

## نقش جنس سازندهای زمین‌شناسی بر کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز سد شیرین‌دره

مریم تاج‌بخشیان<sup>۱</sup>، ابوالفضل مساعدی<sup>۲\*</sup>، محمدحسین محمودی قرائی<sup>۳</sup>، سید رضا موسوی حرمی<sup>۳</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استاد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استاد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۶/۱۵؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۹/۱۰)

### چکیده

ارزیابی کیفیت منابع آب آشامیدنی و تعیین عوامل طبیعی و انسان‌زاد مؤثر بر ترکیب شیمیایی آنها نقش بسیار مهمی در پایداری اکوسیستم‌های وابسته به این منابع ایفا می‌کند. در این مطالعه با هدف ارزیابی کیفیت آب رودخانه‌ها و چشمه‌های حوضه آبریز سد شیرین‌دره و مخزن این سد و بررسی تأثیر جنس سازندها بر کیفیت آنها، داده‌های کیفی این منابع، شامل غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کربنات، بی‌کربنات، کلراید، سولفات، هدایت الکتریکی، مجموع مواد جامد محلول، سختی کل و pH، در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ برای ۳۳ نمونه آب سطحی، ۶ نمونه آب چشمه و یک نمونه آب مخزن سد شیرین‌دره مورد بررسی قرار گرفت. سه شاخص کیفی شامل  $WQI_B$ ،  $WQI_{MT}$  و  $WQI_{DD}$  برای این نمونه‌های آب محاسبه شدند. برای بررسی تأثیر جنس سازندها بر کیفیت آب، ۱۰ نمونه رسوب رودخانه‌ای از سطح حوضه آبریز مورد مطالعه جمع‌آوری شده و نوع کانی‌های موجود در آنها مشخص شد. نتایج نشان داد عامل هوازگی سنگ نسبت به دو عامل تبخیر و بارش نقش بسیار مهم‌تری در تعیین ترکیب شیمیایی منابع آب مورد مطالعه دارد. واحدهای ژیبسی، شیلی و آهکی به عنوان مهم‌ترین منبع ورود این یون‌ها به داخل آب شناسایی شدند. نتایج تأثیر جنس سازندها را بر ترکیب شیمیایی منابع آب تأیید کرد. براساس مقادیر شاخص‌های کیفی، آب مخزن سد کیفیت بالاتری برای آشامیدن دارد که دلیل آن را می‌توان پیوستن چشمه‌هایی در نزدیکی مخزن سد، به آب‌های ورودی به مخزن در نظر گرفت. کیفیت بهتر آب این چشمه‌ها را می‌توان به منشأ کارستی آنها در سازند تیرگان نسبت داد.

**کلیدواژگان:** کیفیت منابع آب آشامیدنی، هوازگی سنگ، تیپ و رخساره، جنس سازندها، منشأ کارستی.

## مقدمه

منابع و مخازن آب مانند رودخانه‌ها، آب‌های زیرزمینی، دریاچه‌ها و سدها از جمله مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده آب برای استفاده‌های مختلف محسوب می‌شوند. از جمله این موارد می‌توان به آبیاری زمین‌های کشاورزی، تولید انرژی الکتریسیته، انتقال گرما، نیروی محرکه برای به حرکت درآوردن توربین‌های بخار و موارد متعدد دیگری اشاره کرد که بدون وجود منابع پایدار آب، تداوم این فعالیت‌ها امکان‌پذیر نیست. اما می‌توان استفاده از منابع آب سطحی و زیرزمینی را برای آشامیدن یکی از نیازهای حیاتی به آب برشمرد. ذخیره آب در مخازن سدها و استفاده از آن برای آشامیدن از جمله اهداف عمده ساخت این سازه‌ها محسوب می‌شود که به‌ویژه در مناطق خشک با ذخیره محدود آب اهمیت بیشتری می‌یابد [۷]. اما منابع آب همواره در معرض آلودگی‌های مختلفی مانند فاضلاب‌های شهری و صنعتی، کودها و آفت‌کش‌های شیمیایی، مواد نفتی و روغنی، باکتری‌ها و عوامل بیماری‌زا، و ذرات معلق و رسوبات قرار دارند که می‌توانند به شدت کیفیت آب آشامیدنی را تحت تأثیر قرار دهند. علاوه بر این، عوامل انسان‌زاد، عوامل طبیعی مانند خصوصیات زمین‌شناسی، تغییرات آب‌وهوایی، سیل، زلزله، خشکسالی و ته‌نشینی اتمسفری ریزگردها نیز می‌توانند تا حد زیادی تعیین‌کننده کیفیت آب آشامیدنی باشند [۱۸].

در میان عوامل طبیعی کنترل‌کننده کیفیت منابع آب، شاید بتوان جنس سازندهای زمین‌شناسی را از مهم‌ترین و تعیین‌کننده‌ترین عوامل در نظر گرفت. سازندهای زمین‌شناسی با داشتن کانی‌هایی که از نظر درصد حلالیت و واکنش با آب با یکدیگر متفاوت هستند، بر اثر برهم‌کنش با آب‌های سطحی و زیرزمینی قابلیت زیادی برای تغییر شیمیایی آب دارند. آب‌های زیرزمینی در مقایسه با آب‌های سطحی به دلیل مدت زمان اقامت طولانی در آبخوان، طی مسیر از محل تغذیه به سمت تخلیه و همچنین، دور ماندن از شرایط سطحی زمین در مقایسه با آب‌های سطحی می‌توانند بر اثر برهم‌کنش با مواد سازنده آبخوان دستخوش تغییرات قابل توجه‌تری شوند [۴۳]. اگرچه آب‌های زیرزمینی به دلایلی که عنوان شد، می‌توانند بیشتر تحت تأثیر واکنش آب و سنگ قرار گیرند، اما نمی‌توان از اثر جنس سازندهای زمین‌شناسی بر

نوع یون‌های غالب در آب‌های سطحی مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن سدها صرف نظر کرد. این موضوع زمانی بیشتر نمود می‌یابد که سازندهای زمین‌شناسی از حلالیت و درصد بالای واکنش‌پذیری با آب برخوردار باشند. در این صورت آب‌های سطحی با حرکت خود در کانال‌ها و مجاری حفرشده روی سازندهای واکنش‌پذیر می‌توانند پذیرنده یون‌های حاصل از واکنش آب و سنگ باشند [۴۲].

بررسی رابطه میان ترکیب شیمیایی منابع آب در ارتباط با سازندهای غالب موجود در یک منطقه و سنگ‌شناسی آنها، شناسایی تأثیرات انحلال و یا ته‌نشینی کانی‌های خاص در آب و فرایندهای مرتبط با واکنش بین آب و سنگ از جمله مهم‌ترین مباحث علم هیدروژئوشیمی محسوب می‌شوند. در واقع، علم هیدروژئوشیمی با استفاده از روابط ساده و قابل فهم میان یون‌های غالب موجود در آب، یون‌های فلزات سنگین و یا ترکیبات ایزوتوپی در تعیین مهم‌ترین فرایندهای مؤثر بر میزان ورود و یا خروج یون‌ها کمک می‌کند. یکی دیگر از امتیازهای مطالعات هیدروژئوشیمی این است که با ترسیم نمودارهایی خاص که نشان‌دهنده ارتباط میان تشکیل‌دهندگان اساسی آب هستند، چارچوبی از مهم‌ترین وقایع هیدروژئوشیمی را که در آب روی داده‌اند و یا در حال وقوع هستند، ارائه می‌دهد که برای تعداد زیادی از نمونه‌های آب نیز کاربرد دارند [۳۷]. از مهم‌ترین مباحث مطرح‌شده در علم هیدروژئوشیمی تعیین تیپ و رخساره منابع آب با استفاده از روش‌های ترسیمی و ترسیم نمودارهای دوتایی و تعیین نسبت میان یون‌های مختلف است [۲۲]. تا کنون در مقیاس ایران و جهان مطالعات بی‌شماری در حیطه علم هیدروژئوشیمی انجام شده که منجر به شناسایی مهم‌ترین عوامل ژئوشیمی مؤثر بر ترکیب شیمیایی آب شده است. رضائی [۳۲] با مطالعه عوامل کنترل‌کننده شوری در آبخوان آبرفتی دشت مند، استان بوشهر، با استفاده از نمودارهای ترسیمی نشان داد ۸۳ درصد از تغییرات کیفی آب این آبخوان توسط سه عامل کنترل می‌شود و اولین و مهم‌ترین آنها انحلال کانی‌های سولفات موجود در سازندهای گروه فارس و پس از آن انحلال هالیت در گنبد نمکی شرق دشت به عنوان عامل دوم است. فخرالدینی و عباس‌نژاد [۱۲] روش‌های هیدروژئوشیمیایی را در مطالعه

رودخانه از جمله علل اساسی کاهش کیفیت آب این رودخانه است. رسولی و همکاران [۳۱] شاخص IRWQI<sup>۲</sup> را برای ارزیابی کیفیت آب سد گلابر، استان زنجان، به کار بردند و دریافتند کیفیت آب مخزن سد در لایه فوقانی و شش‌ماهه گرم در رده خوب، و در شش‌ماهه سرد سال در رده متوسط قرار می‌گیرد. Wu و همکاران [۴۱] کیفیت آب دریاچه آب شیرین Poyang، چین، را با استفاده از مقادیر شاخص کیفی آب و پارامترهای pH، مجموع مواد جامد محلول، و غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، بی‌کربنات، کلراید، سولفات، و کربنات مورد سنجش قرار دادند و دریافتند در بیشتر نمونه‌های آب این دریاچه کیفیت پایین تا مناسب برای آشامیدن وجود دارد که علت آن را رخنمون سازندهای سولفاته و کربناته در منطقه عنوان کردند. Othman و همکاران [۲۷] با کاربرد شاخص کیفی آب و تأثیر پارامترهایی مانند اکسیژن‌خواهی شیمیایی، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، اکسیژن محلول، جامدات معلق، pH و آمونیاک برای برخی رودخانه‌های جاری در غرب مالزی به این نتیجه رسیدند که در برخی نمونه‌های آب بالادست رودخانه به دلیل توسعه مناطق مسکونی و رشد جمعیت کیفیت آب نسبت به مناطق پایین‌دست کاهش نشان می‌دهد. Bhatt و همکاران [۶] با استفاده از شاخص کیفی آب که در آن از پارامترهای pH، مجموع مواد جامد محلول، و غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، بی‌کربنات، کلراید، سولفات، نترات، فلوراید، آرسنیک، آهن و منگنز استفاده می‌شود کیفیت منابع دشت سیلابی Gangetic، استان Bihar، هندوستان، را ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که بیشتر نمونه‌های آب کیفیت عالی تا خوب دارند. همچنین، مشخص شد تیپ و رخساره آب  $\text{Mg-HCO}_3$ ،  $\text{Na-HCO}_3$ ،  $\text{Mg-SO}_4$  است که به‌شدت متأثر از ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه است.

سد شیرین‌دره در شمال شرق ایران به عنوان بزرگ‌ترین سد در استان خراسان شمالی در سال ۱۳۸۴ روی رودخانه شیرین‌دره احداث شد. تا کنون مطالعات اندکی روی کیفیت آب آشامیدنی مخزن این سد انجام

شیمی رودخانه بیدخوان، استان کرمان، به کار بردند و به این نتیجه رسیدند که هوازدهگی سیلیکات‌ها، هوازدهگی پیریت و تبادل یونی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر ترکیب شیمیایی این رودخانه هستند. Kozłowski و Komisarek [۲۰] با استفاده از روش‌های ترسیمی و نمودارهای دوتایی نشان دادند هوازدهگی سیلیکات‌ها، کربنات‌ها و تبادل یونی از جمله مهم‌ترین عوامل طبیعی و وابسته به زمین‌شناسی دشت Opalenica، لهستان، هستند. Davraz و Batur [۱۲] توسعه تیپ و رخساره  $\text{Ca-HCO}_3$ ،  $\text{Mg-HCO}_3$  و  $\text{Ca-Mg-HCO}_3$  را به حضور سازندهای شیلی و مارنی حوضه آبریز Yalvac-Gelendost نسبت دادند و خاطر نشان کردند که این‌گونه سازندها تأثیر منفی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی و سطحی این حوضه برای آشامیدن دارد.

