



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۱ ■ شماره ۴ ■ زمستان ۱۴۰۰

صفحه‌های ۸۸۳-۸۶۷

DOI: 10.22059/jwim.2022.332514.932

مقاله پژوهشی:

بررسی وضعیت هیدروشیمیایی آبخوان دشت خوی و تعیین منشأ آنومالی‌های احتمالی

الهام اکبری^۱، عطاءاله ندیری^{۲*}، فریبا صادقی اقدم^۳

۱. دانشجوی دکتری آب زیرزمینی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲. دانشیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳. پژوهش‌گر پسادکتری، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۶

چکیده

دشت خوی یکی از مراکز اصلی صنعتی و کشاورزی استان آذربایجان غربی می‌باشد که آب مورد نیاز کشاورزی، صنعت و شرب این دشت عموماً توسط آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود، لذا کیفیت آب‌های در دسترس این دشت بسیار مهم به نظر می‌رسد. کیفیت آب‌های زیرزمینی عموماً وابسته به فرایندهای هیدروژئوشیمیایی حاکم بر سیستم منابع آبی می‌باشد. به این منظور برای درک بهتر فرایندهای هیدروژئوشیمیایی در آبخوان دشت خوی، روش‌های گرافیکی و آماری چندمتغیره برای تفسیر نتایج به دست آمده از آنالیز تعداد ۵۴ نمونه برداشت شده از منابع آب زیرزمینی در شهریورماه سال ۱۳۹۵ به کار برده شد و مشاهده شد که مقدار آرسنیک بیش تر از حد استاندارد جهانی برای شرب است. نتایج دیاگرام پایپر و دورو نشان داد که تیپ غالب آب زیرزمینی در منطقه کرنات‌ه کلسیک و منیزیک، کلروره سدیک و تیپ مختلط است. در آنالیز خوشه‌ای سلسله‌مراتبی، نمونه‌ها در دو خوشه اصلی و پنج زیرخوشه قرار گرفتند. نمودارهای استیف مربوطه، نشان‌گر هشت گروه کلی با منشأ شور، آهکی، بازالتی، ترکیب آذرین و آهکی، ترکیب شور و شیل، ترکیب شیل و آهک (مارن) و اختلاطی تشخیص داده شد. نتایج روش تحلیل عاملی، مدلی سه مؤلفه‌ای را برای داده‌ها پیشنهاد نمود. در مؤلفه نخست سدیم، کلر، سولفات، بی‌کربنات، کلسیم و منیزیم به هم وابسته بودند، در مؤلفه دوم نترات و آرسنیک با همدیگر ارتباط داشتند، درحالی که در مؤلفه سوم آهن به‌طور جزئی با بقیه در ارتباط بود. عامل‌های اول و سوم منشأ زمین‌زاد و بخشی از عامل دوم، منشأ زمین‌زاد و بخشی منشأ انسان‌زاد دارد.

کلیدواژه‌ها: آرسنیک، روش‌های آماری چندمتغیره، روش‌های گرافیکی، فرایندهای هیدروشیمیایی.

Hydrochemical characteristics investigation of Khoy plain aquifer and determination of probable anomalies sources

Elham Akbari¹, Ataallah Nadiri^{2*}, Fariba Sadeghi Aghdam³

1. Ph.D. Student in Hydrogeology, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. Associate Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

3. Ph.D. in Hydrogeology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Received: October, 18, 2021

Accepted: January, 06, 2022

Abstract

Khoy plain is one of the main industrial and agricultural centers in West Azerbaijan province that the water requirement for agriculture, industry and drinking water is generally supplied by groundwater. Therefore, the quality of available water seems very important in this area. Groundwater quality is generally dependent on hydrogeochemical processes that regnant the water resources system. For this purpose, in order to better understand the hydrochemical processes in Khoy plain aquifer, graphical and multi-variable statistical methods were used to interpret the results obtained from the analysis of 54 samples taken in September 2016 from groundwater resources. The results of the Piper diagram and the expanded Durov diagram shows that the groundwater type in the region is mostly calcium and magnesium carbonate, sodium chloride and the mixed type. In hierarchical cluster analysis, the samples are placed in two main clusters and five sub-clusters. The Stiff graphs identified eight general groups with saline, calcareous, basaltic, igneous and calcareous composition, Saline shale composition, shale and lime composition (Mame) and mixed type. The results of the factor analysis method suggested a three-component model for the data. In the first component, sodium, chloride, sulfate, bicarbonate, calcium and magnesium were interdependent; in the second component, nitrate and arsenic were linked; while in the third component, iron was partially related to the others. The first and third factors have geogenic sources and the second factor shows both geogenic and anthropogenic sources for groundwater contaminants.

Keywords: Arsenic, Hydrochemical processes, Graphical methods, Multivariate statistical methods.

مقدمه

منابع آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و شاید اصلی‌ترین منابع آب شیرین هر کشور است، که متأسفانه بی‌توجهی به آن موجب نشر و انتقال آلاینده‌های مختلف به این منابع شده است (Asghari Moghadam, 2010). ترکیب شیمیایی یون‌های محلول در آب متأثر از واکنش‌های مختلفی است که در تقابل بین آب و مواد آبخوان اتفاق می‌افتد. شناسایی و پایش کیفیت منابع آب زیرزمینی و شناخت عوامل مؤثر بر آن جایگاه ویژه‌ای در مدیریت آبخوان دارد. کیفیت آب زیرزمینی براساس تشکیل‌دهنده‌های شیمیایی، بیولوژیکی، محتوای رسوبی و دمای آن تعیین می‌شود (Hounslow, 1995) که تحت تأثیر فرایندهای طبیعی و انسان‌زاد قرار دارند.

به‌کارگیری یک روش طبقه‌بندی مناسب برای تقسیم‌بندی نمونه‌های آب از نظر شیمیایی به گروه‌های مختلف مشابه، ابزاری کارآمد برای توصیف محیط‌های هیدرولوژیکی است. امروزه روش‌های متنوعی برای رده‌بندی نمودارهای هیدروشیمیایی وجود دارد که شامل روش‌های گرافیکی (نمودارهای پایپر، استیف، انگشتی و نمودارهای ترکیبی) و روش‌های آماری (آماره توصیفی، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تجزیه و تحلیل خوشه‌ای) است (Khanoranga, 2019; Akosua Loh. et al., 2021; Xiao et al., 2021). که تجزیه و تحلیل خوشه‌ای به روش‌های متنوعی از جمله (HCA)^۱، (KMC)^۲ و (FKM)^۳ می‌باشد. از این روش‌ها در بررسی اطلاعات کیفی آب و تقسیم‌بندی نمونه‌ها به گروه‌های متمایزی که از نظر زمین‌شناسی و آماری معنی‌دار باشند استفاده می‌شود (Stossel, 1997).

روش‌های گرافیکی، روش‌های عمومی برای تفسیر فرایندهای هیدروشیمیایی هستند. دیاگرام پایپر برای تعیین تیپ آب زیرزمینی قابل استفاده است (Piper, 1944).

دیاگرام بسط داده‌شده دورو، تیپ‌های مختلف آب زیرزمینی و بعضی از فرایندهای هیدروژئوشیمیایی از جمله تعویض یونی، تعویض یونی معکوس، انحلال ساده و اختلاط آب‌هایی با کیفیت متفاوت را بهتر از دیاگرام پایپر نشان می‌دهد (Singhal et al., 1999). دیاگرام استیف نمونه‌های آنالیزشده را با نمونه‌های استاندارد مقایسه کرده و از این طریق تأثیر لیتولوژی روی آب زیرزمینی را آشکار می‌کند (Stiff, 1951).

روش‌های گرافیکی برای تفسیر و نمایش پارامترهایی مانند سیلیس، نترات و آرسنیک و غیره نمی‌توانند استفاده شوند، درحالی‌که روش‌های آماری چندمتغیره می‌توانند بین پارامترهای فیزیکوشیمیایی مختلف مانند هدایت الکتریکی، دما و pH ارتباط برقرار کرده و رابطه بین متغیرها و نمونه‌ها را کشف کنند، بنابراین روش‌های آماری چندمتغیره توانایی رفع محدودیت‌های روش گرافیکی برای تفسیر فرایندهای هیدروژئوشیمیایی را دارند (Dalton, 1978).

از مهم‌ترین روش‌های آماری چندمتغیره می‌توان به روش‌های آنالیز خوشه‌ای سلسله‌مراتبی و تحلیل عاملی اشاره کرد. آنالیز خوشه‌ای سلسله‌مراتبی به‌عنوان تکنیک طبقه‌بندی برای بررسی تیپ هیدروژئوشیمیایی منابع آب زیرزمینی و تفسیر منشأ آن‌ها استفاده می‌شود (Cloutier et al., 2008). تحلیل عاملی نیز برای بررسی منشأ هیدروژئوشیمیایی تیپ‌های مختلف آب زیرزمینی استفاده می‌شود (Liu et al., 2003 و Voundouris et al., 2000). اطلاع از وضعیت کیفی منابع آبی به‌وسیله تعیین عوامل اصلی مؤثر بر هیدروشیمی آب‌ها و شاخص کیفیت آب این امکان را فراهم می‌سازد تا ضمن استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده، در مواقع لزوم برای تأمین سلامت این منبع مهم و حیاتی بتوان راه‌کارهای مدیریتی مناسب را به‌کار برد (Nadiri et al., 2017).

