

## ایزوتوپی کارست و منشأ چشمه‌های آبخوان مرزی خراسان شمالی

فاطمه باقری<sup>۱\*</sup>، غلامحسین کرمی<sup>۲</sup> و رحیم باقری<sup>۳</sup>

### چکیده

منابع آبی کارست به ویژه در نواحی خشک، به‌عنوان مهم‌ترین منبع آب شرب در دنیا محسوب می‌شوند که اولین مرحله برای مدیریت بهتر آن‌ها، تعیین منشأ و حوضه آبرگیر و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی حاکم بر آن‌هاست. آبخوان کارستی مورد مطالعه، واقع در استان خراسان شمالی، دارای رخنمون گسترده‌ای از آهک‌های تیرگان است. این آبخوان بزرگ و مرزی علی‌رغم تغذیه زیاد، توسط تعداد محدودی چشمه کارستی (ارناوه، رزقانه، اسطرخ، قردانلو، ایوب و سرانی) با دبی بین ۱۵ تا ۵۰۰ لیتر بر ثانیه تخلیه می‌شود. نمونه‌های آب چشمه‌ها و بارش برای یک دوره یک ساله جمع‌آوری و یون‌های اصلی و ایزوتوپ‌های پایدار ( $\delta D$  و  $\delta^{18}O$ ) برای تعیین خط بارش ایزوتوپی، تعیین منشأ، منابع تغذیه و فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم بر منابع کارستی منطقه، آنالیز شده است. مقدار هدایت الکتریکی بین ۲۵۰ تا ۸۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر در چشمه‌های آب سرد و حدود ۱۰۲۰ میکروموس بر سانتی‌متر در چشمه آب گرم ایوب متغیر است. با توجه به نتایج هیدروژئوشیمیایی و نسبت‌های یونی، رخساره‌های غالب در این آبخوان کارستی، رخساره بیکربناته کلسیک - منیزیک ناشی از انحلال سنگ کربناته و سولفات-کلسیک ناشی از انحلال ژیپس و پیریت در چشمه ایوب هستند. در چشمه ارناوه، ایوب و رزقانه، میزان غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم نیز وجود آبی کارست و لایه‌های شیلی و ماری زیادتر در حوضه آبرگیر این چشمه‌ها، غالب بودن جریان افشان و زمان ماندگاری زیادتر آب افزایش یافته است. بر اساس پارامترهای فیزیکوشیمیایی، تغییرات دبی با مقدار هدایت الکتریکی و دما در چشمه‌های اسطرخ و سرانی به‌دلیل بزرگ‌تر بودن حوضه آبرگیر و توسعه بیشتر کارست، محسوس‌تر است و رابطه عکس نشان می‌دهند. برای اولین بار معادله خط بارش ایزوتوپی محدوده چشمه‌ها بر اساس داده‌های برداشت شده به‌صورت  $\delta^2H = 7 \delta^{18}O + 6.32$  ارائه شده است؛ به‌گونه‌ای که شیب و عرض از مبدأ کمتری نسبت به خط بارش ایزوتوپی جهانی به علت تأثیر تبخیر ثانویه از باران در طول بارش، نشان می‌دهد. همه چشمه‌های مورد مطالعه روی خط آب جوی محلی و در نزدیکی خط مدیریتانه واقع شده‌اند که می‌توان نتیجه گرفت بارش‌هایی که باعث تغذیه این چشمه‌ها می‌شوند منشأ جوی دارند که بیشتر از توده‌های هوایی مدیریتانه‌ای نشأت می‌گیرند. غنی‌تر بودن ترکیب ایزوتوپی چشمه ارناوه به‌دلیل کمی تبخیر در طول مسیر جریان آب از آهک ماری با قابلیت نفوذپذیری کم و همچنین ضخامت زیاد آبی کارست در حوضه آبرگیر آن که تأییدکننده نتایج هیدروژئوشیمیایی و هیدروژئولوژی است. حوضه آبرگیر چشمه‌ها تاقدیس‌های مجاور آن‌ها است که با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های مختلف اطراف چشمه‌ها مقدار  $\delta^{18}O$  بین ۰/۳۲٪ و ۱/۶٪ در هر ۱۰۰ متر ارتفاع تغییر کرده و ارتفاع تغذیه چشمه‌ها بین ۲۲۰۰ تا ۲۷۰۰ متر متغیر می‌باشد که تأییدکننده حوضه آبرگیر آن‌هاست.

**واژه‌های کلیدی:** ایزوتوپی، خط بارش ایزوتوپی، منابع آب، هیدروژئولوژی کارست، هیدروژئوشیمیایی.

ارجاع: باقری ف.، کرمی غ. و باقری ر. ۱۳۹۹. ایزوتوپی کارست و منشأ چشمه‌های آبخوان مرزی خراسان شمالی. مجله پژوهش آب ایران. ۳۷: ۸۹-۱۰۰.

۱- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

۲- دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

۳- استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

\* نویسنده مسئول: f.bagheri.2007@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۴

## مقدمه

با توجه به محوری بودن آب در برنامه‌های توسعه پایدار هر منطقه، مدیریت منابع محدود آب زیرزمینی یک امر ضروری است که توجه به آن بیش از گذشته احساس می‌شود. به دلیل کاهش ذخیره منابع آب زیرزمینی موجود در آبخوان‌های آبرفتی، منابع آبی کارست به‌عنوان مهم‌ترین منبع آب شرب در دنیا محسوب می‌شوند؛ به گونه‌ای که آب شرب حدود ۲۵ درصد از مردم دنیا نیز از این منابع تأمین می‌شود (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). وجود سازندهای آهکی وسیع در قسمت‌های زیادی از ایران و استحصال آب شرب و کشاورزی از این منابع، چه به‌صورت چشمه و چه به‌صورت چاه، مؤید اهمیت بسیار زیاد این منابع است. مدیریت صحیح این آبخوان‌ها نیاز به شناخت وضعیت موجود و همچنین تغییرات آن در وضعیت مختلف دارد. در این زمینه بررسی‌های هیدروژئولوژی (کمی) و هیدروژئوشیمی-ایزوتوپی (کیفی) آب زیرزمینی به‌عنوان راهکارهای عملی و علمی برای اقدامات مدیریتی ضروری هستند. آبخوان‌های کارستی، مخازن زیرزمینی به شدت ناهمگنی هستند که سطح ایستابی در این آبخوان‌ها یک سطح پیوسته نیست و دارای شیب منطقه‌ای و محلی است. چشمه‌های کارستی محل تخلیه طبیعی آبخوان‌های کارستی هستند. داده‌های کمی و کیفی چشمه‌های کارستی بازتاب مستقیم ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی و هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی هستند که به وضعیت جریان در آن‌ها بستگی دارد.

