

هیدروژنومورفولوژی، شماره ۱۵، تابستان ۱۳۹۷، صص ۹۴-۷۵

وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۳۱ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۹

تعیین عوامل مؤثر بر هیدروشیمی منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت و کارستی غرب ارومیه

حامد جعفریان^۱

عبدالرضا واعظی هیر^۲

حسین پیرخراطی^۳

چکیده

برای بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی شهرستان ارومیه تعداد ۱۵ نمونه از آب چشمه‌های مختلف در کل گستره‌ی مطالعاتی برداشت گردید. اندازه‌گیری غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی (HCO_3 , Cl , SO_4 , Mg , Ca , Na , K) و برخی خواص آب همچون EC، pH و TDS به صورت برجا در محل نمونه‌برداری و با استفاده از دستگاه‌های قابل حمل اندازه‌گیری شد. بررسی نمودارهای دایره‌ای نشان داد که ژپس موجود در واحد آبرفت‌های جوان سبب بالا رفتن جزئی مقدار SO_4 و EC در نمونه‌های موجود در حوضه‌ی آبرفت این واحد شده است و همچنین وجود مارن‌های موجود در منطقه باعث افزایش مقدار Na در برخی از نمونه‌ها شده است. تیپ غالب نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه، بیکربناته و کلسیک بوده و فرآیندهایی چون تعویض یونی (به علت حضور کانی‌های رسی)، هوازدگی و انحلال سازندهای آهکی و دولومیتی موجود در منطقه عوامل اصلی کنترل‌کننده‌ی شیمی آب چشمه‌های مورد مطالعه بوده است، همچنین مشخص گردید که بخش اعظمی از تغذیه‌ی آب چشمه‌ها از واحدهای زمین‌شناسی مشابه (آهک‌های پرمین و واحدهای تخریبی میوسن) صورت می‌گیرد که از نظر کشاورزی مناسب بوده

۱- کارشناسی ارشد، رشته‌ی زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشگاه ارومیه، دانشکده‌ی علوم، گروه زمین‌شناسی، تبریز، ایران.

۲- دانشیار، زمین‌شناسی هیدروژئولوژی، دانشگاه تبریز، دانشکده‌ی علوم طبیعی، گروه علوم زمین، تبریز، ایران (نویسنده مسئول).
E-mail: r.vaezi@tabrizu.ac.ir

۳- دانشیار، زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشگاه ارومیه، دانشکده‌ی علوم، گروه زمین‌شناسی، ارومیه، ایران.

و اکثریت نمونه‌ها برای شرب از کیفیت خوب برخوردار هستند. بالاترین همبستگی بین سولفات و TDS با ۸۴ درصد است که نشان‌دهنده‌ی شوری نسبی در برخی نمونه‌ها تحت تأثیر این یون بوده و همبستگی کلسیم و بی‌کربنات نشان از منشاء ناشی از انحلال آهک و دولومیت است.

کلمات کلیدی: آبخوان کارستی، آب زیرزمینی، ارومیه، سازند سخت، هیدروشیمی.

مقدمه

آب موجود در آبخوان‌های سازند سخت، به علت دارا بودن مقادیر کم املاح، کیفیت مطلوبی جهت استفاده‌های مختلف دارا می‌باشند. آبخوان‌های موجود در سازندهای آهکی از نوع کم‌عمق و سطحی بوده و ویژگی بارز آن‌ها ناهمگنی و ناهمسانی است که در این آبخوان‌ها به خوبی مشاهده می‌شود. تعدد چشمه‌ها با آبدهی کم در امتداد مسیر آبراهه‌ها و شکستگی‌ها که به شدت تحت تأثیر بارندگی‌های فصلی است، از دیگر مشخصات هیدروژئولوژیک این سفره‌ها است. حجم آب ذخیره‌شده در سنگ‌های سخت به کمتر از ۲ درصد می‌رسد (هانسلو^۱، ۱۹۹۵: ۱۲۸). مطالعات انجام‌شده توانایی سازندهای سخت از جمله سنگ‌های بازالتی و آهکی را برای تشکیل آبخوان‌های بارزش نشان می‌دهد (پیترسون^۲، ۱۹۹۳: ۱۶۷). با توجه به اینکه خصوصیات هیدروژئولوژیکی سازند سخت به میزان گسترش تخلخل ثانویه (به صورت درز و شکاف و انحلال) بستگی دارد، در این سنگ‌ها، سیستم شکستگی و شکاف‌ها مسیرهای هیدرولیکی را در توده سنگ ایجاد می‌کنند (محمدزاده، ۱۳۹۳). در واکنش‌های هوازدگی و انحلال، کانی‌های مختلف دارای سرعت و پتانسیل متفاوتی هستند و تأثیر آن‌ها در ترکیب شیمیایی آبخوان، نه بر اساس فراوانی، بلکه براساس سرعت هوازدگی آن‌ها است (پیترسون، ۱۹۹۳). لایه‌های هوازده‌ی گسترده و ضخیم، شرایط مناسبی را برای ایجاد آبخوان‌ها با حجم ذخیره و آبدهی بالا

