

ارزیابی ویژگی‌های هیدروشیمیایی و کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌های محدوده دریاچه زریوار

شیرکو ابراهیمی محمدی*

استادیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۲/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۳/۱۶)

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، هیدروژئوشیمیایی، رخساره‌های هیدروشیمیایی، تعادل ترمودینامیکی، مکانیسم‌های کنترل‌کننده وضعیت شیمیایی آب هفت چشمه و ۱۵ چاه محدوده دریاچه زریوار بر اساس ۱۵ متغیر کیفیت آب طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۲ و همچنین مقایسه کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌ها و تغییرات فصلی آنها انجام شد. تحلیل‌ها و مقایسات آماری بر اساس نمودارهای پایپر، شولر، دورو، لودویگ-لنگلایر، ویلکوکس و گیس، نسبت‌های یونی مختلف، شاخص‌های اشباع و آزمون‌های ویلکاکسون و من-ویتنی انجام گرفت. یون‌های فراوان شامل بی‌کربنات، کلسیم و منیزیم است که دلیل آن انحلال سنگ‌های کربناته در منطقه تغذیه آب‌های زیرزمینی است. نسبت کلسیم به منیزیم در آب همه چشمه‌ها و چاه‌ها به دلیل انحلال کانی‌های سیلیکاته بین دو تا نه، سختی آب بیشتر از ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم یا به بیانی خیلی سخت بود. دو رخساره هیدروشیمیایی اصلی شامل کلسیم-منیزیم-بی‌کربنات و کلسیم-منیزیم-بی‌کربنات-سولفات بود که نتیجه فرایندهای تغییردهنده شیمی آب طی مسیر جریان و سنگ‌شناسی تشکیلات زمین‌شناسی زیرین منطقه است. نسبت‌های یونی Mg/Ca در برابر Cl و نمودارهای گیس بیان می‌کند که اهمیت فراوان مکانیسم‌های تعامل سنگ و آب، تبادل کاتیونی و انحلال کانی‌های کربنات و سیلیکات در تعیین کیفیت شیمیایی آب چشمه‌ها و چاه‌های منطقه بود.

کلیدواژگان: آب زیرزمینی، شاخص اشباع، گیس، نسبت‌های یونی، مریوان.

مقدمه

داده‌های کیفیت آب چاه‌ها و چشمه‌ها اطلاعات خوبی درباره وضعیت زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی منطقه و شاخص‌های تغذیه، تخلیه و ذخیره آب زیرزمینی می‌دهند [۱]. خصوصیات شیمیایی آب چشمه‌ها و چاه‌ها نه تنها تحت تأثیر سنگ‌شناسی و مدت زمان تماس آب با سازندهای منطقه هستند بلکه متأثر از ورودی‌ها از اتمسفر، خاک و همچنین از منابع آلاینده نظیر معادن، اراضی تخریب‌شده، پساب‌های صنعتی و فاضلاب‌های شهری و روستایی‌اند. ظهور چشمه‌ها به خصوصیات منطقه تغذیه مانند خاک رویی، ساختمان خاک، شیب سطح زمین بستگی دارد [۲] و دبی آنها دارای تغییرات فصلی است و به الگوی بارش در ناحیه تغذیه و تغییرات میزان بارشی بستگی دارد که می‌تواند به داخل زمین نفوذ کند. جنگل‌زدایی، تغییر کاربری اراضی، چرای مفرط و تغییر اقلیم بر کیفیت و کمیت آب چشمه‌ها تأثیر می‌گذارد. از بین منابع آبی مختلف، برای مردمی که در بالادست مناطق کوهستانی و تپه‌ای زندگی می‌کنند، آب چشمه‌ها منبعی حیاتی برای شرب خود و احشام و آبیاری اراضی کشاورزی و باغ‌هاست. در نقاط مختلف دنیا پژوهش‌های متعددی درخصوص بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی و عوامل تأثیرگذار بر آن انجام شده است [۳] که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

ژنگ و همکارانش (۲۰۱۷) کیفیت آب‌های زیرزمینی رودخانه شینکای^۱ در چین را با آمار توصیفی، ماتریس‌های همبستگی، ضرایب نسبت یونی و روش شاخص آلودگی جامع اصلاح‌شده نمو^۲ ارزیابی کردند [۴]. نتایج پژوهش آنها نشان داد یون‌های اصلی Ca^{+2} و HCO_3^- بود و کوچک‌بودن نسبت یون Cl به Ca نشانه شرایط هیدرودینامیکی خوب بود. وجود همبستگی زیاد بین یون‌های NH_4^+ و Ca^{+2} نشان داد هر دو یون منشأ یکسانی دارند.

نیو و همکارانش (۲۰۱۷) برای تشخیص منبع آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت جیانگان^۳ چین، ۱۶ ویژگی کیفیت آب را در ۲۹ چاه طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۰ بررسی کردند [۵]. طبق نتایج آزمون فصلی من-کندال، مقدار pH و غلظت یون‌های $\text{NO}_3\text{-N}$ و Cl به ترتیب در

۲۷، ۲۶ و ۱۵ چاه روند افزایشی معناداری را نشان دادند. افزایش pH به دلیل خروج گاز دی‌اکسید کربن در نتیجه استخراج زیاد آب‌های زیرزمینی و افزایش غلظت یون‌های Cl⁻ و SO_4^{2-} در بعضی چاه‌ها به دلیل مواد شیمیایی صنعتی بود.

مالکی و همکارانش (۲۰۱۷) تأثیر فعالیت‌های کشاورزی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی آبخوان چتوکا^۴ در جنوب غربی موروکو را با برداشت ۴۵ نمونه آب بررسی کردند [۶]. نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده آلودگی آب‌ها به نیترات بر اثر مصرف کودهای کشاورزی و آبشویی آنها در بخش‌های جنوبی بود. آنها روابط معناداری بین غلظت نیترات با نوع آبیاری و میزان کود مصرفی در اراضی یافتند.

در داخل کشور نیز مطالعات مختلفی درخصوص کیفیت آب‌های زیرزمینی صورت گرفته که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

عبادت‌ی (۱۳۹۴) با هدف بررسی روند تغییرات کیفی آب زیرزمینی دشت ایوانکی، واحدهای سنگ‌شناسی و موقعیت گسل‌ها را بررسی و نتایج تجزیه نمونه‌های آب منطقه را تحلیل کرد [۷]. نتایج پژوهش ایشان نشان داد بیشترین شوری در بخش شرقی و جنوبی دشت و روند تغییرات آنها از ارتفاعات به سمت مرکز و غرب محدوده و منطبق با مسیر رودخانه اصلی بود.

نجف‌زاده و همکارانش (۱۳۹۴) کمیت و کیفیت آب زیرزمینی دشت مهولات در استان خراسان رضوی را با استفاده از داده‌های سطح آب، هدایت الکتریکی و غلظت کل نمک‌های محلول در سه دوره آماری ۱۳۸۰، ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ بررسی کردند [۸]. نتایج پژوهش آنها تأثیر روند رو به رشد تعداد چاه‌های بهره‌برداری و خشکسالی‌های اخیر بر افت سطح آب زیرزمینی منطقه را نشان داد. به دنبال آن پیشروی جبهه‌های آب شور از کویرهای مجاور در جنوب و غرب، منطقه مطالعاتی را از طریق مسیل‌ها و کانال‌ها تحت تأثیر قرار داده و کیفیت آنها را کاهش داد.