بارش‌ها نیز به‌عنوان مهم‌ترین منبع تغذیه‌کننده آب زیرزمینی در مناطق کارستی و آبرفتی هستند؛ بنابراین مطالعه و بررسی تغییرات زمانی و مکانی رفتار ایزوتوپی بارش همراه منابع آب زیرزمینی حائز اهمیت است. شناخت رفتار هیدروژئولوژیکی لایه‌های آبدار کارستی، تعیین مسیرهای جریان و منشأ تغذیه در سفره‌های کارستی با استفاده از روش‌های مختلف در طول چند دهه اخیر، رواج بسیاری داشته است که نتایج گسترده‌ای از این مطالعات به دست آمده است (باقری، ۱۳۸۶؛ محمدی بهزاد، ۱۳۹۰؛ میلانویچ، ۱۹۸۱؛ بوگلی، ۱۹۸۰؛ بوناچی، ۱۹۹۳؛ احمد، ۱۹۹۶؛ رئیسی و کرمی، ۱۹۹۶، ۱۹۹۷؛ کوواکس، ۲۰۰۵؛ کریمی و همکاران، ۲۰۰۵؛ باقری و همکاران، ۲۰۰۷؛ اشجاری، ۲۰۰۷؛ رئیسی، ۲۰۰۸؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۰؛ لی و همکاران، ۲۰۱۶؛ کرمی

و همکاران، ۲۰۱۶؛ حمدی و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین تعیین منشأ و مسیر جریان آب در سفره‌های کارستی بسیار حائز اهمیت و نسبت به محیط‌های دیگر پیچیده‌تر است (فورد و ویلیامز، ۲۰۰۷). مهم‌ترین پارامترها در مطالعه کارست شامل بررسی سری‌های زمانی هدایت الکتریکی، دما، دبی در مقابل بارش و غلظت یون‌های اصلی هستند. ایزوتوپ‌های پایدار ( $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta\text{D}$ ) همراه داده‌های هیدروژئوشیمی می‌تواند ابزار مفیدی برای حل مسائل هیدروژئولوژی باشند (کلارک و فریتز، ۱۹۹۷). ایزوتوپ‌های پایدار به‌طور کلی برای ردیابی سیستم جریان و تعیین منشأ به کار می‌روند (شوارتز و ژانگ، ۲۰۰۳). با توجه به این که ویژگی‌های ایزوتوپی آب‌ها در طول مسیر کمتر دچار تغییر می‌شود و همچنین ویژگی‌های منشأ اولیه خود را حفظ می‌کنند، در تفکیک و تعیین مسیرهای محتمل جریان و همچنین تعیین منشأهای مختلف بسیار مفید و کارساز هستند. همچنین این روش برای تعیین مسیرهای جریان به‌صورت محلی و یا منطقه‌ای نیز بسیار کاربردی و مفید است.

آبخوان‌های کارستی در استان خراسان شمالی با توجه به رخنمون‌های گسترده سازندهای کربناته مهم‌ترین منبع تأمین آب آشامیدنی و کشاورزی هستند. در این مناطق با توجه به وجود مقدار تغذیه زیاد، خروجی زیادی مشاهده نمی‌شود. در این منطقه با توجه به گسترش سازند تیرگان، تعداد معدودی چشمه کارستی وجود دارد که تنها بخش نسبتاً کمی از آب‌های کارستی منطقه را تخلیه می‌کنند و مهم‌ترین منبع تأمین آب آشامیدنی در این منطقه هستند. برخی از این چشمه‌ها نیز مانند ارناوه و رزقانه فراهم‌کننده دبی پایه رودخانه ارناوه هستند و در نهایت به مخزن سد شیرین دره می‌ریزند که این سد، مهم‌ترین منبع تأمین آب شرب و کشاورزی این استان است. کاظمی (۱۳۹۳) با مطالعه چشمه آب گرم ایوب و شفا واقع در تاقدیس آسیا زو به این نتیجه رسیدند که سازند آهکی تیرگان و بخش ماسه سنگی آیتامیر به‌عنوان محل تغذیه، ذخیره آب زیرزمینی و مخازن کارستی هستند و سیستم جریان آب زیرزمینی بیشتر تحت تأثیر تکنونیک ناحیه‌ای است. پژوهش‌های اندکی نیز روی مخزن سد شیرین دره انجام شده که در آن‌ها بیشتر به بررسی رسوبات مخزن پرداخته شده است (صدری و همکاران، ۱۳۹۳). با توجه به نبود مطالعه هیدروژئولوژی کارست در

مطالعه تعداد شش چشمه کارستی ارناره، رزقانه، قردانلو، سرانی، ایوب و اسطرخی به‌عنوان معرف انتخاب شدند که موقعیت آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