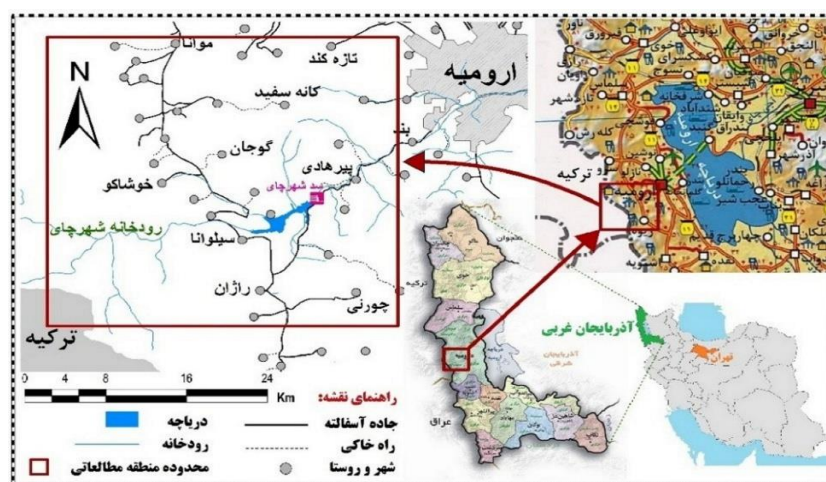
1- Hounslow

2- Peterson

فراهم می‌کنند. افزایش شناخت از فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی کنترل‌کننده‌ی شیمی آب‌های زیرزمینی در آبخوان‌های سازند سخت و آهکی می‌تواند در بهبود شناخت سیستم‌های هیدروژئوشیمیایی و مدیریت کمی و کیفی این آب‌ها کمک شایانی کند. در ارتباط با کیفیت شیمیایی منابع آب زیرزمینی در ایران تحقیقات زیادی انجام شده است (کلانتری و علیجانی، ۱۳۸۷؛ فاریابی و همکاران، ۱۳۸۹؛ کلانتری و همکاران، ۱۳۸۸؛ درانی نژاد، ۱۳۸۷). با توجه به اینکه در منطقه‌ی مورد مطالعه قنات یا چاه بهره‌برداری وجود ندارد و چشمه‌ها مهم‌ترین منبع تأمین آب منطقه هستند، هدف از این پژوهش، بررسی خصوصیات شیمیایی چشمه‌های موجود در سازندهای سخت واقع در غرب شهر ارومیه و عوامل مؤثر بر کیفیت شیمیایی آب این چشمه‌ها است.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه با مساحت ۶۵۲ کیلومترمربع در ۱۲ کیلومتری غرب شهرستان ارومیه واقع شده است. این محدوده از غرب به مرز ایران و ترکیه از شرق به شهر ارومیه، از شمال به حوضه‌ی آبریز نازلوچای و از جنوب به حوضه‌ی باراندوزچای محدود است.

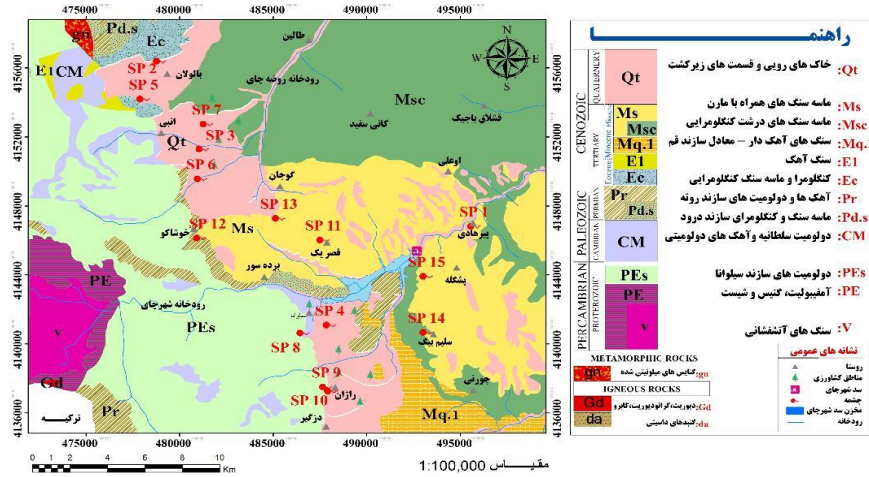


شکل (۱) موقعیت محدوده‌ی مورد مطالعه و راه‌های دسترسی

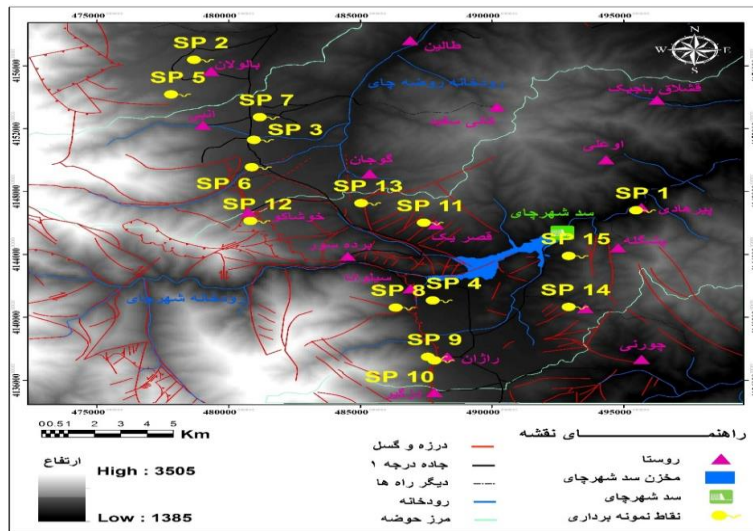
از نظر تقسیمات هیدرولوژیکی این منطقه جزو حوضه آبریز دریاچه‌ی ارومیه بشمار می‌رود و شامل دو حوضه‌ی رودخانه‌ی روضه‌چای و رودخانه‌ی شهرچای است که هر دو از زیر حوضه‌های دریاچه‌ی ارومیه هستند. سد شهرچای که بر روی رودخانه‌ی شهرچای احداث شده است تقریباً در مرکز محدوده‌ی مطالعاتی با مخزنی ۲۲۱ میلیون مترمکعب قرار گرفته است. این منطقه از نظر اقلیمی بر اساس اقلیم نمای آمبرژه دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است، به‌طوری‌که متوسط درجه حرارت سالانه ۹/۸ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه برابر ۴۰۰ میلی‌متر است. ذوب شدن برف‌های موجود در ارتفاعات بخش غربی منطقه آبراهه‌های متعدد و رودخانه‌ها را به وجود آورده و سبب تأمین آب زیرزمینی منطقه می‌شود.

واحدهای زمین‌شناسی منطقه عمدتاً شامل سنگ‌های کربناته (آهک و دولومیت) به‌ویژه مربوط به رخنمون‌های مربوط به سنگ آهک‌های پرمین (Pr) و توده‌های آهکی و دولومیتی داخل آن، دولومیت‌های به شدت چین‌خورده‌ی پرکامبرین بالایی (PEs)، واحدهای میوسن شامل سنگ‌های آهک‌دار (Mq.1)، ماسه‌سنگ‌های دانه درشت کنگلومرای (Msc)، ماسه‌سنگ‌های دانه درشت همراه با مارن (Ms) و مجموعه‌های افیولیتی است. بخش شرقی منطقه که زیر پوشش سنگ‌ها و سازندهای رخساره‌ی مولاسی است با مورفولوژی تپه‌ماهوری برای مارن، شیل و گل‌سنگ‌ها و مورفولوژی خشن برای ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سنگ‌آهک در آن مشاهده می‌شود (شکل ۲).

در مطالعات و بررسی‌های اولیه، نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۱۰۰۰۰۰ و نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه، مورد مطالعه قرار گرفت و با استفاده از تصاویر هوایی و نرم‌افزار Google Earth موقعیت ۲۰ چشمه و راه‌های دسترسی به آن‌ها در منطقه‌ی مطالعاتی شناسایی شد. سپس طی مطالعات میدانی در بخش اعظمی از منطقه که امکان پیمایش وجود داشت و با استفاده از مطالعات قبلی تمامی چشمه‌های اصلی در منطقه شناسایی و از بین آن‌ها ۱۵ چشمه که از پراکندگی خوبی در منطقه برخوردار بودند برای انجام مطالعات هیدروشیمی انتخاب شدند (شکل ۳).