مبحث کیفیت آب، به‌ویژه کیفیت آب آشامیدنی، ارتباط تنگاتنگی با تأثیر جنس سازندهای زمین‌شناسی در یک منطقه دارد، زیرا حضور املاح محلول بالا که در نتیجه واکنش آب و سنگ وارد منابع آب سطحی و زیرزمینی می‌شوند، می‌تواند به‌شدت کیفیت آب را تحت تأثیر قرار دهند [۲۲ و ۳۷]. بنابراین، باید برای کاربردی کردن مباحث هیدروژئوشیمی از رابطه میان این علم با مطالعه کیفیت منابع آب بهره برد. این موضوع به‌ویژه برای منابع آب آشامیدنی، مانند مخازن سدها، که تأثیر مستقیمی روی سلامت و محیط زیست دارند، حائز اهمیت است. برای بررسی کیفیت آب آشامیدنی شاخص‌های کیفی مختلفی تا کنون ارائه شده‌اند که هر یک از این شاخص‌ها بر مبنای برخی پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در آب قابل محاسبه هستند. پرستار و همکاران [۲۸] کیفیت آب رودخانه هیروچایی در خلخال، استان اردبیل، را با استفاده از شاخص NSFQI<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند کیفیت آب در بالادست این رودخانه به دلیل نبود منابع آلاینده خوب است، اما در پایین‌دست آن به دلیل تخلیه فاضلاب شهری کیفیت آب کاهش می‌یابد. امین‌پور شیانی و همکاران [۳] شاخص کیفی NSFQI را برای بررسی کیفیت آب رودخانه گاز در رودبار، استان گیلان، محاسبه کردند و دریافتند تخلیه زباله و فاضلاب خانگی، زهاب‌های کشاورزی، فضولات حیوانی و دبی پایین

آشامیدنی شامل  $WQI_B$ ،  $WQI_{MT}$  و  $WQI_{DD}$ ، (۶) تعیین کیفیت منابع آب مورد مطالعه برای آشامیدن براساس مقادیر این شاخص‌ها، (۷) مقایسه میان کیفیت منابع آب مورد مطالعه و بررسی تأثیر عوامل زمین‌شناسی بر کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز این سد.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه شده

حوضه آبریز سد شیرین‌دره بین  $25^{\circ} 06' 57''$  تا  $28^{\circ} 35' 57''$  عرض شمالی و در  $65$  کیلومتری شمال غربی شهرستان بجنورد در استان خراسان شمالی واقع شده است (شکل ۱). رودخانه شیرین‌دره با جهت کلی شمال شرقی- جنوب غربی، آب‌های سطحی و زیرزمینی این حوضه آبریز را با وسعت  $1750 \text{ km}^2$  زهکشی کرده و به سمت رودخانه اترک هدایت می‌کند. رودخانه شیرین‌دره که از کوه‌های آسیازو واقع در شمال سرچشمه می‌گیرد، در مسیر خود به سمت مخزن سد شیرین‌دره از منابع آب زیرزمینی مانند چشمه‌های آسیازو، ایوب و ارناره هم بهره‌مند می‌شود. از میان این چشمه‌ها، چشمه ارناره با دبی بین  $400 \text{ lit/s}$  تا  $520$  مهم‌ترین منبع زیرزمینی تغذیه‌کننده آب رودخانه شیرین‌دره محسوب می‌شود. برای حرکت آب زیرزمینی در منطقه مطالعه‌شده نیز از سمت شمال و شمال غرب به سمت جنوب است [۱۹]. قدیمی‌ترین واحدهای سنگی حوضه آبریز مورد مطالعه متعلق به دوران دوم و جدیدترین آنها مربوط به عهد حاضر هستند. از رسوبات دوران دوم تنها بخشی از واحدهای سنگی کرتاسه از جمله سازندهای تیرگان، سرچشمه، سنگانه و آیتامیر در منطقه وجود دارند. سنگ‌شناسی سازند تیرگان عبارت است از: سنگ آهک الیتی و لایه‌های بسیار جزئی از آهک مارنی، مارن و شیل آهکی. ترکیب شیمیایی آهک تیرگان که به صورت کربنات کلسیم متبلور شده و فاقد سیمان یا دارای مقدار اندکی از آن است، باعث شده تا این سازند نسبت به سایر سازندهای موجود در حوضه از استحکام و مقاومت بیشتری در برابر عوامل فرساینده برخوردار باشد. سازند تیرگان در حوضه آبریز مورد مطالعه دارای وسعتی در حدود  $140 \text{ km}^2$  (۸ درصد) است که بیشتر در دیواره جنوبی، شرقی و شمالی حوضه و همچنین، داخل آن و در مرکز تاقدیس ایوب و دره

شده است. برای مثال، صدی [۳۴] کیفیت آب مخزن سد شیرین‌دره را براساس شاخص NSFQI بد ارزیابی کرد که استفاده از کودهای شیمیایی و ورود فاضلاب‌های خانگی در نواحی بالادست مخزن را دلیل این موضوع عنوان کرد. تیموری و همکاران [۳۸] با استفاده از شاخص NSFQI کیفیت آب مخزن سد شیرین‌دره را متأثر از شرایط آب‌وهوایی ارزیابی کردند که پایین‌ترین کیفیت را در مردادماه نشان داد. از دیدگاه زمین‌شناسی حدود  $60$  درصد از مناطق بالادست این سد پوشیده از سازندهایی با قابلیت انحلال و فرسایش‌پذیری بالا مانند مارن و شیل با میان‌لایه‌هایی از ژئیس و هالیت است که به نوبه خود می‌توانند بر اثر هوازدگی و فرسایش درصد قابل توجهی از املاح محلول را به داخل آب‌های سطحی و در نهایت مخزن سد تخلیه کنند. با توجه به اینکه بخش بیشتر آب ذخیره‌شده در مخزن سد شیرین‌دره برای تأمین آب آشامیدنی شهرستان بجنورد اختصاص یافته، باید با استفاده از روش‌هایی آسان و قابل اعتماد، مانند روش‌های هیدروژئوشیمیایی و تعیین عوامل زمین‌شناسی مؤثر بر شیمی آب و سپس، شاخص‌های کیفی آب، به بررسی کیفیت منابع آب ورودی به مخزن این سد پرداخته شود. همچنین، آب ورودی به مخزن سد شیرین‌دره از منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود که بررسی عوامل طبیعی مؤثر بر کیفیت این منابع، به ویژه خصوصیات زمین‌شناسی و جنس سازندهای غالب، می‌تواند کمک بسیاری به بهره‌وری مناسب از این منابع کند. علاوه بر این، با مقایسه میان خصوصیات کیفی آب‌های سطحی و زیرزمینی موجود در این منطقه با آب مخزن سد شیرین‌دره می‌توان به توسعه پایدار این منابع در منطقه کمک کرد و از طرفی، راهکارهای افزایش کیفیت آب مخزن سد را پیشنهاد داد. بنابراین، اهداف این پژوهش را می‌توان به صورت زیر بیان کرد: (۱) بررسی مهم‌ترین فرایندهای کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی منابع آب سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز سد شیرین‌دره، (۲) تعیین تیپ و رخساره نمونه‌های آب برداشت‌شده از این منابع، (۳) بررسی نمودارهای دوتایی برای مشخص شدن عوامل هیدروژئوشیمیایی مؤثر بر شیمی این منابع آب، (۴) ایجاد رابطه میان ترکیب شیمیایی رسوبات رودخانه‌ای با ترکیب شیمیایی منابع آب، (۵) محاسبه سه شاخص کیفی آب

این حوضه، و یک نمونه از مخزن سد شیرین‌دره در سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ استفاده شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده در این نمونه‌های آب شامل غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کربنات، بی‌کربنات، کلراید، سولفات، هدایت الکتریکی، مجموع مواد جامد محلول، سختی کل و pH هستند. غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم توسط دستگاه نشر شعله‌ای مدل Corning 400 با دقت ppm ۰/۱ ساخت کشور ژاپن، کربنات و بی‌کربنات به روش تیتراسیون اسید و باز (ASTM D3875) با دقت ppm ۰/۱، کلراید به روش تیتراسیون با استفاده از نیترات نقره (ASTM D4458) با دقت ppm ۰/۱، و سولفات به روش توربیدیمتری با استفاده از کلرور باریم (ASTM D516) با دقت ppm ۰/۱ در آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی اندازه‌گیری شد. مقدار مجموع مواد جامد محلول، هدایت الکتریکی، pH و دما نیز در محل نمونه‌برداری به ترتیب توسط دستگاه TDS متر مدل TDS-3 ساخت کشور چین با دقت ۰/۰۱، دستگاه EC متر مدل con200 ساخت کشور تایوان با دقت ۰/۰۱، و دستگاه pH متر مدل Horiba ساخت کشور ژاپن با دقت ۰/۰۱ اندازه‌گیری شدند. برای بررسی جنس رسوبات حاصل از فرسایش سازندهای زمین‌شناسی و نوع کانی‌های موجود در آنها تعداد ۱۰ نمونه رسوب ته‌نشین شده در حواشی رودخانه‌های حوضه آبریز مورد مطالعه جمع‌آوری شد. نمونه‌های رسوب پس از خشک شدن و عبور از الک ۱۲۰ مش برای انجام آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) توسط دستگاه مدل Explore شرکت GNR ایتالیا به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد منتقل شدند. در شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه و مهم‌ترین سازندهای رخنمون‌یافته به همراه شبکه توزیع رودخانه‌های جاری در حوضه آبریز مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی و رسوبات نشان داده شده است.

پیش از استفاده و تحلیل نتایج کیفی آب باید از وجود داشتن یا نداشتن خطا در اندازه‌گیری مطمئن شد. مجموع غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی در هر منبع آبی باید تقریباً مساوی باشد. این موضوع با استفاده از چندین روش که به آنها موازنه یونی گفته می‌شود، می‌تواند ارزیابی شود [۲۱ و ۳۵]. نبود کیفیت مناسب در آب می‌تواند به طور

زو دیده می‌شود. این سازند به علت خصوصیات بافتی و شیمیایی، قابلیت کارستی شدن را دارد و از این‌رو، قدرت نسبتاً خوبی در جذب آب دارد و در نتیجه، هنگام بارش مانع از ایجاد رواناب و تولید رسوب در حوضه می‌شود. تأثیر حضور این سازند بر توپوگرافی حوضه آبریز شیرین‌دره به صورت ارتفاعاتی است که حاشیه‌های شرقی و جنوبی آن را تشکیل می‌دهد. سازند سرچشمه در حوضه آبریز مورد مطالعه با وسعت  $648 \text{ km}^2$  (۳۷ درصد) و ترکیب مارن و شیل به همراه لایه‌هایی از آهک، توپوگرافی پست و آبراهه‌های دندریتی را در منطقه به وجود آورده است. این سازند بر اثر فشارهای تکتونیکی اغلب دارای درز و شکاف است. از این‌رو، در محل تماس با سازند سنگانه، چشمه‌های بسیار کوچکی با دبی پایین تشکیل شده‌اند. سازند سنگانه با ترکیب شیل یکنواخت و وسعت  $420 \text{ km}^2$  (۲۴ درصد) به دلیل قابلیت زیاد فرسایش باعث ایجاد لایه ضحیمی از مواد هوازده سست روی دامنه‌ها شده که از یک طرف، باعث نفوذ آب به لایه‌های زیرین و از طرف دیگر، باعث افزایش وزن توده و تسهیل وقوع حرکات توده‌ای و به‌ویژه حرکات ریزشی و لغزشی شده است. همچنین، به دلیل قابلیت فرسایش زیاد این سازند، پستی و بلندی‌هایی (تپه ماهورهایی) در منطقه ایجاد شده است که بر اثر عملکرد متقابل هوازدگی مکانیکی و فرسایش متعاقب آن به وجود آمده‌اند. ضخامت سازند آیتامیر در حوضه آبریز سد شیرین‌دره حدود  $300 \text{ m}$  است و به طور عمده از دو بخش ماسه‌سنگی و تناوب ماسه‌سنگ و شیل فوقانی تشکیل شده است. به‌رغم اینکه بخش تحتانی این سازند ماسه‌سنگی است، ولی به دلیل وجود سیمان کلسیتی، به‌سرعت هوازده و فرسوده شده و مناطقی با ارتفاع متوسط تا کم را شکل داده است. گسترش سازند آیتامیر در منطقه مطالعه‌شده حدود  $525 \text{ km}^2$  (۳۰ درصد) است. رسوبات کواترنری در منطقه مطالعه‌شده نیز شامل آبرفت‌ها، لس‌ها و پادگانه‌ها با وسعت  $17 \text{ km}^2$  (یک درصد) هستند که به شکل آبرفت‌های رودخانه‌ای، لس‌ها و پادگانه‌ها مشاهده می‌شوند [۱۹ و ۳۴].