### ویژگی‌ها هیدروژئولوژیکی

آبخوان‌های کارستی مورد مطالعه متشکل از تاق‌دیس‌ها و ناودیس‌های متوالی است که از طریق شش چشمه مهم تخلیه می‌شود. چشمه کنتاکتی ارناره با ارتفاع حدود ۸۱۰ متر به‌عنوان کم ارتفاع‌ترین چشمه در محدوده این آبخوان است. میزان دبی آن از ۳۷۰ لیتر بر ثانیه در تابستان تا ۵۵۰ لیتر بر ثانیه در زمستان متغیر و با این میزان دبی به‌عنوان مهم‌ترین منبع تغذیه سد شیرین دره است. این چشمه در تاق‌دیس بابابند با ارتفاع ۸۶۰ تا ۱۹۵۰ متر واقع شده که در حوضه آبرگیر آن، عمدتاً پوشیده از پوشش خاک است. چشمه رزقانه واقع در تاق‌دیس آسیازو با ارتفاع ۱۳۰۰ متر دارای دبی حدود ۲۰۰ لیتر بر ثانیه است. قسمت عمده لیتولوژی حوضه آبرگیر این چشمه، از نوع آهکی است و سازند شیلی و مارنی سرچشمه در این منطقه نسبت به حوضه ارناره گسترش کمتری دارد. ارتفاع تاق‌دیس آسیازو ۱۳۰۰ تا ۲۰۲۰ متر است. چشمه سرانی واقع در تاق‌دیس کونجوخور با ارتفاع حدود ۱۶۰۰ متر و لیتولوژی غالب آهکی و اپی‌کارست اندک دارای دبی بین ۴۲ تا ۸۶ لیتر بر ثانیه است. ارتفاع تاق‌دیس کونجوخور ۲۰۰۰ تا ۲۶۰۰ متر است. عمده بارش این منطقه به‌صورت برف است. چشمه قردانلو واقع در ادامه تاق‌دیس بابابند با ارتفاع حدود ۱۴۷۰ متر دارای کمترین مقدار دبی حدود ۱۸ لیتر بر ثانیه است؛ در حالی که چشمه اسطرخی با تغییرات دبی از ۵۰ تا ۱۵۰ لیتر بر ثانیه، بیشترین میزان نوسانات دبی را دارد. دبی چشمه آب گرم ایوب (واقع در نزدیکی تاق‌دیس آسیا زو) نیز حدود ۱۱ لیتر بر ثانیه است. میانگین بارش سالانه از ۲۳۰ در محدوده تاق‌دیس بابابند تا ۳۷۰ میلی‌متر در محدوده سرانی و ارتفاع منطقه از ۸۰۰ تا ۳۰۰۰ متر متغیر است.

### روش کار

در یک دوره زمانی ۱۱ ماهه از مهرماه ۱۳۹۵ تا مردادماه ۱۳۹۶ به‌صورت ماهانه نمونه‌برداری هیدروشیمی و ایزوتوپی از شش چشمه مهم کارستی منطقه انجام شد. پارامترهای درجه حرارت (T)، هدایت الکتریکی (EC) و

این منطقه، هدف از انجام این پژوهش، بررسی منشأ و منابع تغذیه، مکانیسم جریان و فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم بر تعدادی از چشمه‌های کارستی مهم استان خراسان شمالی با استفاده از روش‌های هیدروژئولوژیکی، هیدروشیمیایی و ایزوتوپی است. همچنین با توجه به این‌که منشأ همه آب‌های زیرزمینی، آب جوی است که در طول بارش به درون سفره‌ها نفوذ می‌کند، بنابراین شناخت رفتار ایزوتوپی بارش نیز برای تعیین منشأ سفره‌های کارستی و بررسی ارتباط هیدرولیکی امری لازم و ضروری است. در این زمینه مهم‌ترین کار لازم، تعیین خط آب جوی محلی (ایزوتوپی) (LMWL) برای منطقه مورد مطالعه بوده است که این خط ایزوتوپی بارش برای تمامی مطالعات ایزوتوپی در این منطقه در آینده کاربرد دارد. خط ایزوتوپی بارش لازمه هر نوع مطالعه ایزوتوپی و هیدروژئولوژی در منطقه است.

### مواد و روش‌ها

#### موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۷۰۰۰ کیلومترمربع در شمال استان خراسان شمالی، در زون ساختاری کپه‌داغ و در نزدیکی مرز ترکمنستان قرار گرفته است. این منطقه در مختصات طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۲۵ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه تا ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه واقع شده است. در زون کپه‌داغ بیشتر چین‌ها نامتقارن، ممتد و کم و بیش با یکدیگر موازی هستند و در یک روند شمال غرب- جنوب شرق آرایش یافته‌اند. همچنین، در این منطقه، زون‌های گسلی بسیاری وجود دارد که گسل‌های همزمان با فرونشست حوضه به‌طور عموم روند شرقی- غربی و یا شمال شرقی- جنوب غربی دارند و گسل‌هایی که محور چین‌ها را قطع می‌کنند و از نوع همگرا هستند، ممکن است امتداد لغز راست‌گرد، با روند شمال غربی، و یا امتداد لغز چپ‌گرد، با روند شمال شرقی، باشند. سازندهای منطقه مورد مطالعه از قدیم به جدید شامل سازند آهکی لار (ژوراسیک بالایی)، سازند آهکی تیرگان (کرتاسه پایینی)، سازند مارنی سرچشمه (کرتاسه پایینی)، سازند شیلی سنگانه (کرتاسه پایینی)، سازند ماسه‌سنگی و شیلی آتامیر (کرتاسه بالایی) و نهشته‌های دریایی کواترنری هستند. در منطقه مورد

شده است. یکی از نمودارهایی که برای نشان دادن و تفسیر نتایج شیمیایی به کار می‌رود، نمودار پایپر است. این دیاگرام عمدتاً برای تشخیص تیپ آب، رخساره‌های هیدروشیمیایی و مسیر تکامل ژئوشیمیایی در سفره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (ریتن هوس، ۱۹۶۷).

با توجه به نمودار پایپر (شکل ۲)، در همه چشمه‌ها میزان عناصر قلیایی‌خاکی (کلسیم و منیزیم) بیشتر از قلیایی، اسیدهای ضعیف (بیکربنات) بیشتر از اسیدهای قوی (سولفات و کلر) که منطبق با انحلال سنگ منشأ کربناته است. در چشمه ارناره، ایوب و رزقانه، میزان غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم نیز افزایش یافته است که می‌تواند دو منشأ برای آن‌ها بیان کرد: ۱) وجود آبی کارست و لایه‌های شیلی و مارنی زیادتر در حوضه آبرگیر این چشمه‌ها، غالب بودن جریان افشان و زمان ماندگاری زیادتر آب و ۲) وجود جریان‌های ناحیه‌ای عمیق و عبور از لایه‌های شیلی زیرین (سازند شورجه) با توجه به اختلاف ارتفاع زیاد منطقه تغذیه و تخلیه است. افزایش غلظت یون سولفات در چشمه ایوب می‌تواند به دلیل انحلال کانی‌های ژپیس و انیدریت یا اکسایش پیریت باشد و همچنین تحت تأثیر جریان‌های ناحیه‌ای عمیق‌تر باشد. رخساره‌های غالب در این آبخوان کارستی، رخساره بی‌کربناته کلسیک- منیزیک ناشی از انحلال سنگ کربناته و سولفات کلسیک در چشمه ایوب هستند.