شکل (۲) نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سیلوانا و سرو، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور



شکل (۳) نقشه ارتفاعی (DEM) محدوده مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه برداری (خطوط قرمز رنگ شکستگی ها و گسل های منطقه را نشان می دهند)

از ۱۵ چشمه‌ی انتخابی نمونه‌ی آب تهیه و جهت آنالیز به آزمایشگاه سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی ارسال گردید. پارامترهایی همچون دمای آب، pH و EC به صورت برجا در محل نمونه‌برداری و با استفاده از دستگاه چندکاره‌ی شیمیایی مدل WA-2017SD، اندازه‌گیری شد. جهت آنالیز یون‌های اصلی و فرعی در آزمایشگاه از دو روش طیف‌سنجی شعله (فلیم فتومتری) برای اندازه‌گیری سدیم و پتاسیم و از روش حجم‌سنجی برای اندازه‌گیری یون‌های کلر، سولفات، کربنات و بیکربنات استفاده شد. لازم به ذکر است، در هیچ‌کدام از نمونه‌های مورد آنالیز یون کربنات مشاهده نشده است. با استفاده از نرم‌افزار Aq.QA خصوصیات نمونه‌ها شامل تیپ آب و نسبت جذب سدیم و خطر شوری تعیین گردید.

جدول (۱) نتایج آنالیز نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه

نمونه	TDS ppm	EC µs/cm	pH	meq/l						
				Cl	So	HCO	Ca	Mg	Na	K
SP1	۲۹۹	۴۶۰	۷/۶	۰/۴	۰/۷۳	۳/۳	۳/۳	۱/۲	۰/۵	۰/۱
SP2	۲۴۰/۵	۳۷۰	۷/۵	۰/۲	۰/۵	۳/۵	۳/۸	۰/۴	۰/۱۲	۰/۱
SP3	۳۸۳/۵	۵۹۰	۷/۱	۰/۳	۲/۲	۴	۵/۲	۱/۱	۰/۱۸	۰/۱
SP4	۲۰۸	۳۲۰	۷/۶	۰/۴	۰/۵	۲/۸	۲/۵	۰/۹	۰/۱۸	۰/۱
SP5	۲۶۰	۳۱۰	۸	۰/۳	۰/۶۲	۳/۲	۳	۱	۰/۱	ND*
SP6	۳۵۱	۵۴۰	۷/۹	۰/۳	۲	۲/۸	۳/۵	۱/۷	۰/۱	ND
SP7	۵۲۶/۵	۸۱۰	۷/۴	۰/۵	۲/۴	۵/۲	۵	۳/۲	۰/۱	ND
SP8	۲۰۸	۳۲۰	۸/۱	۰/۴	۰/۵۷	۲/۴	۱/۸	۱/۵	۰/۰۹	ND
SP9	۱۸۲	۳۶۴	۸	۰/۳	۱/۲	۱/۸	۲/۶	۰/۶	۰/۱۷	ND
SP10	۲۴۱	۴۸۱	۷/۷	۰/۴	۰/۷	۳/۲	۳/۳	۰/۸	۰/۵	ND
SP11	۲۶۸	۵۳۵	۷/۴	۰/۳	۱/۱	۳/۶	۳/۴	۱/۴	۰/۴	ND
SP12	۲۴۴	۴۹۰	۷/۵	۰/۳	۰/۶	۳/۸	۳	۱/۶	۰/۰۷	ND
SP13	۲۸۳	۵۷۲	۷/۴	۰/۴	۰/۹	۳/۸	۴/۲	۰/۸	۰/۳	ND
SP14	۳۴۲	۶۸۵	۷/۶	۱/۲	۱/۲	۳/۴	۴/۲	۱	۰/۸	ND
SP15	۲۳۳	۴۶۵	۷/۶	۰/۵	۰/۵	۳/۲	۳/۱	۰/۸	۰/۴	ND

*ND: Not Detect

بررسی نمودارهای دورو و گیپس در محیط نرم افزار Aq.QA و بررسی اندیس اشباع و محاسبه‌ی نسبت‌های یونی، منشأ یون‌ها و کانی‌های موجود در نمونه‌های آب را فراهم ساخت. برای بررسی کیفیت آب از لحاظ کشاورزی از نمودار ویلکاکس و برای طبقه‌بندی آب از لحاظ شرب از نمودار شولر استفاده شد. با استفاده از کد دستوری قابل اجرا در محیط Microsoft Excel Worksheet نتایج آنالیز بر روی نمودار ویلکاکس و شولر قابل رویت شد. همچنین با استفاده از کد کامپیوتری PHREEQC، تأثیر انحلال کانی‌های مختلف بر هیدروشیمی آب چشمه‌های منطقه‌ی مطالعاتی و مقادیر نمایه‌های اشباع کانی‌های موردنظر انجام پذیرفت.

بحث و نتایج

برای بررسی هدایت الکتریکی (EC)^۱ و تغییرات آن در مکان‌های مختلف از منطقه‌ی مطالعاتی از نمودارهای دایره‌ای استفاده شد (شکل ۴). در این نمودارها اندازه‌ی هر دایره نشان‌دهنده‌ی میزان هدایت الکتریکی است که با توجه به مقادیر آن‌ها در ۵ کلاس مختلف از نظر غلظت و اندازه‌ی دایره تقسیم‌بندی شد. هدایت الکتریکی در منطقه‌ی مورد مطالعه از $310 \mu\text{ms/cm}$ در نمونه‌ی SP5 تا $810 \mu\text{ms/cm}$ در نمونه‌ی SP7 متغیر است. افزایش EC در نمونه‌ی SP7 می‌تواند به دلیل قرار گرفتن بخشی از حوضه‌ی آبرگیر این چشمه در آبرفت‌های جوان منطقه باشد. وجود ژپس در رسوبات آبرفتی و قابلیت انحلال بالای این واحد سنگی منجر به افزایش مواد محلول موجود در آب زیرزمینی می‌شود. مقدار کم EC در نمونه‌ی SP5 به دلیل وجود سنگ‌های آتش‌فشانی در مجاورت این چشمه است و مقدار متوسط آن در نمونه‌ی SP12 به دلیل وجود آهک‌ها و دولومیت‌های موجود در منطقه (سازند روته) است. با تحلیل کامل مقادیر هدایت الکتریکی در نمونه‌های مورد مطالعه و موقعیت قرارگیری آن‌ها بر روی نقشه، مشاهده می‌شود که میزان هدایت الکتریکی از آبخوان‌های موجود در واحدهای آهکی، دولومیتی

1- Electrical Conductivity

و ماسه‌سنگی به سمت رسوبات و آبرفت‌های عهد حاضر و واحدهای شیلی و مارنی منطقه افزایش می‌یابد.

