

فرایندهای ژئوشیمیایی مؤثر در شیمی آب زیرزمینی در سازند کربناته خوش‌بیلاق، شمال ایران

محسن رضایی^{۱*}، رشید زیوری^۲، جواد اشجاری^۳ و عبدالرضا کابلی^۴

۱. دانشیار، گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی
۲. دانشجوی کارشناسی‌ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی (rashid.zivari@yahoo.com)
۳. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تهران (javad_ashjari@yahoo.com)
۴. کارشناس‌ارشد هیدروژئولوژی، شرکت آب منطقه‌ای گلستان (kaboli_a@yahoo.com)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۳

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۲۶

چکیده

سازندهای کربناته (از جمله چشمه‌ها و چاه‌های کارستی) در تأمین آب برای آشامیدن و آبیاری نقش مهمی ایفا می‌کند. لازم است هم‌زمان با توسعه بهره‌برداری در این منابع، به ویژگی‌های هیدروژئوشیمی و عوامل مؤثر در تغییرات کیفیت آب نیز توجه داشت. در این مقاله، خصوصیات شیمیایی منابع آب سازند سخت کربناته خوش‌بیلاق در استان گلستان در شمال کشور مطالعه شده است. از نتایج آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی مربوط به بیست دهنه چشمه استفاده شد. در این نمونه‌ها، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و یون‌های اصلی ($\text{Na, K, Ca, Mg, Cl, SO}_4, \text{HCO}_3$) سنجش شد. روش‌های مختلف شامل نمودارهای ترکیبی، نمایه‌های اشباع و آنالیزهای چند متغیره در ارزیابی پارامترهای کیفی استفاده شده است. نتایج نشان داد که فراوانی نسبی یون‌های اصلی $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$ و $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ است. تغییرات TDS و EC به ترتیب ۲۲۰ الی ۷۰۶ میلی‌گرم بر لیتر و ۱۵۱/۹ تا ۳۵۳ میکرومتر است. تحلیل خوشه‌ای بر اساس غلظت یون‌های اصلی، EC و pH آب چشمه‌ها را در سه گروه متفاوت قرار داد. تحلیل عوامل کنترل‌کننده بر کیفیت آب نشان داد عامل اصلی واکنش سنگ‌آب است. با توجه به نمودار گیبس و رسم نمودار $\text{Ca} + \text{Mg}$ بر $\text{SO}_4 + \text{HCO}_3$ ، انحلال سنگ‌های کربناته اثر غالب را بر هیدروشیمی آب دارد و یون‌های حاصل از هوازدهی سنگ‌های سیلیکاته نقش به مراتب کمتری دارد. جنس غالب کانی‌های تجزیه‌شده بر اساس شیمی آب دولومیت است. نمایه‌های اشباع کلسیت، دولومیت و ژپس نشان می‌دهد که آب‌های زیرزمینی مسیر زیادی را طی کرده و به تکامل شیمیایی نرسیده است. واکنش‌های تبادل یونی هم در جهت مثبت و هم در جهت منفی روی می‌دهد که وابسته به مسیر جریان آب زیرزمینی و فرایند اختلال آب است. مشاهده فرایند کلرو-آلکالین نشان داد که فرایند تبادلات آنیون-کاتیون فرایند مهم ژئوشیمیایی در کنترل شیمی آب منطقه مورد مطالعه است.

کلیدواژه

آنالیز چندمتغیره، اندیس اشباع، چشمه کربناته، سازند خوش‌بیلاق، هیدروژئوشیمی.

۱. سر آغاز

چاه در مناطق آبرفتی و احداث سدهای سطحی بزرگ با مشکلات اجتماعی عدیده‌ای روبه‌رو شود. از این‌رو، منابع آبی سازندهای کربناته (از جمله چشمه‌ها و چاه‌های کارستی) در سیستم آبرسانی برای آشامیدن و آبیاری نقشه مهمی ایفا می‌کند. لازم است به ویژگی‌های هیدروژئوشیمی

در بسیاری از نقاط ایران منابع آبرفتی و آب‌های سطحی از لحاظ کمی و کیفی محدودیت‌هایی دارد و در حال حاضر بیلان بسیاری از دشت‌های ایران منفی است. از طرفی، وجود اراضی کشاورزی معمولاً باعث شده است که حفر

و عوامل مؤثر در تغییرات کیفیت آب، هم‌زمان با توسعه بهره‌برداری در این منابع، توجه کرد.

ارزیابی هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی معمولاً بر اساس مجموعه‌ای اطلاعات جامع در مورد شیمی آب‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد. شیمی آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر عوامل متفاوتی است، از جمله زمین‌شناسی محل، میزان هوازگی سنگ‌ها و نوع آن، کیفیت آب تغذیه‌شونده به درون آبخوان و واکنش‌های هیدروژئوشیمیایی (Guler & Thyne, 2004; Subramani et al., 2005; Coetsiers & Walraenens, 2006).

Yakubo و همکاران (۲۰۰۹) و Yidana و Yidana (۲۰۰۹) با استفاده از آنالیز آماری چندمتغیره، منابع آب را در گروه‌هایی مختلف قراردادند و دریافتند که شیمی آب‌ها با هوازگی کانی‌های سیلیکاته، کربناته و نفوذ بارش کنترل می‌شود. در این میان، آثار هوازگی کانی‌های سیلیکاته و باران اثر بیشتری بر هیدروشیمی آب نسبت به هوازگی (یا انحلال) کربنات‌ها داشت. Aris و همکاران (۲۰۰۷) در پژوهشی به مطالعه فرایندهای اصلی تکامل ژئوشیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی جزیره Manukan پرداختند. بر اساس اطلاعات ژئوشیمیایی، نتایج و آنالیزها نشان داد که آب زیرزمینی از لحاظ شیمیایی در سدیم و کلر غنی شده است و این نشان‌دهنده نفوذ آب دریا به داخل آبخوان است. مدل شبیه‌سازی PHREEQC، حلالیت کلسیت، دولومیت و آراگونیت را نشان داد که شاخص اشباع (SI)^۱ مثبت و در محدوده فوق‌اشباع قرارداد که منجر به رسوب این کانی‌ها در آب می‌شود. Talabi و همکاران (۲۰۱۳) با تحقیق در مورد تعیین خصوصیات فیزیکی-شیمیایی آب‌های سطحی و عوامل کنترل‌کننده هیدروشیمیایی و مناسب بودن آب برای نوشیدن و آبیاری، فرایندهای غالب و مؤثر بر شیمی آب را هوازگی/انحلال سنگ‌ها و تبادلات کاتیونی Na^+ در آب و Ca^{2+} معرفی کردند و به دلیل پایین بودن غلظت یون‌ها نشان دادند که واکنش سنگ‌آب پایین است یا زمان تماس کم است و آب برای مصارف گفته‌شده مناسب است.

سازند خوش‌بیلاق سازند مهم کربناته‌ای به سن دونین در شمال ایران است. نمود منابع آبی این سازند بیشتر به صورت چشمه است. برون‌زدهای این سازند در نواحی کوهستانی و در حاشیه دشت گرگانرود قرارداد. به دلیل تکتونیک خاص منطقه، سطح اساس فرسایش محلی بالاست. در این ناحیه به دلیل ضخامت کم و دانه‌درشت بودن آبرفت و بالابودن سنگ‌بستر استفاده از چاه‌های آبرفتی جوابگوی مصارف مختلف نیست.