زارعی و امیری (۱۳۹۵) تغییرات الگوی مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت فسا بر مبنای روش ویلکوکس بین سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۲ را بررسی کردند [۹]. نتایج

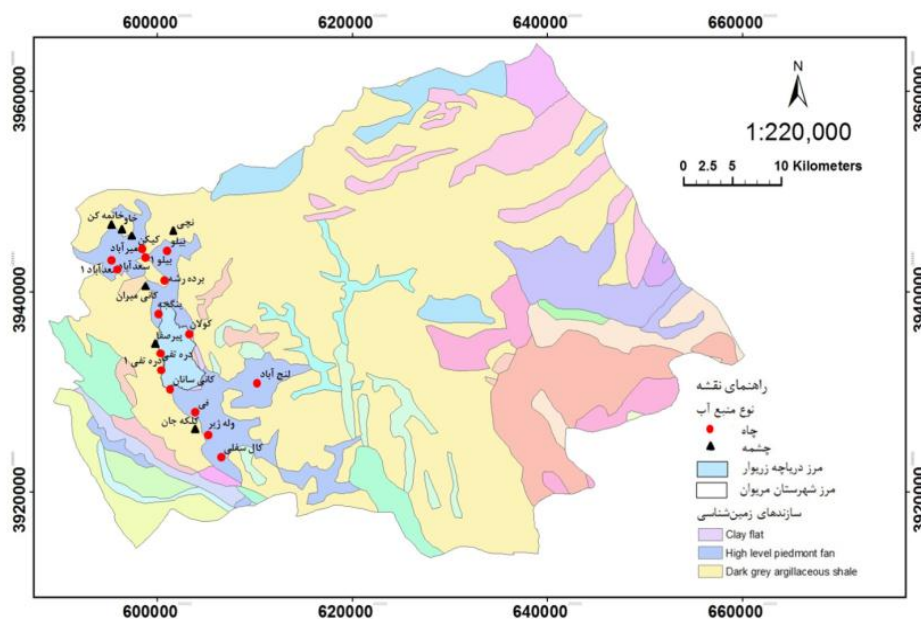
1. Xincai
2. Nemerow
3. Jianghan

4. Chtouka

کیفی آنها از جنبه‌های مختلف اهمیت دارد. بنابراین، پژوهش حاضر با مطالعه ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، هیدروژئوشیمیایی، رخساره‌های هیدروشیمیایی، تعادل ترمودینامیکی و مکانیسم‌های کنترل‌کننده وضعیت شیمیایی داده‌های ۱۵ متغیر کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌های منطقه، درصد بررسی کیفیت منابع آب به‌خصوص برای آبیاری و همچنین مقایسه کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌ها و تغییرات فصلی آنهاست. نتایج این پژوهش کمک شایانی به مدیریت منابع آب و همچنین کشاورزی منطقه خواهد کرد.

پژوهش آنها بیان‌کننده کاهش مساحت مناطق دارای کلاس مناسب‌تر طی دوره پژوهش بود. نتایج الگوی مکانی کیفیت آب کشاورزی نشان داد مساحت مناطق با وضعیت متوسط و بد به ترتیب در حال کاهش و افزایش هستند.

منطقه پژوهش شده از لحاظ کشاورزی یکی از قطب‌های تولید تنباکو در کشور است و به‌طور قطع کیفیت آب آبیاری بر کیفیت محصولات کشاورزی تأثیرگذار است و از طرف دیگر، منابع آب منطقه (چشمه‌ها و چاه‌ها) استفاده‌های دیگری چون شرب انسان و دام نیز دارند و آگاهی از وضعیت



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی و موقعیت چشمه‌ها و چاه‌های مطالعه‌شده در محدوده دریاچه زریوار

[۱۰]. شیل آرچلیک سیاه خاکستری و دگرگونه‌های درجه پایین شامل فیلیت با کمی آهک و سنگ‌های آتش‌فشانی (Ksfsh) از عمده‌ترین واحدهای لیتولوژیکی حوضه است که فشار و دمای وارد شده بر آن متوسط و جزء دگرگونی‌های ناحیه‌ای است که رخ اسلیتی یا شیسستوزیته از خصوصیات مهم آن به حساب می‌آید. نهشته‌های کواترنر منطقه بر اساس بعضی پارامترها همچون محیط رسوب‌گذاری، زمان تشکیل، مواد تشکیل‌دهنده و ریخت‌شناسی به واحدهای مخروط‌افکنه، پادگان‌های آبرفتی، رسوبات رودخانه‌ای و واریزه قابل تفکیک هستند. سازند Qt1 شامل خاک‌های رسی، سیلنتی و عناصر و قطعات ریزسنگی و در حقیقت بقایای حاصل از فرسایش کوه‌های مجاور خود با ضخامت حداکثر ۴-۶ متر بوده و با

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده

حوضه آبخیز دریاچه زریوار در استان کردستان و شهرستان مریوان واقع شده است. این حوضه آبخیز با وسعت ۵۴۴۲۶/۸ هکتار دارای مختصات جغرافیایی ۱۲ و ۱ و ۴۶ تا ۴۸ و ۱۶ و ۴۶ طول شرقی و ۲۴ و ۲۳ و ۳۵ تا ۱۲ و ۴۳ و ۳۵ عرض شمالی است. آب این دریاچه از چشمه‌های کف و جریان‌های سطحی تأمین می‌شود. در محدوده مطالعاتی مریوان ۶۹۹ حلقه چاه، هفت رشته قنات و ۵۲۸ دهانه چشمه آماربرداری شده است (آماربرداری سال ۱۳۸۲). میزان تخلیه از این منابع در سال آماربرداری معادل ۳۲/۸ میلیون مترمکعب (به ترتیب برابر با ۱۹/۴، ۱/۴ و ۱۲ میلیون مترمکعب) برآورد شده است

بیش از چشمه‌ها بود. کلیتیت آب چشمه‌ها در حد خنثی (۷/۶۸ تا ۷/۹۵) و آب چاه‌ها در حد خنثی تا کمی قلیایی (۷/۹۱ تا ۸/۱۱) بود، چراکه کربنات‌ها، بی‌کربنات‌ها، هیدروکسیدها، سیلیکات‌ها و بورات‌ها، یون‌های هیدروژن را در آب‌های زیرزمینی کاهش می‌دهند و آب را قلیایی می‌کنند. هدایت الکتریکی آب چشمه‌ها در محدوده ۴۲۴ تا ۶۹۴ و آب چاه‌ها بین ۲۸۳ تا ۶۳۲ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر بود. هدایت الکتریکی همبستگی مثبت قوی با باقی‌مانده خشک و غلظت کلر دارد، بنابراین بیشتر بودن غلظت باقی‌مانده خشک و کلر در آب چشمه‌ها نسبت به آب چاه‌ها توجیه‌کننده بیشتر بودن هدایت الکتریکی آب چشمه‌هاست. جدول ۱ آماره‌های توصیفی متغیرهای کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌های منطقه پژوهش شده طی دوره آماری ۱۶ ساله از ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۲ را نشان می‌دهد.