با بررسی نمودارهای دایره‌ای در شکل (۵) مشخص شد غلظت بالای سولفات در نمونه‌های شماره‌ی SP3 – SP6 – SP7 – SP10 – SP11 نیز ناشی از واحدهای آبرفتی جوان منطقه است که معمولاً دارای قطعاتی از ژئوپس است و سرعت جریان آب زیرزمینی در آن بسیار کمتر از واحدهای سازند سخت می‌باشد و در نتیجه سرعت پایین جریان آب زیرزمینی باعث افزایش زمان ماندگاری و سبب افزایش انحلال یونها می‌شود (هانسلو، ۱۹۹۵). غلظت بالای سدیم در آب‌های کشاورزی می‌تواند باعث کاهش نفوذپذیری و تخریب ساختار خاک گردد (هانسلو، ۱۹۹۵: ۱۰۴). همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود مقدار سدیم در نمونه‌های SP1 – SP11 – SP14 – SP15 به نسبت بقیه‌ی نمونه‌ها غلظت بالاتری را نشان می‌دهد. با توجه به وجود ۳۵ تا ۶۵ درصد خاک رس در مارن‌ها می‌توان غلظت بالای سدیم در این نمونه‌ها را ناشی از انحلال مارن‌های موجود در واحدهای میوسن منطقه دانست.

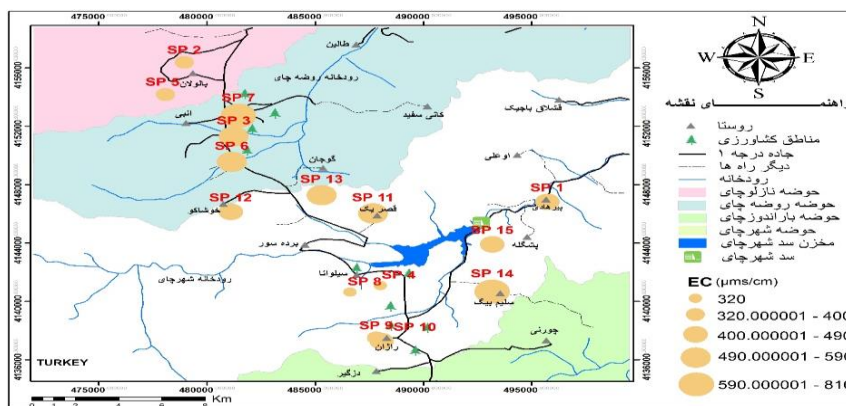
تیپ غالب هیدروشمیایی آبخوان تابعی از لیتولوژی، قدرت انحلالی و الگوی جریان است، می‌توان با استفاده از نمودار پایپر^۱ به ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان پی برد (فریز^۲ و چری^۳، ۱۹۷۹: ۱۳۳)، این نمودار برای نشان دادن آنکه ترکیب یونی آب چگونه از میان موقعیت‌های هیدروژئولوژیکی تغییر می‌کند، مفید بوده و در تعیین تیپ آب استفاده می‌شود (شکل ۷ الف). با تحلیل نمودار تقسیم‌بندی پایپر برای آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی بر اساس درصد یون‌های اصلی و موقعیت قرارگیری آنالیز نمونه‌های آب در دو مثلث تعیین تیپ آب مشخص شد که در تمامی چشمه‌های موجود در منطقه‌ی مطالعاتی مقدار یون کلسیم بر سدیم و منیزیم غالب بوده و مقدار یون بیکربنات بیشتری نسبت به کلر دارند و در نتیجه تیپ بیکربناته و تیپ کلسیمی غالب هستند. بر

1- Piper

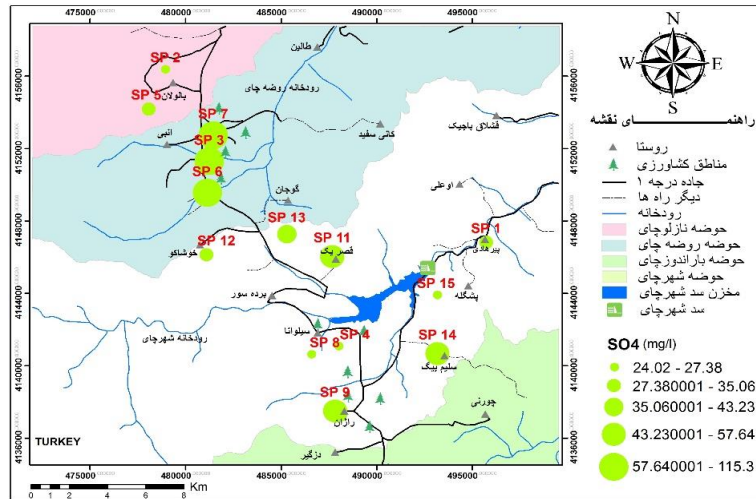
2- Freeze

3- Cherry

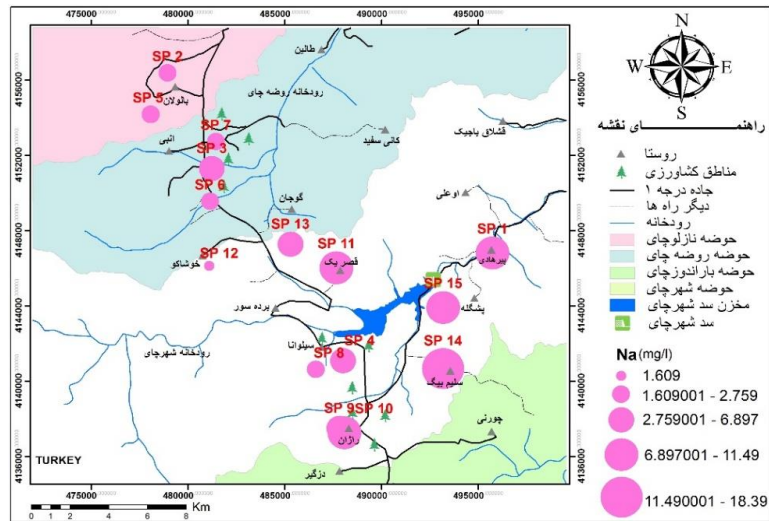
این اساس در آب‌های مورد مطالعه سختی کربناته بیشتر از ۵۰ درصد بوده و به‌عبارت‌دیگر قلیایی‌های حاکی و اسیدهای ضعیف در منطقه غالب هستند و آب‌های این محدوده دارای سختی موقت هستند. با مطالعه و تفسیر زمین‌شناسی منطقه می‌توان نتیجه گرفت که گسترش سنگ‌های کربناته (بخش آهکی سازندهای قم، سلطانیه و روته) در منطقه‌ی مورد مطالعه و انحلال کانی‌های کربناته منشأ اصلی یون‌های کلسیم و منیزیم در آب چشمه‌ها بوده و غلظت بالای یون بی‌کربنات در نتیجه‌ی فرسایش و هوازدگی کانی‌های کربناته است. نکته‌ی قابل توجه در دیاگرام پایپر قرار گرفتن بسیاری از نمونه‌ها در امتداد یک خط است که بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط صداقت (۱۳۸۷: ۲۰۲) این تأثیر اختلاط بین آب‌های مختلف را نشان می‌دهد و با توجه به طبیعت منطقه‌ی مورد مطالعه و فراوانی وجود درزه‌ها و گسل‌های متعدد در این محدوده (شکل ۳)، انتقال آب‌های با شیمی مختلف در امتداد این شکستگی‌ها و اختلاط آن‌ها در محل تقاطع درزه‌ها علت روند خطی نمونه‌ها در نمودار پایپر است. اختلاط آب‌های با شیمی مختلف برخلاف آبخوان‌های آبرفتی در آبخوان‌های سازند سخت یک پدیده‌ی غالب است.