### تعیین منشأ یون‌ها با استفاده از نسبت‌های یونی و نمودارهای ترکیبی

یون‌های غالب در نمونه‌های چشمه‌های کارستی منطقه می‌توانند منشأهای مختلفی داشته باشند. همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده، نسبت  $\text{HCO}_3/\text{SiO}_2$  در چشمه‌های مورد مطالعه بالاتر از ۱۰ است که این بیان‌کننده هوازدگی سنگ‌های کربناته است. در چشمه ایوب، آنیون غالب سولفات است که منشأ طبیعی معمول این آنیون، کانی‌های تبخیری مانند ژپیس و انیدریت است. با توجه به نسبت  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  که در این چشمه کمتر از ۱ و  $\text{Ca}/\text{SO}_4+\text{Ca}$  کمتر از ۰/۵ است منشأ سولفات موجود در آب این چشمه نمی‌تواند تنها وجود ژپیس و انیدریت باشد. سولفات آب می‌تواند به دلیل عبور جریان آب زیرزمینی از کانی‌های سولفیدی مانند پیریت حاصل شود که حضور پیریت در سازند سرچشمه و آتامیر (کازمی،

اسیدیته (pH) همزمان با نمونه‌برداری، میزان یون بی‌کربنات نیز به روش حجم‌سنجی (Titration) با اسید سولفوریک استاندارد ۰/۰۵ نرمال و شناساگر متیل اورنژ و غلظت یون‌های دیگر (K, Mg, Na, Ca),  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{CO}_3$  و Cl با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی یونی اندازه‌گیری شده است. حداکثر خطای آنالیز در مطالعه هیدروشیمی نمونه‌های آب برداشت شده، حدود ۴٪ محاسبه شده است. همچنین برای تعیین خط بارش ایزوتوپی، از نمونه‌های بارش و برف در ایستگاه‌های باران سنجی اطراف چشمه‌ها در طول یک سال به صورت ماهانه نمونه‌برداری انجام شده است. نمونه‌های ایزوتوپی منطقه مورد مطالعه در آزمایشگاه سازمان بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) در وین و دانشگاه اترخت هلند (Utrecht University) اندازه‌گیری و به صورت یک در هزار یا پرمیل (‰) بیان شده است. درصد تغذیه در طی این پژوهش و با استفاده از همپوشانی لایه‌های مختلف لیتولوژی، ضخامت آبی کارست و آهک برهنه، عوارض کارستی، نوع بارش، تراکم خطواره، پوشش گیاهی، شیب و جهت شیب در نرم افزار جی‌ای‌اس محاسبه شده است. که در این مقاله، تنها به بیان درصد تغذیه بسنده شده است.

### نتایج و بحث

در این پژوهش، برای تعیین منشأ چشمه‌های کارستی مورد مطالعه، ابتدا با استفاده از نمودار پایپر و نسبت‌های یونی ارزیابی اولیه از وضعیت هیدروشیمی و فرآیندهای شیمیایی کنترل‌کننده هیدروشیمی آب زیرزمینی انجام و در ادامه با تجزیه و تحلیل سری زمانی پارامترهای فیزیکی-شیمیایی و داده‌های ایزوتوپی ( $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta\text{D}$ ) منشأ، مکانیسم تغذیه و ارتفاع حوضه آبرگیر نیز بررسی شد. نتایج حاصل از آنالیز هیدروشیمیایی در جدول ۱ آورده شده است.

### ویژگی‌ها و رخساره‌های هیدروشیمیایی

مقدار هدایت الکتریکی در منطقه مورد مطالعه بین ۲۵۰ در چشمه سرانی و ۸۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر در چشمه کنتاکتی ارناره متغیر است. چشمه آب گرم ایوب (واقع در نزدیکی ناقدیس آسیازو) نیز دارای هدایت الکتریکی ۱۰۵۰ میکروموس بر سانتی‌متر است. برای بررسی هیدروشیمیایی از دیاگرام‌های مختلف استفاده

۴، نمودار ترکیبی مجموع مواد محلول (TDS) و یون‌های غالب (Ca, Mg, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, Na, Cl) را نشان می‌دهد. چشمه ارناره دارای روند افزایشی با یون‌های منیزیم، کلسیم، سدیم و بیکربنات است که از سازند کربناته (تیرگان) تغذیه و تحت تأثیر لیتولوژی سازند شیلی و مارنی (سرچشمه و سنگانه) قرار گرفته است. سنگ منشأ کربناته (تیرگان) چشمه رزقانه در مقایسه با چشمه ارناره، خلوص بیشتری دارد و هیدروشیمی آب آن کمتر تحت تأثیر سازندهای شیلی قرار گرفته است؛ زیرا روند افزایش TDS با کلسیم بیشتر و با سدیم کمتر است. در چشمه قردانلو روند افزایشی TDS با یون‌های منیزیم و بیکربنات و به مقدار کمتر کلسیم بیان‌کننده انحلال سازند کربناته (آهکی- دولومیتی) تیرگان است. مقدار TDS چشمه ایوب نیز که دارای روند افزایشی با یون‌های منیزیم، سولفات، بیکربنات و به مقدار کمتر کلسیم است که نشان‌دهنده آب با تیپ سولفات کلسیک- منیزیک است که از درون واحدهای کربناته تیرگان و لایه‌های ژیبسی و کانی‌های سولفیدی (سازند سرچشمه، آتامیر) عبور کرده‌اند. سازندهای آهکی- دولومیتی در چشمه‌های سرانی و اسطرخی درصد خلوص بالاتری دارند.