رابطه دبی و همچنین ارتفاع دهانه چشمه‌ها با میزان هدایت الکتریکی، بیان‌کننده وجود رابطه کاهنده با ضریب تعیین (R^2) ۰/۴۶۵ بین دبی و هدایت الکتریکی و رابطه افزایشنده با ضریب تعیین ۰/۷۴۷ بین ارتفاع دهانه چشمه‌ها و هدایت الکتریکی بود (شکل ۲). هدایت الکتریکی چشمه‌ها تحت تأثیر ارتفاع دهانه و دبی آنهاست. مقدار هدایت الکتریکی آب زیرزمینی با ادامه مسیر در ناحیه اشباع و انحلال یون‌های بیشتر در آب، افزایش می‌یابد. بنابراین، انتظار می‌رود هدایت الکتریکی چشمه‌هایی که در ارتفاع بالاتری قرار دارند به دلیل طی مسیر کوتاه‌تر، کمتر از چشمه‌های کم‌ارتفاع‌تر باشد. اما از طرف دیگر، دبی چشمه‌های مرتفع‌تر به دلیل کوچک‌تر بودن ظرفیت آبخوان، کمتر از دبی چشمه‌های کم‌ارتفاع‌تر است [۱۲]. بنابراین، در منطقه پژوهش شده به دلیل اختلاف کم ارتفاع دهانه چشمه‌ها و به تبع آن اختلاف کم مسیر طی شده آب چشمه در سازندهای منطقه، تأثیر دبی بر هدایت الکتریکی بیش از تأثیر ارتفاع دهانه آنها بر میزان هدایت الکتریکی بوده است.

مخروط‌افکنه‌های نزدیک دریاچه در ارتباط است [۱۱]. نقشه زمین‌شناسی و موقعیت چشمه‌ها و چاه‌های مطالعه‌شده در محدوده دریاچه زریوار در شکل ۱ نشان داده شده است.

روش پژوهش

در این پژوهش با جمع‌آوری داده‌های متغیرهای کیفیت آب هفت چشمه و ۱۵ چاه (شکل ۱) شامل آنیون‌ها (Cl, Na, Mg, Ca, Na%, SO₄, HCO₃, Anions)، کاتیون‌ها (K, Cations) و سایر متغیرها شامل SAR, pH, TH, TDS, EC و که توسط وزارت نیرو از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۲ در ابتدای ماه‌های خرداد و مهر هر سال به‌عنوان پایان سال آبی و شروع سال آبی بعد برداشت شده بود، کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌های محدوده دریاچه زریوار بررسی و مقایسه شد. برای مقایسه مقادیر متغیرهای کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌ها علاوه بر ترسیم نمودارها، ابتدا نرمال‌بودن توزیع داده‌ها با آزمون کای اسکور بررسی و به علت نرمال نبودن آنها از آزمون ویلکاکسون استفاده شد. با رسم نمودارهای جعبه‌ای، توزیع داده‌های کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌ها نمایش داده شد. از طریق ترسیم نمودار پایپر به کمک نرم‌افزار (Version 1.29.0.0) GW_Chart^۱، نمودارهای شولر، دورو، لودویگ-لنگلایر و ویلکوکس به کمک نرم‌افزار AquaChem 2014.2^۲، شاخص اشباع به کمک نرم‌افزار PHREEQC^۳، نمودار گیبس و نسبت‌های یونی مختلف وضعیت هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی منطقه تحلیل شد. برای مقایسه غلظت متغیرهای مختلف کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌های منطقه در ماه‌های خرداد و مهر از آزمون من-ویتنی استفاده شد.

یافته‌ها

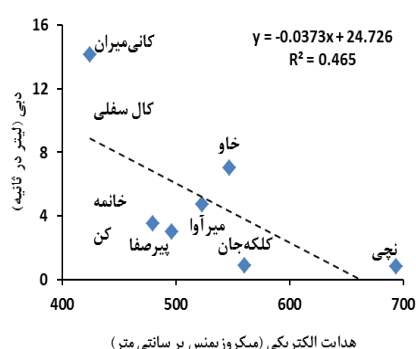
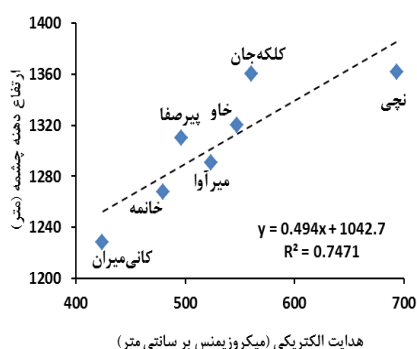
ویژگی‌های فیزیوشیمیایی

مقادیر میانگین کلر، سولفات، منیزیم و پتاسیم چشمه‌ها و چاه‌ها یکسان بود، اما مقادیر میانگین بی‌کربنات، کلسیم، آنیون‌ها، کاتیون‌ها، سختی، باقی‌مانده خشک و هدایت الکتریکی چشمه‌ها بیشتر از چاه‌ها و مقادیر میانگین سدیم، درصد سدیم، نسبت جذب سدیم و کلیتیت چاه‌ها

1. https://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/GW_Chart/GW_Chart.html
 2. <https://www.waterloohydrogeologic.com/aquachem/>
 3. https://www.brr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/

جدول ۱. شاخص‌های توصیفی متغیرهای مختلف کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌های منطقه پژوهش‌شده

متغیرها	چاه‌ها				چشمه‌ها			
	بیشترین	کمترین	میانگین	انحراف معیار	بیشترین	کمترین	میانگین	انحراف معیار
Cl	۰/۴۱	۰/۱۱	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۲۲	۰/۰۸
SO4	۰/۶۴	۰/۱۶	۰/۳۴	۰/۱۳	۰/۷۵	۰/۱۷	۰/۳۴	۰/۱۴
HCO3	۶/۰۲	۲/۶۲	۴/۴۲	۰/۷۳	۵/۸۷	۴/۰۹	۵/۱۸	۰/۴۷
Na	۱/۰۸	۰/۲۹	۰/۴۱	۰/۱۱	۰/۴۱	۰/۲۶	۰/۳۴	۰/۰۵
Mg	۱/۳۱	۰/۵۱	۰/۷۹	۰/۱۵	۰/۹۲	۰/۷۰	۰/۸۰	۰/۰۷
Ca	۵/۸۰	۲/۲۱	۳/۹۶	۰/۸۳	۶/۳۹	۳/۴۷	۴/۷۵	۰/۶۹
Na%	۲۰/۸۳	۴/۳۴	۶/۸۱	۳/۱۰	۷/۹۰	۴/۰۶	۵/۸۱	۱/۱۰
K	۰/۳۲	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۴
Anions	۶/۹۹	۳/۲۱	۵/۰۸	۰/۸۵	۷/۴۴	۴/۵۲	۵/۸۵	۰/۶۸
Cations	۷/۱۰	۳/۳۰	۵/۲۰	۰/۸۷	۷/۶۲	۴/۶۵	۵/۹۳	۰/۶۸
SAR	۰/۷۵	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۰۳
PH	۸/۱۱	۷/۵۷	۷/۹۱	۰/۱۱	۷/۹۵	۷/۶۸	۷/۸۰	۰/۰۹
TH	۳۳۹/۳۲	۱۳۶/۰۶	۲۳۷/۷۱	۴۲/۳۸	۳۵۵/۴۷	۲۱۲/۸۵	۲۷۷/۲۱	۳۴/۷۶
TDS	۴۰۴/۸۴	۲۰۵/۶۵	۳۰۱/۱۱	۴۶/۷۲	۴۴۲/۲۰	۲۷۱/۴۶	۳۴۳/۴۲	۴۰/۵۰
EC	۶۳۲/۲۶	۲۸۳/۱۳	۴۶۷/۱۶	۷۶/۰۶	۶۹۳/۸۰	۴۲۴/۱۵	۵۳۲/۱۵	۵۸/۵۳