شکل (۴) پراکندگی مقدار هدایت الکتریکی برحسب $\mu\text{mS/cm}$ در آب زیرزمینی منطقه‌ی مورد مطالعه (مرز حوضه‌های آبریز بر اساس نقشه‌ی DEM تعیین شده است)



شکل (۵) پراکندگی غلظت یون سولفات بر حسب میلی گرم بر لیتر در آب زیرزمینی منطقه‌ی مورد مطالعه

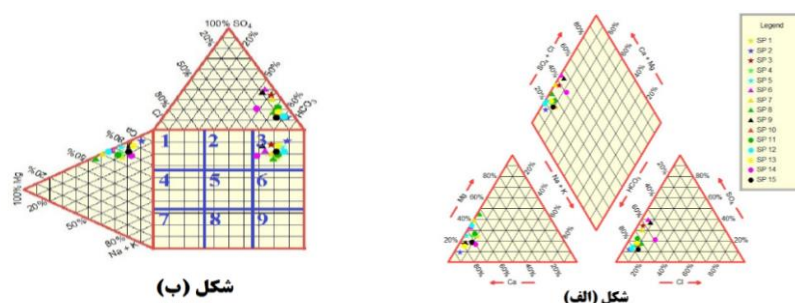


شکل (۶) پراکندگی غلظت یون سدیم بر حسب میلی گرم بر لیتر در آب زیرزمینی منطقه‌ی مورد مطالعه

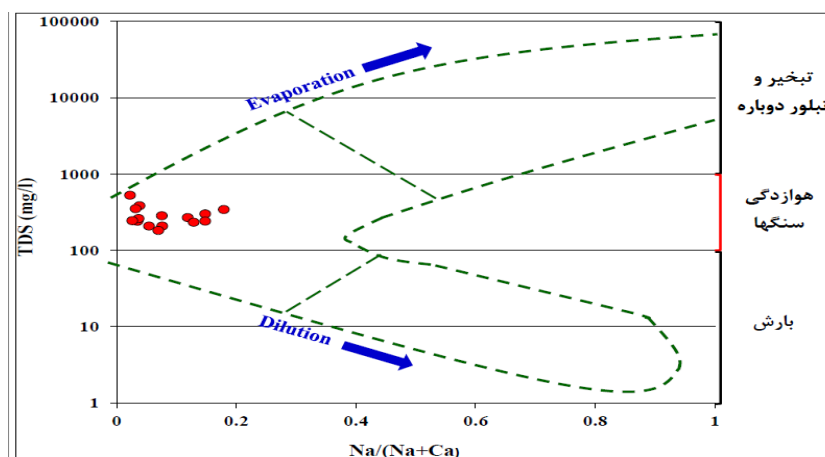
نمودار دورو^۱ از این نظر که نتایج آنالیزها بر روی مثلث‌های آنیون و کاتیون جداگانه قرار می‌گیرند شبیه به نمودار پایپر است (هم^۲، ۱۹۸۹: ۲۲۵۴). بر اساس مطالعات لیود^۳ و هیتکوت^۴ (۱۹۸۵) قرار گرفتن نمونه‌ها در منطقه‌ی ۳ نشان‌دهنده‌ی غالب بودن یون‌های بیکربنات و سدیم در آب است (شکل ۷ ب)، این منطقه نشان‌دهنده‌ی تعویض یونی در آب است. وجود رس‌های موجود در منطقه می‌تواند دلیل انجام فرآیند تعویض یونی باشد. فرآیند تبادل یونی در حقیقت جایگزینی سدیم به جای کلسیم و منیزیم در سطح رس‌هاست (میسون، ۱۹۵۲: ۱۲۸). همان‌طور که سیر تکاملی نمودار نشان می‌دهد، تیپ آب‌های تعیین‌شده توسط نمودار پایپر در این نمودار هم قابل‌مشاهده است. موقعیت قرارگیری نتایج آنالیز نمونه‌ها در نمودار دورو بیانگر آن است که تغذیه‌ی چشمه‌ها از واحدهای زمین‌شناسی مشابه صورت می‌گیرد و با توجه به شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه این سازندها می‌تواند آهک‌های پرمین و واحدهای تخریبی میوسن در منطقه باشد.

جهت تعیین منشأ یون‌های محلول در آب از مدل گیبس^۵ استفاده گردید. موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمودار گیبس نشان می‌دهد کیفیت شیمیایی تمامی نمونه‌ها تحت تأثیر هوازدگی سنگ‌ها است. با توجه به لیتولوژی منطقه، هوازدگی و انحلال سازندهای آهکی، دولومیتی و واحدهای تخریبی میوسن عامل اصلی کنترل‌کننده‌ی شیمی آب چشمه‌های منطقه بوده است (شکل ۸).

1- Durov
2- Hem
3- Liody
4- Heathcote
5- Gibbs



شکل (۷) نمودارهای پایپر (الف) و دورو (ب) برای نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه



شکل (۸) نمودار گیبس برای نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه

مهم‌ترین معیارهای کیفی در طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی، شوری و مقدار سدیم موجود در آن است (ویلکاکس^۱، ۱۹۵۵). زیرا این دو نه تنها بر رشد گیاه مؤثرند، بلکه درجه‌ی تناسب آب از نظر آبیاری و تأثیر آن بر نفوذپذیری خاک را مشخص می‌سازند. طبقه‌بندی ویلکاکس تأثیر سدیم در ارتباط با شوری کل را نشان می‌دهد و استفاده از این نمودار کاربردی‌ترین روش برای طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی است. در بررسی

1- Wilcox

رده‌ی آب با استفاده از میزان نسبت جذب سدیم^۱ و هدایت الکتریکی در دیاگرام ویلکاکس، مشخص شد که تمامی نمونه‌های مورد مطالعه به‌جز چشمه‌ی شماره‌ی SP7 در کلاس C2-S1 قرار گرفته است، یعنی این آب‌ها شوری کمی داشته و برای کشاورزی مناسب هستند. شوری بالا در نمونه‌ی SP7 سبب شده تا این چشمه در کلاس C3-S1 قرار گیرد که در این کلاس آب‌ها شور هستند ولی برای کشاورزی قابل استفاده هستند.