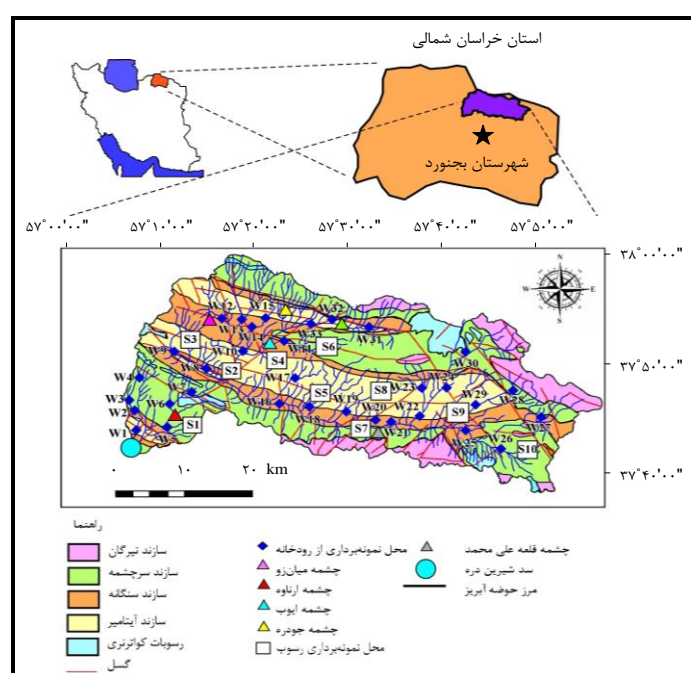
#### روش مطالعه

در این مطالعه از داده‌های کیفی نمونه‌های آب برداشت‌شده از رودخانه‌های سطح حوضه آبریز شامل ۳۳ نمونه، ۶ نمونه آب برداشت‌شده از چشمه‌های موجود در

در این معادله، Cat غلظت کاتیون‌های اصلی (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم)، An غلظت آنیون‌های اصلی (کربنات، بی‌کربنات، سولفات و کلراید)، و D درصد اختلاف به دست آمده است. وجود حداکثر درصد اختلاف بین  $\pm 10$  درصد نشان‌دهنده قابل قبول بودن نتایج است [۳۶]. در جدول ۱ نتایج حاصل از محاسبه این پارامتر برای نمونه‌های آب مورد مطالعه ارائه شده و بر این اساس، درصد اختلاف تمام این نمونه‌ها در محدوده  $\pm 10$  قرار دارند و بنابراین، می‌توان گفت که خطای آنالیز در آنها در حد قابل قبول است.

مستقیم با خطا در اندازه‌گیری یون‌های موجود در آن در ارتباط باشد. یکی از روش‌های متداول تعیین موازنه یونی استفاده از درصد اختلاف است که در آن از غلظت یون‌های اصلی در آب (بر اساس meq/l)، شامل یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کربنات، بی‌کربنات، سولفات و کلراید، استفاده می‌شود و براساس معادله ۱ قابل محاسبه است [۱۵ و ۱۷]:

$$\%D = \frac{\sum \text{Cat} - \sum \text{An}}{\sum \text{Cat} + \sum \text{An}} \times 100 \quad (1)$$



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز مورد مطالعه (برگرفته از [۱]) به همراه شبکه آبراهه‌های اصلی و نقاط نمونه‌برداری از آب‌های سطحی و زیرزمینی و رسوبات

جدول ۱. نتایج درصد اختلاف محاسبه‌شده براساس معادله ۱ برای نمونه‌های آب مطالعه‌شده به تفکیک محل نمونه‌برداری

مخزن سد		چشمه			رودخانه						
۰/۸۳	R1	-۳/۵۵	ایوب	-۱/۶۲	W28	-۳/۶۰	W19	-۰/۴۸	W10	۲/۸۷	W1
		۶/۸۷	آسیازو	۲/۵۴	W29	-۰/۷۶	W20	۲/۸۳	W11	۲/۱۹	W2
		-۳/۷۳	جودره	-۰/۹۴	W30	۳/۳۱	W21	-۹/۰۹	W12	-۰/۲۸	W3
		-۰/۱۶	میان زو	۵/۷۲	W31	۱/۴۹	W22	-۱/۴۴	W13	۴/۱۱	W4
		-۱/۶۲	قلعه علی محمد	۴/۱۹	W32	-۲/۲۵	W23	۱/۵۱	W14	۵/۷۳	W5
		-۹/۴۲	ارناوه	۶/۵۰	W33	-۰/۳۶	W24	-۰/۸۵	W15	۳/۵۳	W6
						-۲/۷۸	W25	-۲/۲۶	W16	۰/۶۸	W7
						۲/۱۳	W26	-۱/۴۸	W17	-۲/۳۳	W8
						-۵/۸۸	W27	۱/۲۹	W18	-۵/۹۹	W9

غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، بی‌کربنات، سولفات، کلراید، مجموع مواد جامد محلول، هدایت الکتریکی، سختی کل و pH، و استانداردهای ۱۰۵۳ آب آشامیدنی ایران و استاندارد WHO کیفیت آب آشامیدنی را تعیین می‌کند و با استفاده از معادلات زیر (۲ تا ۵) به دست می‌آید [۸ و ۳۰]:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

$$q_i = \frac{V_i}{S_i} \times 100 \quad (3)$$

$$S_i = W_i \times q_i \quad (4)$$

$$WQI_B = \sum_{i=1}^n S_i I \quad (5)$$

در معادلات یادشده،  $w_i$  وزن عامل  $i$ ام،  $n$  تعداد عوامل به‌کاررفته (۱۱)،  $W_i$  وزن نسبی عامل  $i$ ام،  $q_i$  کیفیت نسبی عامل  $i$ ام،  $V_i$  غلظت عامل  $i$ ام،  $S_i$  حد استاندارد آب آشامیدنی برای عامل  $i$ ام،  $RI_i$  شاخص خطر برای عامل  $i$ ام، و  $WQI_B$  شاخص محاسبه‌شده کیفیت آب است. در جدول ۲ اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه این شاخص ارائه شده است.

برای تعیین مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده ترکیب شیمیایی منابع آب مورد مطالعه از نمودار ارائه‌شده توسط Gibbs [۱۳] استفاده شد. این نمودار براساس نسبت بین یون‌ها و مقدار مجموع مواد جامد محلول در آب شامل سه محدودده است که با توجه به فرارگیری منابع آب در هر یک از سه محدوده مختلف این نمودار که شامل غلبه فرایند تبخیر، هوازدگی سنگ و یا بارش است، می‌توان تعیین کرد که کدام یک از این فرایندها در تعیین ترکیب شیمیایی آنها مهم‌ترند. پس از تعیین نوع فرایند مؤثر در ترکیب شیمیایی منابع آب مورد مطالعه، تیپ و رخساره آنها که به ترتیب بیانگر نوع غالب کاتیون و آنیون موجود است با استفاده از نمودار Piper [۲۹] در محیط نرم‌افزار Rock Ware Aqqa v.1.1.1.1 مشخص شد. روش ترسیمی نمودارهای دوتایی نیز که با استفاده از آنها به‌سادگی می‌توان به منبع آزادسازی یون‌های مختلف با توجه به جنس غالب سازندهای موجود در یک منطقه پی برد، روش دیگری برای تعیین نقش لیتولوژی روی نوع یون‌های غالب موجود در منابع آب مورد مطالعه بود. در ادامه، برای بررسی کیفیت منابع آب مورد مطالعه به منظور آشامیدن از سه شاخص کیفی مختلف استفاده شد که به‌اختصار به روش محاسبه آنها اشاره می‌شود.

#### شاخص کیفی آب Brown ( $WQI_B$ )

این شاخص از به‌کارگیری ۱۱ پارامتر کیفی آب شامل

جدول ۲. اطلاعات استفاده‌شده در محاسبه  $WQI_B$  [۸]

استاندارد WHO			استاندارد ۱۰۵۳ مجاز			استاندارد ۱۰۵۳ مطلوب			عامل
$S_i$	$W_i$	$w_i$	$S_i$	$W_i$	$w_i$	$S_i$	$W_i$	$w_i$	
۲۰۰	۰/۰۶	۲	۱۲	۰/۰۶۶	۲	۱۲	۰/۰۶۶	۲	پتاسیم (mg/l)
۲۰۰	۰/۰۶	۲	۲۰۰	۰/۰۶۶	۲	۲۰۰	۰/۰۶۶	۲	سدیم (mg/l)
۱۵۰	۰/۰۶	۲	۳۰	۰/۰۶۶	۲	۳۰	۰/۰۶۶	۲	منیزیم (mg/l)
۲۰۰	۰/۰۶	۲	۳۰۰	۰/۰۶۶	۲	۳۰۰	۰/۰۶۶	۲	کلسیم (mg/l)
۲۵۰	۰/۰۹	۳	۴۰۰	۰/۱	۳	۲۵۰	۰/۱	۳	سولفات (mg/l)
۲۵۰	۰/۰۹	۳	۴۰۰	۰/۱	۳	۲۵۰	۰/۱	۳	کلراید (mg/l)
۲۴۰	۰/۰۹	۳	-	-	-	-	-	-	بی‌کربنات (mg/l)
۷/۸۵	۰/۱۲۱	۴	۷/۷۵	۰/۱۳۳	۴	۷/۵	۰/۱۳۳	۴	pH
۱۰۰۰	۰/۱۲۱	۴	۱۵۰۰	۰/۱۳۳	۴	۱۰۰۰	۰/۱۳۳	۴	مجموع مواد جامد محلول (mg/l)
۱۵۰۰	۰/۱۲۱	۴	۱۰۰۰	۰/۱۳۳	۴	۵۰۰	۰/۱۳۳	۴	هدایت الکتریکی ( $\mu S/cm$ )
۵۰۰	۰/۱۲۱	۴	۵۰۰	۰/۱۳۳	۴	۲۰۰	۰/۱۳۳	۴	سختی کل (mg/l as $CaCO_3$ )
-	۱	۳۳	-	۱	۳۰	-	۱	۳۰	مجموع

در این معادلات،  $q_i$  کیفیت نسبی عامل  $\lambda_m$ ،  $V_i$  غلظت عامل  $\lambda_m$ ،  $S_i$  حد استاندارد آب آشامیدنی برای عامل  $\lambda_m$ ،  $W_i$  وزن هر عامل است که از معکوس کردن مقدار  $S_i$  به دست می‌آید، مقدار  $K$  در معادلات یادشده مساوی یک، و  $n$  تعداد عوامل به‌کاررفته (۹). تنها استثنا در میان عوامل کیفی، pH است که وزن مربوط به آن  $0.05$  بوده و نرخ کیفی آن نیز به روش دیگری محاسبه می‌شود. اگر مقدار به‌دست‌آمده برای این شاخص کوچک‌تر از  $100$  باشد، نشان‌دهنده مطلوبیت منابع آبی مورد نظر برای آشامیدن است و اگر مقداری مساوی و یا بیشتر از  $100$  داشته باشد، عدم مطلوبیت آن را برای آشامیدن نشان می‌دهد. در جدول ۳ اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه این شاخص ارائه شده است.

### شاخص کیفی آب Mishara و Tiwari ( $WQI_{MT}$ )

این شاخص در سال ۱۹۸۵ توسط Mishra و Tiwari و ارائه شد که در آن از ۹ عامل شامل غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، بی‌کربنات، سولفات، کلراید، مجموع مواد جامد محلول و pH استفاده شده است. معادلات مربوط به محاسبه این شاخص به صورت زیر (معادله‌های ۶ تا ۹) است [۲۳]:

$$q_i = \frac{V_i}{S_i} \times 100 \quad (6)$$

$$q_i(\text{pH}) = \frac{V_{\text{pH}} - \gamma}{\lambda.5 - \gamma} \times 100 \quad (7)$$

$$W_i = \frac{K}{S_i} \quad (8)$$

$$WQI_{MT} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \times W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (9)$$

جدول ۳. اطلاعات استفاده‌شده در محاسبه  $WQI_{MT}$  [۲۳]

عامل	$S_i$	$W_i$
پتاسیم (mg/l)	۱۲	۰/۰۸۳۳
سدیم (mg/l)	۲۰۰	۰/۰۰۵۰
منیزیم (mg/l)	۵۰	۰/۰۲۰۰
کلسیم (mg/l)	۷۵	۰/۰۱۳۳
سولفات (mg/l)	۲۵۰	۰/۰۰۴۰
کلراید (mg/l)	۲۵۰	۰/۰۰۴۰
بی‌کربنات (mg/l)	۱۲۰	۰/۰۰۸۳
pH	۶/۵-۸	۰/۰۰۵۰
مجموع مواد جامد محلول (mg/l)	۶۰۰	۰/۰۰۱۷

$$q_i = \frac{V_i}{S_i} \times 100 \quad (11)$$

$$RI_i = W_i \times q_i \quad (12)$$

$$WQI_{DD} = \sum_{i=1}^n RI_i \quad (13)$$

در این معادلات،  $W_i$  وزن نسبی عامل  $\lambda_m$ ،  $W_i$  وزن داده‌شده به عامل  $\lambda_m$ ،  $n$  تعداد عوامل به‌کاررفته (۱۰)،  $q_i$  نرخ کیفی عامل  $\lambda_m$ ،  $V_i$  مقدار اندازه‌گیری‌شده عامل  $\lambda_m$ ،  $S_i$  مقدار استاندارد ارائه‌شده برای عامل  $\lambda_m$ ،  $RI$  شاخص خطر برای عامل  $\lambda_m$ ، و  $WQI_{DD}$  شاخص کیفی محاسبه شده برای منابع آب است. در جدول ۴ اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه این شاخص ارائه شده است.