شکل ۲. ارتباط دبی و ارتفاع دهانه چشمه‌ها با میزان هدایت الکتریکی آنها در منطقه پژوهش‌شده

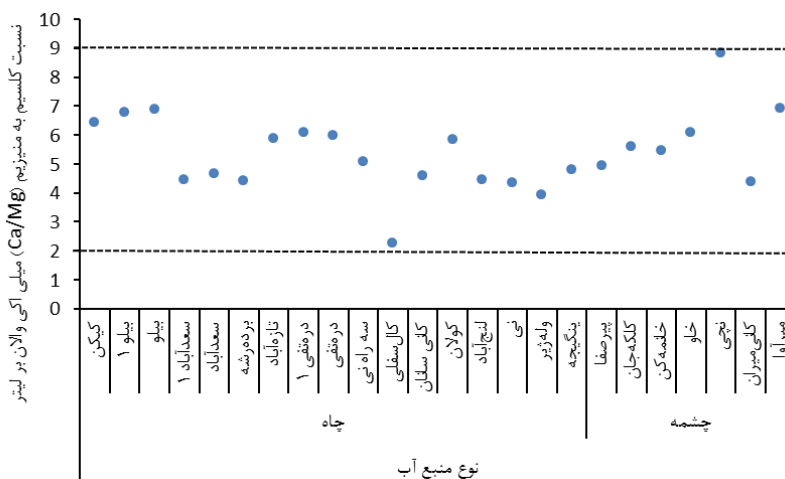
سیلیکاته، فرایند غالب در منطقه است چراکه نسبت کلسیم به منیزیم (Ca/Mg) آب‌های زیرزمینی بیان‌کننده انحلال کلسیت و دولومیت از سازندهای منطقه است. اگر نسبت کلسیم به منیزیم برابر با یک باشد، انحلال دولومیت بیشتر و اگر این نسبت بیش از یک باشد، انحلال کلسیت بیشتر است [۱۳]. نسبت کلسیم به منیزیم بیش از دو بیان‌کننده انحلال کانی‌های سیلیکاته است [۱۴]. نسبت کلسیم به منیزیم یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی کیفیت آب آبیاری است و کاهش این نسبت به مقادیر کمتر از یک، اثر منفی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک داشته و با

ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی

انحلال سنگ‌های کربناته زاگرس در منطقه تغذیه آب‌های زیرزمینی (چشمه و چاه) سبب فراوان‌تر شدن غلظت HCO_3^- ، Ca^{2+} و Mg^{2+} نسبت به دیگر یون‌ها شده است. غلظت بی‌کربنات در آب چشمه‌ها بیش از آب چاه‌ها بود، زیرا انحلال کربنات‌ها طی عبور آب زیرزمینی از منطقه تغذیه به سمت قسمت‌های ضخیم‌تر سفره به دلیل فقدان دی‌اکسید کربن، کاهش می‌یابد. همه آب چشمه‌ها و چاه‌های منطقه پژوهش‌شده نسبت کلسیم به منیزیم دو تا نه داشتند (شکل ۳) که نشان می‌دهد انحلال کانی‌های

میلی گرم در لیتر کربنات کلسیم بود. مقادیر بیش از سختی کل سبب بیماری نمی شود اما هر دو حالت خیلی نرم (کوچکتر از ۷۵ میلی گرم کربنات کلسیم) و خیلی سخت (بیش از ۳۰۰ میلی گرم کربنات کلسیم) برای آب نامطلوب است. سختی کل بین ۸۰ تا ۱۰۰ میلی گرم (کربنات کلسیم) برای شرب قابل قبول است [۱۶].

برهم زدن توازن تغذیه‌ای، سبب کاهش عملکرد گیاهان می شود. خشکسالی‌های مکرر و بهره‌برداری زیاد از منابع آب زیرزمینی در برخی موارد موجب افزایش نسبی غلظت یون منیزیم می شود [۱۵]. سختی آب ناشی از ترکیبات منیزیم و کلسیم است. سختی آب چشمه‌ها و چاه‌ها در محدوده پژوهش شده خیلی سخت یعنی بیشتر از ۳۰۰



شکل ۳. نمودار پراکندگی نسبت یونی کلسیم به منیزیم آب چاه‌ها و چشمه‌های منطقه پژوهش شده

کاتیون‌های اصلی در این رخساره‌ها بودند. رخساره‌های کلسیم- منیزیم- بی کربنات- سولفات ممکن است نتیجه افزایش تبادل کاتیونی باشد. در این رخساره‌ها آنیون‌های اصلی به ترتیب فراوانی بی کربنات و سولفات بودند. نتایج ترسیم نمونه‌ها روی نمودار لودویگ-لنگلایر (شکل ۴) نشان داد آب چاه‌ها و چشمه‌ها درصد کمی سدیم، پتاسیم، کلر و سولفات (کمتر از ۱۰ درصد) داشت. نمودار شولر با هدف شناخت منبع غلظت مواد محلول در آب چشمه‌ها و چاه‌ها ترسیم شد. (شکل ۴). ارزیابی نمودار شولر نشان داد خطوط ارتباطی غلظت یون‌ها (میلی اکی‌والان بر لیتر) در ناحیه SO_4-CL و $CL-Mg$ موازی نیستند که نشان می‌دهد آب چشمه‌ها و چاه‌ها از منابع متفاوتی نشئت گرفته‌اند. در نمودار شولر، خطوط روی هم قرار نگرفته‌اند بلکه با فواصل متفاوت که نشان از غلظت‌های متفاوت یون‌هاست در بالای هم قرار گرفته‌اند. اگر آب‌ها غلظت‌های متفاوتی داشته باشند، خطوط ارتباطی یون‌ها یکی بالاتر از دیگری قرار می‌گیرند. با توجه به نمودار شولر مشخص شد که مقادیر یون‌های Ca^{2+} و HCO_3^- آب چشمه‌ها و چاه‌ها زیاد است که دلیل آن وجود سنگ‌های کربناته در آبخوان است. برای تشخیص منبع اصلی