نمودار شولر^۲ که بر اساس استانداردهای پیشنهادی آب آشامیدنی طراحی شده است، می‌تواند برای تعیین قابلیت شرب نمونه‌های آب بر اساس غلظت یون‌های عمده بکار رود. بر اساس نمودار شولر بیشتر آب‌های منطقه دارای کیفیت خوب از نظر شرب هستند. دو نمونه‌ی SP7 و SP3 کیفیت کمتری نسبت به بقیه‌ی چشمه‌ها در منطقه‌ی مورد مطالعاتی داشته و در قسمت آب‌های قابل قبول از نظر شرب در نمودار شولر قرار می‌گیرند. قرار گرفتن این دو نمونه در قسمت آب‌های قابل قبول به علت بالا بودن مقدار سختی کل در آن‌ها است. برای تعیین فرآیند غالب کنترل‌کننده‌ی ترکیب هیدروشیمیایی نسبت‌های یونی نمونه‌ها بر اساس جدول نسبت یونی هانسلو (۱۹۹۵)، محاسبه گردیده است.

با توجه به جدول (۲) و نسبت یونی $Na/Na+Cl$ در نمونه‌های SP1-SP10- SP11 بیشتر از ۰/۵ است که این نشان می‌دهد سدیم منبع دیگری از هالیت و آل‌بیت دارد و همچنین ممکن است تبادل یونی اتفاق افتاده باشد در بقیه‌ی نمونه‌ها مقدار این نسبت کمتر از ۰/۵ است که به‌غیر از نمونه‌ی SP7 که TDS در این نمونه برابر ۵۲۶ میلی‌گرم بر لیتر است و نشان‌دهنده‌ی تبادل یونی معکوس در منشأ سدیم به دلیل وجود رس است، بقیه‌ی نمونه‌ها دارای TDS بین ۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر هستند که بیانگر خطای آنالیز است. فرآیند تبادل یونی در حقیقت جایگزینی سدیم بجای کلسیم و منیزیم در سطح رس‌هاست. نسبت $Mg/Mg + Ca$ در تمامی نمونه‌ها حاکی از آن است که منیزیم در چشمه‌های مورد مطالعه از هوازدگی سنگ دولومیت و سنگ‌آهک است

1- SAR

2- Schoeller

که نمودار گیس (شکل ۸) نیز این امر را تأیید می‌کند. پراکندگی آهک و دولومیت‌های سازند روته می‌تواند منبع منیزیم در آب زیرزمینی منطقه باشد. با توجه به نسبت یونی $Ca+Mg/So_4$ در تمامی نمونه‌ها حاکی از بالا بودن مقدار کلسیم و منیزیم در منشأ این چشمه‌ها است که نشان‌دهنده‌ی نقش دولومیت در ترکیب شیمیایی آبخوان منطقه است. با توجه به نسبت بیکربنات بر مجموع آنیون‌ها در نمونه‌ی SP2 می‌توان نتیجه گرفت هوازگی سیلیکات‌ها و یا کربنات‌ها منشأ یون بیکربنات در این نمونه است. در نمونه‌های SP6, SP3 و SP7 مقدار بالای سولفات نشان‌دهنده‌ی انحلال ژپیس موجود در واحدهای آبرفتی منطقه است.

جدول (۲) تعیین منشأ یون‌ها از نسبت‌های یونی محدوده‌ی مورد مطالعه

نمونه	نسبت‌های یونی					
	Na/Na + Cl	Mg/Mg + Ca	Ca/Ca + So ₄	Ca + Mg/So ₄	Cl/Sum anions	HCO ₃ /Sum anions
SP 1	۰/۵۶	۰/۲۷	۰/۸۲	۶/۱۶	۰/۰۹	۰/۷۴
SP 2	۰/۳۸	۰/۱۰	۰/۸۸	۸/۴۰	۰/۰۵	۰/۸۳
SP 3	۰/۳۸	۰/۱۷	۰/۷۰	۲/۸۶	۰/۰۵	۰/۶۲
SP 4	۰/۳۱	۰/۲۶	۰/۸۳	۶/۸۰	۰/۱۱	۰/۷۶
SP 5	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۸۳	۶/۴۵	۰/۰۷	۰/۷۸
SP 6	۰/۲۵	۰/۳۳	۰/۶۴	۲/۶۰	۰/۰۶	۰/۵
SP 7	۰/۱۷	۰/۳۹	۰/۶۸	۳/۴۲	۰/۰۶	۰/۶۴
SP 8	۰/۱۸	۰/۴۵	۰/۷۶	۵/۷۹	۰/۱۲	۰/۷۱
SP 9	۰/۳۶	۰/۱۹	۰/۶۸	۲/۶۷	۰/۰۹	۰/۵۵
SP 10	۰/۵۶	۰/۲۰	۰/۸۳	۵/۸۶	۰/۰۹	۰/۷۴
SP 11	۰/۵۷	۰/۲۹	۰/۷۶	۴/۳۶	۰/۰۶	۰/۷۲
SP 12	۰/۱۹	۰/۳۵	۰/۸۳	۷/۶۷	۰/۰۶	۰/۸۱
SP 13	۰/۴۳	۰/۱۶	۰/۸۲	۵/۵۶	۰/۰۸	۰/۷۵
SP 14	۰/۴۰	۰/۱۹	۰/۷۸	۴/۳۳	۰/۲۱	۰/۵۹
SP 15	۰/۴۴	۰/۲۱	۰/۸۶	۷/۸۰	۰/۱۲	۰/۷۶

با توجه به نسبت Ca/Mg می‌توان جنس سنگ احتمالی مخزن را تشخیص داد، بدین ترتیب اگر مقدار این نسبت کمتر از ۱ باشد در واقع منیزیم بر کلسیم غالب بوده و جنس سنگ مخزن دولومیتی است. اگر مقدار نسبت Ca/Mg بین ۱ تا ۲/۵ قرار گیرد، جنس سنگ مخزن دولومیت آهکی است. نسبت Ca/Mg بین ۲/۵ تا ۵ نشان‌دهنده‌ی جنس سنگ مخزن آهک دولومیتی خواهد بود. مقدار این نسبت اگر در بین ۵ تا ۸ قرار گیرد جنس سفره آهکی است. نسبت بالای ۸ که در واقع حاکی از بالا بودن مقدار کلسیم در نمونه است نشان‌دهنده‌ی آهک خالص یا سنگ آهک گچ‌دار در سنگ مخزن است (استاندارد مهندسی آب کشور، ۱۳۸۲: ۱۱).