هدف از این پژوهش ارزیابی فرایندهای اصلی تکامل ژئوشیمیایی و کیفیت آب‌های سازند کربناته خوش‌بیلاق است. با استفاده از شاخص کیفیت آب و روش‌های مرسوم نموداری و کاربرد روش‌های آماری چندمتغیره و تجزیه و تحلیل سلسه‌مراتبی خوشه‌ای (HCA)^۲ و با تحلیل عاملی اجزای اصلی (PCA)^۳ و چرخش واریماکس، و موازنه جرم تعیین پارامترهای مؤثر بر هیدروشیمی آب‌های سازند کربناته صورت پذیرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در مختصات جغرافیایی $54^{\circ}47'$ تا $55^{\circ}8'$ طول شرقی و $36^{\circ}48'$ تا 37° عرض شمالی واقع شده است و از لحاظ تقسیمات جغرافیایی در حوزه شهرستان‌های علی‌آباد کنول و رامیان قرارداد. این منطقه در $3/8$ کیلومتری جنوب و جنوب‌شرقی شهر علی‌آباد و 2 کیلومتری جنوب‌غرب شهر رامیان قرارداد گرفته است. از طریق جاده‌های آسفالت آزادشهر-رامیان-شاهرود، و جاده خان‌ببین به شیرآباد، جاده علی‌آباد کنول-زرین‌گل-شاهرود و جاده فاضل‌آباد به استان، که همگی به بزرگراه گرگان-آزادشهر-مشهد متصل می‌شود، در دسترس است. حداقل ارتفاع در منطقه مورد مطالعه، بالاتر از روستای شیرآباد و همین‌طور نزدیک روستای شفیع‌آباد فندرسک، با 118 متر و حداکثر ارتفاع 1834 متر (شمال غرب ارتفاعات قلعه موران، حدواسط و بالاتر از روستاهای پاقلعه و خاک‌پیرزن) است. اختلاف میانگین حداکثر با میانگین

قرار دارد. بُرش الگوی آن را بزرگ‌نیا (۱۹۷۳) در گردنه خوش‌بیلاق مطالعه و معرفی کرد.

جدا از توصیف لایه به لایه بُرش الگو در نگاهی کلی توالی‌های این سازند را می‌توان به چهار عضو زیر تقسیم کرد (آقاناتی، ۱۳۸۳):

۱. واحد آواری پایینی، شامل تناوب کنگلومرا، ماسه‌سنگ، سیلت‌سنگ و شیل که درون سنگ‌های تیره‌رنگی از آهک قرار دارد
 ۲. واحد کربناته‌های پایینی، شامل سنگ‌آهک‌های پرفسیل، آهک‌های آرژیلتی، سیلتی، سنگ‌آهک‌های زیست‌آواری و آهک‌های دولومیتی
 ۳. واحد آواری بالایی، متشکل از ماسه‌سنگ سرخ - قهوه‌ای که سیمای لایه کلیدی دارد
 ۴. واحد کربناته‌های بالایی، شامل تناوبی از سنگ‌آهک‌های پرفسیل، سنگ‌آهک‌های زیست‌آواری، شیل آهکی و سنگ‌آهک رسی
- این سازند دارای پتانسیل مناسبی از نظر تراوایی و نفوذپذیری است و می‌توان آن را منبع آب سازند سخت اکتشاف کرد.

۲.۲. نمونه‌برداری

بر اساس مطالعات نیمه تفضیلی شرکت کنکاش عمران، در منطقه مطالعاتی حدود ۳۷ چشمه وجود دارد. به دلیل خشک شدن بعضی چشمه‌ها در خشکسالی‌های اخیر و دشواری دسترسی به منطقه، بیست دهنه از این چشمه‌ها در تابستان سال ۱۳۹۳ نمونه‌برداری شد (شکل ۱). نمونه‌برداری از آب چشمه‌ها در حجمی به میزان ۵۰۰ میلی‌لیتر، با بطری‌های پلی‌اتیلن برداشت شد که قبلاً به خوبی با آب مقطر شستشو داده و خشک شده بود (برای جلوگیری از خطا). همه نمونه‌ها در بسته یخ قرار گرفت و به آزمایشگاه انتقال داده شد. تا زمان آنالیز، نمونه‌ها در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. پارامترهای دمای آب، pH، آب، EC، و TDS با دستگاه در

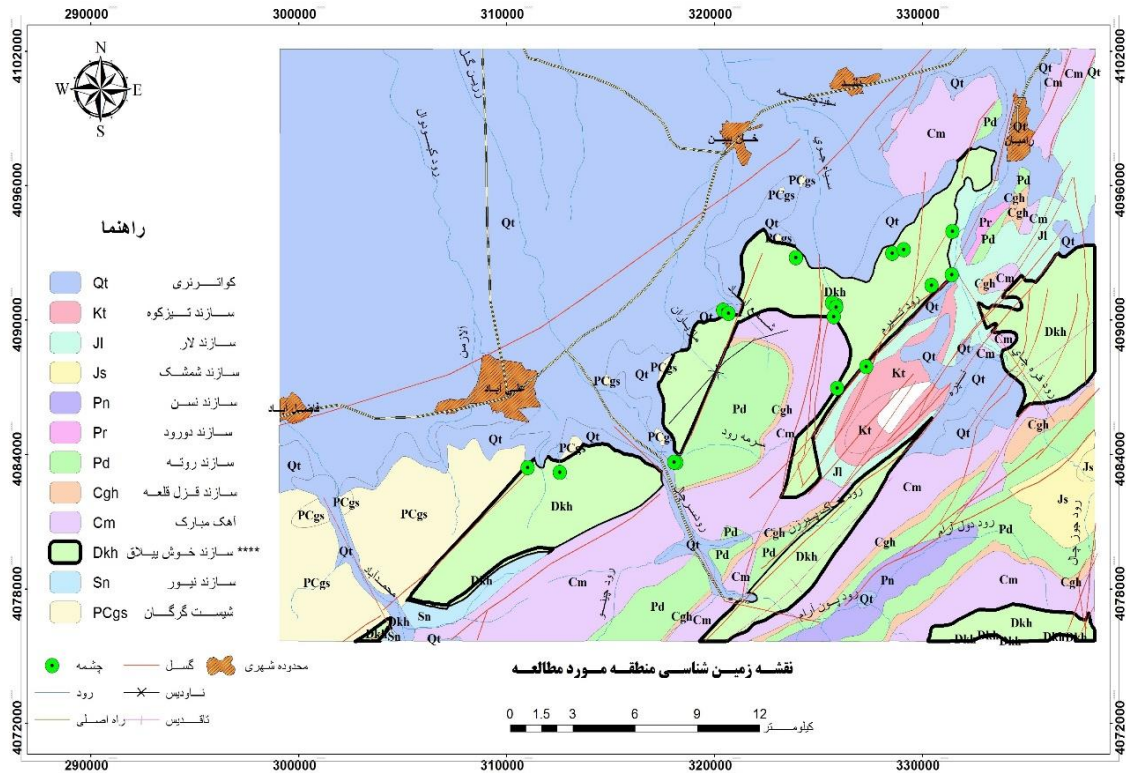
حداقل دما در گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال در نواحی غرب (ایستگاه فاضل‌آباد) و شرق (ایستگاه رامیان) به ترتیب برابر ۴۶/۱ و ۴۴/۲۷ درجه سانتی‌گراد است. میزان بارندگی از غرب به شرق نزدیک به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد.