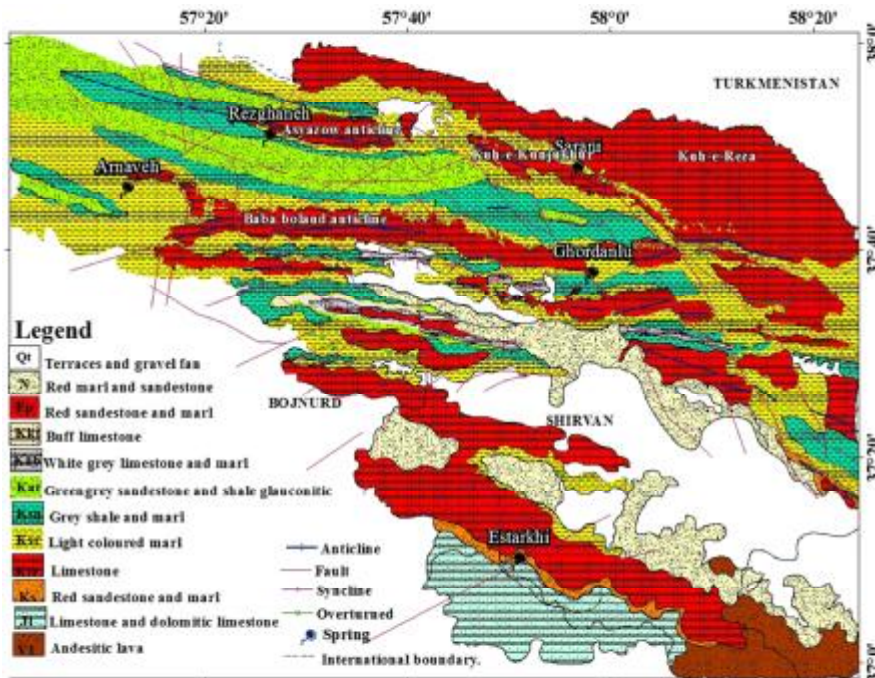
#### بررسی سری زمانی پارامترهای فیزیکوشیمیایی

در شکل ۵ سری زمانی بین دبی، بارش، دمای آب و هدایت الکتریکی در چشمه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. با افزایش مقدار دبی، پارامتر هدایت الکتریکی کاهش پیدا می‌کند و یک رابطه عکس بین آن‌ها وجود دارد. بسته به حجم و توالی بارش‌ها، در زمانی که حجم بارش کم باشد، بیشتر آن‌ها به‌عنوان رطوبت اولیه در زون اپی‌کارست در سطح آبخوان کارستی باقی می‌مانند و با گذشت زمان و رخداد پدیده‌های تبخیر و واکنش با سنگ، مقدار غلظت املاح آن‌ها بسته به نوع سازند می‌تواند در طول زمان ماندگاری افزایش یابد. افزایش هدایت الکتریکی آب چشمه‌ها می‌تواند نتیجه بیرون رانده شدن آب‌های موجود در زون اپی‌کارست و شکستگی‌های ریز آبخوان کارستی با زمان ماندگاری بالا باشد که املاح زیادی در خود حل کرده‌اند. بعد از آن، آب‌های تغذیه‌ای با آب‌های قدیمی درون منطقه تغذیه به تعادل شیمیایی می‌رسند و در نتیجه، تغییرات زمانی هدایت الکتریکی تقریباً ثابت می‌شود. در بعضی چشمه‌ها مانند ارناره،

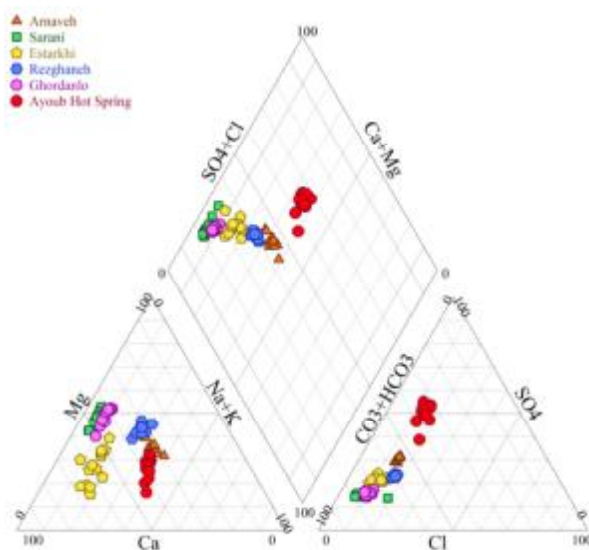
۱۳۹۳) تأییدکننده این فرآیند است. نسبت Ca/Mg می‌تواند منعکس‌کننده ترکیب آهک یا دولومیت باشد. این نسبت در آب‌هایی با رخداد پدیده انحلال آهک و دولومیت به ترتیب بیشتر از ۳ و ۱ است. مقادیر متوسط بیان‌کننده حضور هر دو سنگ دولومیتی و آهکی در طول مسیر جریان است. این نسبت در چشمه اسطرخی بیش از ۲ است که می‌تواند به دلیل وجود سنگ مخزن کربناته خالص‌تر از بقیه چشمه‌ها در حوضه آبریز آن باشد. از آن جایی که هر چه خلوص سنگ آهک بیشتر باشد، ظرفیت کارستی شدن بیشتر می‌شود بالا بودن دامنه تغییرات پارامترهای فیزیکوشیمیایی، وجود توسعه بیشتر کارست و خالص‌تر بودن سنگ آهک را تأیید می‌کند. نسبت Ca/Mg در چشمه رزقانه حدود ۰/۷ و در چشمه‌های ارناره و قردانلو حدود ۰/۹ است که می‌تواند ناشی از عدم تعادل آب با سنگ میزبان ناشی از اختلاط آب‌ها با منشأهای مختلف باشد. سازند تیرگان و سرچشمه در این منطقه، مقادیر بالایی از منیزیم را دارد (مطالعات نیمه‌تفضیلی حوضه آبریز شیرین دره، شرکت طوس آب، ۱۳۸۹). وجود مقادیر بالای منیزیم در ترکیب سنگ می‌تواند باعث بالا رفتن این مقدار در آب شود که از مشخصه‌های سازند آهکی تیرگان با بین لایه‌های مارن و سازند مارنی سرچشمه است. نسبت Na/Cl+ Na در چشمه‌های ارناره، اسطرخی، رزقانه و ایوب بالاتر از ۰/۵ است که وجود فرآیند تبادل یونی را تأیید می‌کند. در آبخوان‌هایی که علاوه بر لایه‌های شیلی، پوشش خاک وجود دارد امکان تبادل یونی وجود دارد. در این حالت، Ca و Mg از آب خارج می‌شود و Na جای آن‌ها را می‌گیرد که با افزایش مقدار Na نسبت به Cl قابل تشخیص است. همچنین نسبت Mg/Mg+Ca در چشمه‌های ارناره و رزقانه اندکی بالاتر از ۰/۵ که علاوه بر هوازگی کربنات‌ها اندکی هوازگی سیلیکات‌ها را نیز نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شده است تمرکز اغلب نمونه‌ها در مرز انتقالی بین محدوده کلسیت غالب و دولومیت غالب شکل گرفته‌اند؛ به گونه‌ای که تمرکز اغلب نمونه‌های چشمه‌های سرانی، ارناره، رزقانه و قردانلو در هر محدوده انحلالی تقریباً به‌طور مساوی است و این موضوع نشان‌دهنده تأثیر سازندهای آهکی بر شیمی آب چشمه‌هاست. سنگ منشأ کربناته چشمه اسطرخی (سازند لار) دارای خلوص بیشتری است. شکل