رخساره‌های هیدروشیمیایی^۱

برای درک خصوصیات هیدروژئوشیمیایی اصلی، تکامل آنها و فرایندهای تأثیرگذار بر کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌های منطقه پژوهش شده، ترکیبات هیدروشیمیایی (آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی) روی دیگرام پایپر [۱۷] ترسیم شدند. داده‌های چشمه‌ها و چاه‌های محدوده دریاچه زریوار در محدوده سختی موقت^۲ قرار گرفته‌اند. با توجه به این نمودار، دو رخساره هیدروشیمیایی اصلی شامل کلسیم- منیزیم- بی کربنات و کلسیم- منیزیم- بی کربنات- سولفات تشخیص داده شد (شکل ۵). این دو رخساره نتیجه دو عامل هستند، یکی فرایندهای تغییردهنده شیمی آب طی مسیر جریان و عامل مهم‌تر، سنگ‌شناسی تشکیلات زمین‌شناسی زیرین. رخساره‌های کلسیم- منیزیم- بی کربنات ممکن است به دلیل انحلال سنگ‌های کربناته منطقه و فرصت محدود برای تعامل و فعل و انفعال بین آب و سنگ‌های موجود در مسیر جریان در سفره آب زیرزمینی آزاد و کم‌عمق [۱۸] منطقه باشد. یون بی کربنات آنیون اصلی و یون‌های کلسیم و منیزیم

1. Hydrochemical facies
2. Temporary Hardness

کلسیت، انیدریت و ژپس در حالی که آب چاه‌ها نسبت به دی‌اکسید کربن نزدیک به حالت تعادل بود.

همچنین شاخص اشباع آب چشمه‌ها نیز با نسبت‌های مختلف بیان‌کننده غیراشباع بودن آنها نسبت به همه متغیرهای کیفیت آب بود به طوری که کانی‌ها از کمترین به فراوان‌ترین عبارت بودند از کلرید سدیم، دولومیت، آراگونیت، کلسیت، انیدریت، ژپس و گاز کربنیک (جدول ۲). شاخص‌های اشباع آب آبخوان‌ها، میزان انحراف از تعادل ترمودینامیکی را مشخص می‌کنند و برای توسعه فرضیاتی درباره فعالیت کانی‌ها در آبخوان کاربرد دارند. شاخص اشباع (SI) برای یک کانی مشخص نشان می‌دهد آب زیرزمینی نسبت به آن کانی، غیراشباع ($SI < 0$) یا در حالت تعادل ($SI = 0$) و یا فوق اشباع ($SI > 0$) است. اگر آب زیرزمینی در خصوص یک کانی مشخص غیراشباع باشد یا به بیانی شاخص اشباع آن منفی باشد، در صورت وجود آن کانی، آب آن را حل می‌کند و در مقابل اگر آب زیرزمینی نسبت به یک کانی خاص فوق اشباع باشد، آن کانی از آب زیرزمینی رسوب می‌کند [۲۴].

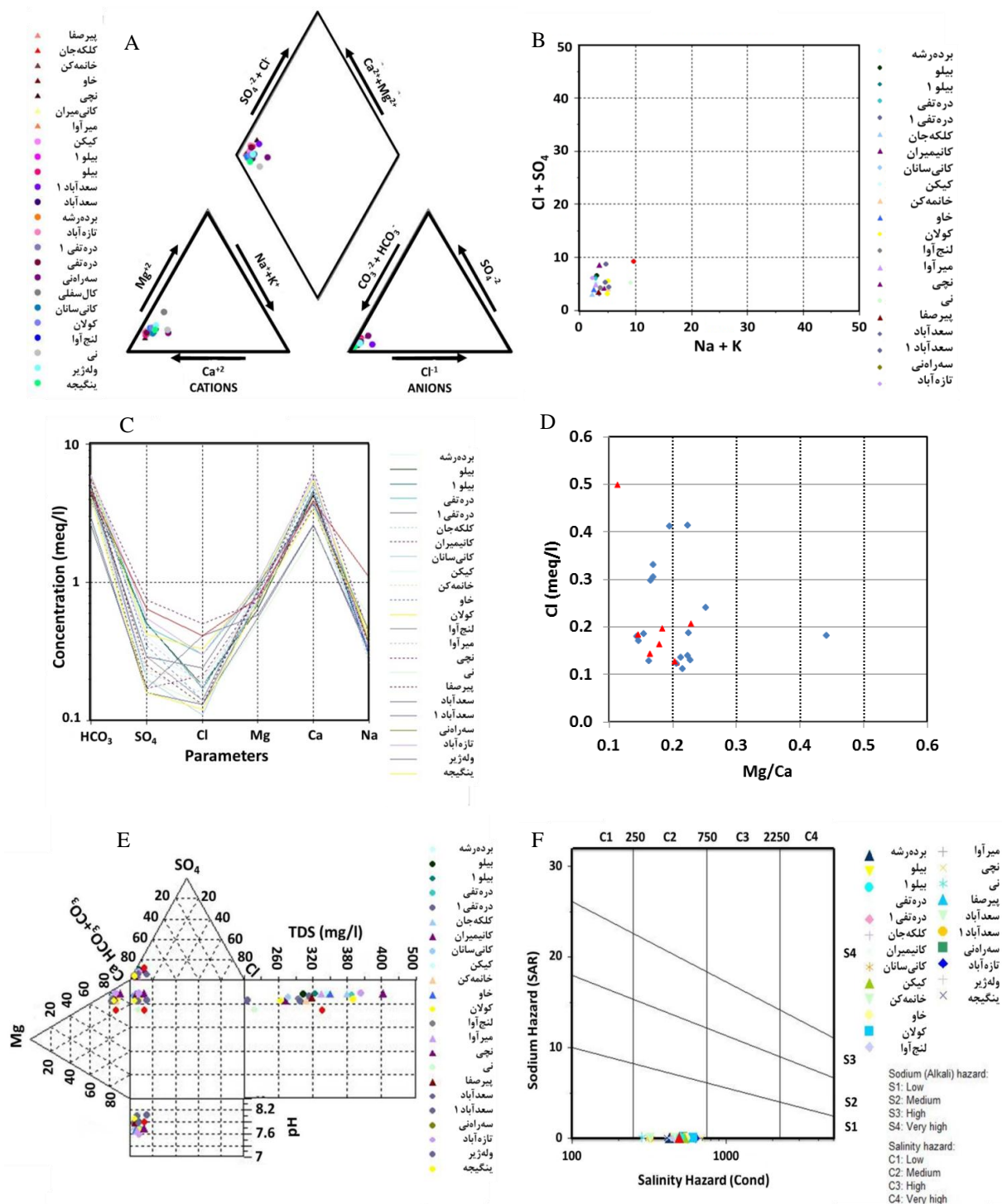
مکانیسم‌های کنترل‌کننده وضعیت شیمیایی آب

بر اساس نمودار گیبس ترسیم‌شده (شکل ۵) در هر دو منبع آبی منطقه (چشمه‌ها و چاه‌ها)، فرایندهای تعامل آب-سنگ به‌طور معناداری میزان اجزای اصلی شیمیایی آب زیرزمینی منطقه مطالعه‌شده را تحت کنترل دارند. واکنش‌های حلالیت و جابه‌جایی در سنگ‌های موجود در آبخوان‌ها عامل اولیه تغییر غلظت یون‌های اصلی در آب زیرزمینی است. تجمع داده‌ها در محدوده هوازدگی شیمیایی زون کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ، نشان می‌دهد ترکیب شیمیایی این آب‌ها بیشتر توسط واکنش هوازدگی سنگ‌ها، انحلال کانی‌های کربنات و سیلیکات و تعامل بین آب و سنگ‌های آبخوان کنترل می‌شود. مکانیسم‌های کنترل‌کننده حضور یون‌های محلول در آب از جمله تبخیر-تبلور، هوازدگی سنگ و بارش از اتمسفر را می‌توان با ترسیم داده‌های هیدروشیمیایی و طبق تغییرات نسبت $Na^+ / (Na^+ + Ca^{2+})$ و $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$ به عنوان تابعی از TDS ارزیابی کرد. بسیاری از جنبه‌های هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی هنوز به خوبی شناسایی نشده است.