شاخص آلودگی فلزات سنگین را در این دشت بررسی کردند. ایشان شش عنصر سنگین و فرعی را در آب‌های زیرزمینی منطقه آزمایش کرده و نتایج را با دیاگرام‌های شیمیایی تفسیر کردند و نشان دادند که میانگین شاخص آلودگی فلزات سنگین پایین‌تر از حد بحرانی است. ولی این شاخص در بعضی مناطق بالا است که تهدیدی برای سلامت انسان است. غلظت بالای فلزات سنگین می‌تواند مرتبط با انحلال سازندهای زمین‌شناسی، استخراج معدن سنگ آهن، فعالیت واحدهای صنعتی و تغلیظ عناصر در آب زیرزمینی در نتیجه تبخیر بالا در مناطق با عمق کم سطح ایستابی باشد.

در طی سال‌های اخیر چندین مقاله از وضعیت هیدروشیمیایی منطقه خوی گزارش شده است. در مطالعه‌ای که به منظور تشخیص وضعیت هیدروژئوشیمیایی و روند شوری آبخوان دشت خوی صورت گرفته است از روش‌های آماری و هیدروشیمیایی استفاده شد. داده‌های مربوط به تعداد ۳۶ نمونه آبی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سه عامل مؤثر بر هیدروشیمی منطقه شامل تأثیر سازندهای زمین‌شناسی (عامل اول و دوم) و تأثیر فعالیت‌های انسانی (عامل سوم) شناسایی شد. با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC شاخص اشباع کانی‌های اصلی آب زیرزمینی و تعامل آب و سنگ تعیین شد. با توجه به شاخص اشباعیت بالای کانی‌های دولومیت، کلسیت، انیدریت، فلوریت و ژپس نسبت به دیگر کانی‌ها، تأثیر سازندهای میوسن و پلیوسن با محتوای کنگلومرای قرمز، ماسه، آهک، مارن و قطعات آتشفشانی و آندزیتی ائوسن در بین آن‌ها بر آب زیرزمینی مشخص شد (Jalali & Asghari Moghadam, 2013). هم‌چنین در ادامه این مطالعات براساس نتایج حاصل از تحلیل عاملی و خوشه‌بندی منشأ اصلی آرسنیک منطقه مطالعاتی زمین-زاد معرفی شد که مربوط به عوامل زمین‌شناسی، سنگ‌ها

در سال‌های اخیر روش‌های آماری چندمتغیره برای تحلیل کیفیت و مطالعه هیدروشیمی آب زیرزمینی توسط پژوهش‌گران مختلفی استفاده شده است. Nadiri et al. (2017) از آنالیز خوشه‌ای سلسله‌مراتبی و تحلیل عاملی برای بررسی وضعیت هیدروشیمیایی آبخوان دشت تسوج بهره جستند. در این تحقیق سه فاکتور اصلی کنترل‌کننده کیفیت آب زیرزمینی دشت تسوج مشخص شد که عامل اول و دوم زمین‌زاد و عامل سوم انسان‌زاد معرفی شدند. در پژوهش‌گران دیگری برای بررسی منشأ شوری و آرسنیک در آب‌های زیرزمینی و سطحی حوضه آبریز سد سهند هشتروند از روش تحلیل عاملی استفاده شده است. در این پژوهش، منشأ بیش‌ترین مواد محلول آب دره عین‌آباد و رودخانه آملالو، سازند قرمز فوقانی و انحلال تشکیلات گچی و نمکی معرفی شد و دو آنومالی منابع آبی منطقه یعنی آرسنیک و شوری، زمین‌زاد و مرتبط با سازندهای زمین‌شناسی منطقه شناخته شدند (Nadiri et al., 2015; al., 2018).

در پژوهش دیگری جهت تعیین منشأ شوری آب زیرزمینی دشت ملکان تعداد ۲۷ نمونه آب زیرزمینی مورد آنالیز هیدروشیمیایی قرار گرفت و با بهره‌گیری از مطالعات ژئوفیزیکی، دیاگرام‌های هیدروشیمیایی، نسبت‌های مختلف یونی و تحلیل عاملی؛ منشأ شوری در قسمت‌های انتهایی دشت به رسوبات خیلی دانه‌ریز ارتباط داده شد. سرعت حرکت آب در برخورد با این رسوبات کم شده و قرارگیری سطح ایستابی آب در عمق کم باعث افزایش تبخیر و افزایش شوری آب زیرزمینی می‌شود. هم‌چنین از یاد برداشت آب از آبخوان احتمال بالا آمدگی آب شور در زیر لایه‌های رسی را افزایش می‌دهد (Norouzi, 2019).

Asghari Moghadam et al. (2020) ویژگی‌های

هیدروشیمیایی آب زیرزمینی آبخوان دشت نغده و

بر هیدروشیمی منابع آب زیرزمینی دشت خوی و منشأ برخی آنومالی‌ها نظیر آرسنیک و نیترات، بعد از بررسی‌های دقیق صحرایی و تعداد بیش‌تری نمونه‌گیری از منابع آبی به‌طور متوازن از همه نقاط دشت با روش‌های استاندارد و آنالیز دقیق نمونه‌ها، از روش‌های گرافیکی و آماری چندمتغیره به‌منظور دستیابی به نتایج دقیق‌تر استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی دشت خوی واقع در شمال استان آذربایجان غربی، با مساحت تقریبی ۶۶۵ کیلومتر مربع بخشی از حوضه آبریز رود ارس و دریای خزر می‌باشد. این حوضه از جنوب به محدوده سلماس و از غرب به مرز کشور ایران و ترکیه محدود می‌شود. جلگه خوی در دامنه جنوب شرقی فلات ارمنستان واقع شده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۱۳۹ متر است و از همه جلگه‌های اطراف خود حتی از دریاچه ارومیه هم پست‌تر است. شیب این جلگه در جهت جنوب غربی به شمال شرقی است.

گسل‌های اصلی منطقه روند شمال غرب- جنوب شرقی داشته و از نوع امتدادلغز و رانده است و احتمالاً باعث بروز برخی از چشمه‌ها شده است. Nabavi (1976) در تقسیم‌بندی خود بخش عمده آذربایجان را جزو زون البرز-آذربایجان می‌داند. از نظر تقسیمات واحدهای زمین‌ساختی ایران، خوی جزو زون خوی-مهاباد بوده و رخساره‌های منطقه شامل رخساره‌های رسوبی، آذرین، دگرگونی و آبرفت‌های عهد حاضر می‌باشند (Nabavi, 1976; Mahabghods, 1985) که در کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه تأثیر دارند. منابع آب سطحی منطقه به‌طور عمده شامل دو رودخانه

و رسوبات حاصل از فرسایش آن‌ها تعیین شد. انحلال کانی‌های موجود در سازند میوسن (مارن، شیل، ماسه و کنگلومرای قرمز) و پلیوسن (کنگلومرای با میان‌لایه‌های مارن و ماسه) بر آرسنیک آب زیرزمینی این ناحیه تأثیر داشته است (Asghari Moghadam & Jalali, 2015). در مطالعه‌ای به‌منظور تخمین مقادیر آرسنیک در کحدوده آبخوان دشت خوی از روش استنتاج فازی و مقایسه آن با روش‌های درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، کریجینگ و کوکریجینگ استفاده و تعیین شد که روش فازی در درون‌یابی مکانی انعطاف‌پذیری و راحتی و سرعت بیش‌تری هم از نظر اجرای کاربر و هم به لحاظ نرم‌افزاری دارد (Houshanghi et al., 2015).