### شاخص کیفی آب Davis و Dewiest ( $WQI_{DD}$ )

این شاخص در سال ۱۹۶۶ توسط Davis و Dewiest ارائه شده است که در آن از ۱۰ پارامتر کیفی آب شامل غلظت یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، بی‌کربنات، سولفات، کلراید، مجموع مواد جامد محلول، هدایت الکتریکی و pH استفاده شده است. معادلات مربوط به محاسبه این شاخص به صورت زیر (معادله‌های ۱۰ تا ۱۳) است [۱۴]:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (10)$$



جدول ۴. اطلاعات استفاده‌شده در محاسبه  $WQI_{DD}$  [۱۰]

$S_i$	$W_i$	$w_i$	عامل
۱۲	۰/۰۶۶	۲	پتاسیم (mg/l)
۲۰۰	۰/۰۶۶	۲	سدیم (mg/l)
۵۰	۰/۰۳۳	۱	منیزیم (mg/l)
۷۵	۰/۰۶۶	۲	کلسیم (mg/l)
۲۵۰	۰/۱۳۳	۴	سولفات (mg/l)
۲۵۰	۰/۱	۳	کلراید (mg/l)
۵۰۰	۰/۱	۳	بی‌کربنات (mg/l)
۷/۵	۰/۱۳۳	۴	pH
۵۰۰	۰/۱۶۶	۵	مجموع مواد جامد محلول (mg/l)
۵۰۰	۰/۱۳۳	۴	هدایت الکتریکی ( $\mu S/cm$ )
	۱	۳۰	مجموع

### نتایج و بحث

در جدول ۵ نتایج حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای مختلف در نمونه‌های آب برداشت‌شده از آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوضه آبریز سد شیرین‌دره ارائه شده است. با مقایسه میانگین پارامترهای اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های آب مورد مطالعه مشخص می‌شود رودخانه‌ها از نظر تمام این پارامترها غلظت بیشتری نسبت به چشمه‌ها و مخزن سد دارند. تنها از نظر میانگین دمای، چشمه‌ها مقدار بیشتری نسبت به رودخانه‌ها و مخزن سد نشان می‌دهند. مقدار pH، کلسیم و کلراید در مخزن سد بیش از میانگین این پارامترها در چشمه‌ها است و در مورد سایر پارامترها میانگین چشمه‌ها بیش از مقدار اندازه‌گیری‌شده در مخزن سد است.

از میان چشمه‌ها، چشمه ایوب نسبت به سایر چشمه‌ها مقادیر بیشتری از سختی کل، منیزیم، سدیم و کربنات دارد، و در چشمه میان‌زو نیز بیشترین مقادیر هدایت الکتریکی، مجموع مواد جامد محلول، پتاسیم و بی‌کربنات ثبت شده است. کلسیم، سولفات و کلراید در چشمه قلعه علی محمد، و در چشمه ارناوه بیشترین pH اندازه‌گیری شده است. در مقابل، چشمه آسیازو کمترین مقدار هدایت الکتریکی، مجموع مواد جامد محلول، کلسیم، منیزیم، بی‌کربنات، سولفات و کلراید را دارد و کمترین pH و سدیم در چشمه میان‌زو، و کمترین سختی کل در چشمه ارناوه

ثبت شده است. یون پتاسیم در چشمه‌های ایوب، آسیازو و قلعه علی محمد، و یون کربنات نیز در چشمه‌های آسیازو، میان‌زو، قلعه علی محمد و ارناوه غلظتی مساوی با صفر دارند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود.

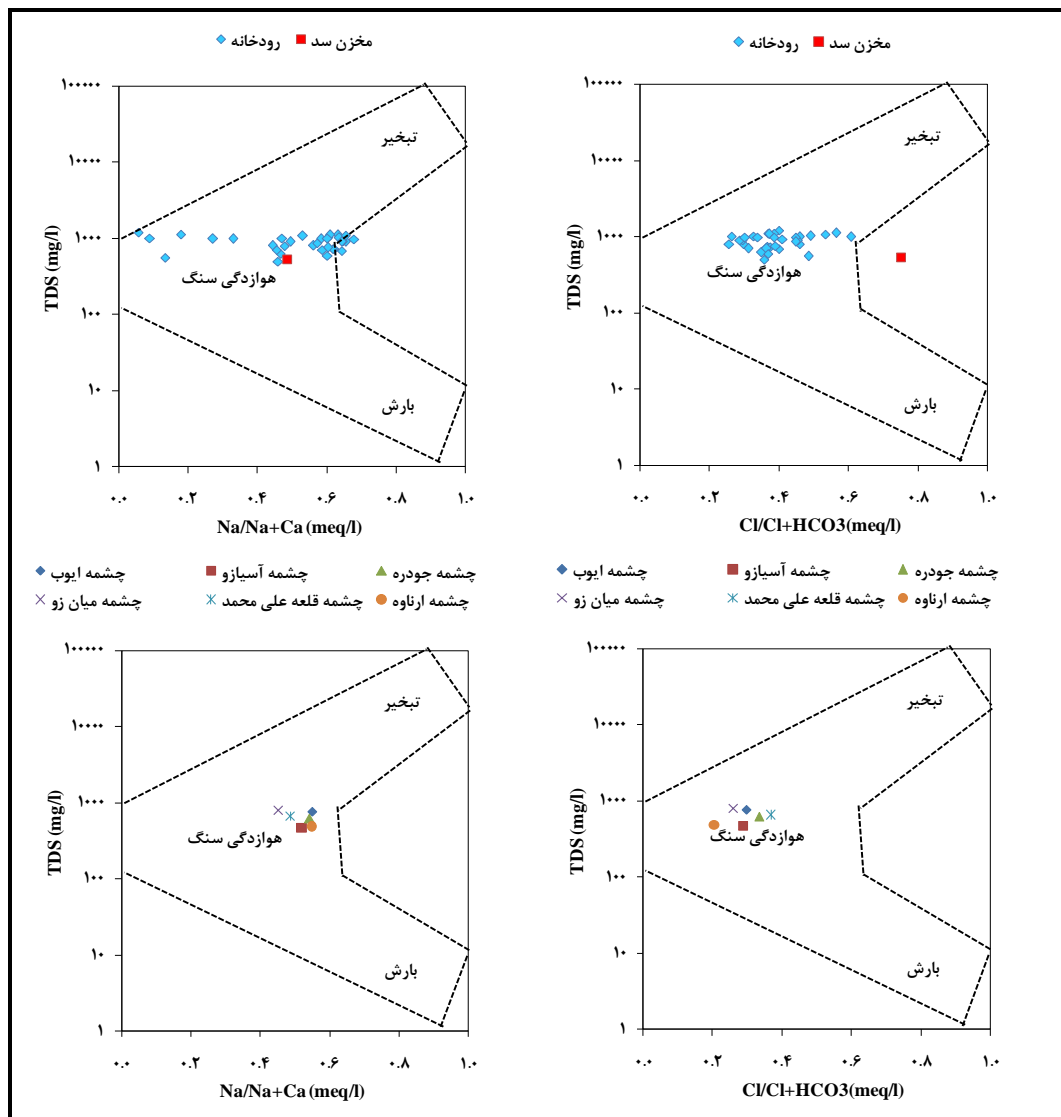
براساس نمودار Gibbs نمونه‌های آب سطحی و زیرزمینی مورد مطالعه مشخص می‌شود فرایند هوازدگی سنگ نسبت به دو عامل تبخیر و بارش تأثیر بیشتری روی ترکیب شیمیایی آب دارد (شکل ۲). در منطقه مطالعه‌شده نوع غالب آب‌وهوا از نوع خشک و نیمه‌خشک است. عامل بارش به طور عمده در نواحی با آب‌وهوای معتدل می‌تواند بر ترکیب شیمیایی آب مؤثر باشد، و عامل تبخیر نیز غالباً در نواحی خشک و بیابانی با دمای بالا و بارش کم مهم‌ترین عامل مؤثر بر ترکیب شیمیایی آب است. از این‌رو، می‌توان گفت که در منطقه مطالعه‌شده هوازدگی سنگ نسبت به دو عامل بارش و تبخیر اثر قابل توجه‌تری بر نوع یون‌های غالب موجود در آب دارد. نتایج نمودار Gibbs نیز این موضوع را تأیید می‌کنند. محققان دیگری مانند روزرخ و همکاران [۳۳] با مطالعه روی ترکیب شیمیایی منابع آب زیرزمینی دشت هرزندات، استان آذربایجان شرقی، و Nazzal و همکاران [۲۵] با بررسی منابع آب شمال غرب عربستان به این نتیجه رسیدند که براساس نمودار Gibbs هوازدگی سنگ نسبت به سایر عوامل نقش مهم‌تری در ترکیب شیمیایی آب دارد.

جدول ۵. مقدار پارامترهای مختلف نمونه‌های آب برداشت‌شده در منطقه مطالعه‌شده (غلظت یون‌ها براساس meq/l است)