سنگ‌شناسی غلظت یون‌ها در آب چاه‌ها و چشمه‌ها، نسبت غلظت Mg/Ca در برابر Cl ترسیم شد (شکل ۴). بیشترین نسبت منیزیم به کلسیم در برابر غلظت کلر مربوط به آب چاه کال سفلی در جنوب دریاچه زریوار بود که علت آن وجود دولومیت در تشکیلات زمین‌شناسی آبخوان این چاه است. با مقایسه این نسبت در بین چشمه‌ها، به دلیل قرارگرفتن چشمه نچی در ارتفاع بالاتر (۱۳۶۲ متر)، نسبت کمتری از منیزیم به کلسیم و همچنین غلظت کمتری از کلر را شاهد بودیم که خود دلیلی بر حضور سازند آهکی خالص در تشکیلات زمین‌شناسی آن بود. انحلال‌پذیری کلسیت و دولومیت در چشمه‌هایی کمتر است که در ارتفاع بالاتری قرار گرفته‌اند، بنابراین دارای نسبت کمتری Mg/Ca هستند. نتایج مشابهی توسط محققان دیگر در نقاط مختلف به‌دست آمده است [۱۹-۲۱]. نسبت Mg/Ca همچنین نشان‌دهنده نسبت حضور کلسیت و دولومیت در آبخوان است [۲۲]. نمودار دوروی توسعه‌یافته بیان‌کننده تجمع داده‌ها در محدوده بی‌کربنات و کلسیم و همچنین تغییرات زیاد باقی‌مانده خشک بود به طوری که کلسیم با حدود ۸۰ درصد فراوان‌ترین کاتیون و بی‌کربنات با حدود ۹۰ درصد فراوان‌ترین آنیون موجود در آب چشمه‌ها و چاه‌های منطقه بود (شکل ۴). به دلیل اینکه آب چشمه‌ها و چاه‌ها در منطقه پژوهش شده بیشتر برای کشاورزی و آبیاری استفاده می‌شود، برای طبقه‌بندی آنها از نمودار ویلکوکس استفاده شد [۲۳]. با توجه به نمودار ویلکوکس میزان خطر سدیم (نسبت جذب سدیم) در پایین‌ترین حد خود و نزدیک صفر بود که بیان‌کننده وضعیت عالی و میزان خطر شوری بین ۲۵۰ تا ۷۵۰ بود که نشان‌دهنده خطر متوسط است و در مجموع داده‌ها در محدوده کلاس C_2S_1 قرار دارند که نشان‌دهنده آب با کیفیت خوب برای آبیاری و کشاورزی است (شکل ۴).

تعادل ترمودینامیکی

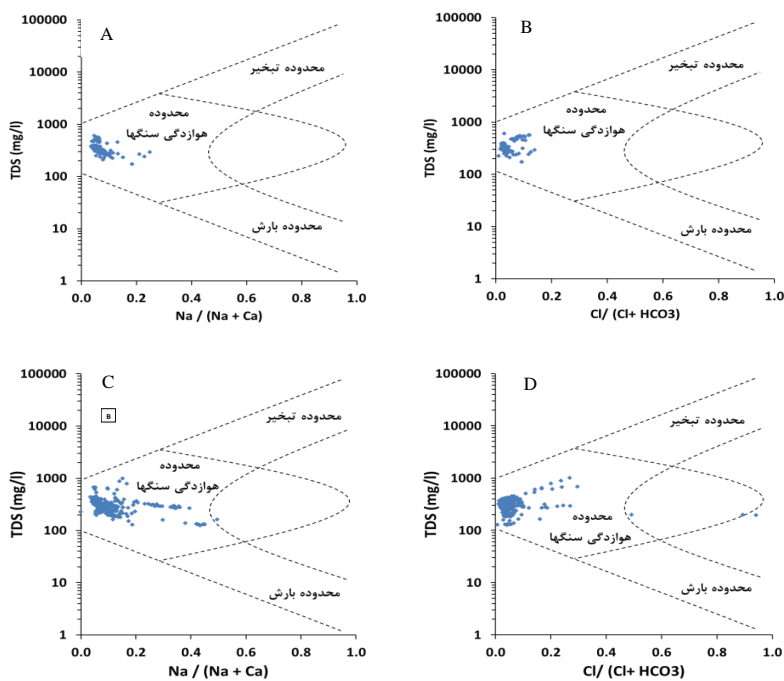
آب زیرزمینی منطقه پژوهش شده به نسبت‌های متفاوت نسبت به همه متغیرهای کیفیت آب مطالعه‌شده، غیراشباع بود (جدول ۲). آب زیرزمینی در منطقه مریوان در صورت وجود هر یک از متغیرها، آنها را در خود حل خواهد کرد. کمترین غلظت‌ها تا بیشترین غلظت‌های کانی‌ها در آب چاه‌ها عبارت بودند از کلرید سدیم، دولومیت، آراگونیت،



شکل ۴. ۴. دیاگرام پایپر (A)، لودویگ-لنگلابر (B)، شولر (C)، نسبت غلظت Mg/Ca در برابر Cl (D)، دورو (E) و ویلکوکس (F) چشمه‌ها و چاه‌ها

جدول ۲. مقادیر شاخص اشباع (SI) اندازه‌گیری شده آب چاه‌ها و چشمه‌های منطقه پژوهش شده