کاهش نزولات جوی، گسترش کشاورزی و صنعت، افزایش تقاضای آب، افزایش تعداد حفر چاه‌ها، بهره‌برداری بیش‌ازحد و در نتیجه، افت سطح آب زیرزمینی، احتمال آلودگی منابع آبی دشت خوی را افزایش داده است. با توجه به این‌که تاکنون مطالعات جامعی در رابطه با زمین‌آمار، هیدروشیمی، تعیین آنومالی‌ها و عناصر سنگین و نیز منشأ آنومالی‌ها در دشت خوی انجام نشده است و یک مورد انجام‌شده نیز به‌دلیل تعداد کم نقاط نمونه‌برداری و بعضی روش‌های متفاوت در بررسی و تفسیر نتایج آزمایش‌های ویژه در رابطه با عنصر آرسنیک با این پژوهش نتایج متفاوتی دارد. سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2008) میزان قابل‌قبول برای آرسنیک در آب آشامیدنی را ۱۰ ppb اعلام کرده، درحالی‌که هنوز استاندارد ایران ۵۰ ppb است که این مقدار بالاتر از حد استاندارد و برای سلامتی بشر خطرناک است (Nadiri et al., 2018). با توجه به گزارش‌های قبلی در مورد مشاهده آنومالی‌های عنصر آرسنیک در منابع آبی دشت خوی (Asghari Moghadam & Jalali, 2015; Houshanghi et al., 2015) به‌منظور تعیین عوامل مؤثر

نمونه برداری و آنالیز داده‌ها

در پژوهش حاضر، ابتدا اطلاعات اولیه درباره منابع آبی و وضعیت زمین‌شناسی منطقه جمع‌آوری شد. سپس برای تکمیل مطالعات و بررسی هیدروشیمی منطقه مطالعاتی تعداد ۵۴ نمونه آب زیرزمینی در شهریورماه ۱۳۹۵ از چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، چشمه‌ها و قنات دشت خوی جمع‌آوری شد (شکل ۲). در هر ایستگاه تعداد دو نمونه با استفاده از ظروف نیم‌لیتری پلی‌اتیلنی، به‌منظور آنالیز یون‌های اصلی و دیگری برای عناصر کمیاب برداشت شد. برای اندازه‌گیری عناصر کمیاب به‌منظور جلوگیری از رسوب احتمالی آن‌ها، با افزودن چند قطره اسید نیتریک ۰/۱ نرمال، pH آن پایین آورده شد.

پارامترهای اسیدیته (pH) و هدایت هیدرولیکی (EC) نمونه‌ها به‌صورت صحرائی و آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. آنالیز یون‌های اصلی نمونه‌ها در آزمایشگاه آب منطقه‌ای ارومیه و آنالیز عناصر کمیاب و سنگین در شرکت آب و فاضلاب ارومیه انجام شد. با استفاده از نتایج آنالیز به‌دست‌آمده، خطای بالانس یونی برای نمونه‌ها محاسبه شد. نتایج نشان‌گر این بود که این مقادیر برای تمام نمونه‌ها کم‌تر از پنج درصد بوده است که تأییدکننده صحت نتایج آنالیزها است.

علاوه بر نمونه‌های برداشت‌شده، اطلاعات هیدروشیمیایی مربوط به منابع آب سطحی و زیرزمینی در منطقه برای سال‌های مختلف جهت بررسی‌های کیفی از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی جمع‌آوری شد. سختی کل (TH)، نسبت جذب سدیم (SAR) و درصد جذب سدیم (%Na) از روی دیگر پارامترها با کمک نرم‌افزار Chemistry محاسبه شد.

روش‌های آماری چندمتغیره مانند آنالیز خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA) و تحلیل عاملی (FA) به‌طور گسترده به‌عنوان روش‌هایی کارآمد در آنالیز کیفی داده‌های آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (Nadiri et

al., 2013). در این مطالعه از روش‌های آماری چندمتغیره با استفاده از نرم‌افزار Spss V.21 استفاده شده است. برای آنالیز داده‌ها با نرم‌افزارهای Rockworks و AQQA و همچنین برای تعیین تیپ و منشأ آب‌های زیرزمینی به جهت تصویرکشیدن سیر تکاملی هیدروشیمی آب زیرزمینی از نمودارهای پایپر، استیف و دورو بهره گرفته شده است. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل (۲) و ویژگی‌های پارامترهای اندازه‌گیری شده مربوط به هیدروشیمی دشت خوی در جدول (۱) ارائه شده است.

طبق مطالعات صورت‌گرفته و مقایسه مقادیر غلظت‌های اندازه‌گیری‌شده، مشاهده شد که غلظت یون‌های کلر، سدیم، آهن و آرسنیک به‌ترتیب با بیش‌ترین مقادیر ۱۰۹۸/۸، ۹۴۷/۵۱، ۱/۴۸ mg/L و ۲۰۹/۸۹ µg/L دارای غلظت بیش‌تر از حد استاندارد جهانی شرب (با مقادیر استاندارد به‌ترتیب ۲۵۰، ۲۰۰، ۰/۳ و ۰/۰۱) در برخی از نمونه‌ها هستند (WHO, 2008). افزایش کلر و سدیم در قسمت‌های مرکزی دشت به‌دلیل ریزدانه‌بودن رسوبات است. در کل می‌توان عامل اصلی این آنومالی‌ها را در سازندهای زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی جستجو کرد.

روش‌های ارزیابی

روش‌های گرافیکی

به‌منظور بررسی دقیق هیدروشیمی منطقه و منشأ ناهنجاری‌های موجود از روش گرافیکی شامل نمودارهای پایپر و دورو بسط داده‌شده، نمودار الگوی استیف که یکی از روش‌های معمول در بررسی‌های هیدروشیمیایی است به‌کار برده شد.

در دیاگرام پایپر، مقایسه تعداد زیادی داده‌های آنالیزشده براساس غلظت نسبی و نه غلظت واقعی اجزا امکان‌پذیر می‌باشد (Fetter, 1999)، که یکی از روش‌های متداول برای تعیین تیپ آب زیرزمینی است (Piper, 1994).

بررسی وضعیت هیدروشیمیایی آبخوان دشت خوی و تعیین منشأ آنومالی‌های احتمالی

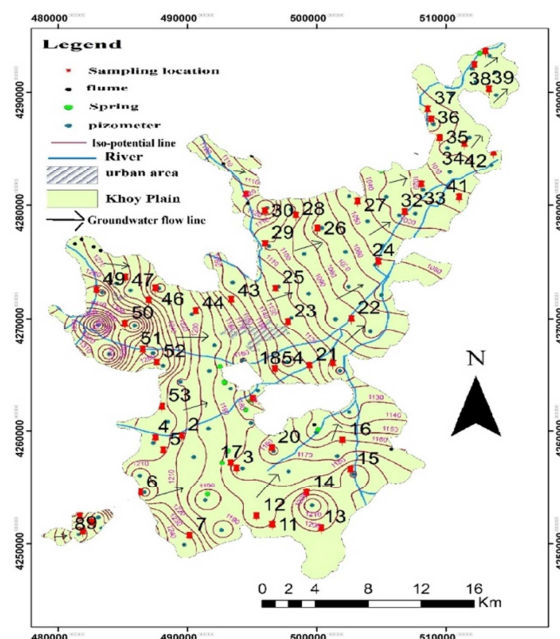


Figure 2. Location of sampling points from Khoy plain aquifer

Table 1. Characteristics of statistical parameters related to Khoy plain hydrochemistry

Factors	Range	Min	Max	Max permissible level (WHO, 2008)	Mean	Standard deviation	Variance	skewness	kurtosis
Ca (mg/L)	656.88	36.72	693.6	300	133.5	112.02	12549.6	2.67	9.6
Mg (mg/L)	386.59	26.74	413.3	30	92.54	71.89	5169.286	2.55	8.4
Na (mg/L)	942.91	4.59	947.51	200	121.56	175.130	30670.6	2.59	7.74
K (mg/L)	39.10	0	39.10	-	7.697	7.693	59.18	2.21	5.86
HCO ₃ (mg/L)	1494.81	30.5	1525.3	-	222.64	286.07	81837.9	2.731	8.071
Cl (mg/L)	1084.7	14.17	1098.8	250	194.73	266.45	70998.4	1.88	2.748
SO ₄ (mg/L)	1176.7	24.05	1200.7	250	175.27	225.20	50716.9	2.73	8.071
NO ₃ (mg/L)	10.16	0.69	10.58	45	4.16	2.024	4.1	0.683	1.03
Fe (mg/L)	1.48	0.05	1.53	0.3	0.51	0.44	0.197	0.90	-0.492
As (µg/L)	209.89	0	209.89	0.01	20.17	41.66	1735.8	3.148	10.292
pH	1.80	6.5	8.3	6.5-8.5	7.573	0.472	0.224	-0.722	-0.381
EC (µmhos/cm)	72501	510	7760	750	1843.3	1370.051	1878300	2.105	5.54

براساس مجموع درصد آنیون‌ها و کاتیون‌ها به میلی‌اکی‌والان بر لیتر رسم می‌شوند. مقادیر آنیون‌ها و کاتیون‌ها در مثلث‌های مربوطه ترسیم و سپس به مکان‌های مورد بررسی در زون‌های اصلی امتداد داده می‌شوند. مزیت این نمودار بر پاییز این است که تیپ‌های مختلف هیدروشیمیایی و بعضی فرایندهای هیدروشیمیایی (تعویض یونی و اختلاط آب‌های با کیفیت متفاوت) را بهتر از دیاگرام‌های پاییز نشان می‌دهد و علاوه بر آن میدان اصلی وسیع‌تری دارند و می‌توان ترکیب، منشأ و

در دیاگرام استیف یا نمودارهای پترن، تمرکز نسبی یون‌های اصلی به میلی‌اکی‌والان بر لیتر روی محورهای موازی افقی پلات شده و سپس با اتصال خطوط به هم به صورت اشکال چندضلعی پدید می‌آید که برای هر نمونه به صورت جداگانه نشان داده می‌شود. در این نمودار نیز همانند دیاگرام پاییز، سه رخساره سدیمی، منیزیمی، کلسیمی و سه تیپ بی‌کربناته، سولفات‌ه و کلروره برای انواع آب‌ها در نظر گرفته می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر نتایج آنالیزها، دیاگرام دورو

فرایندهای مؤثر در ترکیب نمونه‌های آب را مورد مطالعه قرار داد.