محل	pH	EC (µS/cm)	TDS (mg/l)	T (°C)	TH (mg/l as CaCO <sub>3</sub> )	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
W1	۷/۹۰	۱۴۶۵/۰۳	۹۹۵/۹۶	۱۲/۵۲	۲۲۵	۱۹/۲	۳/۰	۱/۹	۰/۰	۰/۰	۴/۵	۱۴/۵	۳/۸
W2	۸/۰۰	۱۰۱۲/۰۶	۶۲۱/۰۱	۱۴/۵۶	۳۲۵	۷/۱	۶/۹	۶/۲	۱/۲	۰/۰	۶/۵	۱۰/۵	۳/۵
W3	۸/۱۸	۱۰۸۶/۰۹	۸۰۲/۰۹	۱۳/۳۰	۲۶۰	۴/۵	۴/۱	۳/۶	۰/۰	۰/۰	۵/۲	۴/۹	۲/۲
W4	۸/۰۹	۱۴۵۶/۱۱	۱۱۱۲/۱۲	۱۳/۰۰	۱۵۵	۷/۳	۷/۵	۱/۶	۱/۲	۰/۰	۳/۱	۹/۱	۴/۰
W5	۸/۰۸	۱۳۲۳/۱۵	۱۱۹۵/۰۵	۱۵/۵۷	۲۴۰	۲۵/۰	۲/۸	۱/۵	۱/۱	۰/۰	۴/۸	۱۹/۱	۳/۲
W6	۸/۳۹	۸۷۴/۹۰	۵۵۳/۰۶	۱۲/۹۳	۲۴۵	۱۰/۵	۱۹/۷	۱/۶	۱/۰	۰/۰	۴/۹	۲۱/۱	۴/۶
W7	۸/۲۹	۹۴۲/۱۱	۴۹۶/۶۵	۱۵/۳۷	۲۰۰	۶/۸	۷/۲	۵/۸	۰/۹	۰/۰	۴/۰	۱۴/۲	۲/۲
W8	۸/۳۳	۱۵۲۲/۲۵	۱۰۲۱/۲۲	۱۳/۱۰	۲۱۵	۴/۲	۶/۱	۶/۴	۰/۰	۱/۵	۲/۸	۱۰/۵	۲/۷
W9	۸/۰۳	۹۵۸/۰۱	۷۹۸/۰۰	۱۵/۳۶	۲۱۲	۳/۹	۴/۹	۵/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۲	۷/۷۲	۳/۶
W10	۸/۳۹	۱۴۲۱/۰۲	۱۱۰۲/۰۰	۱۳/۶۳	۲۵۰	۴/۲	۶/۲	۷/۲	۰/۷	۱/۱	۳/۹	۱۱/۲	۲/۲
W11	۸/۰۹	۱۳۶۴/۶۵	۱۱۰۶/۳۵	۱۲/۰۳	۱۶۰	۴/۳	۷/۱	۶/۷	۰/۰	۰/۰	۳/۲	۱۱/۹	۲/۰
W12	۸/۲۸	۱۱۰۷/۰۷	۷۲۰/۰۲	۱۶/۷۸	۳۰۰	۳/۱	۴/۸	۵/۱	۰/۰	۱/۰	۵/۰	۶/۷	۲/۹
W13	۸/۰۹	۱۲۰۱/۱۵	۸۹۷/۹۸	۱۶/۲۳	۱۸۰	۳/۱	۶/۳	۵/۹	۰/۰	۰/۰	۳/۶	۹/۱	۳/۰
W14	۸/۱۶	۱۲۹۸/۶۹	۱۰۰۶/۰۰	۱۴/۹۸	۲۳۰	۳/۵	۷/۸	۶/۱	۰/۰	۱/۱	۳/۵	۱۰/۶	۱/۷
W15	۸/۰۳	۱۵۲۰/۲۰	۹۸۶/۰۸	۱۴/۰۰	۱۹۰	۴/۷	۷/۲	۶/۶	۰/۰	۰/۰	۳/۸	۱۲/۰	۳/۱
W16	۸/۲۹	۱۲۵۹/۰۵	۹۹۳/۰۹	۱۵/۹۰	۱۷۰	۴/۵	۵/۷	۶/۸	۰/۵	۱/۰	۲/۴	۱۱/۲	۳/۷
W17	۸/۳۳	۱۳۲۳/۲۷	۱۰۶۹/۰۶	۱۵/۰۸	۲۱۵	۶/۳	۴/۸	۷/۱	۰/۰	۱/۵	۲/۸	۱۱/۳	۳/۲
W18	۸/۳۲	۱۲۸۹/۸۰	۸۵۶/۰۰	۱۲/۳۸	۲۱۸	۴/۶	۵/۱	۶/۲	۰/۵	۰/۹	۳/۴	۸/۹	۲/۸
W19	۷/۸۷	۱۳۰۱/۰۰	۸۹۶/۰۳	۱۴/۱۱	۳۱۰	۵/۱	۴/۶	۵/۰	۰/۰	۰/۲	۶/۰	۷/۱	۲/۵
W20	۷/۸۰	۱۵۲۵/۰۳	۱۰۸۳/۰۳	۱۳/۳۹	۲۷۰	۴/۱	۷/۵	۷/۸	۰/۰	۰/۰	۵/۴	۱۱/۱	۳/۲
W21	۸/۲۰	۱۵۴۱/۰۰	۹۸۶/۰۳	۱۴/۸۵	۲۱۵	۳/۵	۵/۲	۱/۳	۱/۲	۰/۰	۴/۳	۴/۰	۲/۲
W22	۸/۲۵	۱۳۳۱/۳۰	۹۲۱/۰۳	۱۴/۰۳	۲۲۵	۳/۶	۶/۵	۶/۶	۰/۳	۰/۹	۳/۶	۹/۵	۲/۵
W23	۸/۱۵	۱۲۹۳/۰۶	۹۶۸/۰۹	۱۳/۲۷	۲۷۰	۲/۳	۶/۳	۷/۰	۰/۵	۱/۴	۴/۰	۱۰/۰	۲/۵
W24	۸/۱۶	۱۰۳۴/۰۰	۷۲۶/۰۰	۱۶/۶۰	۲۵۵	۳/۶	۵/۵	۵/۸	۰/۰	۰/۹	۴/۲	۷/۴	۲/۵
W25	۸/۲۵	۹۰۶/۰۶	۶۸۷/۸۲	۱۵/۲۵	۲۵۵	۲/۱	۶/۱	۳/۸	۰/۲	۰/۹	۴/۲	۵/۰	۲/۸
W26	۸/۰۱	۸۵۶/۵۰	۶۹۸/۰۳	۱۵/۱۱	۲۱۰	۳/۳	۴/۳	۴/۷	۰/۴	۰/۵	۳/۷	۵/۸	۲/۱
W27	۸/۰۹	۹۶۳/۰۶	۸۷۹/۰۰	۱۳/۶۹	۳۰۵	۳/۵	۵/۳	۳/۲	۰/۰	۰/۰	۶/۱	۵/۳	۲/۱
W28	۸/۰۵	۹۲۵/۲۵	۶۹۶/۰۰	۱۳/۶۰	۲۷۵	۳/۷	۵/۳	۳/۱	۰/۰	۰/۴	۵/۱	۴/۷	۲/۳
W29	۸/۴۵	۱۳۰۱/۲۶	۸۹۶/۰۶	۱۴/۰۰	۱۸۰	۳/۱	۶/۳	۵/۶	۰/۱	۰/۰	۳/۶	۹/۳	۱/۴
W30	۸/۲۱	۹۲۱/۰۰	۵۹۳/۰۸	۱۴/۲۵	۱۸۰	۲/۷	۳/۵	۴/۱	۰/۲	۰/۰	۳/۶	۵/۰	۲/۱
W31	۸/۲۰	۱۰۲۵/۰۲	۷۵۲/۵۰	۱۵/۳۳	۱۸۰	۲/۵	۶/۷	۳/۸	۰/۰	۰/۰	۳/۶	۵/۷	۲/۳
W32	۷/۳۰	۱۱۷۸/۷۸	۱۰۰۳/۰۳	۱۴/۳۹	۲۹۵	۷/۰	۴/۰	۶/۲	۰/۱	۰/۰	۵/۹	۸/۰	۲/۱
W33	۸/۵۰	۱۰۹۸/۰۰	۹۸۳/۰۰	۱۲/۲۵	۲۵۵	۶/۳	۵/۶	۳/۱	۰/۱	۰/۰	۵/۱	۶/۰	۲/۲
حداقل	۷/۳۰	۸۵۶/۵۰	۴۹۶/۶۵	۱۲/۰۳	۱۵۵	۲/۱	۲/۸	۱/۳	۰/۰	۰/۰	۲/۴	۴/۰	۱/۴
حداکثر	۸/۵۰	۱۵۴۱/۰۰	۱۱۹۵/۰۵	۱۶/۷۸	۳۲۵	۲۵/۰	۱۹/۷	۷/۸	۱/۲	۱/۵	۶/۵	۲۱/۱	۴/۶
میانگین	۸/۰۹	۱۲۰۰/۵۴	۸۷۸/۹۳	۱۳/۵۲	۲۳۲	۵/۵	۶/۰	۴/۹	۰/۳	۰/۴	۴/۲	۹/۳۵	۲/۷
ایوب	۷/۸۰	۱۱۶۷/۰۶	۷۶۵/۰۶	۳۲/۰۰	۳۰۵	۳/۲	۵/۱	۳/۹	۰/۰	۱/۶	۴/۵	۵/۱	۱/۹
آسیازو	۸/۲۰	۶۱۲/۰۰	۴۶۵/۰۸	۱۹/۱۰	۱۳۵	۱/۹	۲/۰	۳/۱	۰/۰	۰/۰	۲/۷	۲/۳	۱/۱
جودره	۸/۵۰	۸۷۲/۰۰	۶۲۱/۰۰	۱۷/۱	۱۷۵	۲/۷	۴/۱	۳/۲	۰/۳	۰/۵	۳/۰	۶/۱	۱/۵
میان‌زو	۷/۶۰	۱۳۰۶/۶۶	۷۹۰/۰۱	۱۵/۵۸	۲۳۵	۲/۳	۴/۱	۱/۹	۰/۹	۰/۰	۴/۷	۲/۹	۱/۶
قلعه													
علی محمد	۸/۰۰	۹۳۰/۳۱	۶۵۲/۰۹	۱۴/۱۳	۱۸۰	۳/۷	۴/۶	۳/۵	۰/۰	۰/۰	۳/۶	۶/۵	۲/۱
ارناوه	۸/۲۴	۷۴۴/۴۰	۴۸۴/۰۹	۱۵/۵۰	۷۵	۱/۹	۳/۴	۲/۴	۰/۲	۰/۰	۴/۵	۴/۰	۱/۱
حداقل	۷/۶۰	۶۱۲/۰۰	۴۶۵/۰۸	۱۲/۵۸	۷۵	۱/۹	۲/۰	۱/۹	۰/۰	۰/۰	۲/۷	۲/۳	۱/۱
حداکثر	۸/۵۰	۱۳۰۶/۶۶	۷۹۰/۰۱	۳۱/۵۰	۳۰۵	۳/۷	۵/۱	۳/۹	۰/۹	۱/۶	۴/۷	۶/۵	۲/۱
میانگین	۸/۰۵	۹۳۸/۵۰	۶۲۹/۵۰	۱۸/۷۸	۷۵	۲/۶	۳/۸	۳/۰	۰/۲	۰/۳	۳/۸	۴/۴	۱/۵
مخزن سد	۸/۰۷	۸۲۷/۸۹	۵۲۵/۰۰	۱۲/۶	۶۴	۳/۱	۲/۹	۲/۹	۰/۰	۰/۰	۱/۲	۳/۷	۱/۹

روندخانه

مجموعه



شکل ۲. نمودار Gibbs منابع آب مطالعه‌شده (برگرفته از [۱۳])

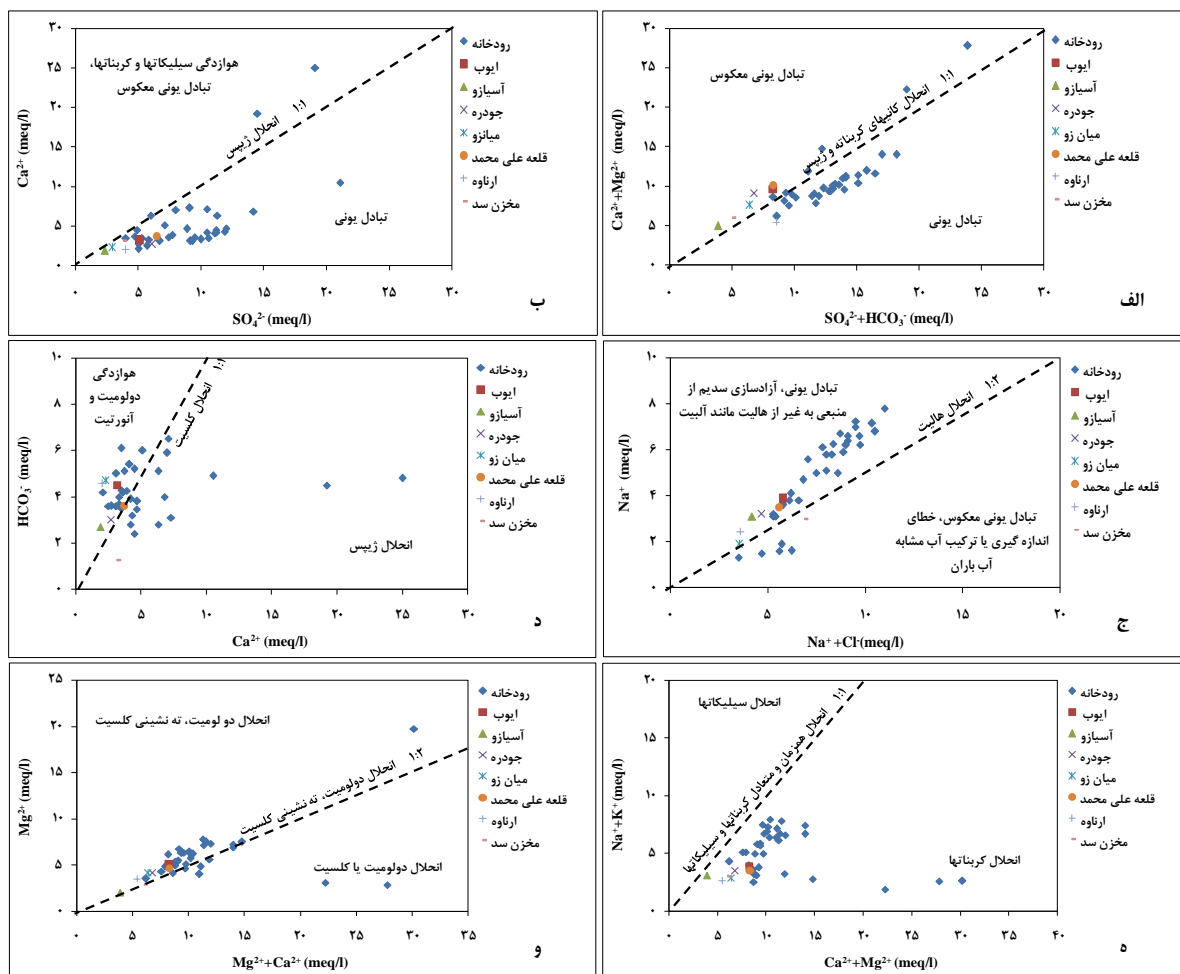
چشمه‌های جودره و قلعه علی محمد  $Mg-SO_4$ ، و آب چشمه آسیازو  $Na-HCO_3$  است. نمونه آب مخزن سد نیز تیپ و رخساره  $Ca-SO_4$  دارد. براساس نمودار Piper (شکل ۳) نمونه‌های آب برداشت‌شده از رودخانه‌های سطح حوضه آبریز به طور عمده در محدوده تأثیر سازندهای شیلی (محدوده ۶)، و سازندهای حاوی ژئیس (محدوده ۱) قرار دارند. نمونه‌های آب چشمه‌ها به طور عمده در محدوده میانی نمودار Piper قرار گرفته‌اند، اما تا حدودی می‌توان ترکیب شیمیایی آب چشمه‌های قلعه علی محمد و جودره را تحت تأثیر شیل (نزدیک به محدوده ۶)، و آب چشمه ارناوه را نزدیک به محدوده انحلال کلسیت (محدوده ۲) در نظر گرفت.