این منطقه از نظر تقسیمات زمین‌شناسی در البرز شرقی قرار دارد. با توجه به مسائل زمین‌ساختی پیچیده و ناشی از مجاورت و برخورد دو زون ساختاری کپه داغ و بینالود که بر این ناحیه حاکم است، توصیف و بازسازی شرایط حوضه‌های رسوبی دشوار است. لذا، چندان نمی‌توان روند مشخص و گویایی از سازوکار چین خوردگی بیان کرد. وجود نهشته‌های چین‌خورده در این محدوده نشان از وجود تنش‌های شدید مربوط به فازهای کوهزایی پس از کرتاسه دارد که همراه با دیگر تنش‌های اواخر سنوزوییک بیشترین تأثیر را بر ریخت‌شناسی کنونی منطقه داشته است. وقوع فازهای کوهزایی و چین‌خوردگی متعدد در سری‌های رسوبی گسل‌های فراوانی در این محدوده مطالعاتی مشاهده می‌شود، که روند عمده آن شمال‌شرقی - جنوب‌غربی است. از جمله آن می‌توان به گسل معکوس علی‌آبادکتول، با سازوکار امتدادلغز و شیب‌لغز و گسل میان‌رستاق اشاره کرد، که موجب ایجاد شکستگی، جابه‌جایی و درز و شکاف‌های فراوان در سازندهای سخت شده است.

سازندهای مختلفی در محدوده مورد مطالعه رخنمون دارد، که در محیط ArcMap شکل تهیه و موقعیت رخنمون سازندها ارائه شده است. مهم‌ترین این سازندها که به عنوان آبخوان با پتانسیل توسعه کارست مورد نمونه‌برداری و مطالعه قرار گرفت، سازند خوش‌بیلاق است. از نظر چینه‌شناسی مقطع اصلی سازند خوش‌بیلاق در کنار جاده شاه‌پسند به شاهرود، در ۲ کیلومتری جنوب‌غربی دهکده خوش‌بیلاق قرار دارد و الگوی سنگ‌های دونین میانی - بالایی البرز شرقی و یکی از سبترترین ردیف‌های دونین البرز است که میان سازند آواری پاها (در زیر) و سازند آهکی مبارک (در بالا)

به روش تیتراسیون، با دستگاه کدورت سنج و Na^+ و K^+ با دستگاه نورسنج شعله‌ای.

محل اندازه‌گیری شد. یون‌های اصلی در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد، شامل Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Cl^- ، CO_3^{2-} و HCO_3^-



شکل ۱. نقشه موقعیت مکانی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

رهنمودهای سازمان جهانی بهداشت (WHO) ^۴ شاخصی است برای نشان دادن مناسب بودن آب برای آشامیدن (World Health Organization, 2006).

در جدول ۲ نتایج بررسی همبستگی بین مؤلفه‌های اصلی هیدروشیمیایی ارائه شده است. غیر از همبستگی بسیار بالا بین هدایت الکتریکی و کل مواد جامد محلول که همواره قابل انتظار است، عدم یا ارتباط ضعیف میان اکثر پارامترهای یونی در جدول ۲ نشان می‌دهد که فرایندهای هیدروشیمی متنوعی بر غلظت یونی در محلول اثر می‌گذارد.

۳. نتایج

۳.۱. هیدروژئوشیمی

در جدول ۱ خلاصه آماری پارامترهای شیمیایی و فیزیکی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های آب ارائه شده است. متوسط دمای نمونه‌های آب ۱۵/۶ درجه سانتی‌گراد، میزان تغییرات pH آب نمونه‌های برداشت شده از ۷/۱۸ تا نزدیک ۸ است. تغییرات TDS و EC در نمونه‌ها به ترتیب ۲۲۰ تا ۷۰۶ میلی‌گرم بر لیتر و ۱۵۱/۹ تا ۳۵۳ میکرومو بر سانتی‌متر و نشان‌دهنده نمونه‌های شیرین و املاح کم است. فراوانی نسبی یون‌های اصلی در کاتیون‌ها $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ و در آنیون‌ها $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ است. غلظت یون‌های اصلی پایین و منطبق بر

جدول ۱. مشخصه‌های آماری مؤلفه‌های مختلف شیمیایی در منطقه مورد مطالعه
(غلظت‌ها برحسب mg/lit و EC میکرومهموس بر سانتی‌متر)

نمونه	EC	pH	TDS	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	K
S1	۳۳۴,۰۰	۷,۹۳	۲۰۴,۰۰	۲۱۳,۵۰	۱,۷۸	۲۱,۳۰	۵۶,۰۰	۱۲,۱۵	۴,۱۴	۰,۷۸
S2	۳۸۶,۰۰	۷,۶۵	۱۹۱,۸۰	۲۴۴,۰۰	۱,۷۳	۲۴,۸۵	۵۲,۰۰	۲۰,۶۶	۵,۵۲	۰,۹۰
S3	۷۰۶,۰۰	۷,۴۳	۳۵۳,۰۰	۱۵۶,۲۰	۲,۰۶	۲۴,۸۵	۵۱,۶۰	۲۰,۹۰	۸,۲۸	۱۲,۷۸
S4	۵۳۸,۰۰	۷,۲۵	۲۶۵,۰۰	۱۸۹,۱۰	۱,۷۸	۲۱,۳۰	۵۱,۰۰	۶,۶۸	۶,۲۱	۱,۴۰
S5	۴۴۰,۰۰	۷,۵۷	۲۲۰,۰۰	۱۶۴,۷۰	۱,۹۲	۲۴,۸۵	۴۸,۰۰	۹,۷۲	۲,۳۰	۱,۵۶
S6	۵۸۱,۰۰	۷,۶۳	۲۹۱,۰۰	۱۹۵,۲۰	۱,۸۲	۱۷,۷۵	۴۶,۰۰	۱۳,۳۷	۰,۴۶	۰,۷۸
S7	۴۸۶,۰۰	۷,۲۵	۲۴۳,۰۰	۱۸۹,۱۰	۱,۶۸	۱۴,۲۰	۴۰,۰۰	۱۲,۱۵	۴,۶۰	۰,۹۸
S8	۴۵۱,۰۰	۷,۴۲	۲۲۶,۰۰	۱۷۰,۸۰	۱,۸۲	۲۱,۳۰	۴۰,۰۰	۱۰,۹۴	۴,۶۰	۰,۹۴
S9	۵۸۹,۰۰	۷,۴۱	۲۹۶,۰۰	۲۱۹,۶۰	۱,۶۸	۱۷,۷۵	۳۷,۰۰	۲۱,۲۶	۴,۶۰	۱,۱۷
S10	۳۷۴,۰۰	۷,۸۳	۱۷۶,۱۰	۱۸۳,۰۰	۱,۸۲	۱۷,۷۵	۳۶,۰۰	۱۸,۲۳	۰,۶۹	۰,۹۸
S11	۲۲۰,۰۰	۷,۸۱	۱۶۶,۹۰	۱۸۹,۱۰	۱,۶۸	۲۴,۸۵	۳۴,۰۰	۱۹,۴۴	۱۱,۵۰	۱,۴۰
S12	۴۱۳,۰۰	۷,۵۶	۲۰۷,۰۰	۲۳۷,۹۰	۱,۷۸	۱۴,۲۰	۳۴,۰۰	۲۴,۳۰	۴,۶۰	۱,۴۸
S13	۳۰۹,۰۰	۷,۷۴	۱۵۲,۷۰	۱۵۸,۶۰	۱,۷۸	۱۴,۲۰	۳۲,۰۰	۱۷,۰۱	۲,۹۹	۰,۷۸
S14	۰۰.۳۱۴	۷,۹۴	۱۵۶,۰۰	۲۰۷,۴۰	۱,۷۳	۲۴,۸۶	۲۷,۰۰	۲۷,۳۴	۴,۱۴	۰,۷۸
S15	۴۶۴,۰۰	۷,۳۶	۲۳۲,۰۰	۱۵۸,۶۰	۱,۶۷	۱۷,۷۵	۳۰,۰۰	۱۵,۸۰	۱,۸۴	۰,۹۰
S16	۴۷۶,۰۰	۷,۵۹	۲۳۸,۰۰	۲۰۷,۴۰	۱,۷۸	۱۴,۲۰	۲۳,۰۰	۳۳,۴۱	۴,۶۰	۱,۱۷
S17	۴۹۵,۰۰	۷,۵۰	۲۴۴,۰۰	۱۸۳,۰۰	۱,۹۲	۲۱,۳۰	۲۰,۰۰	۲۷,۹۵	۴,۶۰	۱,۰۱
S18	۳۳۵,۰۰	۷,۹۰	۱۵۱,۹۰	۲۰۱,۳۰	۱,۴۴	۲۴,۸۵	۲۴,۰۰	۲۷,۹۵	۴,۶۰	۱,۲۹
S19	۵۹۸,۰۰	۷,۱۸	۲۸۸,۰۰	۲۱۹,۶۰	۱,۵۸	۲۱,۳۰	۲۲,۰۰	۲۵,۵۲	۱۳,۱۱	۱,۵۶
S20	۴۰۸,۰۰	۷,۷۳	۲۰۳,۰۰	۲۰۷,۴۰	۱,۴۴	۲۴,۸۵	۲۰,۰۰	۲۷,۹۵	۸,۲۸	۰,۷۸
میانگین حسابی	۴۴۵,۸۵	۷,۵۸	۲۲۵,۲۷	۲۹۹,۷۸	۱,۷۴	۲۰,۴۱	۳۶,۱۸	۱۹,۳۹	۵,۰۸	۱,۶۸
حداکثر	۷۰۶,۰۰	۷,۹۴	۳۵۳,۰۰	۲۵۶,۲۰	۲,۰۶	۲۴,۸۵	۵۶,۰۰	۳۳,۰۰	۱۳,۱۱	۱۲,۷۸
حداقل	۲۲۰,۰۰	۷,۱۸	۱۵۱,۹۰	۱۵۸,۶۰	۱,۴۴	۱۴,۲۰	۲۰,۰۰	۶,۶۰	۰,۴۶	۰,۷۸