نوع منبع	نام منبع	متغیرها					Dolomite (CaMg(CO ₃) ₂)	Gypsum (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	Halit (NaCl)
		Anhydrite (CaSO ₄)	Aragonite (CaCO ₃)	Calcite (CaCO ₃)	CO ₂ (g)				
چاه‌ها	کیکن	-۲/۱۹	-۳/۵	-۳/۳۶	-۰/۸۴	-۷/۴	-۱/۹۷	-۸/۹۲	
	بیلو ۱	-۲/۱۱	-۳/۴۸	-۳/۳۴	-۰/۸۶	-۷/۳۸	-۱/۸۹	-۸/۹۷	
	بیلو	-۲/۱۲	-۳/۴۷	-۳/۳۳	-۰/۹	-۷/۳۷	-۱/۹	-۸/۹۳	
	سعدآباد ۱	-۲/۷۲	-۳/۴۱	-۳/۲۷	-۱/۴۱	-۷/۰۵	-۲/۵	-۸/۵۵	
	سعدآباد	-۲/۷۳	-۳/۴۶	-۳/۳۲	-۱/۰۹	-۷/۱۷	-۲/۵۱	-۹/۰۲	
	برده‌رشه	-۲/۳۹	-۳/۴۹	-۳/۳۵	-۰/۹۴	-۷/۲۱	-۲/۱۷	-۸/۷۷	
	دره تفی ۱	-۲/۵۱	-۳/۵۲	-۳/۳۷	-۰/۸۵	-۷/۴	-۲/۲۹	-۹/۰۱	
	دره تفی	-۲/۱	-۳/۵۱	-۳/۳۶	-۰/۷۹	-۷/۳۷	-۱/۸۸	-۸/۶۷	
	سه‌راه‌نی	-۲/۰۶	-۳/۵۳	-۳/۳۸	-۰/۸۹	-۷/۳۵	-۱/۸۴	-۸/۰۳	
	کال سفلی	-۲/۵۲	-۳/۵۵	-۳/۴۱	-۰/۹۵	-۷/۴	-۲/۳	-۸/۷۹	
	کانی سانان	-۲/۵۷	-۳/۵۱	-۳/۳۷	-۰/۹۱	-۷/۲۷	-۲/۳۵	-۹/۱۷	
	کولان	-۲/۱۶	-۳/۵۲	-۳/۳۷	-۰/۷۹	-۷/۳۹	-۱/۹۴	-۸/۶	
	لنج‌آباد	-۲/۴	-۳/۵۲	-۳/۳۷	-۰/۸۸	-۷/۲۷	-۲/۱۸	-۸/۹۸	
	نی	-۲/۶۸	-۳/۴۸	-۳/۳۴	-۱/۱۲	-۷/۱۸	-۲/۴۶	-۸/۷۹	
وله‌ژبر	-۲/۴۱	-۳/۵۲	-۳/۳۸	-۰/۹۱	-۷/۲۲	-۲/۱۹	-۸/۶۵		
پنگیجه	-۲/۶۷	-۳/۵۱	-۳/۳۷	-۰/۹۳	-۷/۲۹	-۲/۴۵	-۸/۹۵		
چشمه‌ها	پیرصفا	-۲/۴۴	-۳/۵۳	-۳/۳۹	-۰/۸۴	-۷/۳۴	-۲/۲۲	-۹/۰۲	
	کلکه‌جان	-۲/۴۶	-۳/۵۳	-۳/۳۹	-۰/۷۸	-۷/۴	-۲/۲۴	-۹/۰۶	
	خانمه‌کن	-۲/۴۸	-۳/۵۲	-۳/۳۸	-۰/۸۷	-۷/۳۶	-۲/۲۶	-۸/۷۹	
	خاو	-۲/۲۵	-۳/۵۳	-۳/۳۹	-۰/۷۹	-۷/۴۳	-۲/۰۳	-۹/۰۵	
	نجی	-۱/۸۷	-۳/۴۶	-۳/۳۲	-۰/۷۹	-۷/۴۶	-۱/۶۵	-۸/۳۸	
	کانی میران	-۲/۶۵	-۳/۵۱	-۳/۳۶	-۰/۹۴	-۷/۲۴	-۲/۴۳	-۸/۷۸	
	میرآباد	-۲/۲۲	-۳/۵۱	-۳/۳۷	-۰/۸۳	-۷/۴۵	-۲	-۸/۹۴	



شکل ۵. نمودار گیبس آب چشمه‌ها (A: کاتیون‌ها، B: آنیون‌ها) و چاه‌ها (C: کاتیون‌ها، D: آنیون‌ها)

مقایسه چشمه‌ها و چاه‌ها و تغییرات فصلی

نتیجه آزمون ویلکاکسون در زمینه مقایسه غلظت متغیرهای کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌ها بیان‌کننده نبود تفاوت معنادار بین کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌ها بود، به طوری که سطح معناداری (p-Value) همه متغیرها بیش از ۰/۰۵ بود (جدول ۳). نتایج مقایسه غلظت متغیرهای کیفیت آب چشمه‌ها بر اساس آزمون من-ویتنی در ماه‌های خرداد و مهر (جدول ۴) بیان‌کننده اختلاف معنادار پتاسیم ($\text{Sig}=0/023$)، قلیائیت ($\text{Sig}=0$) و سولفات ($\text{Sig}=0/006$) بود در حالی که غلظت سایر متغیرها تفاوت معناداری را در ماه‌های خرداد و مهر نشان ندادند ($\text{Sig}>0/05$). بیشترین تغییرات منیزیم و سدیم در پاییز و بیشترین تغییرات کاتیون‌ها، سولفات، کلراید، نسبت جذب سدیم، پتاسیم، کلسیم، باقی‌مانده خشک،

سختی کل و هدایت الکتریکی در بهار بود که ناشی از تأثیر فعالیت‌های انسانی از جمله کشاورزی و کوددهی به مزارع است. تغییرات میزان بی‌کربنات در دو ماه خرداد و مهر تقریباً یکسان بود که ناشی از وجود سازندهای کربناته منطقه است. نتایج مقایسه غلظت متغیرهای کیفیت آب چاه‌ها نیز در ماه‌های خرداد و مهر بر اساس آزمون من-ویتنی نشان داد اختلاف معناداری بین میزان قلیائیت ($\text{Sig}=0$) و سولفات ($\text{Sig}=0/003$) در ماه‌های خرداد و مهر وجود دارد، اما غلظت سایر متغیرها تفاوت معناداری را در ماه‌های خرداد و مهر نشان ندادند ($\text{Sig}>0/05$). بیشترین تغییرات قلیائیت، نسبت جذب سدیم و پتاسیم در پاییز و سایر متغیرها در بهار بود. افزایش pH ممکن است به دلیل خروج گاز دی‌اکسید کربن در نتیجه بهره‌برداری و استخراج زیاد آب‌های زیرزمینی باشد [۵].

جدول ۳. سطح معناداری (p-value) آزمون ویلکاکسون برای مقایسه غلظت متغیرهای کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌ها

آنیون‌ها			کاتیون‌ها				سایر متغیرها					
Cl	SO4	HCO3	Na	Mg	Ca	Na%	K	SAR	PH	TH	TDS	EC
۰/۶۷۱	۰/۶۱۲	۰/۲۳۷	۰/۵۲۸	۰/۳۱۰	۰/۶۱۲	۰/۲۳۷	۰/۰۷۲	۰/۳۵۲	۰/۱۷۶	۰/۶۱۲	۰/۴۹۹	۰/۱۷۶

جدول ۴. سطح معناداری آزمون من-ویتنی برای مقایسه متغیرهای کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌ها در ماه‌های خرداد و مهر

منبع آب	EC	TH	TDS	Na	Ca	Mg	K	Na%	SAR	PH	HCO3	Cl	SO4
چشمه‌ها	۰/۴۵۳	۰/۲۶۹	۰/۴۰۷	۰/۹۱۸	۰/۳۱۷	۰/۱۰۳	۰/۰۲۳	۰/۶۳۸	۰/۸۱۸	۰	۰/۲۱۰	۰/۱۶۶	۰/۰۰۶
چاه‌ها	۰/۲۲۶	۰/۳۳۱	۰/۳۶۷	۰/۷۰۲	۰/۳۴۱	۰/۸۵۷	۰/۸۵۰	۰/۸۵۹	۰/۸۴۴	۰	۰/۹۲۷	۰/۴۶۴	۰/۰۰۳

