبی دشت بهبهان قرار گرفته است. جهت کلی جریان آب زیرزمینی در آبخوان از حواشی شمالی و شرق تا جنوب دشت بهبهان

افزایش 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 هست. منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مهمترین و گاه تنها منبع آبی مورد استفاده برای تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت محسوب می‌شوند. بنابراین، ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی، امری لازم و ضروری است. به همین منظور بسیاری از مطالعات انجام شده در زمینه آب‌های زیرزمینی بر روی خصوصیات کیفی منابع آب و عوامل مؤثر بر آن متمرکز شده‌اند (Li et al., 2015). بر اساس نتایج تحقیقی که تحت عنوان تأثیر شهرنشینی بر شیمی آب‌های زیرزمینی در حوضه لانزو توسط (Lu et al., 2022) در چین انجام شد، مشخص شد که در مناطق شهری فعالیت‌های انسان‌زاد، احتمال خطر آلودگی آب-های زیرزمینی را افزایش می‌دهند به‌طوری‌که ۹۶ درصد از آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه (شهر لانزو) فاقد کیفیت استاندارد آب آشامیدنی هستند. نتایج مطالعه‌ای که توسط کلانتری و همکاران در سال ۱۴۰۰ با استفاده از روش‌های آماری در آبخوان عقیلی از توابع استان خوزستان انجام گرفت، نشان داد که فاضلاب‌های روستایی و آب‌های برگشتی کشاورزی باعث افزایش شوری آب منطقه گردیده است. مطالعه دیگری در جنوب چین در منطقه PRD نیز نشان داد که نفوذ پساب‌های صنعتی و فاضلاب‌های خانگی از عوامل اصلی کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه هستند (Zhang et al., 2019). آلودگی منابع آب با نیترات یک مشکل رایج جهانی مرتبط با فعالیت‌های انسانی است (McLay et al., 2001). در حال حاضر، نگرانی‌های زیادی در مورد حضور نیترات (NO_3) در آب‌های زیرزمینی به دلیل استفاده شدید از کودها و سایر منابع انسانی (تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی) وجود دارد (Abasca et al., 2022). از جمله فعالیت‌های انسانی که باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شوند می‌توان به تولید و استفاده از کودهای شیمیایی، تخلیه سیستم‌های فاضلاب صنعتی و خانگی و سوخت‌های فسیلی اشاره کرد (Ward et al., 2018). در طول دو قرن گذشته، تولید و مصرف نیترات، به‌ویژه در زمینه کشاورزی، به‌طور قابل‌توجهی

به طرف رودخانه مارون است. شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری.

Figure 1 - Geological map and sampling station locations.

مواد و روش‌ها

پرتابل HQ14D انجام گرفت. پس از نمونه‌برداری نمونه‌ها در یخچال نگهداری و پس از یک روز به آزمایشگاه سازمان آب و برق خوزستان جهت آنالیز ارسال شدند. جهت اندازه‌گیری و تعیین مقادیر یون‌های مختلف در آزمایشگاه سازمان آب و برق خوزستان، از دستگاه کروماتوگراف یونی Metrohm مدل ۹۴۰ استفاده از نرم‌افزارهای Excel 2016، XLSTAT 2015.1 و IBM SPSS 20 انجام شد. در جدول ۱ خلاصه اطلاعات پارامترهای هیدروشیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی ارائه شده است.

جهت انجام این پژوهش تعداد ۶۳ نمونه آب از منابع مختلف برای آنالیز شیمیایی در مهرماه ۱۴۰۰ جمع‌آوری شد، نمونه‌های آب جهت آنالیز آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی در بطری‌های ۲۵۰ میلی‌لیتری و برای نیترات در بطری‌های پلی‌اتیلن ۶۰ میلی‌لیتری جمع‌آوری شدند. قبل از نمونه‌برداری ظروف به خوبی با آب مقطر شستشو داده شدند و در محل نمونه برداری نیز چند بار با آب نمونه شستشو و سپس پر شدند. در چاه‌هایی که خاموش بودند پس از ۱۵ دقیقه پمپاژ نمونه برداری انجام شد. اندازه‌گیری‌های صحرائی شامل دمای آب، هدایت الکتریکی EC، و pH در محل و توسط دستگاه

جدول ۱- خلاصه نتایج هیدروشیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی بخش جنوبی آبخوان بهبهان (مهرماه ۱۴۰۰).

Table 1 - Summary of hydrochemical results of groundwater samples from the southern part of the Behbahan aquifer (October, 2021).

Variable	Minimum	Maximum	Mean	Std. deviation
T	20.4	29.5	25.430	2.246
ECus/cm	1682	6610	3576.818	1047.457
TDS mg/l	1093.3	4296.5	2368.831	689.006
Na meq/l	1.600	33.162	11.219	6.133
K meq/l	0.051	0.950	0.198	0.145
Ca meq/l	8.386	36.410	21.547	7.175
Mg meq/l	2.240	24.190	9.730	5.436
Cl meq/l	1.550	25.804	10.589	5.329
HCO3 meq/l	1.990	6.500	3.871	1.040
SO4 meq/l	8.320	51.530	27.375	11.183
NO3 mg/l	3.307	102.900	37.593	26.503
F mg/l	0.330	2.180	1.145	0.461
Br mg/l	0.054	1.070	0.394	0.234

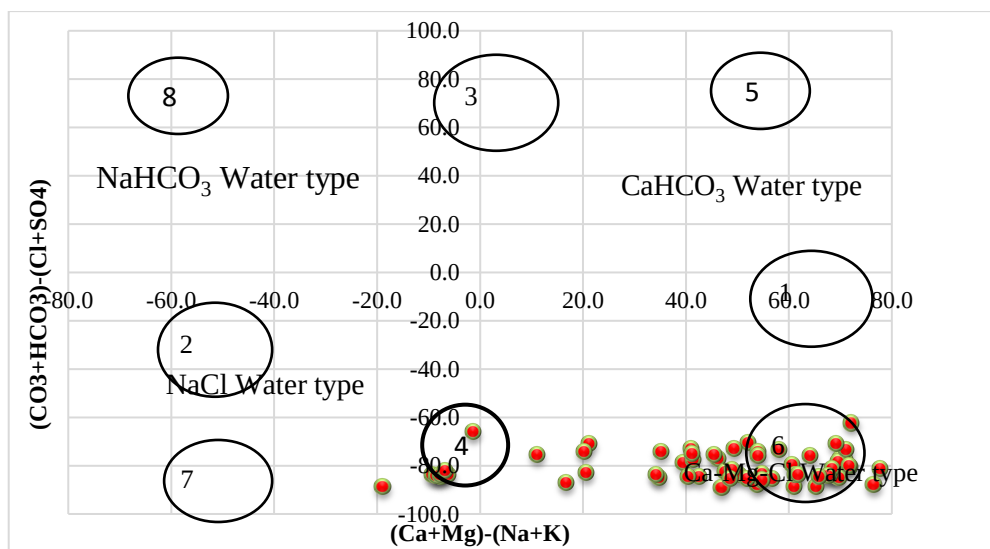
pH	6.600	8.000	7.141	0.312
----	-------	-------	-------	-------

بحث و نتایج

خصوصیات هیدروشیمیایی

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اکثر نمونه‌ها در کلاس ۶ واقع شده‌اند. در این کلاس، کاتیون‌های $\text{Ca}+\text{Mg}$ و آنیون‌های SO_4+Cl غالب‌اند. آب‌های این ناحیه دارای سختی دائمی بوده و در مصارف آبیاری رسوب کربنات سدیم باقیمانده ایجاد نمی‌کنند و نشان‌دهنده تیپ غالب Ca-Mg-Cl می‌باشند. آب‌های زیرزمینی متأثر از ترکیب شیمیایی لیتولوژی آبخوان و تعویض یونی معکوس در این ناحیه قرار می‌گیرند. تعداد کمی از نمونه‌ها نیز در کلاس ۷ قرار گرفته‌اند که در این ناحیه، $\text{Na}+\text{K}$ و SO_4+Cl از یون‌های غالب است و آب‌های شور در این ناحیه قرار می‌گیرند که برای مصارف آبیاری و شرب مناسب نیستند. این ناحیه، نشان‌دهنده تیپ غالب Na-Cl یا Na-SO_4 می‌باشد. آب‌های زیرزمینی که در انتهای مسیر حرکت هستند در این ناحیه قرار می‌گیرند.