نمودار Piper و تحلیل‌های انجام‌شده با استفاده از نرم‌افزار Rock Ware Aqqa v.1.1.1.1 نشان می‌دهد کاتیون‌های منیزیم، کلسیم و سدیم در تعیین تیپ، و آنیون‌های سولفات و بی‌کربنات در تعیین رخساره آنها نسبت به سایر یون‌ها نقش مهم‌تری دارند (شکل ۳ و جدول ۶). براساس جدول ۶ در ۳۹/۴ درصد از نمونه‌های آب برداشت‌شده از رودخانه تیپ و رخساره  $Na-SO_4$ ، در ۳۰/۳ درصد تیپ و رخساره  $Mg-SO_4$ ، در ۱۸/۱ تیپ و رخساره  $Ca-SO_4$ ، ۹/۱ درصد تیپ و رخساره  $Mg-HCO_3$ ، و در ۳ درصد از آنها تیپ و رخساره  $Ca-HCO_3$  مشاهده می‌شود. آب چشمه‌های ایوب، میان‌زو و ارناوه  $Mg-HCO_3$



دولومیت و آنورتیت (شکل ۴-د)، انحلال کربنات‌ها (شکل ۴-ه)، و انحلال دولومیت و ته‌نشینی کلسیت براساس نمودارهای دوتایی به عنوان مهم‌ترین فرایندهای مؤثر بر ترکیب شیمیایی آب معرفی می‌شوند. برای نمونه، آب مخزن سد نیز فرایندهای تبادل یونی معکوس (شکل ۴-الف)، تبادل یونی (شکل ۴-ب)، تبادل یونی معکوس (شکل ۴-ج)، انحلال ژپیس (شکل ۴-د)، انحلال کربنات‌ها (شکل ۴-ه) و انحلال دولومیت و ته‌نشینی کلسیت (شکل ۴-و) مهم‌ترین فرایندهای اثرگذار بر ترکیب شیمیایی آب هستند.

(شکل‌های ۴-الف و ۴-ب)، تبادل یونی و انحلال آلبیت (شکل ۴-ج)، انحلال ژپیس و کلسیت و هوازدهگی دولومیت و آنورتیت (شکل ۴-د)، انحلال کربنات‌ها (شکل ۴-ه) و انحلال دولومیت و ته‌نشینی کلسیت و به مقدار کمتری انحلال دولومیت یا کلسیت روی ترکیب شیمیایی نمونه‌های آب برداشت‌شده از رودخانه‌های سطح حوضه آبریز مؤثر هستند. برای نمونه‌های آب چشمه‌ها، فرایندهای تبادل یونی معکوس (شکل ۴-الف)، تبادل یونی (شکل ۴-ب)، تبادل یونی و انحلال آلبیت (شکل ۴-ج)، هوازدهگی



شکل ۴. نمودارهای دوتایی منابع آب مطالعه‌شده (برگرفته از [۲۰ و ۲۲])

آلبیت، دولومیت، کائولینیت، ژپیس، کلریت، هالیت و مونتموریلونیت است. کانی‌های کلسیت، دولومیت، ژپیس، هالیت، و آلبیت طی واکنش با آب و از طریق معادلات زیر یون‌هایی مانند کلسیم، بیکربنات، منیزیم، سولفات، سدیم و کلراید را به داخل آب رها می‌کنند. بنابراین، انحلال این

در جدول ۷ نتایج حاصل از تعیین نوع کانی‌ها و درصد فراوانی آنها در نمونه‌های رسوب مورد مطالعه ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کانی‌های کلسیت و کوارتز در تمام نمونه‌های رسوب شناسایی شده‌اند. پس از این کانی‌ها، بیشترین میانگین مربوط به کانی‌های ایلیت،

کانی‌ها می‌تواند بر ترکیب شیمیایی منابع آب مورد مطالعه اثرگذار باشد، به طوری که نتایج حاصل از نمودارهای دوتایی نیز این موضوع را تأیید می‌کنند (روابط ۱۴-۱۸).

CaCO<sub>3</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O → Ca<sup>2+</sup> + 2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (۱۴)

CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + 2CO<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O → Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + 4HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (۱۵)

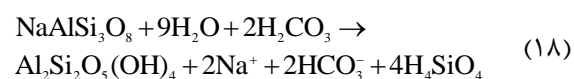
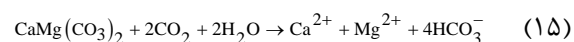
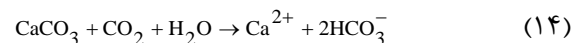
CaSO<sub>4</sub> → Ca<sup>2+</sup> + SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (۱۶)

NaCl → Na<sup>+</sup> + Cl<sup>-</sup> (۱۷)

NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> + 9H<sub>2</sub>O + 2H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> → Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> + 2Na<sup>+</sup> + 2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + 4H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> (۱۸)

کانی‌های رسی انواع مختلفی دارند که کائولینیت، مونتوریلونیت، ایلیت و کلریت فراوان‌ترین کانی‌های رسی شناخته‌شده در طبیعت هستند که از میان آنها تنها کانی کائولینیت با فرمول Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> فاقد کاتیون‌های قلیایی و یا قلیایی خاکی است، اما در ساختار سایر کانی‌های رسی یادشده مقادیر فراوانی از این گونه کاتیون‌ها مشاهده می‌شود، به طوری که در ساختار مونتوریلونیت ((Mg,Na,Al)<sub>5</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>6</sub>)، ایلیت ((K,H<sub>3</sub>O)(Al,Mg,Fe)<sub>2</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>[(OH)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)]) و کلریت

کانی‌های رسی انواع مختلفی دارند که کائولینیت، مونتوریلونیت، ایلیت و کلریت فراوان‌ترین کانی‌های رسی شناخته‌شده در طبیعت هستند که از میان آنها تنها کانی کائولینیت با فرمول Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> فاقد کاتیون‌های قلیایی و یا قلیایی خاکی است، اما در ساختار سایر کانی‌های رسی یادشده مقادیر فراوانی از این گونه کاتیون‌ها مشاهده می‌شود، به طوری که در ساختار مونتوریلونیت



کانی‌های رسی انواع مختلفی دارند که کائولینیت، مونتوریلونیت، ایلیت و کلریت فراوان‌ترین کانی‌های رسی شناخته‌شده در طبیعت هستند که از میان آنها تنها کانی کائولینیت با فرمول Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> فاقد کاتیون‌های قلیایی و یا قلیایی خاکی است، اما در ساختار سایر کانی‌های رسی یادشده مقادیر فراوانی از این گونه کاتیون‌ها مشاهده می‌شود، به طوری که در ساختار مونتوریلونیت

جدول ۷. نتایج حاصل از آنالیز XRD و تعیین نوع کانی‌های اصلی (بر حسب درصد) در نمونه‌های رسوب مورد مطالعه

نام نمونه	کوارتز	کلسیت	دولومیت	هالیت	مونتوریلونیت	ایلیت	کلریت	کائولینیت	ژیپس	آلبیت	مناطق نامعین
S1	۵۱/۳	۳۱/۲	-	۰/۹	۰/۵	-	۴/۹	-	۱۰/۶	-	۰/۶
S2	۵۸/۱	۰/۴	۲۱/۶	۱/۸	۰/۴	۱۷/۶	-	-	-	-	۱/۰
S3	۳۲/۱	۳۳/۱	-	-	۰/۸	-	-	۲۵/۸	-	۶/۶	۱/۶
S4	۶۹/۱	۳/۷	۱/۹	۲/۰	۰/۹	-	-	-	۳/۰	۱۹/۴	۰/۰
S5	۵۰/۵	۲۲/۹	-	-	۰/۸	۱۶/۸	-	۲/۹	۶/۰	-	۰/۱
S6	۵۷/۸	۱۹/۰	-	-	۰/۸	۱۵/۴	-	۵/۶	۱/۱	-	۰/۳
S7	۶۱/۷	۱۹/۷	-	-	۲/۳	۱۲/۱	-	-	۳/۰	-	۱/۲
S8	۴۶/۶	۲۱/۰	-	-	-	۱۶/۵	-	۹/۳	۴/۵	-	۲/۱
S9	۵۲/۸	۲۶/۱	-	-	-	۶/۵	-	-	۱۲/۵	-	۲/۱
S10	۴۹/۸	۱۹/۲	-	-	-	۹/۲	-	۱۲/۲	۶/۴	-	۳/۲
میانگین	۵۲/۹	۱۹/۶	۱۱/۷	۱/۵	۰/۹	۱۳/۴	۴/۹	۱۱/۱	۵/۸	۱۳/۰	۱/۱

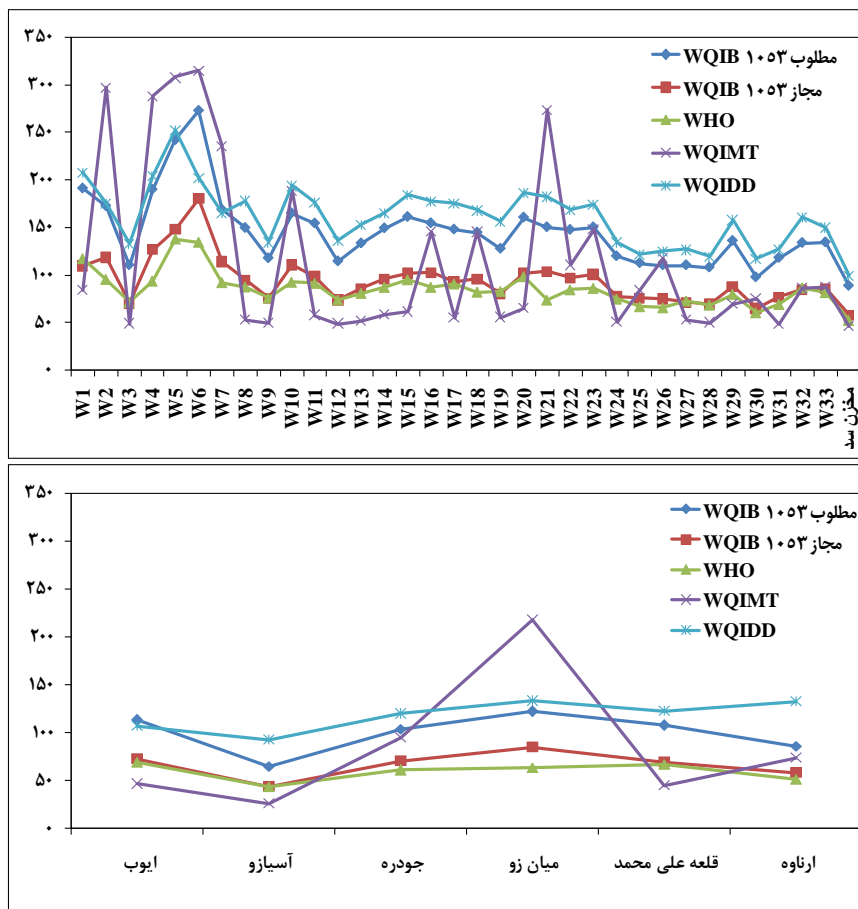
در شکل ۵ نمودار مقادیر شاخص‌های کیفی مختلف محاسبه‌شده برای نمونه‌های آب مورد مطالعه، و در جدول ۸ طبقه‌بندی کیفی این نمونه‌های آب ارائه شده است. از نظر WQI<sub>B</sub> و استاندارد ۱۰۵۳ مطلوب و WQI<sub>DD</sub> در