روش‌های آنالیز چندمتغیره

یکی از روش‌های آماری که در تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات هیدروشیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بررسی میزان همبستگی موجود بین پارامترهای مختلف فیزیکی و شیمیایی است به‌گونه‌ای که ارتباط بین یک جفت از متغیرها مورد بررسی قرار می‌گیرد. خصوصیات آماری داده‌ها و به دنبال آن ماتریس همبستگی متغیرهای اصلی در این مطالعه محاسبه می‌شود. در این قسمت از مطالعه برای بررسی و دسته‌بندی داده‌های هیدروشیمیایی از روش خوشه‌بندی مرتبه‌ای استفاده شده است. در به‌کارگیری خوشه‌بندی مرتبه‌ای از روش Ward's برای اندازه‌گیری تفاوت بین گروه‌ها استفاده شده است. آنالیز خوشه‌ای سلسله‌مراتبی، توانایی نشان‌دادن تأثیر غلظت یون‌ها در طبقه‌بندی نمونه‌ها را دارا است، درحالی‌که روش‌های گرافیکی از این توانایی برخوردار نیستند.

به‌منظور مطالعات هیدروشیمیایی، آلودگی آب‌های زیرزمینی و شناسایی فرایندهای زمین‌زاد و انسان‌زاد مؤثر در آن‌ها، روش تجزیه و تحلیل مولفه‌های اصلی به‌کار برده شد. انطباق مثبت و منفی زیاد بین متغیرها و عامل‌ها براساس بارهای عاملی زیاد به‌طور نسبی نزدیک به ۱ یا ۱- است. علاوه بر این روش چرخشی واریماکس^۶ برای متمایز نمودن متغیرهایی با بار عاملی زیاد (نزدیک به ۱ تا ۱-) از متغیرهایی با بارهای عاملی کم (نزدیک به صفر) اتخاذ شده است (Norouzi, 2019).

نتایج و بحث

نمودار پایپر جهت تعیین تیپ آب زیرزمینی برای

نمونه‌های منطقه مورد مطالعه، براساس درصد یون‌های اصلی و تقسیمات میدان لوزی‌شکل مطابق شکل (۳) ترسیم شد. بر پایه این نمودار، آب زیرزمینی منطقه به‌طور عمده از چهار تیپ مختلف تشکیل شده است. دسته a که در قسمت شش قرار می‌گیرد، نشان‌گر سختی غیرکربناتی، دسته b، نوع اختلاطی را نشان‌گر است و در قسمت نه واقع شده است که هیچ کاتیون و آنیونی در آن غالب نیست، دسته c، نوع قلیایی خاکی-اسیدی ضعیف را نشان می‌دهند که کلسیم آن‌ها زیاد بوده و سختی موقت دارند و اکثر نمونه‌ها در این دسته جای دارند و در قسمت پنج قرار دارد و دسته d، نوع قلیایی-اسیدی قوی را نشان می‌دهد که در قسمت هفت قرار دارد و از آب‌های شور منشأ گرفته است.

نمودارهای Stiff رسم شده شکل (۴) نشان‌گر هشت منشأ کیفی برای نمونه‌ها است. نمونه دو به نمایندگی از نمونه‌های (۲، ۴، ۸، ۲۲، ۴۸) منشأ دولومیتی، نمونه ۱۰ به نمایندگی از نمونه‌های (۱۰ و ۱۱) با منشأ ژئوپس و آهکی، نمونه ۲۴ به نمایندگی از نمونه‌های (۶، ۳، ۱۳، ۲۴ و ۵۱) با منشأ شور، نمونه ۲۵ به نمایندگی از نمونه‌های (۲۱، ۲۵ و ۴۰) منشأ آهکی و نمونه ۲۸ به نمایندگی از نمونه‌های (۷، ۹، ۱۶، ۲۳، ۲۶، ۲۷، ۲۹، ۳۱، ۳۲، ۳۵، ۳۹، ۴۱، ۴۶، ۴۷، ۵۲ و ۵۴) دارای منشأ بازالتی هستند. نمونه ۱۴ نیز به نمایندگی از نمونه‌های (۱۴، ۱۵ و ۳۶) نشان‌گر ترکیب آب‌های شور با شیل، نمونه ۳۳ نیز نمایان‌گر نمونه‌های (۱۲، ۱۹ و ۳۳) با منشأ اختلاط آذرین و آهکی هستند. همچنین نمونه ۴۴ نیز نمایان‌گر اختلاط آهک و شیل که مربوط به مارن است، می‌باشد. بقیه نمونه‌ها نیز منشأ خاصی را نشان نمی‌دهند و از اختلاط آب‌های در تماس با سازندهای مختلف تشکیل شده‌اند. شکل (۴) فرم کلی نمونه‌های منشأ گرفته از محیط‌های مختلف در نمودار استیپ را نشان می‌دهد.

بررسی وضعیت هیدروشیمیایی آبخوان دشت خوی و تعیین منشأ آنومالی‌های احتمالی

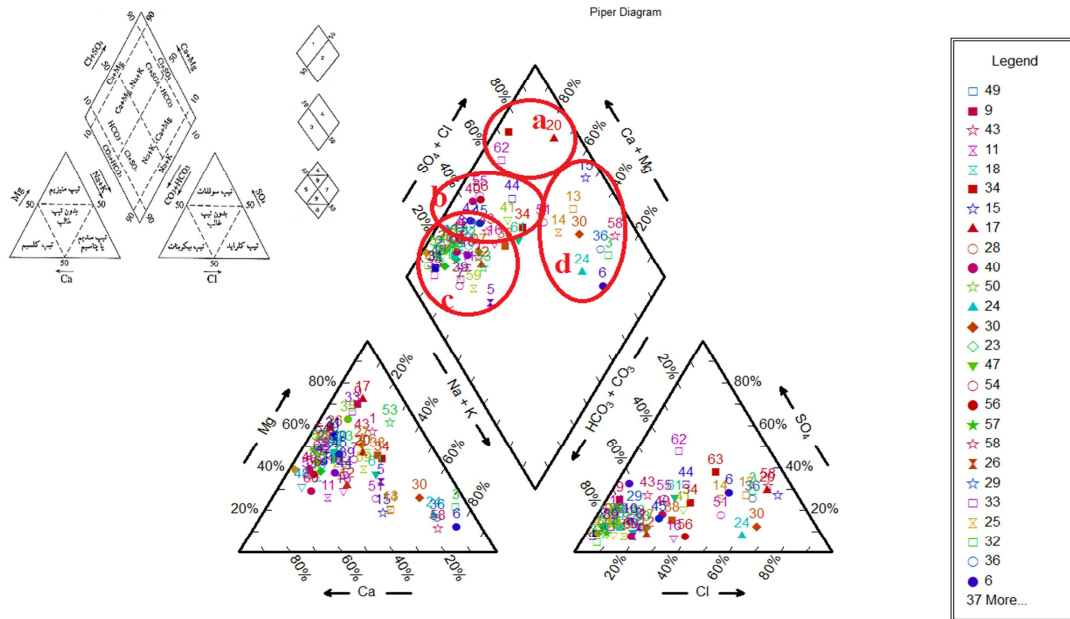


Figure 3. Piper diagram of water samples of the study area according to the main diagram

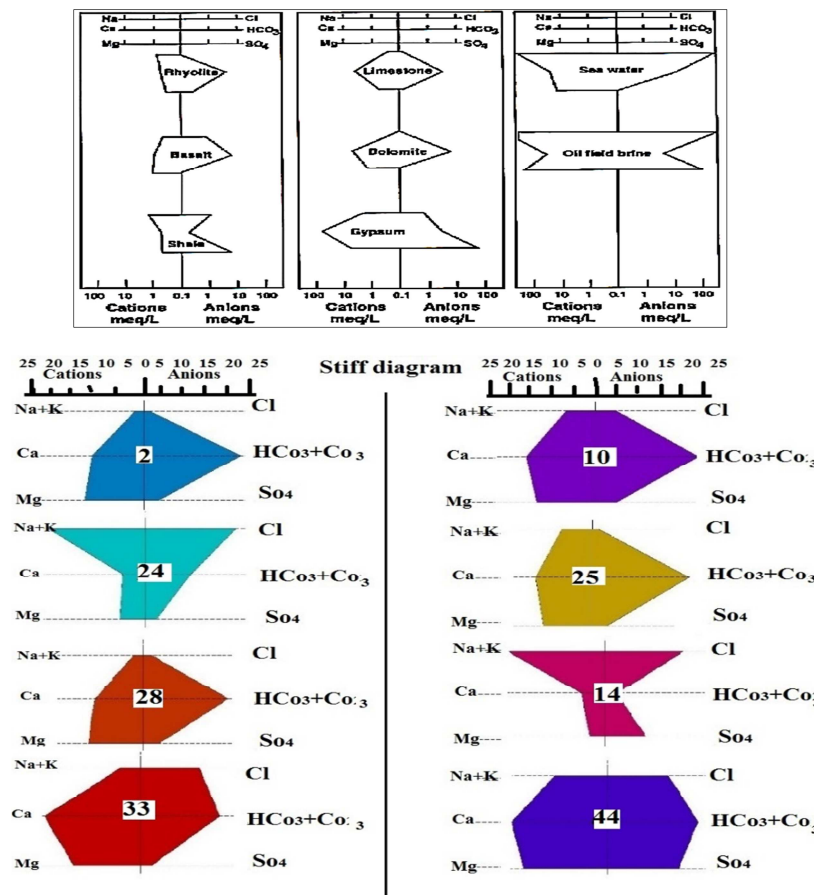


Figure 4. Examples of 8 groups of Stiff diagrams for the dry season of 2016 according to the main diagram