SPSS17 نشان می‌دهد. مطابق شکل، چشمه‌ها در سه گروه متفاوت قرار می‌گیرند. گروه‌های اول و دوم تشابه بیشتری نشان می‌دهد و در سطح بالاتری در یک دسته قرار می‌گیرد.

۲.۳. آنالیز چند متغیره آماری

شکل ۲ نتیجه تحلیل خوشه‌ای بر اساس غلظت یون‌های اصلی، EC و اسیدینگی آب را با استفاده از برنامه

قرارمی گیرد. در این گروه میانگین TDS ۲۴۰/۸ میلی گرم در لیتر، و میانگین غلظت یون‌ها ۳۷/۲۲ میلی گرم بر لیتر و ماکزیمم و مینیمم EC به ترتیب ۵۳۸ و ۴۵۱ میکرومhos بر سانتی متر است.

گروه ۳. در لین گروه نمونه‌هایی قرار دارد که میانگین غلظت یون‌ها بر حسب میلی گرم بر لیتر ۴۳/۴۲ و ماکزیمم و مینیمم هدایت الکتریکی (EC) به ترتیب ۷۰۶ و ۴۹۵ میکرومhos بر سانتی متر و میانگین مواد جامد باقی مانده (TDS) برابر با ۲۹۴/۴ میلی گرم بر لیتر است که نسبت به گروه اول و دوم از EC و TDS بالاتری برخوردار است.

بیشتر نمونه‌های آب در گروه ۱ قرارمی گیرد و بعد از آن گروه ۲ تعداد بیشتری را شامل می شود. هر سه گروه در زیر به اختصار توضیح داده شده است.

گروه ۱. نمونه‌هایی که در خوشه ۱ قرار گرفته است، شامل منابع آبی ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۸ و ۲۰. بیشترین و کمترین هدایت الکتریکی (EC) به ترتیب ۵۸۹ و ۳۰۹ میکرومhos بر سانتی متر است و میانگین مواد جامد باقی مانده (TDS) برابر با ۱۹۵/۸۵ میلی گرم بر لیتر است. میانگین غلظت یون‌های این گروه ۴۱/۲۷ میلی گرم در لیتر است.

گروه ۲. نمونه‌های ۴، ۷، ۸، ۱۵ و ۱۶ در این گروه

جدول ۲. خصوصیات ماتریس همبستگی مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده در چشمه‌های منطقه مورد مطالعه

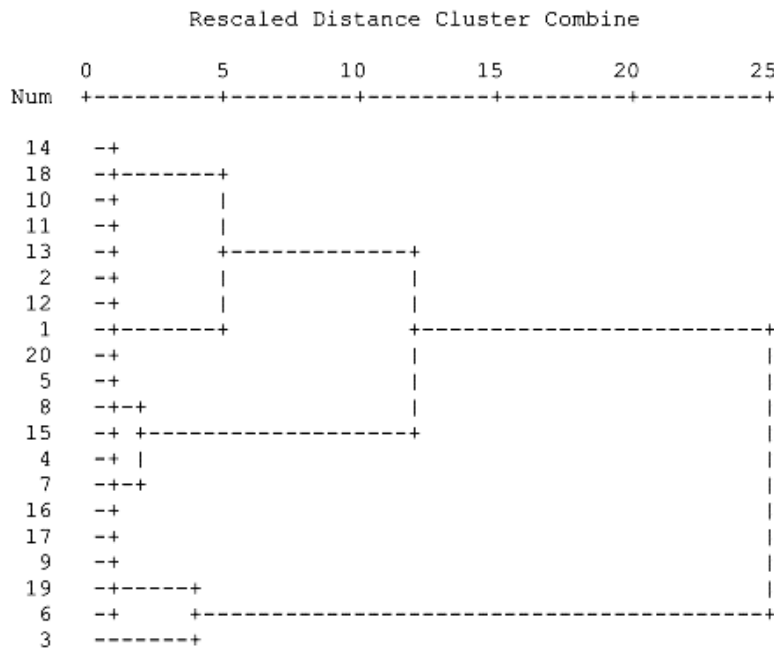
	EC	pH	TDS	TH	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	K
EC	۱										
pH	-۰,۷۵	۱									
TDS	۰,۹۶	-۰,۷۳	۱								
TH	۰,۱۴	۰,۲۹	۰,۱۸	۱							
HCO ₃	۰,۳۲	۰,۰۱	۰,۳۵	۰,۸۶	۱						
SO ₄	۰,۳۵	-۰,۱۶	۰,۴۰	۰,۲۳	۰,۰۱	۱					
Cl	-۰,۱۳	۰,۲۸	-۰,۰۹	۰,۲۵	۰,۲۱	-۰,۰۹	۱				
Ca	۰,۱۸	-۰,۰۶	۰,۲۸	۰,۳۰	۰,۱۹	۰,۵۱	۰,۱۲	۱			
Mg	-۰,۰۷	۰,۲۶	-۰,۱۴	۰,۴۰	۰,۴۱	-۰,۳۳	۰,۰۶	-۰,۷۵	۱		
Na	۰,۰۹	-۰,۲۴	۰,۱۹	۰,۱۴	۰,۴۲	-۰,۳۰	۰,۴۱	-۰,۲۱	۰,۳۰	۱	
K	۰,۵۳	-۰,۱۹	۰,۵۷	۰,۴۹	۰,۵۰	۰,۵۰	۰,۲۶	۰,۳۰	۰,۰۴	۰,۲۸	۱