یکی از دیاگرام‌های مفید جهت تعیین نوع و فرآیندهای تأثیرگذار بر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی دیاگرام چادها (Chadha, 1999) می‌باشد. این دیاگرام، نسخه اصلاح‌شده دیاگرام پایپر می‌باشد. در دیاگرام چادها، تفاضل درصد میلی اکی‌والان قلیائی‌های خاکی ($\text{Ca}+\text{Mg}$) و قلیائی‌ها ($\text{Na}+\text{K}$) در مقابل تفاضل اسیدهای ضعیف (HCO_3+CO_3) و اسیدهای قوی (SO_4+Cl) رسم می‌شوند. این دیاگرام، علاوه بر دارا بودن تمامی مزیت‌های دیاگرام پایپر، تعیین فرآیندهای حاکم بر ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی، شامل تعویض یونی، اختلاط آب‌های طبیعی، احیای سولفات، نفوذ آب شور و سایر عوامل هیدروژئوشیمیایی مربوطه را نیز ممکن می‌سازد. دسته‌بندی منابع آب زیرزمینی دشت بهبهان در شکل ۲ نمایش داده شده



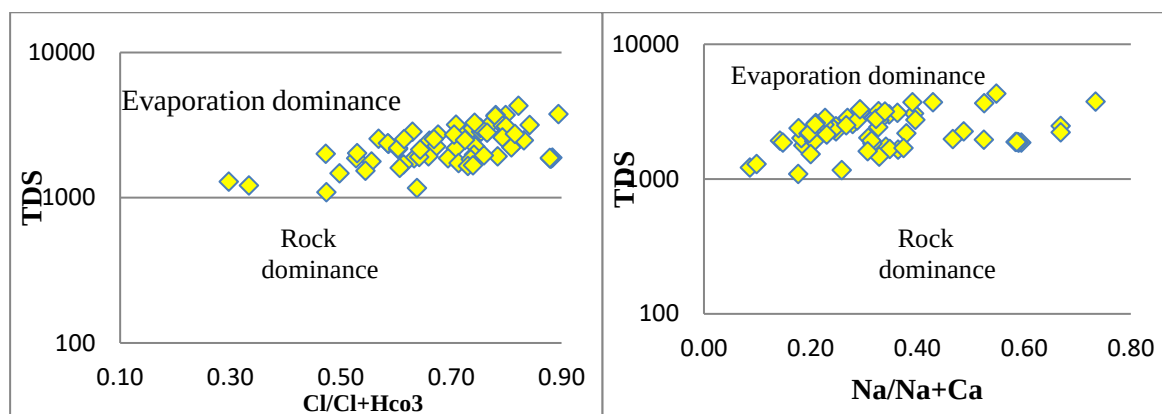
شکل ۲- نمودار چادها برای نمونه‌های مورد مطالعه.

Figure 2 - Chadha diagram for the studied samples.

دیاگرام گیبس

عمودی و نسبت $\text{Na}/\text{Na}+\text{Ca}$ و $\text{Cl}/\text{Cl}+\text{HCO}_3$ بر روی محورهای افقی قرار می‌گیرد. در شکل ۳ نمودار گیبس نمونه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به نتیجه مدل، نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده‌ای واقع شدند که فرآیندهای تبخیر کنترل‌کننده طبیعی شیمی منابع آب زیرزمینی در منطقه است.

با توجه به اینکه در طبیعت عوامل متعددی ازجمله کانی‌شناسی و شرایط آب و هوایی بر خصوصیات شیمیایی آب-های زیرزمینی تأثیرگذار هستند، گیبس در سال ۱۹۷۰ مدلی جهت شناسایی و تفکیک این عوامل پیشنهاد کرد که در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است در این دیاگرام مقادیر لگاریتمی TDS برحسب میلی گرم در لیتر بر روی محور



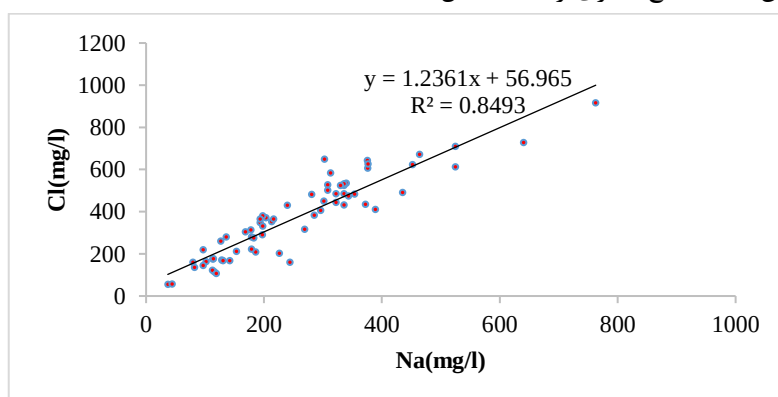
شکل ۳- نمودار گیبس فرایندهای حاکم بر آبهای زیرزمینی منطقه مورد مطالعه.

Figure 3 - Gibbs diagram of the controlling processes in the groundwater of the study area.

نسبت‌های یونی

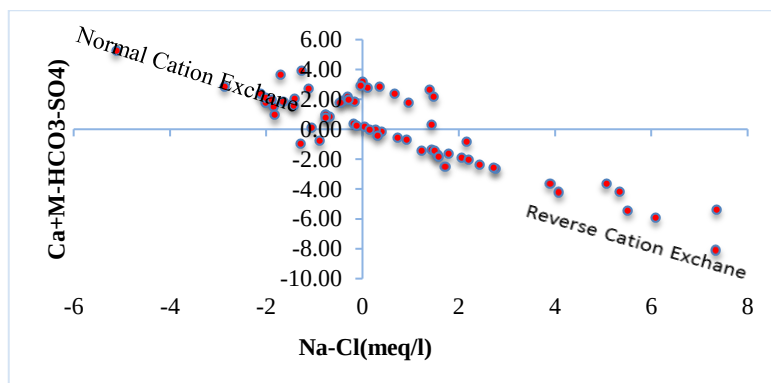
یونی و تبادل یونی معکوس برای یون سدیم است. در صورتی که نسبت Na/Cl بیش از یک باشد، سدیم از واکنش‌های هوازدگی سیلیکات‌ها منشأ گرفته است و در صورتی که این نسبت کمتر از یک یا نزدیک به یک باشد، نشان‌دهنده انحلال سدیم است که می‌تواند ناشی از فرایند تبخیر و فعالیت‌های انسان‌زاد (کشاورزی) باشد (رشیدی و حسینی، ۱۴۰۲). در شکل ۵ نمودار ترکیبی $Na-Cl$ در برابر $(SO_4^{2-}-HCO_3^-)$ به منظور بررسی تبادل یونی در منطقه ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تبادل یونی و تبادل یونی معکوس منعکس‌کننده کاهش و افزایش مقدار سدیم نسبت به یون کلرید است.

نسبت‌های یونی و نمودارهای ترکیبی شاخص‌های مناسبی در ارزیابی کیفیت منابع آب هستند و استفاده از آن‌ها در تعیین منشأ املاح موجود در آب بسیار کاربردی می‌باشد (Gibbs, 1970). ارزیابی نمودار سدیم در برابر کلرید یکی از مهمترین روش‌های ارزیابی نقش عوامل مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی است. به طوری که نسبت ۱:۱ این عناصر نشان‌دهنده انحلال سنگ‌های تبخیری از جمله هالیت است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اکثر نمونه‌ها روی خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند. با توجه به وجود سازندهای تبخیری در منطقه مورد مطالعه، هالیت یکی از اصلی‌ترین منابع تولیدکننده این عناصر در منابع آب منطقه است. وجود تعدادی از نمونه‌ها در بالا و پایین خط ۱:۱ منعکس‌کننده منابع دیگری از جمله تبادل



شکل ۴- نمودار سدیم و کلرید نمونه‌های مورد مطالعه.

Figure 4 - Sodium and chloride diagram of the studied samples.



شکل ۵- نمودار ترکیبی تبادل یونی در نمونه‌های مورد مطالعه.

Figure 5 - Combined ion exchange diagram in the studied samples.

روش‌های ارزیابی آلودگی

روش‌های آماری

یکی از ابزارهای کاربردی تجزیه و تحلیل پارامترهای هیدروشیمیایی روش‌های آماری می‌باشد که برای به دست آوردن روابط هیدروشیمیایی و ایجاد روابط بین آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش از سه تکنیک آماری ماتریس همبستگی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل خوشه‌ای (HCA) جهت شناسایی و دسته‌بندی منشأ آلودگی منابع آب زیرزمینی استفاده شده است.

ضریب همبستگی

از جمله روش‌های غیرمستقیم پایش کیفی منابع آب استفاده از ضریب همبستگی است که می‌تواند ارتباط بین پارامترهای مؤثر بر کیفیت منابع آب را شناسایی کند. به منظور شناسایی و رابطه بین پارامترهای مؤثر بر کیفیت منابع آب دشت بهبهان از ۱۳ پارامتر استفاده گردید که نتایج ماتریس

همبستگی پیرسون آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جفت پارامترهای هیدروشیمیایی همبستگی مثبت بالایی دارند. این امر منعکس‌کننده منبع مشترک، برای این عناصر است. همبستگی بین سولفات، کلسیم و منیزیم می‌تواند از انحلال سازندهای تبخیری (سازند گچساران) و یا به دلیل استفاده از کودهای حاوی سولفات و کلسیم در منطقه مورد مطالعه باشد. همبستگی بالای بین کلرید و سدیم می‌تواند منعکس‌کننده منشأ زمین زاد از جمله انحلال سازندهای تبخیری در منابع باشد. همبستگی بین کلسیم با منیزیم و پتاسیم ناشی از انحلال سازندهای آهکی و همچنین استفاده از کودهای شیمیایی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین همبستگی مثبت بین نیتрат و یون‌های سولفات، منیزیم و پتاسیم می‌تواند با منبع انسان‌زاد در ارتباط باشد.