با توجه به اطلاعات مندرج در جدول (۳) و نسبت کلسیم به منیزیم در نمونه‌های SP6-SP7-SP8-SP11-SP12 ملاحظه می‌گردد که جنس احتمالی بدنه‌ی آبخوان در این نمونه‌ها دولومیت آهکی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جنس سفره‌ی آب زیرزمینی در حوضه‌ی آبخیز این چشمه‌ها می‌تواند دولومیت و آهک‌های سازند روته و دولومیت‌های سازند سلطانیه و همچنین دولومیت‌های به شدت چین‌خورده در بخش سیلوانا باشد. نسبت کلسیم به منیزیم در نمونه‌های SP2 و SP13 نشان می‌دهد که جنس سفره‌ی آب زیرزمینی در محل این چشمه‌ها از نوع آهک خالص و آهکی است. همچنین با توجه به مقدار سختی کل در این جدول مشاهده می‌شود اکثر نمونه‌ها از نظر کیفیت بر اساس سختی کل در رده‌ی آب‌های سخت قرار می‌گیرند. مقدار بالای سختی کل در نمونه‌های SP3 و SP7 باعث شده است که این دو نمونه در کلاس آب‌های کاملاً سخت قرار گیرند.

اندیس اشباع‌شدگی^۱ به صورت $SI = \log IAP/Ks$ بیان می‌شود که IAP میزان فعالیت یون و Ks میزان انحلال یون را نشان می‌دهد. اگر برای یک کانی اندیس اشباع بیشتر از صفر باشد فوق اشباع و آن کانی در آب رسوب می‌کند و اگر کمتر از صفر باشد، شرایط تحت اشباع است و می‌تواند به مقدار بیشتری در آب انحلال یابد و چنانچه

1- SI

اندیس اشباع صفر باشد، آب نسبت به این کانی اشباع است (راجموهن^۱ و ایلانگو^۲، ۲۰۰۴: ۴۶). در این مطالعه برای تعیین تعادل شیمیایی بین کانی‌های اصلی موجود در سازندهای زمین‌شناسی و آب زیرزمینی از جمله کلسیت، دولومیت، انیدریت، ژپس، آراگونیت و هالیت به محاسبه‌ی شاخص اشباع این کانی‌ها پرداخته شده است. با توجه به نمودار، نمایه‌ی اشباع نسبت به دولومیت در نمونه‌های SP2-SP3-SP13 منفی است. بیشترین میزان اشباع نسبت به دولومیت مربوط به نمونه‌های SP5 و SP8 است که متأثر از واحدهای دولومیتی سازند سیلوانا هست. در نمونه‌های SP2-SP3-SP11-SP12-SP13-SP15 اندیس اشباع کلسیت و آراگونیت در حدود صفر بوده و به این معنا است که در بین میزان انحلال و رسوب‌گذاری آن تعادل وجود دارد. بقیه‌ی نمونه‌های منطقه‌ی مورد مطالعه نسبت به کلسیت و آراگونیت و دولومیت فوق اشباع هستند که علت آن انحلال منیزیم و کلسیم سازندهای موجود در منطقه است که با نتایج مربوط به نسبت‌های یونی مطابقت دارد. علی‌رغم بالا بودن سولفات و کلراید در برخی نمونه‌ها، نمایه‌ی اشباع نسبت به کانی‌های ژپس، انیدریت و هالیت منفی است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی آن است که آب‌های منطقه نسبت به این کانی‌ها در حالت تحت اشباع قرار دارد و این کانی‌ها می‌توانند در آب‌های منطقه بیشتر حل شده و شوری را افزایش دهند. علاوه بر اینکه حلالیت این سه کانی در آب بالا است، واحدهای شورکننده در منطقه‌ی مورد مطالعه گسترش بسیار کمی دارند و به همین دلیل آب‌های زیرزمینی نسبت به کانی‌های تبخیری تحت اشباع هستند (شکل ۹).

به منظور اثبات یافته‌های قبلی در مورد تأثیر واحدهای زمین‌شناسی بر هیدروشیمی آب زیرزمینی، از تحلیل آماری همبستگی و آنالیز خوشه‌ای (Cluster Analysis) استفاده گردید. با توجه به جدول نتایج همبستگی بین متغیرهای اندازه‌گیری شده که به روش پیرسون محاسبه گردید (جدول ۴)، مشاهده می‌گردد که بالاترین همبستگی بین سولفات و TDS با ۸۴ درصد است که نشان می‌دهد شوری نسبی در برخی نمونه‌ها

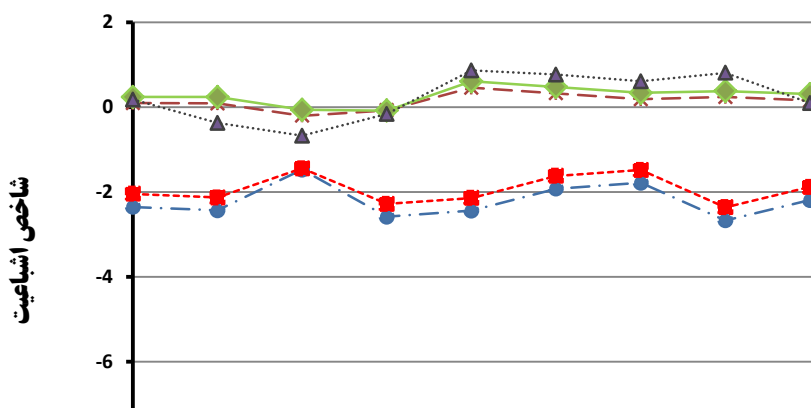
1- Rajmohan

2- Elango

تحت تأثیر این یون بوده است. همبستگی کلسیم و بی‌کربنات نشان از منشاء ناشی از انحلال آهک و دولومیت است. همچنین همبستگی مثبت ۸۰ درصد بین دو یون سولفات و کلراید و همبستگی ۷۴ درصد بین دو یون سدیم و کلراید نشان‌دهنده تأثیر واحدهای شورکننده نظیر مارن‌های میوسن در منطقه است. همبستگی معکوس بین یون بی‌کربنات و pH با $75/3$ درصد قابل انتظار بوده و نشان می‌دهد با افزایش pH بالا یون بی‌کربنات کاهش می‌یابد.