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش داده‌های ۱۵ متغیر کیفیت آب مربوط به هفت چشمه و ۱۵ چاه محدوده دریاچه زریوار در استان کردستان طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۲ بررسی و مقایسه شد. نسبت کلسیم به منیزیم در آب همه چشمه‌ها و چاه‌ها بین دو تا نه بود که بیان‌کننده انحلال کانی‌های سیلیکاته به‌عنوان فرایند غالب در منطقه است. سختی آب چشمه‌ها و چاه‌ها، خیلی سخت یعنی بیشتر از ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم بود که به‌عنوان آب شرب نامطلوب است. نمودار دوروی توسعه‌یافته بیان‌کننده تغییرات زیاد باقی‌مانده خشک بود به طوری که کلسیم با حدود ۸۰ درصد فراوان‌ترین کاتیون و بی‌کربنات با حدود ۹۰ درصد فراوان‌ترین آنیون موجود در آب چشمه‌ها و چاه‌های منطقه بود. با توجه به نمودار ویلکوکس، میزان خطر سدیم در کمترین حد و نزدیک

صفر بوده و میزان خطر شوری بین ۲۵۰ تا ۷۵۰ بود که بیان‌کننده خطر متوسط است. نتیجه آزمون ویلکاکسون بیان‌کننده نبود تفاوت معنادار بین کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌ها بود به طوری که سطح معناداری (p-Value) همه متغیرها بیش از ۰/۰۵ بود. نتایج مقایسه غلظت متغیرهای کیفیت آب چشمه‌ها در ماه‌های خرداد و مهر بر اساس نمودار جعبه‌ای و آزمون من-ویتنی بیان‌کننده اختلاف معنادار پتاسیم ($\text{Sig}=0/023$)، قلیائیت ($\text{Sig}=0$) و سولفات ($\text{Sig}=0/006$) در ماه‌های خرداد و مهر در چشمه‌ها و درباره چاه‌ها، نشان‌دهنده اختلاف معنادار قلیائیت ($\text{Sig}=0$) و سولفات ($\text{Sig}=0/003$) در ماه‌های خرداد و مهر بود. غلظت سایر متغیرها تفاوت معناداری را در ماه‌های خرداد و مهر با $\text{Sig}>0/05$ نشان ندادند.

منابع

- JW, Aka FT, Ohba T, Hell JV, Nkeng GE. Temporal pollution by nitrate (NO₃), and discharge of springs in shallow crystalline aquifers: Case of Akok Ndoue catchment, Yaounde (Cameroon). *African Journal of Environmental Science and Technology*. 2013; 7(5): 175-191.
- [13]. Maya AL, Loucks MD. Solute and isotopic geochemistry and groundwater flow in the central Wasatch range, Utah. *Journal of Hydrology*. 1995; 172: 31-59.
- [14]. Katz BG, Coplen TB, Bullen TD, Davis JH. Use of chemical and isotopic tracer to characterize the interactions between groundwater and surface water in mantled karst. *Groundwater*. 1997; 35(6): 1014-1028.
- [15]. Dehghani F, Rahnamayi R, Malekooti J, Saadat S. Evaluation of calcium to magnesium ratio in some country irrigation water. *Journal of Water Research in Agriculture*. 2013; 23(1): 117-129.
- [16]. Memon M, Soomro M, AkhtarKazi MS, Memon S. Drinking water quality assessment in Southern Sindh (Pakistan). *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011; 177(1): 39-55.
- [17]. Piper AMA. Graphical procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*. 1994; 25: 914-928.
- [18]. Azizi M. Hydrogeology and hydrogeochemistry of Marivan and Ghezdelchessoo plain. Ms.C thesis. Tarbiat Modares University. Basic science faculty. 2013.
- [19]. Elliott T, Andrews JN, Edmunds WM. Hydrochemical trends, palaeorecharge and groundwater ages in the fissured chalk aquifer of the London and Berkshire Basins, UK. *Applied Geochemistry*. 1999; 14: 333-363.
- [20]. McIntosh JC, Walter LM. Paleowaters in Silurian-Devonian carbonate aquifers: geochemical evolution of groundwater in the Great Lakes region since the Late Pleistocene. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006; 70: 2454-2479.
- [21]. Ansari AMD, Deodhar A, Kumar US, Khatti VS. Water quality of few springs in outer Himalayas - A study on the groundwater bedrock interactions and hydrochemical evolution. *Groundwater for Sustainable Development*. 2015; 1: 59-67.
- [22]. White WB. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. Oxford University Press, New York, 1988.
- [1]. Walton WC. *Groundwater resources evaluation*. Mc Graw Hill Book Co, New York; 1970.
- [2]. Joshi BK. Hydrology and nutrient dynamic of spring of almora-binsar area, indian central himalaya: landscapes, practices, and management. *Water Resources*. 2006; 33(1): 87-86.
- [3]. Martos-Rosillo S, Moral F. Hydrochemical changes due to intensive use of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Estepa (Seville, southern Spain). *Journal of Hydrology*. 2015; 528: 249-263.
- [4]. Zheng Q, Ma M, Wang Y, Yan Y, Liu L, Liu L. Hydrochemical characteristics and quality assessment of shallow groundwater in Xincai River Basin, Northern China. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2017; 17: 368-371.
- [5]. Niu N, Wang H, Loáiciga HA, Hong S, Shao W. Temporal variations of groundwater quality in the Western Jiangnan Plain, China. *Science of the Total Environment*. 2017; 578(1): 542-550.
- [6]. Malki M, Bouchaou L, Hirich A, Brahim YA, Choukr-Allah R. Impact of agricultural practices on groundwater quality in intensive irrigated area of Chtouka-Massa, Morocco. *Science of the Total Environment*. 2017; 574: 760-770.
- [7]. Ebadati N. Qualitative trend of groundwater resources Eyvanakey plain. *Iranian Journal of Ecohydrology*. 2015; 2(4): 383-394. [Persian].
- [8]. Najafzadeh H, Zehtabian Gh, Khosravi H, Golkarian A. The Effect of Climatic and Geology Parameters on Groundwater Resources Quantitative and Qualitative (Case Study: Mahvelat). *Iranian Journal of Ecohydrology*. 2015; 2(3): 235-336. [Persian].
- [9]. Zaree A, Amiri MJT. Assessing the spatial and zoning of drinking and irrigation water quality using the geostatistics technique and GIS. *Iranian Journal of Ecohydrology*. 2016; 3(4): 505-516. [Persian].
- [10]. Department of Natural Resources in Kurdistan Province, Implementation - detailed studies of Zarivar watershed, Marivan, Volume VII (Groundwater), 2007. P. 49.
- [11]. Department of Natural Resources in Kurdistan Province, Implementation - detailed studies of Zarivar watershed, Marivan, Volume III (Geology and Geomorphology), 2007. P. 63.
- [12]. Fantong WY, Fouépe AT, Serges I, Djomou LB, Banseka HS, Anazawa K, SMA A, Mendjo

[23]. Wilcox LV. Classification and use of irrigation waters, US Department of Agriculture, Washington Dc, 1995.

[24]. Langmuir D. Aqueous environmental geochemistry. Prentice Hall Inc. Upper Saddle River, NJ, 1997.