موجود در تقسیم‌بندی نمودار دورو حاصل از هر سه فرایند تعویض یونی، انحلال ساده و ترکیبی هستند. ماتریس همبستگی پارامترهای هیدروژنوشیمیایی جدول (۲) نشان داده شده است، براساس این جدول همبستگی مثبت و بالای کلر با سدیم و پتاسیم نشان‌دهنده منشأ کلر از هالیت و سیلویت است و می‌توان برای بررسی سازوکار شوری آب در برخی نواحی استفاده کرد. همبستگی بالای منفی بی‌کربنات با اسیدیته نشان‌دهنده ظهور کربنات و ناپدیدشدن بی‌کربنات با افزایش pH است. در این تحقیق، همبستگی پیرسون با نرم‌افزار SPSS انجام گرفته است. همبستگی بالا بین کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی وجود دارد، به‌طوری‌که مشاهده می‌شود کلسیم، منیزیم و سدیم همبستگی بالایی با آنیون‌های مربوطه مثل سولفات، کلراید و بی‌کربنات دارد که این مطلب نشان از منشأ انحلال کانی‌های کلسیم‌دار و ژپس می‌باشد.

شکل (۵)، نمودار Durov را که برای نمونه‌های آنالیزشده از منابع آبی منطقه رسم شده نشان می‌دهد. این نمودار به زون‌های مختلفی تقسیم شده است که نمونه‌های رسم‌شده در شش زون تمرکز یافته‌اند. مطابق نمودار، نمونه‌های زون چهار یون‌های سولفات و کلسیم بالایی دارند و نشان‌گر آب‌های تغذیه‌شده در سفره‌های آهکی، گچی و لاوا با فرایند انحلال ساده یا مخلوط در مسیر جریان هستند. در زون دو نمونه‌هایی قرار دارند که یون‌های بی‌کربنات و منیزیم آن‌ها زیاد است و نمایان‌گر آب‌های با منشأ دولومیتی است. در زون سه نمونه‌هایی جای دارند که نشان‌گر تعویض یونی در آب و تأثیر سازنده‌های آذرین هستند. نمونه‌های زون هفت نیز کلسیم و کلر بالا دارند و نمونه‌های زون پنج و شش که اکثر نمونه‌های آبی منطقه در این دو زون واقع شده نشان‌گر آب‌های اختلاطی از چندین منبع هستند. نمونه‌های

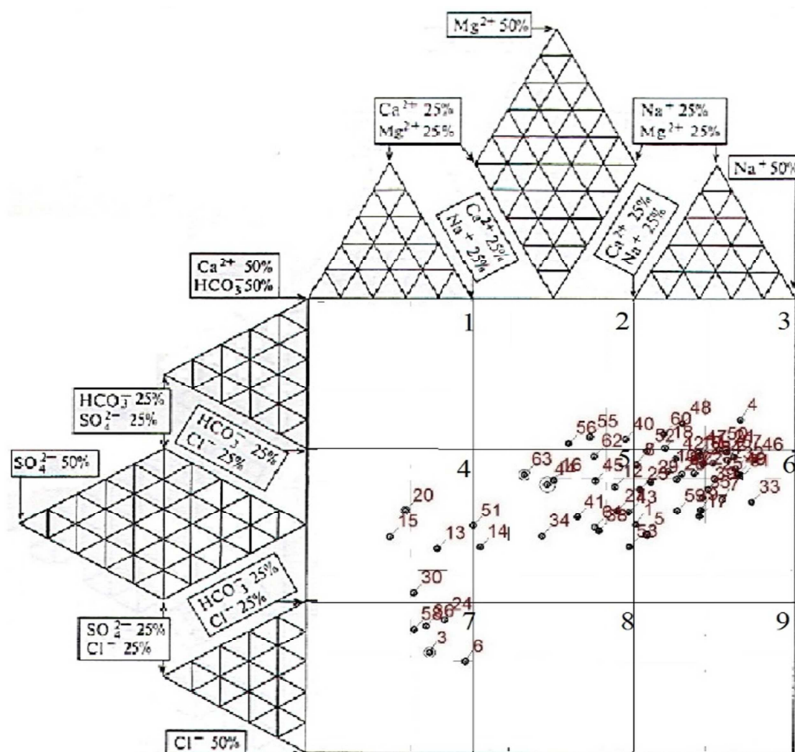


Figure 5. Expanded Durov diagram of water samples in the study area

Table 2. Pearson correlation matrix between standardized samples of Khoy plain groundwater (August, 2016)

Factors	(Na)	(K)	(Ca)	(Mg)	(Cl)	(SO4)	(HCO3)	(As)	(NO3)	(Fe)	(EC)	(pH)
(Na)	1											
(K)	.665**	1										
(Ca)	.168	.453**	1									
(Mg)	.220	.524**	.757**	1								
(Cl)	.857**	.742**	.416**	.476**	1							
(SO4)	.604**	.669**	.673**	.736**	.771**	1						
(HCO3)	.604**	.669**	.673**	.736**	.771**	1.000**	1					
(As)	-.047	-.127	-.034	.040	-.046	-.042	-.042	1				
(NO3)	-.069	-.029	-.221	-.158	.006	-.079	-.079	.205	1			
(Fe)	.051	-.005	-.100	-.055	.027	-.103	-.103	.061	-.016	1		
(EC)	-.136	-.040	.125	.098	-.099	.088	.088	.061	-.024	-.065	1	
(pH)	.010	-.004	-.155	-.190	-.019	-.128	-.128	.013	-.004	.012	-.502**	1

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* Indicates the degree of reliability of the calculation of the correlation coefficient between the data.

* Minimum confidence 0.95% and ** Best assurance 0.99%.

Items with a high correlation are marked with two asterisks that have an R above 0.05.

خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA)، نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه از لحاظ ترکیب آن‌ها در دو خوشه قرار می‌گیرد. نمونه‌هایی با فاصله اتصال کم‌تر از چهار به یک خوشه گروه‌بندی می‌شوند. این آستانه در پنج زیرخوشه از HC1 تا HC5 نام‌گذاری شده است. HC1 و HC2 دارای فاصله اتصال مشابهی است و در نتیجه شباهت هیدروشیمیایی بیش‌تری دارند. همبستگی هیدروشیمیایی نمونه‌های خوشه HC3، HC4 و HC5 نیز قوی است.

براساس نتایج حاصل از روش‌های گرافیکی و آنالیز خوشه‌بندی مرتبه‌ای، نمونه‌های خوشه یک نشان‌گر تکامل هیدروشیمیایی نمونه‌ها است و منشأ زمین‌زاد را نشان می‌دهد. نمونه‌های خوشه دو تحت تأثیر pH و هدایت الکتریکی هستند و مقدار آرسنیک و آهن و نیترات بالایی دارند به‌ویژه زیرخوشه HC3 مقدار آرسنیک زیادی دارد. بالابودن غلظت نیترات مربوط به دفع نامناسب فضولات انسانی و حیوانی و به‌کاربردن کودهای شیمیایی در پرورش محصولات کشاورزی است و منشأ انسان‌زاد دارد. تغییرات مقدار کل مواد جامد محلول (TDS) در آب‌های زیرزمینی ممکن است در خصوص نوع کاربری زمین و حاکی از آلودگی این آب‌ها باشد (Armansson, 1999). جهت درک فعالیت‌های انسانی بر شیمی آب‌های زیرزمینی می‌توان از نمودار TDS در مقابل

بین کاتیون‌هایی که شعاع یونی نزدیک به هم دارند مثل سدیم و پتاسیم، کلسیم و منیزیم همبستگی نزدیکی وجود دارد که می‌تواند جایگزین هم شوند. هم‌چنین بین یون‌هایی مثل کلسیم و پتاسیم نیز همبستگی نزدیکی وجود دارد و می‌تواند تحت‌تأثیر تعویض یونی قرار گیرند که احتمالاً نشان‌گر یک منشأ مشترک می‌باشد و به احتمال بسیار زیاد در ارتباط با ویژگی‌های زمین‌شناسی نقاط نمونه‌برداری است. همبستگی منفی EC با pH نشان‌گر ارتباط معکوس آن‌ها در فرایندهای انحلال است که با افزایش اسیدیته (کاهش pH) انحلال و در نتیجه آن مواد محلول افزایش می‌یابد. همبستگی منفی pH با pH بیشتر عناصر به‌دلیل محدودبودن محدوده تغییرات pH در نمونه‌ها و هم‌چنین افزایش انحلال‌پذیری عناصر به‌ویژه کاتیون‌ها با کاهش pH است.