این عامل را می توان مرتبط با انحلال کانی‌های تبخیری از جمله ژیپس و انیدرید در نظر گرفت. ۲۳/۲ درصد از تغییرات ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی را عامل دوم کنترل می کند. در این عامل پتاسیم و بی کربنات بالاترین بار عاملی را نشان می دهد. این عامل تأثیر هم‌زمان انحلال کربنات‌ها و فرایند تبادل کاتیونی در نظر گرفته می شود. حدود ۲۰ درصد تغییرات کیفیت آب زیرزمینی چشمه ها نیز با عامل سوم کنترل می شود. این عامل که مرتبط با اسیدینگی آب است را می توان مرتبط با تعادل آب با گاز کربنیک

تحلیل عاملی بر اساس پارامترهای کیفیت شامل غلظت یون‌های اصلی، هدایت الکتریکی و اسیدینگی آب نشان می دهد که ۸۵ درصد تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در چشمه‌های محدوده مورد مطالعه با چهار عامل اصلی کنترل می شود. بار چهار عامل نخست نسبت به پارامترهای کیفیت در جدول ۳ ارائه شده است. عامل نخست که مسئول بیش از ۲۴ درصد تغییرات کیفیت آب زیرزمینی است، با کلسیم و سولفات ارتباط دارد. این عامل همبستگی بالایی نیز با کل مواد جامد محلول نشان می دهد.

اعضای این گروه همبستگی منفی دارد. بار عاملی فاکتور ۱ در اعضای گروه ۲ مثبت است. اعضای این گروه همبستگی منفی با بقیه عوامل نشان می‌دهد و بار عاملی فاکتور ۲ در همه اعضای گروه سوم مثبت محاسبه شده است. همه اعضای این گروه با دیگر عوامل همبستگی منفی دارد.

اتمسفری دانست. عامل چهارم با حدود ۱۷ درصد بار عاملی، با سدیم و کلر در ارتباط است. برای مقایسه نتایج تحلیل عاملی با تحلیل خوشه‌ای، بار عاملی هر کدام از فاکتورها در نمونه‌های مختلف بررسی شد. نتایج این بخش نشان داد که بار عاملی فاکتورهای ۳ و ۴ در اکثر نمونه‌های گروه ۱ مثبت است و دیگر عوامل با



شکل ۲. نمودار تحلیل خوشه‌ای نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

جدول ۳. مقدار بار عامل‌ها بر اساس چرخش Varimax

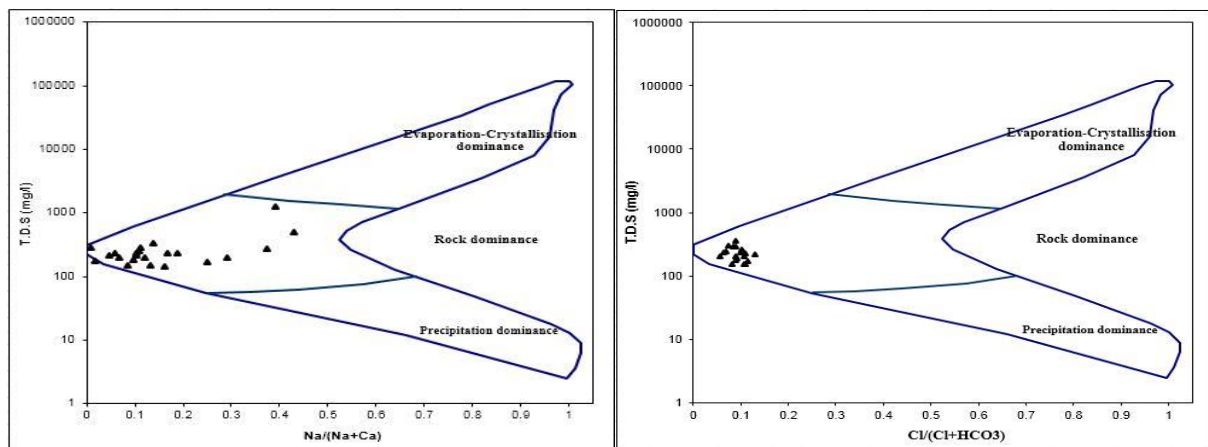
Variables	Component			
	P1	P2	P3	P4
TDS	۰,۹۲	۰,۵۱	-۰,۷۷	-۰,۰۴
pH	-۰,۰۸	۰,۰۱	۰,۹۷	۰,۰۲
Ca	۰,۸۹	۰,۲۶	-۰,۰۰	۰,۰۱
Mg	-۰,۹۱	۰,۳۲	۰,۲۱	۰,۰۶
Na	-۰,۳۱	۰,۱۹	-۰,۳۲	۰,۷۸
K	۰,۱۹	۰,۸۴	-۰,۲۰	۰,۱۳
HCO ₃	-۰,۲۱	۰,۷۷	-۰,۰۱	۰,۲۹
Cl	۰,۱۹	۰,۲۰	۰,۳۳	۰,۸۰
SO ₄	۰,۵۴	۰,۵۲	-۰,۱۹	-۰,۴۵
% of variance	۲۴,۰۷	۲۳,۲۱	۲۰,۴۶	۱۷,۲۵

۳.۳. تحلیل عوامل کنترل‌کننده کیفیت آب

گونه‌های یونی حل‌شده در نمونه‌های آب، حاصل از هوازدگی کانی‌های سنگ‌ها و با مشارکت جزئی نزولات جوی است (Berner & Berner, 1981). سهم منابع اتمسفری نمک‌های محلول در آب با توجه به شیمی آب باران یا با در نظر گرفتن نسبت عناصر با کلر ارزیابی شده است (Stellard & Edmond, 1983; Sarin et al., 1989). نسبت میانگین Na/Cl و K/Cl در نمونه‌های آب به‌ترتیب برابر است با ۰/۲۵ و ۰/۰۸۲ که کمتر از آئروسول دریایی (Zhang et al., 1995) و نشان می‌دهد که سهم یونی نزولات جوی در

این منطقه محدود است. سهم یونی در منطقه از تعادل سنگ-آب است. این مشاهدات بیشتر در شکل ۳ تأیید شده است (Gibbs, 1970).

نمودار گیبس، ارائه شده از رسم نسبت $Na^+/[Na^++Ca^{2+}]$ و $Cl^-/[Cl^-+HCO_3^-]$ در مقابل TDS، به‌طور گسترده برای ارزیابی ارتباط منبع یون‌های محلول در آب استفاده می‌شود. این منابع نظیر نزولات جوی، سنگ و منبع تبخیری است. در این مطالعه، با توجه به آنالیز داده‌های طرح‌شده در نمودار گیبس، منبع نمونه‌های آب در دامنه سنگ قرار گرفت.