محسوس‌تر از دیگر چشمه‌هاست. ضریب تغییرات درجه حرارت در چشمه‌های ارزناوه، رزقانه و سرانی بیشتر از دیگر چشمه‌ها است؛ به گونه‌ای که افزایش دبی درجه حرارت اندکی کاهش می‌یابد که این مسأله به دو دلیل: (۱) سهم بیشتر تغذیه از ذوب برف و (۲) فعال شدن تعدادی از مجاری غیرفعال در ماه‌های پر بارش و کوتاه بودن زمان ماندگاری آن از منطقه تغذیه تا تخلیه می‌تواند ایجاد شود.

سرانی، اسطرخی و قردانلو زمانی که حجم بارش زیاد باشد، افزایش دبی با کاهش بسیار کمی در هدایت الکتریکی همراه است که می‌تواند در نتیجه افشان بودن جریان غالب باشد. بیشترین تغییرات دبی در چشمه‌های سرانی و اسطرخی مشاهده می‌شود. چشمه اسطرخی به دلیل بزرگ‌تر بودن حوضه آبرگیر و توسعه بیشتر کارست، تغییرات در مقادیر هدایت الکتریکی



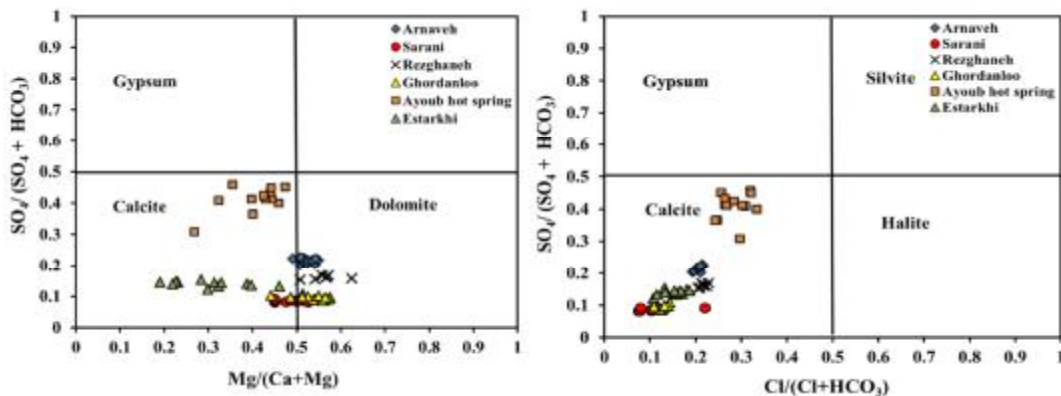
شکل ۱- نقشه زمین شناسی و موقعیت چشمه‌های مورد مطالعه در استان خراسان شمالی



شکل ۲- نمودار پایپر چشمه‌های کارستی مهم مورد مطالعه در استان خراسان شمالی

جدول ۱- نتایج آنالیز کیفی و نسبت‌های یونی (EC بر حسب  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ، دبی بر حسب  $\text{l}/\text{s}$ ، غلظت یون‌ها بر حسب  $\text{meq}/\text{l}$ )

Arnave	Sarani	Rezghaneh	Ayoub hot spring	Ghordanlu	Estarkhi	
۸۳۰	۳۷۰	۶۷۰	۱۰۵۰	۴۰۰	۶۷۰	EC
۷/۹	۸	۸	۷/۵	۷/۸	۷/۸	pH
۵۰۰	۳۵	۲۵۰	۱۱	۱۳	۱۸۰	Discharge
۲/۸	۲/۱	۲/۵	۴	۱/۸	۴/۵	$\text{Ca}^{2+}$
۳/۳	۲	۳/۳	۳	۲/۳	۲/۵	$\text{Mg}^{2+}$
۲/۵	۰/۶	۱/۸	۵/۵	۰/۷	۱/۶	$\text{SO}_4^{2-}$
۴/۶	۳/۵	۴/۷	۴/۲	۳/۳	۵	$\text{HCO}_3^-$
۲/۸	۰/۲۵	۱/۸	۳/۷	۰/۳	۱/۲	$\text{Na}^+$
۱/۲	۰/۳	۱/۳	۱/۵	۰/۵	۱	$\text{Cl}^-$
۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۰۴	$\text{K}^+$
۰/۹	۱	۰/۷	۱/۵	۰/۹	۲/۵	Ca/Mg (molar)
۱	۳/۱	۱/۲	۰/۶	۲/۶	۲/۷	Ca/ $\text{SO}_4$
۲/۵	۰/۷	۱/۴	۲/۳	۰/۸	۰/۷-۱/۸	Na/Cl
۰/۷	۰/۴	۰/۵۸	۰/۷	۰/۴۲	۰/۶	Na/Cl+Na
۰/۵۴	۰/۴۵	۰/۵۶	۰/۴	۰/۵۳	۰/۳	Mg/Ca+Mg
۰/۵۲	۰/۷۵	۰/۵۵	۰/۴	۰/۷۲	۰/۷۳	Ca/Ca+ $\text{SO}_4$
۱۹/۳	۲۳/۸	۲۲/۱	۱۰/۳	-	۲۶	$\text{HCO}_3/\text{SiO}_2$
۰/۶۵	۰/۸۵	۰/۶۸	۰/۵	۰/۸۵	۰/۷۵	$\text{HCO}_3/\text{Anions}$