جدول ۲- ضریب همبستگی پارامترهای هیدروشیمیایی منابع آب دشت بهبهان.

Table 2 - Correlation coefficient of hydrochemical parameters of water sources in the Behbahan plain.

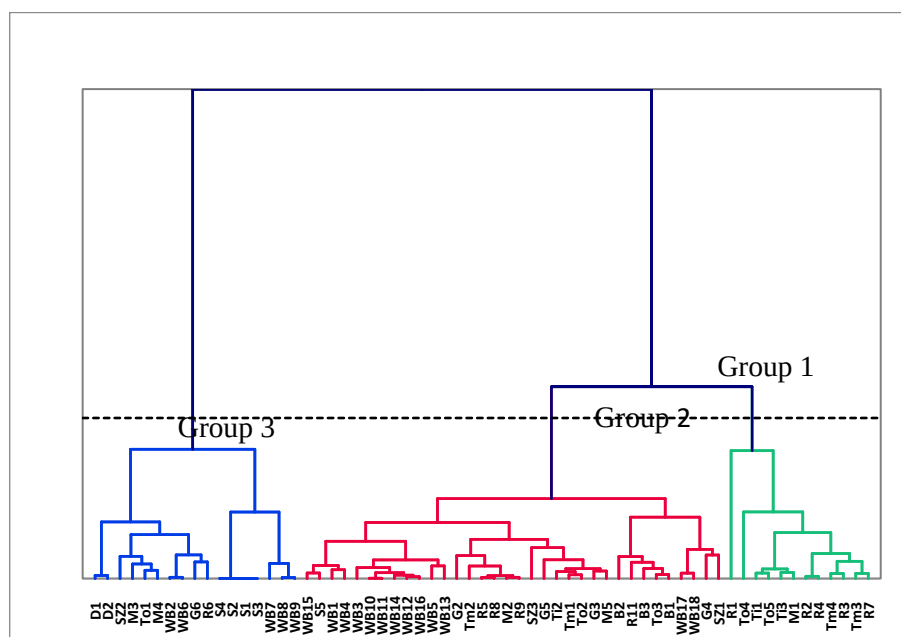
	EC us/cm	TDS mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Cl mg/l	HCO ₃ mg/l	SO ₄ mg/l	NO ₃ mg/l	F mg/l	Br mg/l
ECus/cm	1											
TDS mg/l	0.994	1										
Ca ²⁺ mg/l	0.591	0.597	1									
Mg ²⁺ mg/l	0.610	0.623	0.540	1								
Na mg/l	0.768	0.745	0.044	0.212	1							
K mg/l	0.657	0.642	0.469	0.567	0.396	1						
Cl mg/l	0.730	0.707	0.146	0.097	0.922	0.311	1					
HCO ₃ mg/l	0.394	0.357	0.491	0.353	0.205	0.359	0.239	1				
SO ₄ mg/l	0.726	0.732	0.835	0.881	0.246	0.642	0.176	0.445	1			
NO ₃ mg/l	0.191	0.204	0.329	0.622	0.153	0.400	0.215	0.320	0.506	1		

F mg/l	0.511	0.530	0.571	0.642	0.182	0.428	0.129	0.216	0.718	0.353	1	
Br mg/l	0.529	0.500	0.425	0.518	0.300	0.568	0.260	0.479	0.555	0.392	0.392	1
pH	-0.004	-0.002	-0.470	-0.056	-0.230	-0.006	-0.102	-0.339	-0.225	-0.057	-0.055	-0.062

آنالیز خوشه‌ای HCA

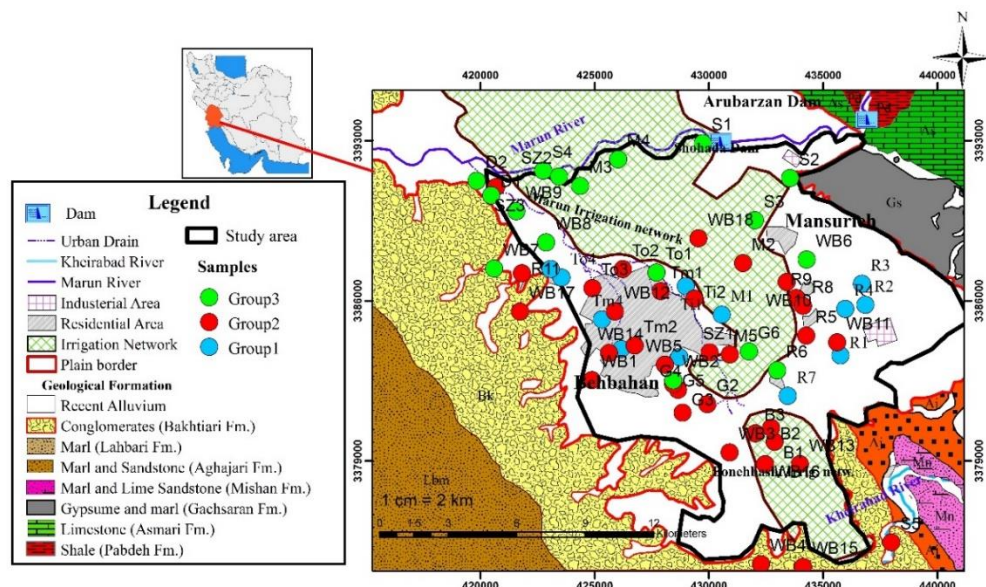
انسان‌زاد در منطقه مورد مطالعه باشد. در گروه ۳ مقدار سدیم و کلرید بیشتر و مقدار سولفات و کلسیم و منیزیم در اکثر نمونه‌ها نسبت به دو گروه دیگر کمتر می‌باشد. در این گروه مقدار نیتрат نیز در اکثر نمونه‌ها کم است به‌طور کلی نمونه‌های این گروه بیشتر تحت تأثیر عوامل طبیعی قرار دارند. ارزیابی غلظت عناصر در گروه ۲ نشان‌دهنده حد میانی بین دو گروه ۱ و ۳ هست که می‌تواند منعکس‌کننده تأثیر عوامل انسان‌زاد و عوامل زمین‌زاد در کنترل پارامترهای شیمیایی منابع آب منطقه مورد مطالعه باشد. در شکل ۷ نقشه موقعیت گروه‌های سه‌گانه بر روی نقشه نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اکثر نمونه‌های گروه ۱ در محدوده روستایی و شهری واقع شده‌اند. بنابراین، افزایش مقدار نیترات در این دسته از نمونه‌ها می‌تواند ناشی از فاضلاب شهری و کودهای حیوانی باشد. اما نمونه‌های گروه ۳ اکثراً در محدوده رودخانه مارون و شبکه آبیاری مارون قرار گرفته‌اند که تحت تأثیر آب-های سطحی بوده و میزان نیترات در این گروه کمتر از دو گروه دیگر می‌باشد.

روش‌های گوناگونی جهت دسته‌بندی داده‌ها وجود دارد اما روش خوشه‌بندی (HCA) یکی از روش‌هایی است که به‌طور گسترده در علوم زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحلیل خوشه‌ای جهت تعیین شباهت نسبی بین پارامترها و ارزیابی داده‌های چند متغیره از جمله ارتباط بین متغیرها، سازمان‌دهی در قالب ساختارهای معنی‌دار و نمایش ترکیب کل آب زیرزمینی یک منطقه در قالب تعدادی خوشه مورد استفاده قرار می‌گیرد (Belkhir et al., 2011). در این مطالعه از روش پیوند Ward استفاده گردید، این روش با استفاده از تجزیه و تحلیل واریانس به بررسی فواصل بین خوشه‌ها می‌پردازد. پس از انجام HCA نمونه‌های مورد مطالعه در ۳ دسته مجزا قرار گرفتند (شکل ۶). همان‌طور که مشاهده می‌شود این سه گروه هر کدام به ۲ زیرگروه دیگر تقسیم شدند. به‌طوری کلی بیشتر نمونه‌ها در گروه ۲ قرار دارند. در گروه ۱ مقدار کلرید، سدیم، بی‌کربنات و هدایت الکتریکی کم‌تر است ولی مقدار سولفات و نیترات در اکثر نمونه‌ها بیشتر هست که می‌تواند به دلیل فعالیت‌های



شکل ۶- دندروگرام نمونه‌های منابع آب دشت بهبهان مهرماه ۱۴۰۰.