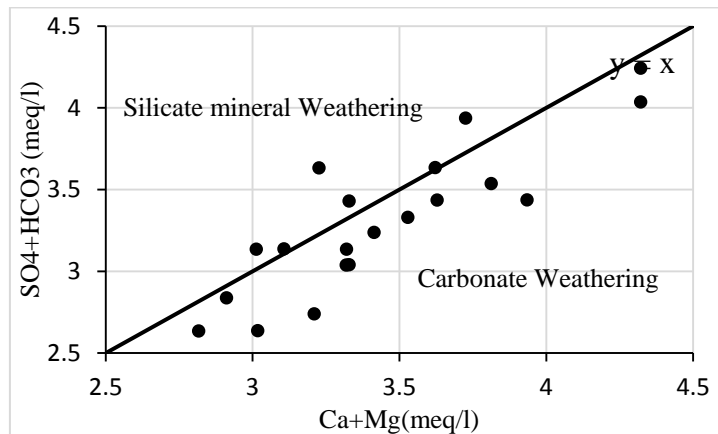


شکل ۳. فرایندهای کلی تنظیم ژئوشیمی نمونه‌های آب چشمه‌ها در منطقه مورد مطالعه

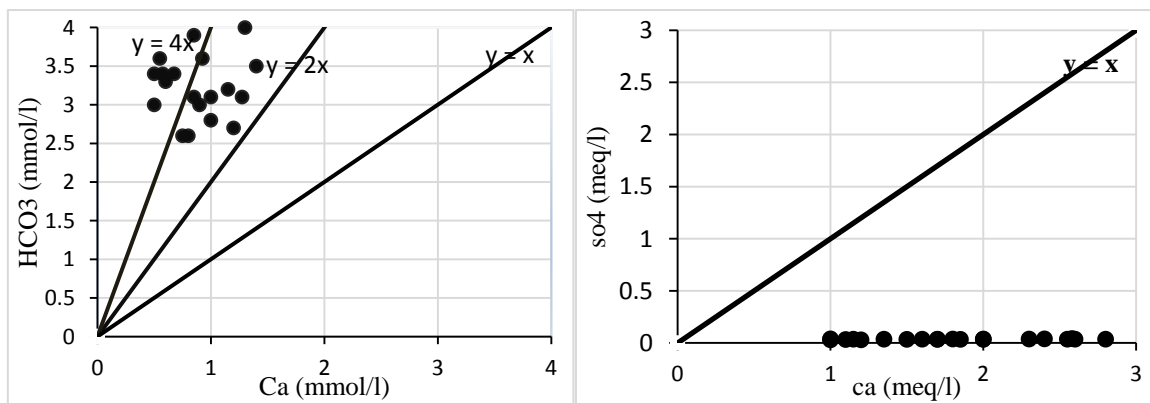
چنانچه اسید سولفوریک بر کلسیت اثر بگذارد نسبت Ca^{2+} به SO_4^{2-} ، یک به یک خواهد بود (Garrels & McKenzie, 1967). در مطالعه حاضر، نمودار پراکندگی بین Ca^{2+} و HCO_3^- در شکل (۵ A) نشان می‌دهد که اکثر نمونه‌ها در اطراف خط نسبت ۱ به ۴ قرار دارد که حاکی از آن است که سنگ دولومیت با دی‌اکسید کربن حل شده است. در شکل (۵ B) رسم پراکندگی Ca^{2+} به SO_4^{2-} هیچ رابطه‌ای نشان نمی‌دهد که هوازدگی و انحلال با اسید سولفوریک ایجاد شده باشد.

بر اساس شکل ۴ که نسبت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی را نشان می‌دهد و با توجه به نمودار گیبس، انحلال سنگ‌های کربناته اثر غالب را بر هیدروشیمی آب دارد، و یون‌هایی از هوازدگی سنگ‌های سیلیکاته نقش به مراتب کمتری داراست (Yakubo et al., 2009).

در حضور اسید کربنیک و اسید سولفوریک واکنش‌های هوازدگی و انحلال تسهیل‌تر می‌شود. اگر دی‌اکسید کربن عامل هوازدگی در کلسیت باشد، نسبت مولی Ca^{2+} به HCO_3^- ، ۱ به ۲ است و چنانچه کانی غالب دولومیت باشد، این نسبت ۴ به ۱ می‌شود (Garrels & McKenzie, 1967).



شکل ۴. طرح پراکنده نشان‌دهنده نقش نسبی هوازدگی سنگ‌های سیلیکاته و کربناته در هیدروژن‌شیمی آب



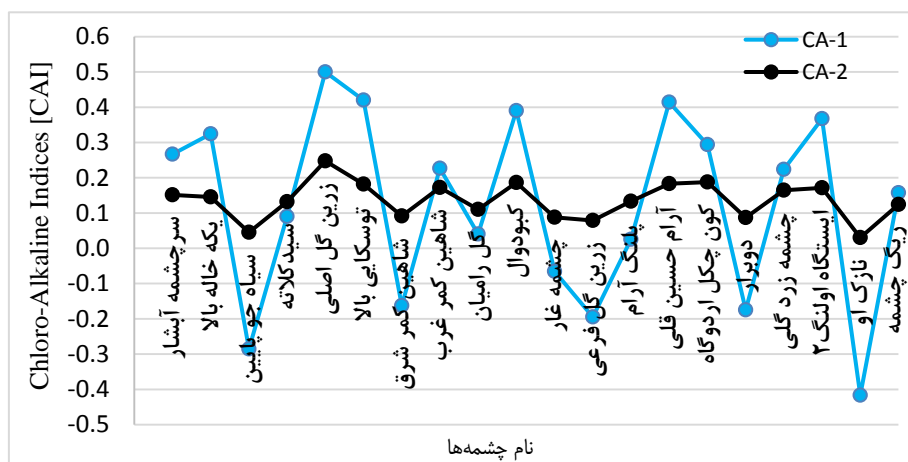
شکل ۵. (A) رابطه بین Ca^{2+} و HCO_3^- (B) رابطه بین Ca^{2+} به SO

$$CAI-2 = ((Cl-(Na+K))/SO_4+HCO_3+CO_3) \quad (2)$$

در منطقه مورد مطالعه مقادیر نمایه‌های کلرو-آلکالین CAI-1 و CAI-2 به ترتیب -0.417 تا 0.5 و از 0.03 تا 0.247 در نوسان است (شکل ۶).

نمایه کلرو-آلکالین با معادله (۱) و (۲) محاسبه می‌شود، برای پی‌بردن به اهمیت پدیده تبادل یونی که مسئول بخشی از غلظت یون‌ها در آب‌های زیرزمینی است.

$$CAI-1 = (Cl-(Na+K))/Cl \quad (1)$$



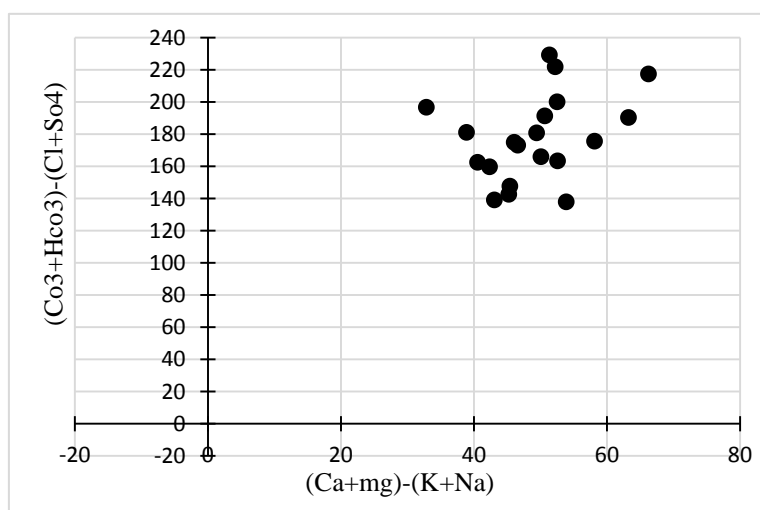
شکل ۶. نمایه Chloro-Alkaline^۵ نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه

۳. قسمت بالای محور عمودی نشان می‌دهد که آنیون با اسیدیته ضعیف بیش از آنیون با اسیدیته قوی است.
۴. در قسمت پایین محور عمودی، آنیون با اسیدیته قوی بیش از آنیون با اسیدیته ضعیف است.
۵. ناحیه بین ۱ و ۲ نشان می‌دهد که فلزات قلیایی خاکی بیش از فلزات قلیایی و آنیون با اسیدیته ضعیف بیش از آنیون با اسیدیته قوی است. نوع سختی آب این ناحیه سختی موقت است.
۶. ناحیه بین ۱ و ۴ نشان می‌دهد که فلزات قلیایی خاکی بیش از فلزات قلیایی و آنیون با اسیدیته قوی بیش از آنیون با اسیدیته ضعیف است.
۷. ناحیه بین ۲ و ۴ نشان می‌دهد فلزات قلیایی بیش از فلزات قلیایی خاکی و آنیون با اسیدیته قوی بیش از آنیون با اسیدیته ضعیف است.
۸. ناحیه بین ۲ و ۳ نشان می‌دهد که فلزات قلیایی بیش از فلزات قلیایی خاکی و آنیون با اسیدیته ضعیف بیش از آنیون با اسیدیته قوی است.
- با این الگوها نمونه‌های منطقه مورد مطالعه در زیر فیلد شماره ۵ قرار می‌گیرد.