درصد بالاتری از نمونه‌های آب رودخانه‌های سطح حوضه آبریز در رده کیفی ضعیف قرار دارند. براساس WQI<sub>B</sub> و استانداردهای ۱۰۵۳ مجاز و WHO نیز درصد بیشتری از نمونه‌های آب رودخانه در رده خوب، و براساس WQI<sub>MT</sub>

در شکل ۵ نمودار مقادیر شاخص‌های کیفی مختلف محاسبه‌شده برای نمونه‌های آب مورد مطالعه، و در جدول ۸ طبقه‌بندی کیفی این نمونه‌های آب ارائه شده است. از نظر WQI<sub>B</sub> و استاندارد ۱۰۵۳ مطلوب و WQI<sub>DD</sub> در

آب چشمه‌های منطقه مورد مطالعه، به‌ویژه چشمه‌های آسیازو و ارناره که رده‌های کیفی بالاتری نسبت به سایر چشمه‌ها دارند، پس از رسیدن به سطح زمین و پیوستن به آب رودخانه‌های جاری موجب افزایش کیفیت آب شده و پس از ورود به مخزن، کیفیت آب مخزن نسبت به آب‌های سطحی و زیرزمینی مورد مطالعه برای آشامیدن بهبود یافته است. مشابه با این نتیجه‌گیری، ندری و همکاران [۲۴] با مطالعه آب رودخانه‌ها و چشمه‌های بخش شمال شرقی رامهرمز در استان خوزستان به این نتیجه رسیدند که آب‌های زیرزمینی این منطقه کیفیت بالاتری برای آشامیدن و کشاورزی دارند. همچنین، Nielsen و همکاران [۲۶] عوامل مؤثر بر افزایش املاح محلول در منابع آب بخش شرقی استرالیا را بررسی کردند و دریافتند تأثیر خشکسالی و سازندهای انحلال‌پذیر این منطقه به‌شدت موجب کاهش کیفیت آب شده و این اثرات کمیت و کیفیت آب رودخانه‌ها را نسبت به آب‌های زیرزمینی کاهش داده است.

در رده مناسب قرار می‌گیرند. از میان نمونه‌های آب چشمه‌های مورد مطالعه، چشمه آسیازو نسبت به سایر چشمه‌ها در رده‌هایی با کیفیت مطلوب‌تر قرار دارد و رده کیفی ضعیف برای آن مشاهده نمی‌شود. پس از این چشمه، چشمه ارناره قرار دارد که تنها براساس شاخص WQIDD کیفیت ضعیفی دارد و طبق سایر شاخص‌ها کیفیتی مناسب و خوب را نشان می‌دهد. آب چشمه‌های ایوب، جودره و قلعه علی محمد رده‌های کیفی مشابهی را نشان می‌دهند، به طوری که دو رده خوب، دو رده ضعیف و یک رده مناسب دارند. چشمه میان‌زو نسبت به سایر چشمه‌ها کیفیتی پایین‌تر برای آشامیدن نشان می‌دهد و دو رده ضعیف، دو رده خوب و یک رده نامناسب دارد. آب مخزن سد در مقایسه با آب‌های سطحی و زیرزمینی مورد مطالعه کیفیت بهتری برای آشامیدن دارد، به طوری که براساس شاخص‌های کیفی محاسبه‌شده چهار رده خوب و یک رده مناسب دارد و رده ضعیف برای آن نمی‌توان در نظر گرفت. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت



شکل ۵. مقادیر شاخص‌های کیفی آب آشامیدنی برای منابع آب مورد مطالعه

جدول ۸. رده‌بندی منابع آب مورد مطالعه براساس شاخص‌های کیفی آب آشامیدنی

مخزن سد	چشمه					درصد نمونه‌های آب رودخانه	کیفیت	رده‌بندی	شاخص کیفی
	ارناوه	قلعه علی محمد	میان‌زو	جودره	آسیازو				
						۰/۰۰	عالی	<۵۰	
						۳/۰۳	خوب	۵۰-۱۰۰	۱۰۵۳
						۹۰/۰۹	ضعیف	۱۰۰-۲۰۰	مطلوب
						۶/۰۷	خیلی ضعیف	۲۰۰-۳۰۰	
						۰/۰۰	غیر قابل آشامیدن	>۳۰۰	
						۰/۰۰	عالی	<۵۰	
						۶۳/۶۳	خوب	۵۰-۱۰۰	۱۰۵۳
						۳۶/۳۷	ضعیف	۱۰۰-۲۰۰	مجاز
						۰/۰۰	خیلی ضعیف	۲۰۰-۳۰۰	
						۰/۰۰	غیر قابل آشامیدن	>۳۰۰	
						۰/۰۰	عالی	<۵۰	
						۹۰/۹۰	خوب	۵۰-۱۰۰	
						۹/۱۰	ضعیف	۱۰۰-۲۰۰	WHO
						۰/۰۰	خیلی ضعیف	۲۰۰-۳۰۰	
						۰/۰۰	غیر قابل آشامیدن	>۳۰۰	
						۶۳/۶۳	مناسب	<۱۰۰	WQIMT
						۳۶/۳۷	نامناسب	≥۱۰۰	
						۰/۰۰	عالی	<۵۰	
						۰	خوب	۵۰-۱۰۰	
						۸۷/۸۷	ضعیف	۱۰۰-۲۰۰	WQIDD
						۱۲/۱۳	خیلی ضعیف	۲۰۰-۳۰۰	
						۰/۰۰	غیر قابل آشامیدن	>۳۰۰	

سلول آبی نشان‌دهنده قرارگیری نمونه آب چشمه مورد نظر در آن رده است.

چشمه غلظت صفر ثبت شده است. به‌رغم اینکه چشمه ایوب بین چشمه‌های آسیازو و ارناوه قرار دارد، اما از نظر رده‌های کیفی آب آشامیدنی مشابه با چشمه‌های جودره و قلعه علی محمد است. این موضوع می‌تواند به دمای زیاد چشمه ایوب مرتبط باشد که به طور معمول بین ۳۰ تا ۳۵ در نوسان است [۱۹]. این دمای زیاد موجب برهم‌کنش بیشتر میان آب و سنگ شده و در نتیجه، املاح محلول بیشتری می‌تواند وارد آب شود و کیفیت آن را کاهش دهد. Capecchiacci و همکاران [۹] با مطالعه منابع آب منطقه هیدروترمال Montecatini، شمال غرب Tuscany، ایتالیا، و همچنین، Ta و همکاران [۳۶] با بررسی ترکیب شیمیایی چشمه‌های آب گرم و سایر منابع آبی منطقه Chongqing، چین، نیز به طور مشابه دریافتند غلظت املاح محلول در چشمه‌های آب گرم که دمای بیشتری نسبت به سایر منابع آب دارند، زیادتر است.

طی مطالعه‌ای جهانی طی سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۱۹ Thorslund و همکاران [۳۹] نشان دادند شوری و میزان املاح محلول موجود در آب به‌شدت به اثرات اقلیمی، زمین‌شناسی و نوع فعالیت‌های انسانی وابسته است و اثرپذیری منابع آب زیرزمینی در برابر این تغییرات نسبت به آب‌های سطحی تا حدودی کمتر است. این محققان اثرپذیری بیشتر آب‌های سطحی از آلودگی‌های طبیعی و انسان‌زاد را دلیل افزایش نسبی املاح محلول در آب‌های سطحی و در نتیجه کاهش کیفیت آنها برای مصارف مختلف نسبت به آب‌های زیرزمینی عنوان کردند.

همان‌گونه که در جدول ۵ نشان داده شده است، چشمه آسیازو کمترین مقدار هدایت الکتریکی، مجموع مواد جامد محلول، کلسیم، منیزیم، بیکربنات، سولفات و کلراید را دارد، و چشمه ارناوه نیز حداقل مقدار سختی کل و سدیم را نشان می‌دهد. از نظر غلظت پتاسیم و کربنات نیز در آب هر دو



در این سازند موجب می‌شود آب چشمه‌هایی که از این سازند سرچشمه می‌گیرند، املاح محلول کمتر و در نتیجه، کیفیت بهتری داشته باشد.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه آب‌های سطحی و آب چشمه‌های موجود در حوضه آبریز سد شیرین‌دره و همچنین، آب مخزن این سد براساس مطالعات هیدروژئوشیمیایی و مطالعات کیفی آب آشامیدنی مورد مقایسه قرار گرفتند. درمورد تمام منابع آب مورد مطالعه عامل هوازدگی سنگ نسبت به دو عامل تبخیر و بارش تأثیر بسیار بیشتری بر تعیین ترکیب شیمیایی دارد. همچنین، توسعه تیپ و رخساره‌هایی با غلبه یون‌های سدیم، کلسیم، منیزیم، سولفات و بی‌کربنات نشان‌دهنده نقش واحدهای سنگی ژیبسی و شیلی به عنوان مهم‌ترین منبع ورود این یون‌ها به داخل آب شناسایی شدند. نمودارهای دوتایی عواملی نظیر تبادل یونی، انحلال کربنات‌ها، انحلال ژیبس و تبادل یونی معکوس را در رده مهم‌ترین واکنش‌های هیدروژئوشیمیایی مؤثر بر شیمی منابع آب قرار دادند. کانی‌شناسی رسوبات مورد مطالعه، بیشتر کانی‌های موجود در این نمونه‌ها را کلسیت، دولومیت، ژیبس و انواعی از کانی‌های رسی معرفی کرد که نتایج حاصل از نمودارهای دوتایی برای تشخیص نوع فرایندهای هیدروژئوشیمیایی اثرگذار بر ترکیب شیمیایی آب را تأیید کرد. از نظر مقادیر شاخص‌های کیفی آب آشامیدنی، آب مخزن سد نسبت به آب‌های سطحی، رده‌های کیفی با کیفیت بهتری را نشان داد که علت آن را می‌توان پیوستن آب چشمه‌هایی با کیفیت بهتر مانند چشمه‌های آسیازو و ارناوه (که در نزدیکی مخزن سد قرار دارند) در نظر گرفت. سازند تیرگان با مقدار آهک بیشتر تنها سازند در حوضه آبریز مورد مطالعه است که قابلیت کارستی شدن و ذخیره آب را دارد. بنابراین، توسعه چشمه‌هایی مانند چشمه ارناوه در این سازند توانسته است آب زیرزمینی با کیفیت بهتری را تولید کند که با پیوستن به آب‌های سطحی و جاری شدن به سمت سد، موجب بهبود کیفیت آب مخزن سد شیرین‌دره می‌شود. نتایج نمودار Piper نیز نشان داد اثر انحلال کلسیت روی ترکیب شیمیایی آب چشمه ارناوه نسبت به سایر چشمه‌ها و آب‌های سطحی مشخص‌تر است. برای درک بهتر فرایندهای مؤثر بر ترکیب شیمیایی