Figure 6 - Dendrogram of water source samples from the Behbahan plain October, 2021.

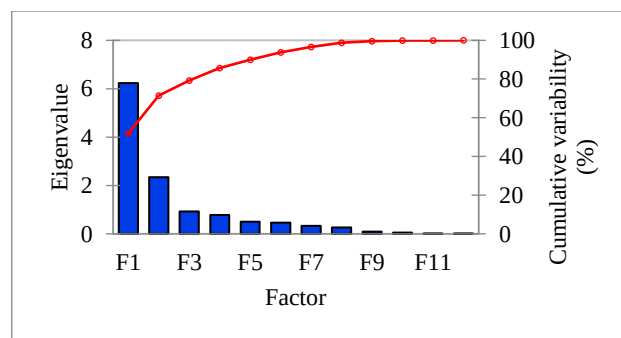


شکل ۷- نقشه موقعیت گروه‌های سه‌گانه حاصل از روش HCA.
Figure 7 - Map of the locations of the three groups obtained from the HCA method.

روش تحلیل عاملی (PCA)

فاکتور استخراج شد که سه فاکتور اول بیشترین تأثیر را بر کیفیت منابع آب منطقه دارند. رابطه فاکتورها با پارامترهای هیدروشیمیایی در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳، در فاکتور ۱ عوامل متعدد طبیعی و شیمیایی افزایش غلظت عناصر در منابع آب زیرزمینی نقش دارند. مثل تبخیر زیاد در قسمت‌های میانی منطقه مورد مطالعه که عمق برخورد به آب زیرزمینی کمتر از ۵ متر است و یا فرآیند تبادل یونی معکوس و انحلال رسوبات آهکی و سازندهای تبخیری. در فاکتور ۲ نیتрат نقش پررنگی دارد که می‌تواند ناشی از پساب شهری و کودهای شیمیایی در محدوده مورد مطالعه باشد. همچنین نقش سدیم و کلرید در فاکتور دوم (جدول ۳) ناشی از تبخیر زیاد در منطقه، انحلال رسوبات تبخیری (سازند گچساران) و ماندگاری زیاد آب در آبخوان است.

PCA جهت ایجاد یک ساختار در یک مجموعه چند متغیره و به‌منظور تحلیل عامل‌های اصلی برای شناخت ساختارهای پنهان به‌کار گرفته می‌شود. این روش بر مبنای مؤلفه‌هایی که بردار ویژه بزرگتر یا مساوی ۱ باشد، استوار است (Belkhir et al., 2011). در این مطالعه به‌منظور ارزیابی تعداد عوامل اصلی تأثیرگذار بر کیفیت منابع آب زیرزمینی از روش PCA استفاده گردید. ابتدا به منظور بررسی مناسب بودن داده‌ها برای تحلیل فاکتورهای اصلی از آزمون KMO استفاده شد. بر اساس پارامترهای فیزیکی شیمیایی (۱۳ پارامتر) ۳ فاکتور اصلی و مهم شناسایی گردید که نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که ۳ فاکتور نخست حدود ۷۵ درصد بر کیفیت منابع آب منطقه مؤثر هستند. همچنین اسکری پلات فاکتورهای اصلی و فرعی در شکل ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ۱۲



شکل ۸- نمودار اسکری پلات و درصد تغییرات بردار ویژه عامل‌ها در نمونه‌های مورد مطالعه.

Figure 8 - Scree plot and percentage of variation of the principal component factors in the studied samples.

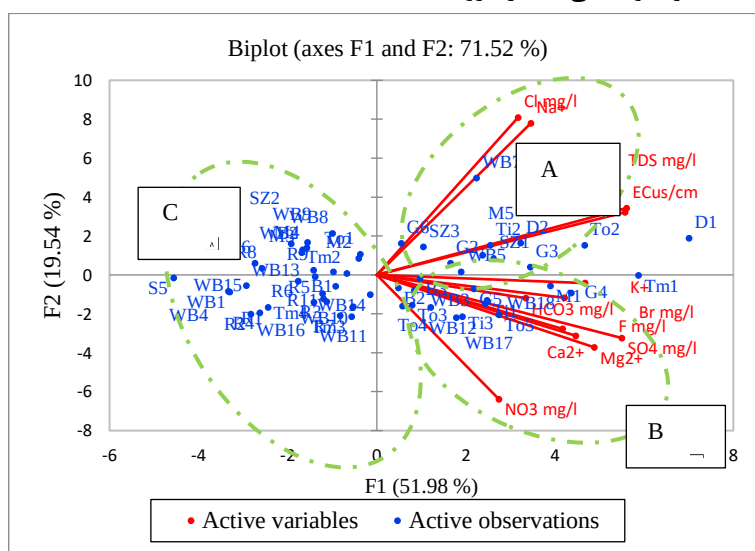
جدول ۳- نتایج آنالیز عامل‌ها پس از چرخش واریماکس.

Table 3 - Results of factor analysis after Varimax rotation.

Factor	F1	F2	F3
ECus/cm	0.838	0.119	0.008
TDS mg/l	0.828	0.104	0.020
Ca2+	0.531	0.098	0.007
Mg2+	0.635	0.139	0.025
Na+	0.318	0.609	0.000
K+	0.582	0.002	0.012
Cl mg/l	0.268	0.656	0.004
HCO3 mg/l	0.298	0.014	0.447
SO4 mg/l	0.805	0.105	0.031
NO3 mg/l	0.200	0.408	0.033
F mg/l	0.463	0.077	0.185
Br mg/l	0.473	0.014	0.162
Eigenvalue	6.238	2.345	0.932
Variability (%)	51.984	19.540	7.766
Cumulative %	51.984	71.524	79.290

قرار گرفته‌اند، دارای مقدار نیترات بالایی می‌باشند. در گروه C که نمونه‌های شبکه خیرآباد، نمونه‌های اطراف محدوده مورد مطالعه و آب‌های سطحی قرار دارند، دارای مقدار نیترات کمتری هستند. 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.

نمودار بایوپلات مجموع دو عامل اول برای نمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌های آب در ۳ گروه توزیع شده‌اند. در گروه یک مهمترین پارامترهای تأثیرگذار یون‌های کلرید و سدیم هستند که با توجه به لیتولوژی منطقه منعکس‌کننده تأثیر سازندهای تبخیری و رسوبات دانه‌ریز رسی در منطقه مورد مطالعه است (گروه A). در گروه (B) نیترات، سولفات و 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



شکل ۹- نمودار بایوپلات نمونه‌های مورد مطالعه.

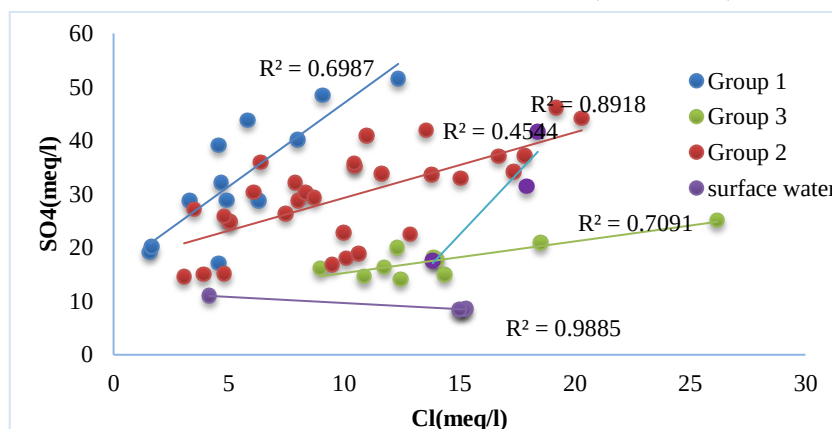
Figure 9 - Bi-plot diagram of the studied samples.

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین و کمترین همبستگی به ترتیب در نمونه‌های آب سطحی و نمونه‌های گروه ۲ برقرار است. با توجه به اینکه یون‌های سولفات به طور

ارزیابی منشأ نیترات با استفاده از نمودارهای ترکیبی

در شکل ۱۰ نمودار تغییرات کلرید و سولفات و همچنین میزان همبستگی در نمونه‌های مورد مطالعه نمایش داده شده

معمول از سازندهای تبخیری شامل ژپس و انیدریت منشأ می‌گیرند، لذا همبستگی بیشتر بین سولفات و کلرید در نمونه‌ها می‌تواند ناشی از انحلال ژپس باشد. همچنین کودهای



شکل ۱۰- نمودار سولفات در برابر کلرید نمونه‌های مورد مطالعه.

Figure 10 - Sulfate versus chloride diagram of the studied samples.