جدول (۳) مقادیر سختی کل و جنس احتمالی سنگ مخزن

نمونه	سختی کل	کیفیت آب بر اساس سختی کل	Ca/Mg	جنس احتمالی بدنه‌ی آبخوان
SP 1	225.12	سخت	2.72	آهک دولومیتی
SP 2	210.15	سخت	9.4	آهک خالص
SP 3	315.2	کاملاً سخت	4.68	آهک دولومیتی
SP 4	170.12	سخت	2.75	آهک دولومیتی
SP 5	200.12	سخت	2.97	آهک دولومیتی
SP 6	260.16	سخت	2.04	دولومیت‌آهکی
SP 7	410.23	کاملاً سخت	1.55	دولومیت‌آهکی
SP 8	165.08	سخت	1.19	دولومیت‌آهکی
SP 9	160.1	سخت	4.29	آهک دولومیتی
SP 10	205.13	سخت	4.08	آهک دولومیتی
SP 11	240.12	سخت	2.4	دولومیت‌آهکی
SP 12	230.12	سخت	1.86	دولومیت‌آهکی
SP 13	250.15	سخت	5.19	آهک
SP 14	260.14	سخت	4.16	آهک دولومیتی
SP 15	195.12	سخت	3.83	آهک دولومیتی



شکل (۹) اندیس اشباع نمونه‌های آب نسبت به کانی‌های مختلف

جدول (۴) نتایج همبستگی بین متغیرهای اندازه‌گیری شده به روش پیرسون

	TDS	pH	CL	SO ₄	CO ₃	HCO ₃	Ca	Mg	K	Na
TDS	۱۰۰									
pH	-۴۷/۴	۱۰۰								
CL	۲۶/۵	-۴۰	۱۰۰							
SO ₄	۸۴**	-۳۳/۳	۸۰	۱۰۰						
CO ₃	a	a	a	a	a					
HCO ₃	۷۸/۲**	-۷۵/۳**	۱۰/۹	۴۴/۸	a	۱۰۰				
Ca	۸۲**	-۷۶/۲**	۲۱/۸	۷۰/۶**	a	۷۸/۸**	۱۰۰			
Mg	۷۵/۵**	-۱۲/۹	۶/۵	۶۲*	a	۵۹/۱*	-۳۰/۸	۱۰۰		
K	-۱۳	-۴۰/۳	-۲۳/۷	-۶/۳	a	۵/۴	۱۶/۴	-۲۸/۱	۱۰۰	
Na	۱۳	-۱۷/۶	۷۴**	-۱۴/۲	a	۰/۷	۱۶/۷	-۲۷/۶	-۶/۶	۱۰۰

** همبستگی معنی‌دار در سطح ۱ درصد

* همبستگی معنی‌دار در سطح ۵ درصد

a. ضریب همبستگی وجود ندارد.

نتیجه‌گیری

بررسی نمودارهای پایپر، دورو و گیبس نشان داد که منشأ آب در تمامی نمونه‌های منطقه یکسان بوده و از نوع بیکربناته و کلسیک است که نشان می‌دهد احتمالاً هوازدگی و انحلال آهک‌ها و دولومیت‌های سازند روته و همچنین سنگ‌آهک‌های ترشیاری منشأ یون‌های آب زیرزمینی منطقه باشد. تمامی نمونه‌ها برای مصرف کشاورزی مناسب بوده و از لحاظ شرب نیز اکثر نمونه‌های مورد مطالعه از کیفیت خوب برخوردار هستند. بررسی نسبت‌های یونی نشان داد که منشأ سدیم در اکثر نمونه‌ها، حاصل فرآیند تعویض یونی بوده ولی منشأ منیزیم از هوازدگی سنگ دولومیت و سنگ‌آهک است که وجود سازندهای آهکی و دولومیتی در محدوده‌ی مطالعاتی این امر را تأیید می‌کند. بررسی اندیس اشباع نشان می‌دهد که بیشترین میزان اشباعیت نسبت به دولومیت مربوط به نمونه‌های SP5 و SP8 است که متأثر از واحدهای دولومیتی سازند سیلوانا می‌باشد و دولومیت در این دو نمونه میل به رسوب‌گذاری دارد. نمایه‌ی اشباع نسبت به کانی‌های ژیپس، انیدریت و هالیت منفی است که به دلیل عدم وجود واحدهای شورکننده در منطقه‌ی مورد مطالعه و نیز حلالیت بالای این کانی‌ها قابل انتظار است. با بررسی نسبت کلسیم بر منیزیم مشاهده شد که جنس بدنه‌ی آبخوان در اکثر نمونه‌ها دولومیتی آهکی و آهک دولومیتی است. نتایج این پژوهش نشان داد که آب‌های زیرزمینی منطقه‌ی مورد مطالعه از نظر هیدروشیمیایی از کیفیت بالایی برخوردار هستند و لیتولوژی سازندهای منطقه نقش اصلی را در تعیین کیفیت آب زیرزمینی داشته است.

منابع

- استاندارد مهندسی آب کشور (۱۳۸۲)، راهنمای مطالعات هیدروژئوشیمیایی محیط‌های کارستی و سازندهای سخت، نشریه‌ی شماره‌ی ۱۴۲ - ن. وزارت نیرو، ص ۳۱.
- محمدزاده، طاهره؛ واعظی‌هیر، عبدالرضا و هادی جعفری (۱۳۹۳)، بررسی هیدروژئوشیمیایی منابع آب زیرزمینی سازند سخت حوضه‌ی صائین (استان اردبیل)، هجدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- Gibbs R.J. (1970), **Mechanisms controlling world water chemistry**. Vol. 170, No. 3962, PP. 1088-1090
- Hem, J.D. (1989), **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**, 3rd edit. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper 2254, US Govt. Printing Office, Washington.
- Join, J.L., Coudray, J., Longworth, D., (1997), **Using principle components analysis and Na/Cl ratio to trace groundwater circulation in a volcanic island: The example of Reunion**, J. Hydrology, Vol. 190, Issues 1-2.
- Kresic, N. and Stevanović, Z. (Editors) (2010), **Groundwater hydrology of springs**, Engineering, theory, management, and sustainability, Amsterdam, Butterworth-Heinemann (Elsevier), 573 pages, ISBN 978-1-85617-502-9.
- Peterson, F.L. (1993). **Hydrogeology of volcanic ocean islands**, In: Sakura, Y. (Ed.), Selected Papers on environmental Geology, 4, pp. 163-171.
- Rajmohan N. Elango L. (2004), **Identification and evolution of hydro geochemical processes in the groundwater environment in an area of the PLe and Cheryyar River Basins**, Environment Geology, 46, 47-61, Southern India.
- Todd, D.K. and Mays, L.W. (2005), **Groundwater Hydrology**, John Wiley and Sons, U.S.A.
- Wilcox, L.V. (1955), **Classification and use of irrigation water**, US Geol Dep Agri Arc, 969: 19.