هر گاه این نمایه‌ها مثبت باشد، نشان از آن است که تبادل یونی Na^+ یا K^+ در آب با Ca^{2+} یا Mg^{2+} کانی‌های هوازده آبخوان صورت می‌گیرد که نشان‌دهنده تعادل کلو-آلکالین است (Rajmohan & Elango, 2004; Schoeller, 1965). زمانی که تبادل عکس صورت می‌گیرد، نمایه منفی و نشان‌دهنده تبادل Ca^{2+} و Mg^{2+} در آب با Na^+ و K^+ در سنگ است که عدم تعادل کلو-آلکالین را نمایان می‌سازد.

تغییرات مقادیر نمایه‌ها سیستماتیک نیست، بنابراین واکنش‌های تبادل یونی هم در جهت مثبت و هم در جهت منفی روی می‌دهد که وابسته به مسیر جریان آب زیرزمینی و فرایند اختلال آب است. مشاهده فرایند کلو-آلکالین نشان داد که فرایند تبادلات آنیون-کاتیون فرایند مهمی در ژئوشیمیایی در کنترل شیمی آب منطقه مورد مطالعه است. از نمودار Chadha (۱۹۹۹) برای طبقه‌بندی آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. نمودار از دو محور متعامد تشکیل شده است (شکل ۷) و دارای هشت زیرفیلد است:

۱. سمت راست محور افقی نشان می‌دهد فلزات قلیایی خاکی بیش از فلزات قلیایی است.
۲. در سمت چپ محور افقی، فلزات قلیایی بیش از فلزات قلیایی خاکی است.

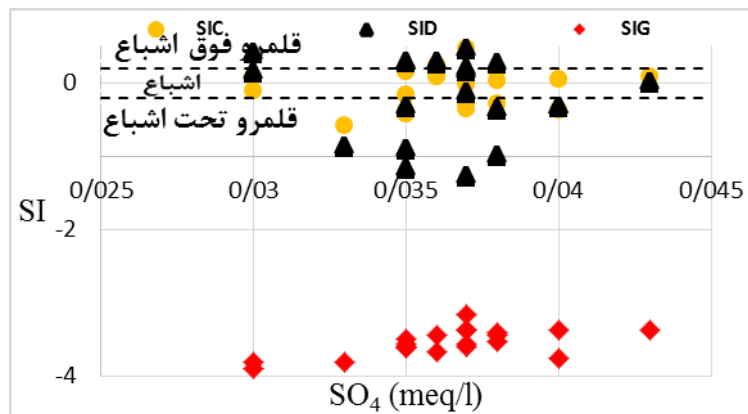


شکل ۷. نمودار Chadha برای نمونه‌های منطقه مورد مطالعه

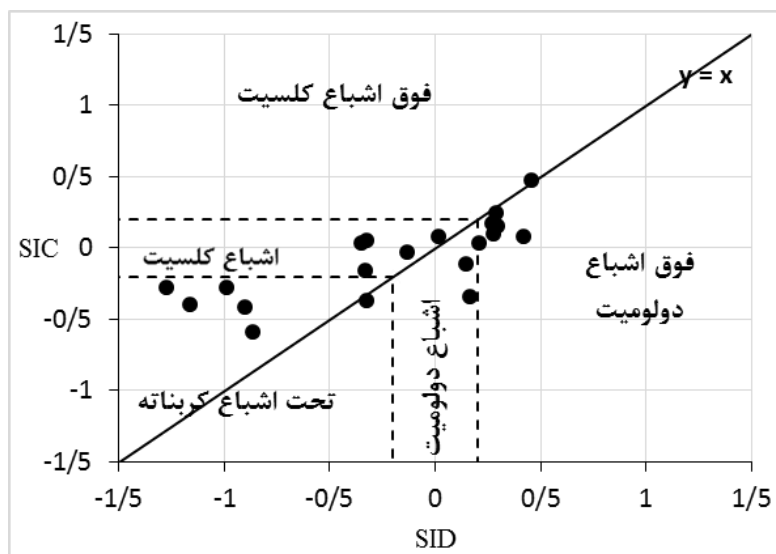
با توجه به شکل ۸، در اکثر نمونه‌ها، به جز پنج مورد، نمایه اشباع دولومیت در منطقه اشباع و تحت اشباع، و نمونه تحت اشباع با تعداد بیشتر، قرارداد. در اغلب نمونه‌ها نمایه اشباع کلسیت در منطقه اشباع و در موارد کمتری تحت اشباع است و نسبت به ژئیس همه نمونه در منطقه تحت اشباع قرار گرفت. بررسی نمایه‌های اشباع نشان می‌دهد که در کل، آب زیرزمینی مسیر زیادی را طی نکرده و به تکامل شیمیایی نرسیده است.

۴.۳. بررسی نمایه اشباع (SI)

برای شناخت عوامل مؤثر بر شیمی آب زیرزمینی و برای تعیین شرایط تعادلی آب در آبخوان، استفاده از مقادیر نمایه‌های اشباع کانی‌های مختلف و بررسی روابط بین آن‌ها بسیار مهم است (Appelo & Postma, 1996). به همین منظور، با توجه به لیتولوژی غالب منطقه مورد مطالعه و با استفاده از برنامه PHREEQCI اقدام به تهیه نمایه‌های اشباع کلسیت، دولومیت و ژئیس شد. از آنجا که تعیین IAP^* و K_{sp}^* با عدم قطعیت همراه است (Merkel & Friedrich, 2002)، محدوده اشباع بودن محلول را از $0/2 < SI < 0/2$ در نظر می‌گیرد (شکل ۸).