در صورتی که مقدار غلظت بالای Cl^- با مقدار NO_3/Cl نسبتاً کم اغلب نشان‌دهنده آلودگی فاضلاب و همچنین کودهای حیوانی است (Martinez et al., 2021). در شکل ۱۲ تغییرات نسبت NO_3/Cl در برابر غلظت Cl ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌ها تحت تأثیر آلودگی فاضلاب و پساب-های دامی قرار دارند. همبستگی بسیار ضعیف بین نیتрат و کلرید می‌تواند نقش فاضلاب به عنوان منبع اصلی نیترات در منابع آب را تأیید کند (Alex et al., 2021). با توجه به همبستگی بالای بین کلرید و سدیم بخش زیادی از کلرید از سازندهای تبخیری منطقه منشأ می‌گیرند. کلرید حاصل از کودهای شیمیایی معمولاً با افزایش قابل توجهی در غلظت NO_3 همراه است، در نمونه‌های مورد مطالعه این مورد مشاهده نمی‌شود و در اکثر نمونه‌ها غلظت زیاد کلرید با NO_3 نسبتاً کم همراه است. آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی عمیق با مقدار کلرید بالا و غلظت نیترات بسیار کم معمولاً تحت تأثیر منابع طبیعی از جمله بارش و نیتروژن آلی خاک می‌باشند (Guo et al., 2020).

نمودار ترکیبی نسبت کلرید به برمید در برابر کلرید (Br/Cl)

به علت ماهیتی که برمید و کلرید دارند کمتر تحت تأثیر واکنش با عناصر دیگر قرار می‌گیرند و این یون‌ها شاخص مفیدی جهت شناسایی منشأ آلودگی‌های انسانی می‌باشند (Panno et al., 2006). به منظور تعیین منشأ و تکامل آب‌های

نسبت NO_3+Cl/HCO_3 (meq/l)

افزایش غلظت نیترات و کلرید آب در برابر کاهش بیکربنات کلسیم حاکی از نقش فعالیت‌های انسان‌زاد در افزایش مقدار نیترات می‌باشد (Liu et al., 2004). در شکل ۱۱ تغییرات NO_3+Cl/HCO_3 (meq/l) در برابر مقدار کل املاح جامد (TDS) نمونه‌ها نشان داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات TDS در گروه ۱ در محدوده بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ قرار دارد و مقدار NO_3+Cl/HCO_3 (meq/l) در این گروه بین ۱ تا ۲/۵ می‌باشد در گروه ۲ تغییرات TDS بین ۱۵۰۰ تا ۳۵۰۰ است و تغییرات NO_3+Cl/HCO_3 (meq/l) بین ۱/۵ تا ۴ است در گروه ۳ تغییرات NO_3+Cl/HCO_3 (meq/l) بین ۲/۵ تا ۸/۵ است و مقدار TDS در این گروه بین ۱۶۰۰ تا ۳۷۰۰ میلی گرم در لیتر متغیر است. با توجه به شکل ۱۲ مقدار همبستگی این دو پارامتر برای گروه‌های مختلف نمونه آب نسبتاً بالا می‌باشد که منعکس کننده نقش فعالیت‌های انسان‌زاد در افزایش نسبت NO_3+Cl/HCO_3 (meq/l) در منابع آب منطقه باشد.

نسبت 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. Cl^- حاصل از کودهای شیمیایی با افزایش میزان غلظت NO_3 همراه است،

را شامل می شود که تأثیر ناچیز فعالیت های انسان زاد در این دسته از نمونه ها را منعکس می کند. منشأ نیترات در این گروه به احتمال زیاد ناشی از منابع طبیعی منطقه و فعالیت های باکتریایی می باشد. در شکل ۱۵ پراکندگی نمونه هایی با میزان نیترات بیشتر از حد استاندارد (بیشتر از ۵۰ میلی گرم بر لیتر) و نیترات کمتر (نیترات بین ۳ تا ۲۰ میلی گرم بر لیتر) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود پراکندگی نمونه ها در سطح محدوده مطالعاتی با تغییرات مقدار نیترات هم خوانی دارد به طوری که نمونه های با مقدار نیترات بیشتر، در محدوده شهر بهبهان و یا در مکان های با فعالیت های کشاورزی، دامداری و صنعتی قرار گرفته اند.

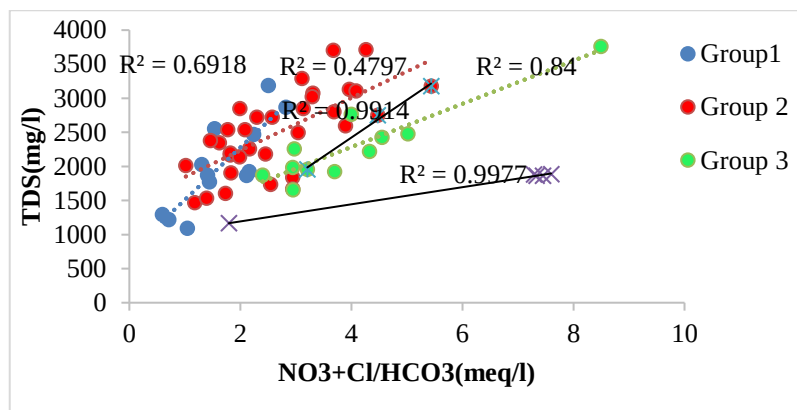
نمودار ترکیبی فلورید و نیترات (F و NO₃)

فلورید به طور طبیعی در منابع آبی بخصوص منابع آب زیرزمینی مشاهده می شود. غلظت فلورید در منابع آب به طور طبیعی از ۰/۱ تا ۷/۲ میلی گرم در لیتر متغیر است (Dandge and Patil, 2022). نفوذ آب و انحلال سنگ های حاوی فلورید، بارش کم و تبخیر زیاد در مناطق نیمه خشک باعث افزایش مقدار فلورید در آب های زیرزمینی می شود (Machender et al., 2014). از جمله فعالیت های غیرطبیعی که منجر به تولید و افزایش فلورید در منابع آب زیرزمینی می شوند، می توان به صنایع آجری و کودهای شیمیایی اشاره کرد. ارزیابی مقدار فلورید در نمونه های مورد مطالعه نشان داد که در تعدادی از نمونه ها مقدار این عنصر از حد استاندارد تعیین شده برای آشامیدن (WHO) بالاتر می باشد. به منظور ارزیابی منشأ طبیعی و یا انسان زاد فلورید از نمودار ترکیبی بین NO₃ و F استفاده گردید (شکل ۱۶). بر اساس این نمودار، با افزایش غلظت نیترات مقدار فلورید نیز در تعدادی از نمونه ها افزایش یافته است. همبستگی بین نیترات و فلورید نشان دهنده نقش فعالیت های انسان زاد در آلودگی منابع آب منطقه می باشد.

زیرزمینی و سطحی و همچنین شناسایی منشأ آلودگی آب های زیرزمینی ناشی از فاضلاب شهری و کودهای شیمیایی و حیوانی از نسبت (Cl/Br) استفاده می گردد بررسی انجام شده توسط (Davis et al., 1998) نشان داد که نسبت کلرید به برومید در نمونه های بارش بین ۵۰ تا ۱۰۰، نمونه های تحت تأثیر فاضلاب شهری بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ و در نمونه های تحت تأثیر انحلال سازندهای تبخیری بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ است. با توجه به شکل ۱۳، نمونه های گروه ۳ و تعدادی از نمونه های گروه ۲ (نمونه های آب سطحی و زهاب کشاورزی) تحت تأثیر انحلال سنگ های تبخیری می باشند. همچنین نسبت کلرید به برمید در اکثر نمونه های گروه ۱ و تعدادی از نمونه های گروه ۲ بین ۳۰۰ تا ۶۰۰ هستند که منعکس کننده تأثیر فاضلاب های شهری و کودهای حیوانی در منطقه مورد مطالعه می باشند. تعدادی از نمونه ها در بین دو محدوده انحلال سازندهای تبخیری و آلودگی های شهری قرار می گیرند که نشان دهنده تأثیر هر دو منبع بر روی نمونه های مورد مطالعه در محدوده می باشد.