در طی روند خوشه‌بندی مقدار شباهت یا همانندی بین جفت نمونه‌ها محاسبه می‌شود، به‌طوری‌که شباهت زیاد نمونه‌ها به‌وسیله ضریب همبستگی زیاد و ضریب فاصله کم‌تر مشخص می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل خوشه‌ای نمونه‌ها (شکل ۶) نیز مؤید این عامل است که نمونه‌هایی که دارای مقادیر آرسنیک بالایی هستند در یک گروه قرار می‌گیرند. شکل (۷) نمودار تجزیه خوشه‌ای سلسله‌مراتبی را نشان می‌دهد. با استفاده از تجزیه

براساس R^2 ، فعالیت‌های انسانی مهم‌ترین دلیل حضور نیترات در منطقه می‌باشد. این فعالیت‌ها می‌تواند ناشی از استفاده بیش‌ازحد از کودهای کشاورزی توسط کشاورزان یا نشت فاضلاب سیستم‌های فاضلاب روستایی منطقه باشند.

(Wang *et al.*, 2004). استفاده کرد $(NO_3+Cl)/HCO_3$ به عبارت دیگر مقدار ضریب تعیین (R^2) بالا بین این یونها با TDS نشان‌دهنده آثار فعالیت انسانی در آب‌های زیرزمینی خواهد بود. باتوجه به نمودار شکل (۸) مقدار R^2 بالا برای آب زیرزمینی منطقه وجود دارد ($R^2=0/6$)

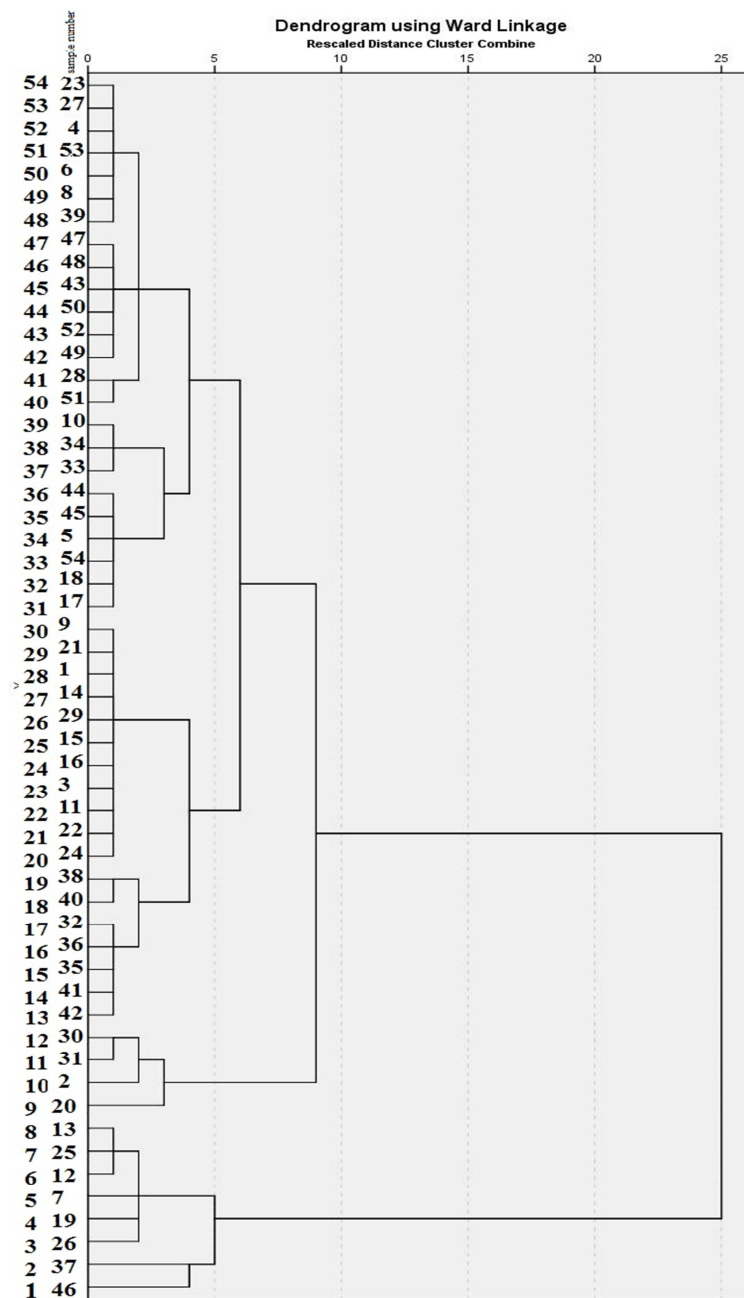


Figure 6. Tree diagram obtained from hierarchical cluster analysis related to water samples in Study area

بررسی وضعیت هیدروشیمیایی آبخوان دشت خوی و تعیین منشأ آنومالی‌های احتمالی

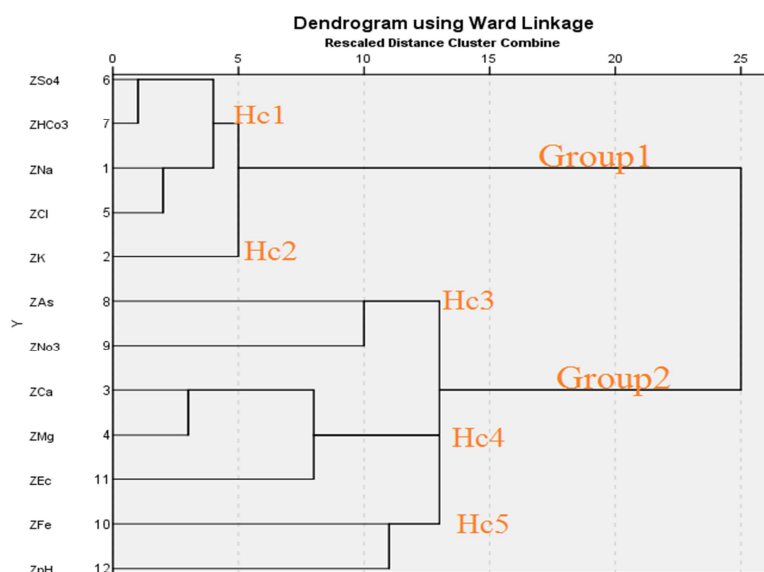


Figure 7. Tree diagram obtained from hierarchical cluster analysis related to water ions in Study area

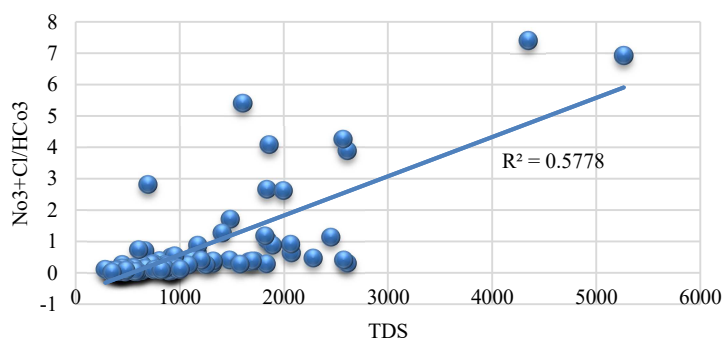


Figure 8. TDS to $(\text{NO}_3 + \text{Cl}) / \text{HCO}_3$ chart

نوع ژئوژنیک است که ناشی از سازندهای زمین‌شناسی مرتبط با ماگماتیسم، دگرگونی-تکتونیک و تخلخل می‌باشد. مشاهدات صحرائی شواهدی از سولفید آرسنیک در شکستگی‌ها و درز و شکاف آهک‌ها، مارن‌ها، ماسه سنگ‌ها و کنگلومرای قرمز فوقانی به صورت پرکننده فضاهای خالی است (Asghari Moghadam & Jalali, 2015).