شکل ۸. نمایه‌های اشباع کلسیت، دولومیت و ژئیس نمونه‌های منطقه مورد مطالعه



شکل ۹. رسم نمودار نمایه اشباع دولومیت به کلسیت

گروه متفاوت قرار می‌گیرد. گروه‌های اول و دوم تشابه بیشتری نشان می‌دهد و در سطح بالاتری یک دسته می‌شود. در تحلیل عوامل کنترل‌کننده بر کیفیت آب می‌توان گفت که براساس نسبت میانگین Na/Cl و K/Cl در نمونه‌های آب سهم غلظت یونی حاصل از نزولات جوی محدود و سهم اصلی مربوط به واکنش سنگ-آب است. نمودار گیبس رسم شده برای نمونه‌های منطقه نشان می‌دهد که منبع یون‌ها در دامنه سنگ قرار می‌گیرد. با توجه به نمودار گیبس و رسم نمودار $Ca+Mg$ بر SO_4+HCO_3 ، انحلال سنگ‌های کربناته اثر غالب را بر هیدروشیمی آب دارد و یون‌های حاصل از هوازدگی سنگ‌های سیلیکاته نقش به‌مراتب کمتری دارد. نمودارهای Ca^{2+} به SO_4^{2-} و Ca^{2+} به HCO_3^- بیان می‌کند که عامل اصلی انحلال و هوازدگی سنگ‌ها، اسید کربنیک و جنس غالب کانی‌های تجزیه شده بر اساس شیمی آب دولومیت است. نمایه کلروآلکالین نشان می‌دهد که تبادلات یونی فرایند مهم ژئوشیمیایی در کنترل شیمی منطقه است. در طبقه‌بندی نمونه‌های آب با Chadha، نمونه دارای تیپ $Ca+Mg > K+Na$ و $HCO_3^- > Cl+SO_4$ است. نمایه‌های اشباع کلسیت، دولومیت و ژپس نشان می‌دهد که آب‌های زیرزمینی مسیر زیادی را طی نکرده و به تکامل شیمیایی نرسیده است.

یادداشت‌ها

1. SI: Saturation Index
2. HCA: Hierarchical Cluster Analysis
3. PCA: Principal component analysis
4. WHO: World Health Organization
5. CAI: Chloro-Alkaline Indices
6. IAP: Ion Activity Product
7. K_{sp} : Equilibrium Constant Solubility Product

به منظور پی‌بردن به جنس غالب محیطی که آب زیرزمینی در آن جریان دارد، از نسبت مولار کلسیم و منیزیم استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این نسبت به طور متوسط $1/44$ و بیانگر تأمین آب چشمه‌ها از سازندهایی با ترکیب آهک دولومیتی و دولومیت است. در مناطق کارستی معمولاً نسبت Ca/Mg مثبت است و در صورت وجود دولومیت خالص این نسبت برابر ۱ می‌شود. ولی در بعضی نمونه‌های منطقه مورد مطالعه این نسبت کمتر از ۱ است. دلایل آن به شرح زیر است:

۱. نفوذ آب دریا که مشخصه آن TDS بالاست.
۲. وجود کانی‌های تیره با TDS پایین.

با توجه به مطالب گفته شده از قبل، در داخل توده سازندی افق‌هایی از گدازه‌های بازیک تا حدواسط و دیاباز اسلیتی دیده شده است و با توجه به پایین بودن TDS دلیل دوم قابل قبول است (Hounslow, 1995). همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، تأثیر دولومیت و کلسیت دولومیتی بر هیدروشیمی آب‌های زیرزمینی بیش از کلسیت است.

۴. نتایج و بحث

در این مطالعه، با توجه آنالیز شیمیایی، تغییرات TDS و EC به ترتیب ۲۲۰ الی ۷۰۶ میلی‌گرم برل یترو و $151/9$ تا 353 میکرومتر بر سانتی‌متر است. فراوانی نسبی یون‌های اصلی در کاتیون‌ها $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ + K^+$ و در آنیون‌ها $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$ است. غلظت یون‌های نمونه‌های آب بر اساس استاندارد سازمان جهانی بهداشت (WHO) برای آشامیدن مناسب است. اکثر پارامترهای اندازه‌گیری شده نشان از عدم یا همبستگی ضعیف با هم دارد که دال بر اثر فرایندهای متنوع در شیمی آب است. نتیجه تحلیل خوشه‌ای بر اساس غلظت یون‌های اصلی، EC و اسیدینگی آب نشان می‌دهد که آب چشمه‌ها در سه

منابع

درويش‌زاده، ع. ۱۳۷۰. زمین‌شناسی ایران. انتشارات نشر دانش، وابسته به مؤسسه انتشارات امیرکبیر، ۹۰۱ صفحه.

- Appelo, C.A.J., and Postma, D. 1996. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema, Rotterdam , 536 pp.
- Aris, A.Z., Abdullah, M.H. and Kim, K.W. 2007. Hydrogeochemistry of groundwater in Manukan Island, Sabah, Malaysia. *Malaysian Journal of Analytical Sciences* 2: 407-413.
- Berner, E.K. and Berner, R.A. 1981. *The global water cycle*. Prentice Hall, Eaglewood Cliffs NJ, 376 pp.
- Bozorgnia, F., 1973. Paleozoic foraminifera biostratigraphy of central and East Alborz (Iran), N.I.O.C, pup.,No.4.,183pp
- Chadha, D.K. 1999. A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hydrogeol J. Volume 7, Issue 5*, pp 431-439
- Coetsiers, M. and Walraevens, K. 2006. Chemical characterization of the Neogene Aquifer, Belgium. *Hydrogeology Journal* 14 (8), pp 1556-1568..
- Garrels, R.M. and McKenzie, F.T. 1967. Origin of the chemical compositions of some springs and lakes. In: *Equilibrium concepts in natural waters: American Cancer Society, Washington, DC*. Chapter 10, pp 222-242
- Gibbs, R.J. 1970. Mechanism controlling world water chemistry. *Science* 170: 1088-1090..
- Guler, C. and Thyne, G.D. 2004. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *Journal of Hydrology* 285 (2004) 177-198.
- Hounslow, A. 1995. *Water quality data: Analysis and interpretation*. August 16, by CRC Press LLC, 85p.
- Merkel Broder J., and Friedrich, B.P. 2002. *Groundwater Geochemistry A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems*. Springer, 230 pp.
- Rajmohan, N. and Elango, L. 2004. Identification and evolution of hydrogeochemical processes of groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India. *Journal of Environmental Geology* Volume 46, Issue 1, pp 47-61.
- Sarin, M.M., Krishnawamy, S., Dilli, K., Somayajulu, B.L.K. and Moore, W.S. 1989. Major ion chemistry of Ganga-Brahmaputra river system: weathering processes and fluxes to the bay of Bengal. *Geochim Cosmochim Acta* 53: 997-1009.
- Schoeller, H. 1965. Qualitative evaluation of groundwater resources. In *Methods and techniques of ground-water investigations and development*. UNESCO , Paris, pp 54-83.
- Stellard, R.F. and Edmond, J.M. 1983. Geochemistry of the Amazon 2: The influence of geology and weathering environment on dissolve load. *Jour. Geophys Research*, 88, 9671-9688.
- Subramani, T., Elango, L., Damodarasamy, S.R. 2005. Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River Basin, Tamil Nadu, India. *Environmental Geology* Volume 47, Issue 8, pp 1099-1110.
- Talabi, A.O., Afolagboye, O.L., Tijani, M.N., Aladejana, J.A. and Ogundana, A.K. 2013. Hydrogeochemical assessment of surface water in the Central Part of Ekiti- State, Southwestern Nigeria. *American Journal of Water Resources*, 1 (4), pp 56-65.
- World Health Organization (WHO). 2006. *Guidelines for drinking water quality criteria*. 2 Ed, World Health Organization, Geneva. ISBN 92-4 154696-4.
- Yakubo, B.B., Yidana, S.M., Emmanuel, N.T., Akabzaa, T.H., and Asiedu, D.A. 2009. Analysis of groundwater quality using water quality index and conventional graphical methods: the Volta region, Ghana. *Environ Earth Sci. Vol.59 No.4* pp.867-879.
- Yidana, S.M., and Yidana, A. 2009. Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis. *Environ Earth Sci.* 59, 1461-1473
- Zhang, J., Huang, W.W., Letolle, R. and Jusserand, C. 1995. Major element chemistry of Husanghe (Yellow river), Chine - weathering processes and chemical fluxes. *Journal hydrology. v.168*, pp.173-203.