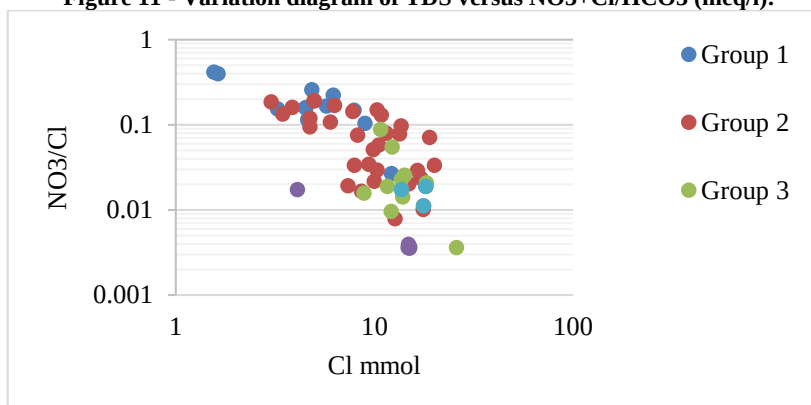
تغییرات غلظت NO₃ در برابر کلرید Cl

در شکل ۱۴ تغییرات نیترات در برابر کلرید در سه گروه مختلف ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، نمونه هایی که دارای مقدار نیترات بیشتری هستند (گروه ۱) اغلب در محدوده شهر بهبهان و اطراف روستاهای منطقه و یا در خروجی منطقه مورد مطالعه واقع شده اند که این امر حاکی از تأثیر پساب های شهری و روستایی در میزان غلظت نیترات نمونه ها می باشد. ارزیابی نمونه هایی که مقدار نیترات در آن ها بین ۸ تا ۲۰ میلی گرم بر لیتر است (گروه ۲)، نشان می دهد که اکثر نمونه های چاه در خارج از محدوده شهری و در نزدیکی رودخانه های مارون و خیرآباد و همچنین شبکه مارون قرار دارند که نشان دهنده تأثیر آب های سطحی در این دسته از نمونه ها است. در گروه ۳ نمونه های آب رودخانه و شبکه مارون و خیرآباد و همچنین نمونه ای که از چاه عمیق برداشت شده اند



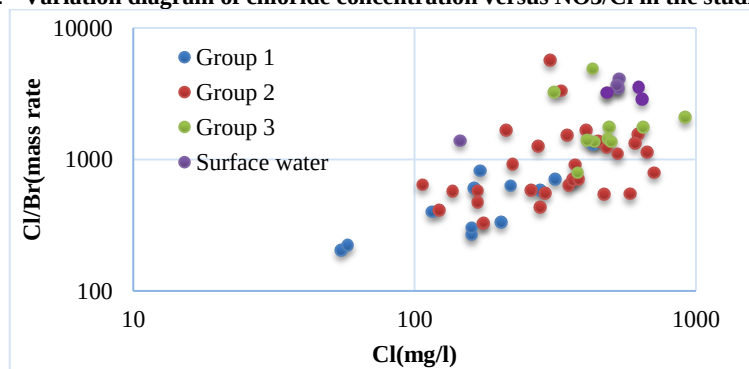
شکل ۱۱- نمودار تغییرات TDS در برابر $\text{NO}_3+\text{Cl}/\text{HCO}_3$ (meq/l).

Figure 11 - Variation diagram of TDS versus $\text{NO}_3+\text{Cl}/\text{HCO}_3$ (meq/l).



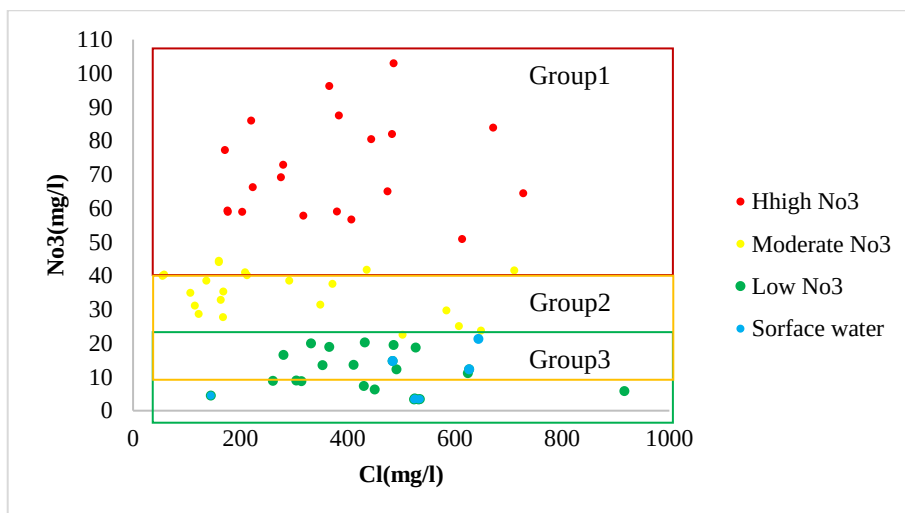
شکل ۱۲- نمودار تغییرات غلظت کلرید در برابر NO_3/Cl در نمونه‌های مورد مطالعه.

Figure 12 - Variation diagram of chloride concentration versus NO_3/Cl in the studied samples.



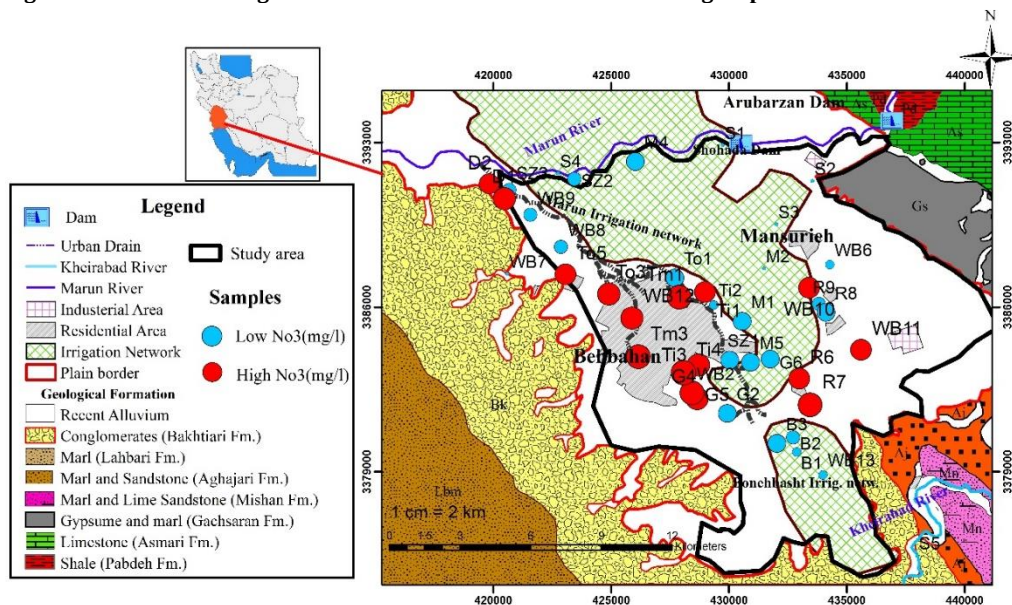
شکل ۱۳- تغییرات غلظت کلرید در برابر Cl/Br در نمونه‌های مورد مطالعه.

Figure 13 - Variation of chloride concentration versus Cl/Br in the studied samples.



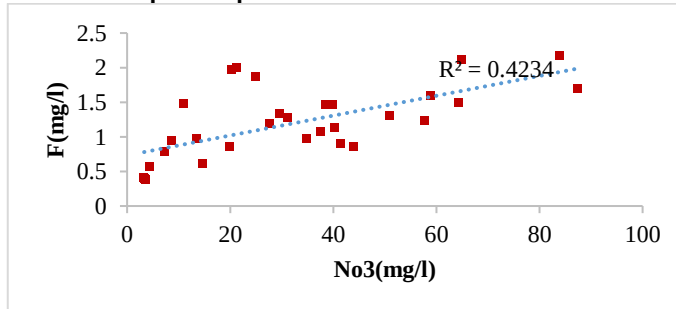
شکل ۱۴- نمودار تغییرات کلرید در برابر نیترات در گروه‌های مختلف منابع آب محدوده مطالعاتی.

Figure 14 - Variation diagram of chloride versus nitrate in different groups of water sources in the study area.



شکل ۱۵- نقشه پراکندگی نمونه‌ها و تغییرات غلظت نیترات نمونه‌های آب.

Figure 15 - Distribution map of samples and nitrate concentration variations in water samples.



شکل ۱۶- نمودار ترکیبی فلوئورید در برابر نیترات در نمونه‌های مورد مطالعه.

Figure 16 - Combined diagram of fluoride versus nitrate in the studied samples.

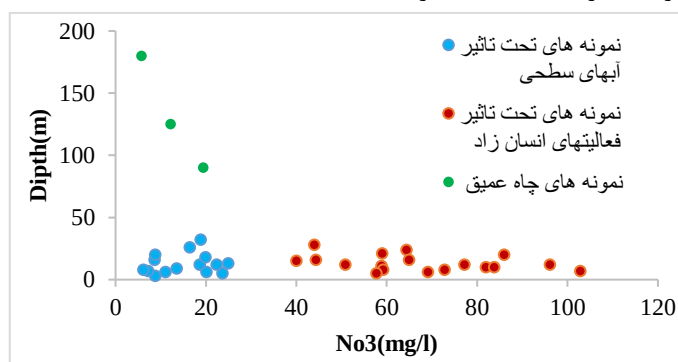
رابطه بین غلظت نیترات و عمق چاه

ارزیابی قرار گرفت (شکل ۱۷). همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌هایی که تحت تأثیر آب‌های سطحی قرار دارند و دارای عمق میانگین ۱۳ متر هستند، دارای مقدار نیترات بین ۷ تا

در این پژوهش رابطه بین غلظت نیترات و عمق چاه‌های نمونه‌برداری به‌منظور ارزیابی تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد مورد

بین ۴۰ تا ۱۰۳ میلی گرم در لیتر متغیر است که این امر ناشی از تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد در افزایش مقدار نیترات در منابع آب منطقه می‌باشد. همچنین در سه نمونه از چاه‌هایی که دارای عمقی بین ۹۰ تا ۱۸۰ متر هستند مقدار نیترات به شدت کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد که در عمق‌های زیاد تأثیر آلودگی نیترات ناشی از فعالیت‌های انسانی کاهش می‌یابد.