شکل ۳- نمودارهای ترکیبی چهار متغیره (قلمروهای انحلالی) نمونه‌های آب چشمه‌های مورد مطالعه

### مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌ها

محدوده حوضه آبرگیر چشمه ارناوه شامل بخشی از تاقدیس بابلند است که سازندهای تیرگان و سرچشمه را در بر می‌گیرد. میزان حجم تخلیه سالانه چشمه که حدوداً ۱۵/۸ میلیون مترمکعب و مساحت حوضه آبرگیر این چشمه در حدود ۱۶۶ کیلومترمربع است. حجم تغذیه به دست آمده برای کل تاقدیس بابابلند با میزان بارندگی ۲۷۰ میلی‌متر و درصد تغذیه ۰/۴ حدود ۴۹/۲ میلیون مترمکعب است. با توجه به اختلاف زیاد حجم تخلیه سالانه چشمه و حجم تغذیه به دست آمده، تاقدیس بابا

بابلند نه تنها می‌تواند آب چشمه ارناوه را تامین کند، بلکه حجم ذخیره آب اضافی زیادتری نیز دارد. در چشمه رزقانه میزان حجم تخلیه سالانه چشمه ۷/۸ میلیون مترمکعب، حجم تغذیه به دست آمده حدود ۸/۴ میلیون مترمکعب (با میزان بارندگی ۲۸۰ میلی‌متر و درصد تغذیه ۰/۵)، مساحت حوضه آبرگیر برای این چشمه ۶۰ کیلومترمربع است. چشمه سرانی در کوه کونجوخور با میزان حجم تخلیه سالانه چشمه که ۱/۱ میلیون مترمکعب و حجم تغذیه (در محدوده این چشمه) حدود ۷ میلیون مترمکعب (با میزان بارندگی ۳۱۰ میلی‌متر و درصد تغذیه ۰/۵۵) که

منشأ جوی این چشمه‌هاست. همه چشمه‌های مورد مطالعه روی خط آب جوی محلی و در نزدیکی خط مدیترانه واقع شده‌اند که می‌توان نتیجه گرفت که بارش‌هایی که باعث تغذیه این چشمه‌ها می‌شوند، منشأ جوی دارند که بیشتر از توده‌های هوایی مدیترانه‌ای نشأت می‌گیرند. چشمه‌ارناوه و اسطرخی نسبت به دیگر چشمه‌ها ترکیب ایزوتوپی غنی‌تری نشان داده است. در آهک‌های خاک مانند<sup>۱</sup> یا در مناطقی که ضخامت اپی‌کارست زیاد است، تبخیر باعث غنی شدن ترکیب ایزوتوپی آب منفذی می‌شود (حامد و دهری، ۲۰۱۳). غنی‌تر بودن ترکیب ایزوتوپی چشمه‌ارناوه به دلیل گسترش آهک مارنی و ضخامت زیاد اپی‌کارست در حوضه آگیر آن، قابلیت نفوذپذیری کمتر این سنگ‌ها و بنابراین افزایش تبخیر است. همچنین چشمه‌ارناوه و ایوب که در نزدیکی خط آب جوی محلی (با فاصله کم) قرار دارند، تحت تأثیر تبخیر قرار گرفته و محتوی ایزوتوپی آن‌ها، تفاوت اندکی با نزولات جوی منطقه دارد. چشمه‌رزقانه روی خط آب جوی محلی محدوده چشمه‌ها قرار دارد و دارای ترکیب ایزوتوپی فقیرتری نسبت به چشمه‌ارناوه است که به دلیل ارتفاع بالاتر حوضه آگیر آن است. چشمه‌اسطرخی با کمی فاصله نسبت به خط جوی قرار گرفته است که این نشان‌دهنده این است که منطقه خط بارش ایزوتوپی کمی فرق می‌کند و باید نمونه اسطرخی با خط بارش منطقه اسطرخی مقایسه شود. در کل تمامی چشمه‌ها دارای منشأ جوی هستند و منطقه تغذیه در آن‌ها ارتفاع متفاوت دارد. با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های مختلف اطراف چشمه‌ها، میانگین وزنی در هر ایستگاه محاسبه و در مقابل ارتفاع ایستگاه ترسیم شده است (شکل ۸). طبق روابط به دست آمده مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  بین % ۰/۳۲ و % ۱/۶ در هر ۱۰۰ متر ارتفاع تغییر می‌کند.

ارتفاع تغذیه برای چشمه‌های مورد مطالعه محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است. داده‌های ایزوتوپی ارتفاعی تا حدودی بیشتر از ارتفاع تاقدیس بابابلند برای چشمه‌ارناوه را نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که چشمه‌ارناوه کاملاً افشان بوده است؛ بنابراین این آب‌های خروجی مربوط به زمان‌های قبل که احتمالاً از نظر ایزوتوپی فقیرتر و عمده تغذیه در چند دهه

مساحت حوضه آگیر به دست آمده برای این چشمه حدود ۷ کیلومتر مربع است. در چشمه‌قوردانلو، میزان حجم تخلیه سالانه چشمه ۰/۵ میلیون مترمکعب و مساحت حوضه آگیر حدود ۳/۵ کیلومتر مربع است. در چشمه‌اسطرخی نیز میزان حجم تخلیه سالانه چشمه ۵/۶ میلیون مترمکعب و مساحت حوضه آگیر این چشمه ۴۶ کیلومتر مربع است.