واکنش‌های جذب آهن توسط اکسید آهن در کنترل واکنش‌ها مهم است. زیرا اکسید آهن به‌طور گسترده در محیط‌های زمین‌شناسی روی اجسام جامد زمین را می‌پوشاند. $\text{As}(\text{III})$ و $\text{As}(\text{V})$ به‌شدت جذب

مقادیر غلظت بالای آرسنیک انطباق قابل‌توجهی با غلظت‌های بالای نترات دارد که می‌تواند چنین تفسیر شود که باطله‌های مواد آلی و کودهای شیمیایی که به داخل رودخانه‌ها زهکشی می‌شود یا به‌صورت نشتی نفوذ می‌کنند و موجب مصرف اکسیژن حل‌شده گردیده که این امر منجر به انحلال کاهشی اکسی‌هیدروکسیدها شده و As آزاد می‌شود. با توجه به این‌که تنها منشأ انسان‌زاد آرسنیک کودهای شیمیایی هستند و در منطقه استفاده محدود از کودهای آرسنیک‌دار عامل اصلی آلودگی حساب نمی‌شود. براساس شواهد موجود منشأ آرسنیک آب زیرزمینی منطقه از

می‌شود. پارامترهای مؤثر در عامل دوم نیترات و آرسنیک و EC و پارامترهای مؤثر در عامل سوم آهن و pH است.

Table 3. Factors analysis results after varimax rotation

Standardized factors	Factors		
	1	2	3
(Na)	0.919	0.003	0.194
(K)	0.823	-0.080	0.105
(Ca)	0.167	-0.139	-0.68
(Mg)	0.279	-0.81	-0.014
(Cl)	0.956	0.031	0.148
(So4)	0.641	-0.022	0.029
(HCo3)	0.641	-0.022	0.029
(As)	-0.056	0.742	0.065
(No3)	-0.014	0.799	-0.116
(Fe)	-0.041	0.059	0.929
(Ec)	-0.149	0.018	-0.246
(pH)	0.031	-0.004	0.267

عامل دوم مربوط به سنگ‌های بازالتی و افیولیت‌ها و مناطق دگرگونی و رورانده است که آرسنیک موجود در کانی‌ها و سنگ‌ها را آزاد و وارد آب زیرزمینی می‌کنند. بخشی از عامل دوم در قسمت‌های میانی دشت که مربوط به نیترات می‌شود نشان‌گر فعالیت‌های کشاورزی و استفاده از کودهای شیمیایی نیتراته است. فعالیت‌هایی در سنگ وجود دارد که در اثر تغییرات pH و فرایندهای اکسایش و کاهش باعث آزاد شدن آهن به آب می‌شود و از پارامترهای مؤثر در عامل سه است. بی‌کربنات معمولاً آنیون غالب در آب‌های زیرزمینی آرسنیک‌دار است. این ماده ممکن است آزاد شدن آرسنات را افزایش دهد (Garcia et al., 2005). اکسیداسیون بیولوژیکی مواد آلی طبیعی باعث تشکیل مقادیر بالایی از بی‌کربنات و ترکیبات نیتروژن‌دار در آب زیرزمینی می‌شود. بخشی از غلظت بی‌کربنات نیز به هوازدگی شیمیایی، انحلال کربنات‌های رسوبی و کاهش نیترات و سولفات و اکسی هیدرواکسیدهای آهن و منگنز ربط داده می‌شود. در شرایط هوازی فسفات منشأ گرفته از کودهای شیمیایی سطحی بر جذب آرسنات توسط گیاهان مؤثر است که از طریق فاضلاب‌ها و تأثیر کودهای شیمیایی فسفات‌ه وارد آب می‌شود.

هیدرواکسیدهای آهن موجود در خاک می‌شود که در این میان اتصال آرسنات به سطوح اکسید آهن در آب با pH اسیدی و نزدیک محیط‌های طبیعی قوی‌تر است (Waychunase, 1993). زیر خوشه HC4 نشان‌گر آب‌های نفوذ کرده در سازندهای آهنی و دولومیتی است که منطقه دارای سازندهای آهنی و دولومیتی زیاد است و هدایت الکتریکی بالایی دارند.

در این مطالعه از آنالیز فاکتوری برای پیدا کردن تأثیر فاکتورهای مختلف بر وضعیت هیدروشیمیایی دشت خوی استفاده و هم‌چنین ارتباط بین فاکتورها و متغیرهای مختلف مشخص شده است. در ابتدا داده‌های مورد استفاده استاندارد شده و سپس عوامل از آن‌ها استخراج شد. براساس نتایج حاصل از تحلیل عاملی، عواملی با مقادیر بیش‌تر از یک شامل سه فاکتور بود که جهت تحلیل و تفسیر فرایندهای هیدروشیمیایی در دشت خوی استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل عاملی در جدول (۳) ارائه شده است. از میان ضرایب هر عامل، ضرایبی که با رنگ قرمز در جدول (۳) نشان داده شده‌اند، نشان‌گر پارامترهای مؤثر در آن عامل هستند. جدول (۴) عامل‌های استخراجی و مقادیر واریانس آن‌ها را نشان می‌دهد و شکل (۹) بارهای عاملی مؤثر در هر عامل استخراجی را نشان می‌دهد.

سه عامل به‌دست آمد که این عامل‌ها ۶۲/۷ درصد از کل واریانس داده‌ها رو شامل می‌شوند. از میان عامل‌ها، عامل اول ۳۷/۳۵ درصد از واریانس کل داده‌ها را شامل می‌شود که مؤثرترین عامل بر تغییر کیفیت آب است. عامل اول حاصل تعادل آب و سنگ است که در زمینه انحلال سنگ‌های حاوی ترکیبات سدیم، پتاسیم، کلر، سولفات، بی‌کربنات، کلسیم و منیزیم است که مبین تأثیر سازندهای زمین‌شناسی منطقه بر هیدروشیمی دشت است. عامل دوم ۱۳/۴۲ درصد از واریانس کل داده‌ها و عامل سوم ۱۱/۹۲ درصد از واریانس کل داده‌ها را شامل

Table 4. Extraction factors and their values of variance

Components	Total	Initial specified value		Total squares after rotation		
		Variance%	Cumulative%	Total	Variance%	Cumulative%
1	3.472	38.021	38.021	3.411	37.352	37.352
2	1.220	13.317	51.384	1.226	13.427	50.778
3	1.033	11.317	62.700	1.089	11.922	62.700
4	0.959	10.500	73.200			
5	0.839	9.193	82.393			
6	0.561	6.140	88.533			
7	0.438	4.797	93.330			
8	0.256	2.799	96.130			
9	0.196	2.146	98.276			
10	0.107	1.171	99.447			
11	0.051	0.553	100.000			
12	-1.001E-013	-1.012E-013	100.000			

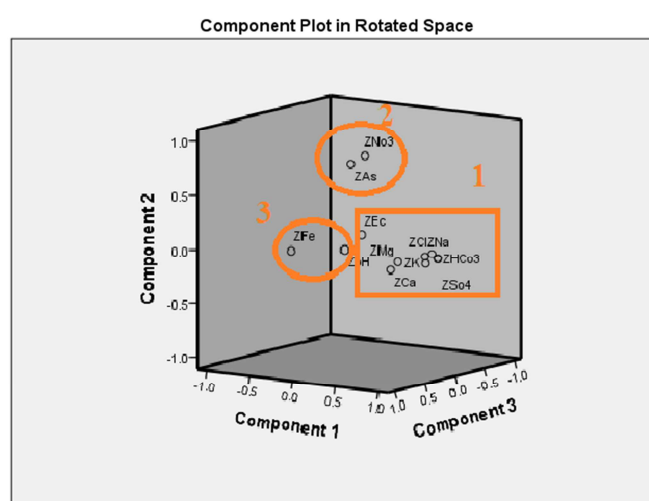


Figure 9. Shows the effective factor loads in each extraction factor

نتیجه‌گیری

به‌دست‌آمده از آنالیز هیدروژئوشیمیایی منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت خوی و دیاگرام پایپر، تیپ آب زیرزمینی در منطقه بیش‌تر بی‌کربناته و کلروره می‌باشد. به‌طورکلی، تیپ منابع آب موجود در بخش‌های جنوب‌شرقی و شرقی کلروره است و تیپ آب در بخش‌های غرب و شمال‌غربی دشت از نوع بی‌کربناته می‌باشد. در بین کاتیون‌ها، رخساره‌های کلسیک، سدیک و منیزیک وجود دارد. براساس دیاگرام پایپر چهار تیپ کلی کلروره سدیک، بی‌کربناته منیزیک، بی‌کربناته کلسیک و اختلاطی برای منابع آب زیرزمینی منطقه تشخیص داده شد.