۲۵ میلی گرم در لیتر می‌باشند. با توجه به نقشه شکل ۱۵ که در بالا ارائه شده است، موقعیت این چاه‌ها در منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده این است که اکثر این چاه‌ها در محدوده شبکه مارون و شبکه خیرآباد و تعدادی نیز در محدوده رودخانه مارون قرار گرفته و تحت تأثیر آب‌های سطحی قرار دارند بنابراین مقدار نیترات در این نمونه‌ها نسبتاً کم می‌باشد. اما در نمونه‌هایی که در محدوده شهر بهبهان و روستاهای حومه آن قرار گرفته‌اند و عمق آن‌ها کمتر از ۲۰ متر است، غلظت نیترات



شکل ۱۷- رابطه بین تغییرات نیترات و عمق چاه‌های مورد مطالعه.

Figure 17 - Relationship between nitrate variation and well depth in the studied wells.

نمونه‌های WB17، WB12، WB18، TM1 و R7 حاصل شده است. بر اساس جدول ۴ محدوده شهر بهبهان دارای شاخص آلودگی متوسط می‌باشد که منعکس‌کننده نقش فعالیت‌های انسان‌زاد از جمله نفوذ و تأثیر پساب‌های شهری در منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه هست. همچنین در قسمت شرقی محدوده مطالعاتی مقدار شاخص در حد متوسط است که طی بازدیدهای صحرایی مشخص شد که در این منطقه فعالیت‌های کشاورزی، دامداری و صنعتی فعال است و باعث افزایش آلودگی در این بخش از منطقه می‌شوند. کمترین میزان شاخص آلودگی نیترات در محدوده رودخانه مارون و رودخانه خیرآباد می‌باشد که این امر ناشی از نفوذ آب‌های سطحی و افزایش کیفیت منابع آب منطقه می‌باشد. به‌طور کلی در اکثر محدوده مطالعاتی میزان شاخص آلودگی نیترات در طبقه با آلودگی کم و طبقه با آلودگی متوسط قرار دارند.

شاخص آلودگی نیترات (NPI)

آلودگی نیترات موجود در آب را می‌توان با استفاده از شاخص آلودگی نیترات (NPI) مورد ارزیابی قرار داد. استفاده از شاخص NPI نشان‌دهنده آلودگی نیترات در آب‌های زیرزمینی به دلیل فعالیت‌های انسانی است که از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود (Obeidat et al., 2012):

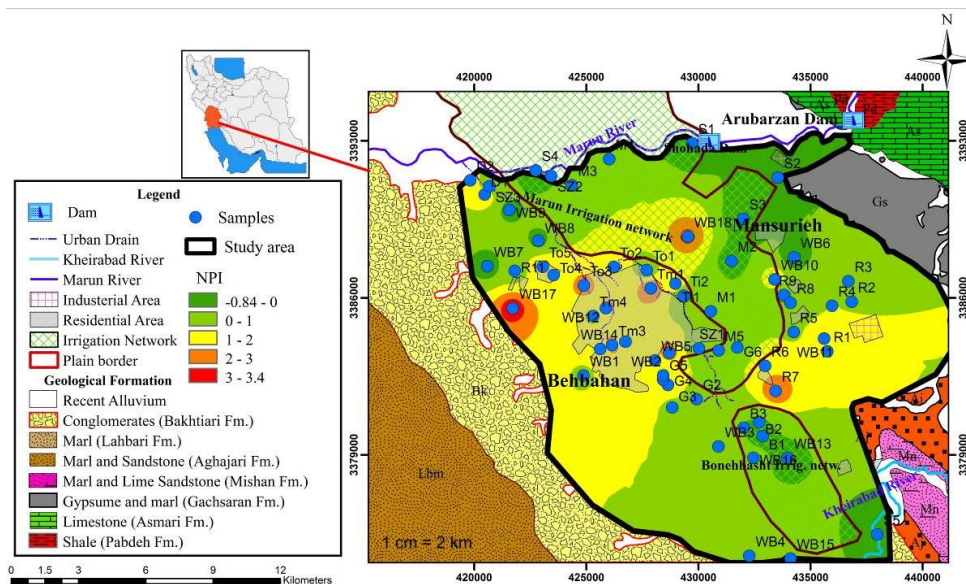
$$NPI = Cs - HVA / HVA \quad (1)$$

در این رابطه، Cs برابر با مقدار نیترات اندازه‌گیری شده در نمونه‌های موردنظر است و HVA حداقل مقدار نیتراتی است که توسط فعالیت‌های انسان‌زاد وارد آب‌های زیرزمینی می‌شود و مقدار آن ۲۰ میلی گرم در لیتر در نظر گرفته شده است (Spalding Exner, 1993; Obeidat et al., 2012). در شکل ۱۸ نقشه پراکندگی شاخص آلودگی نیترات نمایش داده شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین آلودگی در

جدول ۴- کلاس‌بندی شاخص آلودگی آب زیرزمینی.

Table 4 - Classification of groundwater pollution index.

NPI Value	<0	0-1	1-2	2-3	>3
Classification	No pollution	Low pollution	Moderate pollution	High pollution	Very high pollution



شکل ۱۸- نقشه شاخص آلودگی نیترات منابع آب منطقه مورد مطالعه.

Figure 18 - Nitrate pollution index map of water sources in the study area.

نتیجه گیری

نتایج آنالیز شیمیایی ۶۳ نمونه آب از منابع مختلف در منطقه مورد مطالعه نشان داده است که مقدار غلظت نیترات اکثر نمونه‌ها در بخش‌های شهری زیاد است که منعکس‌کننده فاضلاب‌های شهری در چاه‌های کم‌عمق منطقه می‌باشد. در تعدادی از چاه‌های اطراف روستاها که برای مصارف صنعتی و دامداری حفاری شده‌اند، نیز مقدار نیترات ناشی از کودهای حیوانی زیاد می‌باشد و باعث آلودگی منابع آب زیرزمینی گردیده است. تکنیک‌های آماری نشان می‌دهد که سه مؤلفه اصلی کنترل‌کننده شیمی آب منطقه می‌باشد. انحلال سازندهای تبخیری، ورود فاضلاب‌های شهری و کودهای شیمیایی و حیوانی از جمله مهمترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت منابع آب منطقه هستند. با استفاده از روش‌های آماری نمودار (بایوپلات) نمونه‌های مورد مطالعه در سه گروه مجزا قرار گرفتند. در گروه ۱ مقدار سدیم و کلرید در اکثر نمونه‌ها زیاد می‌باشد و منعکس‌کننده تأثیر سازندهای زمین‌شناسی منطقه در کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی منطقه می‌باشد. در گروه ۲ مقدار نیترات همراه با یون‌های سولفات و کلسیم غالب است که ناشی از ورود فاضلاب‌های شهری در منابع آب منطقه است. گروه سوم تأثیر رودخانه‌های مارون و خیرآباد در بهبود کیفی منابع زیرزمینی از طریق شبکه‌های آبیاری را نشان می‌دهد به‌طوری‌که نمونه‌های این گروه از کیفیت بهتری نسبت به گروه‌های ۱ و ۲ برخوردارند. به‌منظور شناسایی منشأ نیترات از

نمودارهای ترکیبی استفاده گردید. مقدار غلظت زیاد Cl^- در برابر مقدار $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ نسبتاً کم، در اکثر نمونه‌ها نشان‌دهنده تأثیر فاضلاب و همچنین کودهای حیوانی بر کیفیت منابع آب منطقه می‌باشد. نمونه‌هایی که دارای غلظت نیترات بیشتر از حد استاندارد برای مصارف شرب هستند اکثراً در محدوده شهر بهبهان و اطراف روستاهای منطقه و یا در خروجی منطقه قرار دارند که حاکی از تأثیر پساب‌های شهری و روستایی بر منابع آب است. بررسی مقدار غلظت نیترات و عمق چاه‌های نشان می‌دهد که نمونه‌ها در سه دسته مجزا قرار دارند. نمونه‌هایی که در محدوده رودخانه مارون و خیرآباد و شبکه‌های مارون و خیرآباد واقع شده‌اند و دارای عمق میانگین ۱۳ متر هستند، مقدار نیترات آن‌ها بین ۳ تا ۲۵ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد ولی در ماهایی که در محدوده شهری و روستایی منطقه مورد مطالعه قرار دارند و دارای همین عمق میانگین (۱۳ متر) هستند، میزان نیترات بین ۴۰ تا ۱۰۳ میلی‌گرم متغیر است که تأیید کننده نقش فعالیت‌های انسان‌زاد در افزایش مقدرات نیترات منابع آب منطقه است. شاخص آلودگی نیترات نیز نشان داده است که فعالیت‌های انسان‌زاد در بخش‌های میانی و شرقی آبخوان باعث افزایش آلودگی نیترات شده است.

and GIS techniques; Applied Water Science, 12(1), p. 7.