یکی از دلایلی که می‌تواند بهتر بودن کیفیت آب چشمه‌های آسیازو و ارناوه را توضیح دهد، منشأ آنها است. سازند تیرگان در حوضه آبریز مورد مطالعه تنها سازندی است که قابلیت کارستی شدن و توسعه چشمه‌هایی با کیفیت بهتر را دارد. این سازند دارای لایه‌بندی ساده بوده و از افق‌های ضخیم آهک در تناوب با مارن تشکیل شده است، اما با دید کلی می‌توان میزان آهک در این سازند را بیشتر از مارن مشاهده کرد [۳۴]. همان‌گونه که اشاره شد، بخش عمده منطقه مطالعه‌شده از سازندهای مارنی، ماسه‌سنگی و شیلی پوشیده شده‌اند که با انحلال و برهم‌کنش خود با آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌توانند میزان ورود و خروج یون‌ها را به داخل آب کنترل کنند. اما سازند آهکی تیرگان به‌رغم توانایی کارستی شدن، با وسعت کمتر و میزان آهک بیشتر نسبت به مارن می‌تواند با برهم‌کنش خود با آب، مقدار کمتری از املاح محلول را وارد آب کند. انحلال آهک می‌تواند موجب ورود یون‌های کلسیم و بی‌کربنات به داخل آب شود و نسبت به شیل، مارن و ماسه‌سنگ که حاوی درصد بالایی از کانی‌های رسی، ژیبس، کلسیت، دولومیت و هالیت هستند، املاح محلول کمتری را وارد محیط آب می‌کند. بنابراین، می‌توان منشأ چشمه‌های آسیازو و ارناوه را سازند آهکی تیرگان در نظر گرفت که این امر منجر به کیفیت بهتر آب این چشمه‌ها در مقایسه با سایر چشمه‌های موجود در منطقه می‌شود. از طرفی، در نمودار Piper ترسیم شده برای منابع آب مورد مطالعه (شکل ۳) نمونه آب چشمه ارناوه نسبت به سایر نمونه‌های آب تا حدودی نزدیک‌تر به محدوده انحلال کلسیت ترسیم شده است که خود بیانگر تأثیر انحلال آهک روی شیمی آب این چشمه است. در نتیجه، پیوستن آب این چشمه‌ها و آب‌های سطحی می‌تواند موجب بهبود کیفیت آب مخزن سد شود. مشابه با این نتیجه‌گیری، باقری و همکاران [۵] با مطالعه ایزوتوپی و هیدروژئوشیمیایی چشمه ارناوه در منطقه مطالعه‌شده به این نتیجه رسیدند که آب این چشمه در مقایسه با سایر منابع آب سطحی موجود در منطقه کیفیت بهتر و املاح محلول پایین‌تری دارد و دلیل این امر را منشأ گرفتن آب این چشمه از نزولات جوی ذخیره‌شده در سازند تیرگان عنوان کردند. بنابراین، مجموع عواملی مانند وجود آهک بیشتر در سازند تیرگان و همچنین، نفوذ آب باران و ذخیره آن

- indices to evaluate groundwater quality and its suitability in middle Gangetic floodplain, Bihar. 2021;3(21):426.
- [7]. Biswas AK, Tortajada C. Water quality management: a globally neglected issue. *International Journal of Water Resources Development*. 2019;9(27):913-916.
- [8]. Brown RM, McClelland NI, Deininger RA, Tozer RG. A water quality index: Do we dare?. *Water & Sewage Works*. 1994;117(33):339-343.
- [9]. Capecchiacci F, Tassi F, Vaselli O, Bicocchi G, Cabassi J, Giannini I, et al. A combined geochemical and isotopic study of the fluids discharged from the Montecatini thermal system (NW Tuscany, Italy). *Applied Geochemistry*. 2015; 59(2):33-46.
- [10]. Davis SN, Dewiest RJM. *Hydrogeology*. New York: Wiley;1966.
- [11]. Davraz A, Batur B. Hydrogeochemistry characteristics of groundwater and health risk assessment in Yavlac-Gelendost basin (Turkey). 2021;67(22):102-123.
- [12]. Fakhradini S, Abbasnejad A. The influence of weathering on hydrogeochemistry of streams draining volcanic rocks: Bidkhan stream, southeast of Bardsir in Kerman. *Geography and Planning*. 2015;53(53):203-226. [Persian]
- [13]. Gibbs RJ. *Mechanisms Controlling World Water Chemistry*. Science. 1970; 170(3962):1088-1090.
- [14]. Gibrilla A, Bam EKP, Adomako D, Ganyaglo S, Osae S, Akiti T, et al. Application of water quality index (WQI) and multivariate analysis for groundwater quality assessment of the Birimian and Cape Coast granitoid complex: Densu River Basin of Ghana. *Water Quality, Exposure and Health*. 2011;3(63):205-220.
- [15]. Ha PT, Kokutse N, Bach DN. Assessing and selecting interventions for river water quality improvement within the context of population growth and urbanization: a case study of the Cau river basin in Vietnam. *Environmet. Development and Sustainability*. 2017;19(10):1701-1729.
- [16]. Habibinia, Kord M, Taheri K. Effect of geological formations on the quality and geochemical characteristics of groundwater Shiyan plain aquifer, Kermanshah. 2021;2(12):120-133.[Persian]
- [17]. Ighalo JO, Adeniyi AG, Marquws G. Artificial intelligence for surface water quality monitoring and assessment: a systematic literature analysis. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2020;2(3):456-462.

منابع آب سطحی و زیرزمینی در منطقه مطالعه شده، باید از سایر چشمه‌های توسعه یافته در این منطقه و همچنین، چاه‌های موجود نیز نمونه برداری شود تا بتوان مقایسه دقیق تری میان آب‌های سطحی و زیرزمینی انجام داد. همچنین، پایش دوره‌ای کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در این منطقه و سنجش عوامل آلاینده انسان‌زاد که مرتبط با فعالیت‌های کشاورزی و دامداری و نیز پساب‌های خانگی هستند، می‌تواند به ارزیابی تأثیر این آلاینده‌ها و مقایسه آن در آب‌های زیرزمینی و سطحی و مخزن سد شیرین‌دره منجر شود.

### سپاسگزاری

این پژوهش براساس طرح پژوهشی شماره ۳/۴۷۹۸۴ (رساله دکتری) مصوب تاریخ ۱۳۹۷/۴/۲۰ به انجام رسیده است که به این وسیله از حمایت معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد قدردانی می‌شود. همچنین، از شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی که بخشی از داده‌های مورد استفاده در این پژوهش را فراهم کردند و کارشناسان محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

### منابع

- [1]. Afshar Harb A. *Geology of Koppeh-Dagh*. Tehran: Geological Survey of Iran; 1994. [Persian]
- [2]. Al-Mashagbah A. Assessment of surface water quality of King Abdullah Canal, using physico-chemical characteristics and water quality index, Jordan. *Journal of Water Resources and Protection*. 2015;7(4):250-262.
- [3]. Amin Pour Shiani S, Mohammadi M, Khaledian MR, Mir Roshandel A. Assessment of quality of Gaz Roudbar River by NSFQI and Liou pollution index. *Wetland Ecobiology*. 2016;8(27):63-74. [Persian]
- [4]. Ardavan B, Farhad H. Study the effect of geological formations on the water quality, Western Dehdasht aquifer. *Geography*. 2009;3(11):93-112. [Persian]
- [5]. Bagheri F, Karami GH, Bagheri R, Najafzadeh R, Ronaghi A. Isotope-hydrogeochemistry of Arnave karstic spring and Shirin Darreh dam reservoir, North Kgorasan. *Quaternary Journal of Iran*. 2019;4(3):321-339. [Persian]
- [6]. Bhatt AG, Kumar A, Trivedi PR. Investigation of multivariate statistics and water quality

- [18]. Karakus CB, Yildiz S. Evaluation for irrigation water purposes of groundwater quality in the vicinity of Sivas city center (Turkey) by using GIS and an irrigation water quality index. *Irrigation and Drainage*. 2020;69(1):121-137.
- [19]. Kazemi M. Hydrogeochemical investigation, reason of high temperature of water and present conceptual model of underground condition of "Ayüb and Shafa Hot Springs" (North Khorasan Province). 2014; Msc thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. [Persian]
- [20]. Kozłowski M, Komisarek J. Identification of the hydrogeochemical processes in groundwater of gleysols and retisols topsequence of the Opalenica Plain. *Journal of Ecological Engineering*. 2016;17(2):113-120.
- [21]. Li S, Zhang, Q. Main human impacts on the upper Han river basin and water quality control for the Middle Route of south to north water transfer project, China. *Chinese Journal of Geochemistry*. 2006;25(2):159-168.
- [22]. Maiga DT, Nyoni H, Mamba BB, Masagati TAM. The role and influence of hydrogeochemistry in the behavior and fate of silver nanoparticles in freshwater systems. *SN Applied Sciences*. 2020;2(41):28-340.
- [23]. Mishra M, Tiwari TN. A preliminary assignment of water quality index to major rivers. *Indian Journal of Environmental Protection*. 1985;5(33):276-289.
- [24]. Nadri A, Khalili M, Kalantari N. Quality assessment of river and spring water for drinking and agricultural purposes. 2015. 1<sup>st</sup> national conference of water management; with optimum use of water in agriculture approach. 2015; August, Hamadan. [Persian]
- [25]. Nazzal Y, Ahmed I, Al-Arifi NS, Ghrefat H, Zaidi F.K, El-Waheidi MM. et al. 2020. A pragmatic approach to study the groundwater quality suitability for domestic and agricultural usage, northwest of Saudi Arabia. *Environmental Monitoring and Assessment*. 186(8):46-59.
- [26]. Nielsen DI, Brock MA, Rees GN, Baldwin DS. Effect of increasing salinity on freshwater ecosystems in Australia. *Australian Journal of Botany*. 2003;51(2):655-665.
- [27]. Othman F, Alaaeldin ME, Seyam M, Ahmed AN, Teo FY, Fai CM, et al. Effective river water quality index prediction considering minimal number of inputs variables. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2020;14(1):1392-1410.
- [28]. Parastar S, Poureshg B, Poureshg Y, Dargahi A, Vosoughi M, Rezaei, M. Quality Assessment of Hiroo River by NSFQI and WILCOX Indices in Khalkhal. *Health and Hygiene*. 2012;4(3):273-283. [Persian]
- [29]. Piper AM. A graphic procedure in geochemical interpretation of water analyses. *Transactions American Geophysics Union*. 1944;25(2):914-923.
- [30]. Ram A, Tiwari SK, Pandey HK, Chaurasia AK, Singh S, Singh YV. Groundwater quality assessment using water quality index (WQI) under GIS framework. 2021;11(46):307-320.
- [31]. Rasouli S, Bazargan J, Shoaie SM. Application of IRWQISC index in water quality evaluation of dam reservoirs (case study: Golabar dam reservoir, Zanjan). 2020;13(6):1820-1831. [Persian]
- [32]. Rezaei M. Study the salinity controlling factors in alluvial aquifer of Mand Plain, Boushehr Province. *Journal of Environmental Studies*. 2011;37(58):105-116. [Persian]
- [33]. Rozrokh J, Asghari Moghaddam A, Nadiri A. Investigation of hydrogeochemical characteristics and qualitative classification of Harzandat plain groundwater resources for various purposes using hydrochemical methods. 2017;5(5):77-92. [Persian]
- [34]. Sadra B. Quantity and quality investigation of water resources and sediment in Shirin Dareh Dam's Catchment Area (North Khorasan Province). 2014; Msc thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. [Persian]
- [35]. Sebastian M, de Anda J, Garcia-Gonzalez A. Assessment of water quality of a subtropical lake using the NSF-WQI and a newly proposed ecosystem specific water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020;192(18):296-309.
- [36]. Ta M, Zhou X, Guo J, Wang X, Wang Y, Xu Y. The evolution and sources of major ions in hot springs in the Triassic carbonates of Chongqing, China. *Water*. 2020;12(1194):1120-1140.
- [37]. Taufiq A, Hosono T, Ide K, Kagabu M, Iskandar I, Effendi AJ, Hutasoit LM, Shimada J. Correction: impact of excessive groundwater pumping on rejuvenation processes in the Bandung basin (Indonesia) as determined by hydrogeochemistry and modeling. *Hydrogeology Journal*. 2018;26(25):1281-1284.
- [38]. Teimouri M, Sheikh V, Sadoddin A. Evaluation

- and comparison of water quality using gray relational analysis and NSFQI in Shirin-darreh dam reservoir. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2018;11(2):169-82. [Persian]
- [39]. Thorslund J, van Vliet MT. A global dataset of surface water and groundwater salinity measurements from 1980-2019. *Scientific Data*. 2020;7(231):211-222.
- [40]. Vespasiano G, Muto F, Apollaro C. Geochemical, geological and groundwater quality characterization of a complex geological framework: the case study of the Coreca area (Calabria, South Italy). *Geosciences*. 2021;11(121):222-244.
- [41]. Wu Z, Zhang D, Cai Y, Wang X, Zhang L, Chen Y, et al. Water quality assessment based on the water quality index method in Lake Poyang: the largest freshwater lake in China. 2017;7(17999):99-118.
- [42]. Zaidi FK, Nazzal Y, Jafri MK, Naeem M. Reverse ion exchange as a major process controlling the groundwater chemistry in an arid environment: a case study from northwestern Saudi Arabia. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020;187(10):123-139.
- [43]. Zhao P, Li Z, Zhang R, Pan J, Liu Y. Does water diversion project deteriorate the water quality of reservoir and downstream? A case study in Danjiangkou reservoir. *Global Ecology and Conservation*. 2020;24(25):1200-1226.