نمونه‌های موجود در تقسیم‌بندی نمودار دوروی بسط داده‌شده، حاصل از هر سه فرایند تعویض یونی، انحلال

تغییرات کاتیون‌ها و آنیون‌ها در آبخوان دشت خوی تقریباً از غرب به شرق افزایش نشان می‌دهند به‌جز در نواحی مرکزی به‌دلیل ریزدانه‌بودن رسوبات، افزایش یون‌هایی مثل کلر و سدیم مشاهده می‌شود. مقادیر کلر، سدیم، آهن و آرسنیک در برخی نمونه‌ها، بیش‌تر از حد استاندارد جهانی برای شرب است. در کل می‌توان عامل اصلی این آنومالی‌ها را سازندهای زمین‌شناسی میوسن و پلیوسن و رسوبات حاصل از دیگر سازندها که ارتفاعات اطراف دشت را ایجاد کرده‌اند، دانست. مقادیر نترات موجود در آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در نمونه‌ها تقریباً در حد استاندارد جهانی لازم برای شرب است. براساس نتایج

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Akosua Loh, Y. S., Akurugu, B. A., Manu, E., & Aliou, A. S. (2020). Assessment of groundwater quality and the main controls on its hydrochemistry in some Voltaian and basement aquifers, northern Ghana. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100296.
2. Armannsson, H. (1999). Geochemistry of the Earth's Surface: Proceedings of the 5th international symposium, Reykjavik. CRC Press, 580 pp.
3. Asghari Moghadam, A. (2010). Principles of groundwater recognition. Tabriz University Press. (In Persian).
4. Asghari Moghadam, A., & Jalali, L. (2015). Investigation of arsenic anomalies and its possible origin in groundwater of Khoy plain. *Scientific Quarterly Journal, Geosciences, (Engineering and Environmental Geology)*, 24(94), 147-154. (In Persian).
5. Asghari Moghadam, A., Nadiri, A. A., & Sadeghi Aghdam, F. (2020). Investigation of hydrogeochemical properties of groundwater in Naqadeh plain aquifer and heavy metal pollution index (HPI). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 29(115), 97-110. (In Persian).
6. Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrienn, 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(4), 294-313.
7. Dalton, M.G., & Upchurch, S.G. (1978). Interpretation of hydrochemical faces by factor analysis. *Journal of Groundwater*, 16(4), 228-233.
8. Fetter, C. W. (1999). Contaminant hydrogeology, second edition, Prentice Hall, Inc. pp. 500.
9. Fijani, E., Moghadam, A. A., Tsai, F. T. C., & Tayfur, G. (2017). Analysis and assessment of hydrochemical characteristic of Maragheh-Bonab plain aquifer. Northwest of Iran. *Journal of Water Resource Management*, 31(3), 765-780.
10. Garcia, S. A., Moyano, A., & Mayorga, P. (2005). High Arsenic contents in groundwater of central Spain. *Environ Geo*, 147, 847-854.
11. Hounslow, A. W. (1995). Water quality data analysis and interpretation. 1nd ed. Florida: CKC press.

ساده و ترکیبی و تعویض یونی معکوس هستند. با توجه به آنالیز خوشه‌ای، نمونه‌های آنالیز شده در دو خوشه اصلی و پنج زیر خوشه قرار می‌گیرند. هر کدام از خوشه‌ها با توجه به محتوای فلزات سنگین و دیگر پارامترها و ارتباط بین پارامترها رسم شده است.

برای بررسی دقیق‌تر روابط همبستگی میان عناصر، آشکار شدن روابط جانبی و نهفته میان آن‌ها و کاهش ابعاد داده‌ها به منظور بررسی روابط پاراژنری و منشأیابی آن‌ها روش آماری استفاده شده است. نتایج روش تحلیل عاملی، مدلی سه مؤلفه‌ای را برای داده‌ها پیشنهاد نمود. در مؤلفه نخست سدیم، کلر، سولفات، بی‌کربنات، کلسیم و منیزیم به هم وابسته بودند، در مؤلفه دوم نیترات و آرسنیک با همدیگر در ارتباط داشتند، در حالی که در مؤلفه سوم آهن به طور جزئی با بقیه در ارتباط بودند. عامل‌های اول و سوم منشأ زمین‌زاد و عامل دوم هم منشأ زمین‌زاد و هم منشأ انسان‌زاد دارد. با استفاده از نمودار استیف در داده‌های هیدروشیمیایی هشت گروه کلی با منشأ شور، دولومیتی، آهکی، بازالتی، ترکیب آذرین و آهکی، ترکیبی شور و شیل، ترکیبی شیل و آهک (مارن) و اختلاطی برای آب زیرزمینی تشخیص داده شد.

با توجه به بررسی‌های کیفی صورت گرفته از نمونه‌های آبی، می‌توان به این نتیجه رسید که مهم‌ترین عامل مؤثر بر ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی شامل تأثیر سازندهای زمین‌شناسی از جمله سازندهای کربناته، سولفات و انحلال در مسیر جریان آب زیرزمینی، بر منابع آب زیرزمینی است.

پی‌نوشت‌ها

1. Hierarchical Cluster Analyzes
2. K-Means Cluster
3. Factors- K Means
4. Expanded Durov diagram
5. Pattern diagram
6. Varimax Rotation

12. Houshanghi, N., Al Sheykh, A. A., Nadiri, A. A., & Asghari Moghadam, A. (2015). Evaluation of interpolation and fuzzy methods in estimating groundwater arsenic content (Case study: Khoy plain aquifer). *Ecohydrology*, 2(1), 63-77. (In Persian).
13. Jalali, L., & Asghari Moghadam, A. (2013). Detection of hydrogeochemical status and salinity trend in Khoy plain groundwater aquifer by statistical and hydrochemical methods, *Journal of Environmental Science*, 39(2), 113-122. (In Persian).
14. Khanoranga, S. K. (2019). An assessment of groundwater quality for irrigation and drinking purposes around brick kilns in three districts of Balochistan province, Pakistan, through water quality index and multivariate statistical approaches. *Journal of Geochemical Exploration*, 197, 14-26.
15. Liu, C. W., Lin, K. H., & Kuo, Y. M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a black food disease area in Taiwan. *Journal of Science of Total Environment*, 313, 77-89.
16. Mahab Ghods, Consulting Engineers. (1985). Location plan of Iranian border rivers, Turkey, Khoy plain groundwater studies, Volume 23. (In Persian).
17. Nabavi, M. H. (1976). An Introduction to the geology of Iran, *Earth sciences*. (In Persian).
18. Nadiri, A. A., Asghari Moghadam, A., Sadeghi Aghdam, F., & Aghaei, H. (2012). Study of arsenic anomaly in Sahand Dam water resources. *Ecology*, 38(3), 61-74. (In Persian).
19. Nadiri, A., Asghari Moghaddam, A., Sadeghi Aghdam, F., & Naderi, K. (2015). Evaluation of salinity and arsenic as destructive factors of surface and groundwater quality (Sahand Dam catchment area). *Journal of Hydrogeomorphology*, 4, 79-99. (In Persian).
20. Nadiri, A. A., Asghari Moghaddam, A., Tsai, F.T.C., & Fijani, E. (2013). Hydrogeochemical analysis for Tasuj plain aquifer, Iran. *Journal of Earth system Science*, 122(4), 1091-1105
21. Nadiri, A. A., Sadeghi Aghdam, F., Khatibi, R., & Asghari Moghaddam, A. (2018). The problem of identifying arsenic anomalies in the basin of Sahand dam through risk-based 'soft modelling'. *Science of the Total Environment*, 613-614, 693-706.
22. Nadiri, A. A., Sedghi, Z., Khatibi, R., & Gharakhani, M. (2017). Mapping vulnerability of multiple aquifer using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures. *Science of Total Environment Journal*, 593-594, 75-90.
23. Norouzi, H., & Asghari Moghadam, A. (2019). Determination of groundwater salinity source using hydrochemical properties and factor analysis method. *Rangeland and Watershed Management. Iranian Journal of Natural Resources*, 72(1), 291-310. (In Persian).
24. Piper, A. M. (1944). A graphical procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union*, 25, 914-923.
25. Singhal, B. B. S., & Gupta, R. P. (1999). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Kluwer Academic Publisher. pp. 400.
26. Stiff, H. A. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 3(10), 60-62.
27. Stossel, R. K. (1997). Delineating the chemical compositions of the salinity source for saline groundwater: An example from east-central Canadian Parish. Louisiana. *Groundwater*, 35, 409-417.
28. Voundouris, K., Panagopoulos, A., & Koumantakis, J. (2000). Multivariate statistical analysis in the assessment of hydrochemistry of the Northern Korinthia Prefecture Alluvial Aquifer system (Peloponnese, Greece). *Journal of Natural Resource Research*, 9(2), 135-145.
29. Waychunase, G.A., Rea, B. A., Fuller, C. C., & Davis, J. A. (1993). Surface chemistry of ferrihydrite, Part 1. EXAFS. Studies of the geometry of co precipitated and adsorbed arsenate. *Geochim Cosmochim Acta*, 57, 2251-2269.
30. Wang, L. G., Li, X. L., Liu, L., & Han, L. (2004). Research on mechanism of groundwater pollution from mine water in abandoned mines. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 14(2), 294-298.
31. WHO. (2008). *Guidelines for Drinking-water Quality. Third Edition Incorporating the First and Second Addenda*, Vol. 1. World Health Organization (WHO) Press, Geneva, Switzerland, p. 306.
32. Xiao, J., Wang, L., Chai, N., Liu, T., Jin, Z., & Rinklebe, J. (2021). Groundwater hydrochemistry, source identification and pollution assessment in intensive industrial areas, eastern Chinese loess plateau. *Environmental Pollution*, 278, 116930.