Davis, S.N., Whittemore, D.O., Fabryka-Martin, J., 1998. Uses of chloride/bromide ratios in studies of potable water. Groundwater, 36(2): 338-350.

Freeman, J.T., 2007. The use of bromide and chloride mass ratios to differentiate salt-dissolution and formation brines in shallow groundwaters of the Western Canadian Sedimentary Basin. Hydrogeology Journal, 15: 1377-1385.

Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. Science 17:1088-1090.

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 p, 125364.

Hem, J.D., 1985., Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water: U.S. Geological Survey, 263p.

Li, P., Qian, H., Howard, K.W. and Wu, J., 2015. Building a new and sustainable "Silk Road economic belt". Environmental Earth Sciences, 74: 7267-7270.

Lü, X., Han, Z., Li, H., Zheng, Y. and Liu, J., 2022. Influence of urbanization on groundwater chemistry at Lanzhou Valley basin in China. Minerals, 12(3), p. 385.

Li, W., Wang, M.Y., Liu, L.Y. and Yan, Y., 2015. Assessment of long-term evolution of groundwater hydrochemical characteristics using multiple approaches: A case study in Cangzhou, northern China. Water, 7(3): 1109-1128.

Han, G. and Liu, C.Q., 2004. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China. Chemical Geology, 204(1-2): 1-21.

Mir, S.A., Qadri, H., Beigh, B.A., Dar, Z.A. and Bashir, I., 2019. Assessment of nutrient status and water quality index of Rambhara stream, Kashmir Himalaya, India. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 8(3): 172-180.

McLay, C.D.A., Dragten, R., Sparling, G. and Selvarajah, N., 2001. Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches. Environmental pollution, 115(2):191-204.

Torres-Martínez, J.A., Mora, A., Mahlkecht, J., Daesslé, L.W., Cervantes-Avilés, P.A. and Ledesma-Ruiz, R., 2021. Estimation of nitrate pollution sources and transformations in groundwater of an intensive livestock-agricultural area (Comarca Lagunera),

منابع

رشیدی، م.، حسینی، ا. س.، ۱۴۰۲. ارزیابی کیفیت هیدروژئوشیمیایی و تعیین منشأ یون‌های آب رودخانه قلیان منطقه قالیکوه لرستان. هیدروژئولوژی، ۶ (۱): ۱۱۳-۱۳۶.

کلانتری، ن.ا.، شیخ زاده، ع.، محمدی، ه.، چقازردی، ز.، ۱۹۳۳. ارزیابی وضعیت هیدروژئوشیمی آب زیرزمینی آبخوان عقیلی با تأکید بر روش‌های آماری چند متغیره. هیدروژئولوژی، ۶ (۲): ۹۵-۱۰۵.

Abascal, E., Gómez-Coma, L., Ortiz, I., Ortiz, A., 2022. Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. Science of the total environment, 810:1-25.

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

Bahrami, M., Zarei, A.R., Rostami F., 2020. Temporal and spatial assessment of groundwater contamination with nitrate-by-nitrate pollution index (NPI) and GIS (case study: Fasarud Plain, southern Iran). Environ Geochem Health 42:3119-3130.

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

Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., Savard, M.M., 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. Journal of Hydrology, 353: 294-313.

Chadha, D.K., 1999. A new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. Journal of Hydrogeology 7:431-439.

Chen, J.Y., Tang, C.Y., Yu, J.J., 2006. Use of ^{18}O , 2H and ^{15}N to identify nitrate contamination of groundwater in a wastewater irrigated field near the city of Shijiazhuang, China. Journal of Hydrology, 326: 367-378.

Davis, J C., 1986. Statistics and data analysis in geology. John Wiley & Sons Inc New York, 646p.

Ducci, D., Della Morte, R., Mottola, A., Onorati, G., Pugliano, G., 2019. Nitrate trends in groundwater of the Campania region (southern Italy). Environmental Science and Pollution Research, 26(3): 2120-2131.

Dandge, K P., Patil, S.S., 2022. Spatial distribution of ground water quality index using remote sensing

- Rawat, K. S., Jeyakumar, L., Singh, S. K., Tripathi, V. K., 2019. Appraisal of groundwater with special reference to nitrate using statistical index approach. *Groundwater for Sustainable Development*, 8: 49–58.
- Steinhorst, R.K., Williams, R.E., 1985. Discrimination of Groundwater Sources using Cluster Analysis, MANOVA, Canonical Analysis and Discriminant Analysis. *Water Resources Research*, 21: 1149-1156.
- Sun, J., Li, Z., Xue, L., Wang, T., Wang, X., Gao, J., Nie, W., Simpson, I.J., Gao, R., Blake, D.R., Chai, F., 2018. Summertime C1-C5 alkyl nitrates over Beijing, northern China: Spatial distribution, regional transport, and formation mechanisms. *Atmospheric Research*, 204: 102-109.
- Spalding, R.F., Exner, M.E., 1993. Occurrence of Nitrate in Groundwater—A Review. *Journal of Environmental Quality*, 22: 392-402.
- Ward, M.H., Jones, R.R., Brender, J.D., De Kok, T.M., Weyer, P.J., Nolan, B.T., Villanueva, C.M., Van Breda, S.G., 2018. Drinking water nitrate and human health: an updated review. *International journal of environmental research and public health*, 15(7), p.1557.
- Edition, F., 2011. Guidelines for drinking-water quality. *WHO chronicle*, 38(4): 8-104.
- Yidana, S.M., Banoeng-Yakubo, B., Akabzaa, T.M., 2010. Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 58(2):220-234.
- Zhang, Y., Shi, P., Li, F., Wei, A., Song, J., Ma, J., 2018. Quantification of nitrate sources and fates in rivers in an irrigated agricultural area using environmental isotopes and a Bayesian isotope mixing model. *Chemosphere*, 208:493-501.
- Zhang, F., Huang, G., Hou, Q., Liu, C., Zhang, Y., Zhang, Q., 2019. Groundwater quality in the Pearl River Delta after the rapid expansion of industrialization and urbanization: Distributions, main impact indicators, and driving forces. *Journal of Hydrology*, 577, p.124004.
- combining major ions, stable isotopes and MixSIAR model. *Environmental Pollution*, 269 p.115445.
- Merchán, D., Sanz, L., Alfaro, A., Pérez, I., Goñi, M., Solsona, F., Hernández-García, I., Pérez, C. and Casalí, J., 2020. Irrigation implementation promotes increases in salinity and nitrate concentration in the lower reaches of the Cidacos River (Navarre, Spain). *Science of the Total Environment*, 706, p.135701.
- Machender, G., Dhakate, R., Narsimha Reddy, M., 2014. Hydrochemistry of groundwater (GW) and surface water (SW) for assessment of fluoride in Chinnaeru river basin, Nalgonda district, (AP) India. *Environmental Earth Sciences*, 72: 4017-4034.
- Nair, I.S., Renganayaki, S. P., Elango L., 2013. Identification of Seawater Intrusion by Cl / Br Ratio and Mitigation through Managed Aquifer Recharge in Aquifers North of Chennai, India *Jgw* 2: 155–62.
- Ogrinc, N., Tamse, S., Zavadlav, S., Vrzel, J., Jin, L., 2019. Evaluation of geochemical processes and nitrate pollution sources at the Ljubljansko polje aquifer (Slovenia): a stable isotope perspective. *Sci. Total Environ.* 646:1588-1600.
- Obeidat, M.M., Awawdeh, M., Al-Rub, F.A., Al-Ajlouni, A., 2012. An innovative nitrate pollution index and multivariate statistical investigations of groundwater chemical quality of Umm Rijam Aquifer (B4), North Yarmouk River Basin, Jordan. *Vouddouris K, Voutsas D. Water Quality Monitoring and Assessment. Croatia: InTech*, 169-188.
- 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., Randriantsivry, J.R., Rajaobelison, J., Fareze, L.P., Rakotomalala, C.U., Razafitsalama, F.A., Rasolofonirina, M., 2020. Nitrate contamination of groundwater in Ambohidrapeto–Antananarivo-Madagascar using hydrochemistry and multivariate analysis. *Applied Water Science*, 10(7): 1-13.