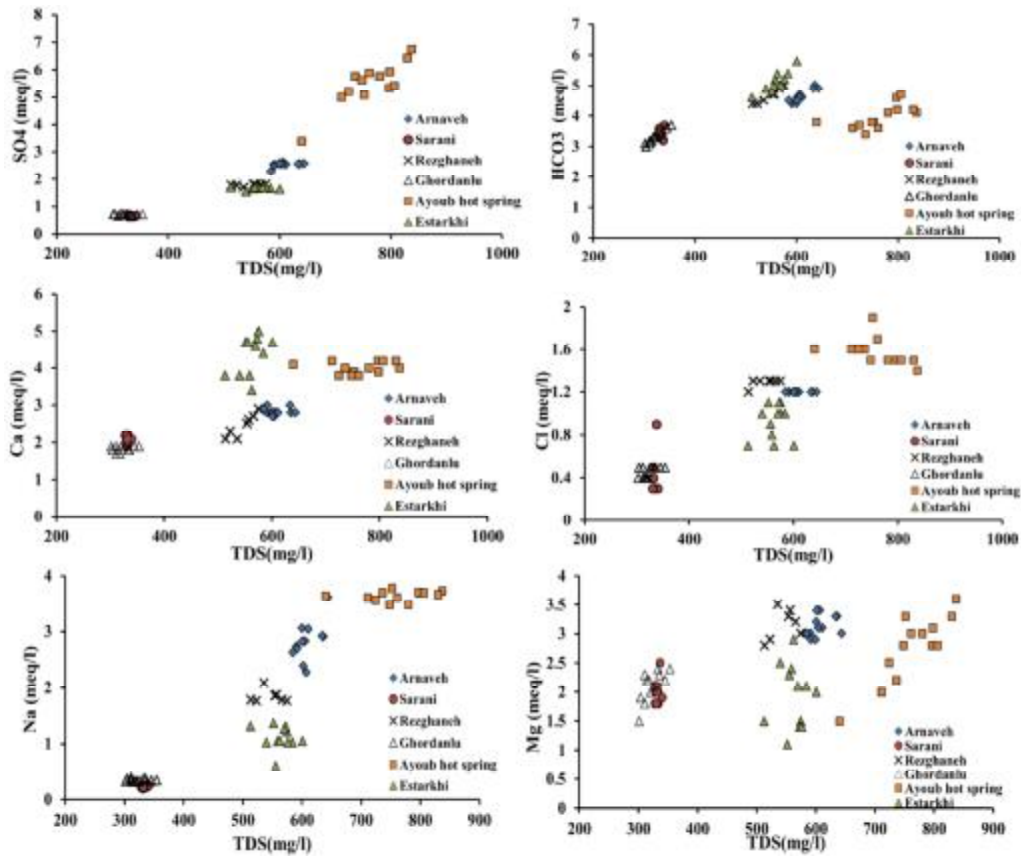
### مقادیر ایزوتوپی ( $\delta\text{D}$ , $\delta^{18}\text{O}$ )

ترکیب ایزوتوپی بارش، از مهم‌ترین پارامترها در مطالعات هیدروژئولوژی است؛ زیرا ویژگی‌های اولیه بارش را به‌عنوان ورودی به سفره آب زیرزمینی در خود نگه می‌دارد و تغییرات بعدی را که در آبخوان اتفاق می‌افتد، می‌توان به راحتی دنبال کرد. رسم خط ایزوتوپی آب‌های جوی محلی منطقه و مقایسه آن با خط ایزوتوپی آب جوی جهانی اولین قدم برای مطالعات ایزوتوپی یک منطقه است. برای ترسیم خط ایزوتوپی آب‌های جوی و بررسی ایزوتوپی چشمه‌های مورد مطالعه، از داده‌های ایزوتوپی ایستگاه‌های نزدیک به حوضه آگیر و محل چشمه‌ها استفاده شد. معادله خط بارش جوی محدوده چشمه‌های ارناوه، رزقانه، سرانی، ایوب و قردانلو به صورت رابطه  $\delta^2\text{H} = 7 \delta^{18}\text{O} + 6.32$  در این مطالعه به دست آمد؛ به گونه‌ای که شیب و عرض از مبدأ کمتری نسبت به خط ایزوتوپی تغییرات بسیار کمی را نشان می‌دهند؛ به گونه‌ای که میانگین مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  در چشمه‌ارناوه، رزقانه، سرانی، قردانلو، اسطرخی و ایوب به ترتیب ۱۰/۲، -۱۱/۳، -۱۱/۵، -۱۱/۲، -۱۰/۳ و -۱۱/۲ و میانگین  $\delta\text{D}$  به ترتیب ۶۷، -۷۲، -۷۳، -۷۰/۲، -۶۱/۵ و -۷۳ هستند. چشمه‌های رزقانه، ایوب، سرانی و قردانلو به دلیل تغذیه از بارش‌های زمستانی در ارتفاعات، دارای مقادیر ایزوتوپی فقیرتر و سبکتری نسبت به دیگر چشمه‌ها هستند. موقعیت چشمه‌های مورد مطالعه روی نمودار  $\delta^{18}\text{O}$  نسبت به  $\delta\text{D}$ ، نسبت به خط آب‌های جوی محلی محدوده چشمه‌ها و جهانی در شکل ۶ نشان داده شده است. همه چشمه‌ها روی خط ایزوتوپی آب‌های جوی محلی قرار دارند که نشان‌دهنده تغذیه آن‌ها از نزولات جوی است. برای بررسی دقیق‌تر چشمه‌ارناوه از خط آب جوی ایستگاه‌های شیرین دره (شکل ۷)، و چشمه‌اسطرخی از خط آب جوی ایستگاه اسطرخی (شکل ۸) استفاده شده است که تأییدکننده

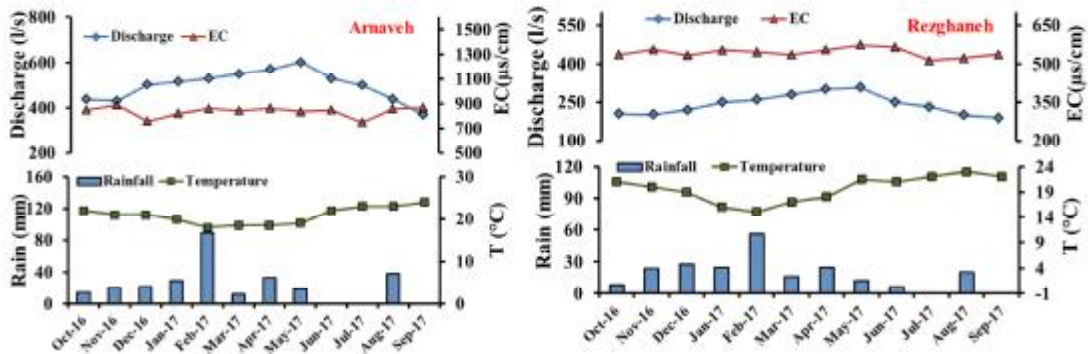


وجود دارد که می‌تواند بخشی از آب خروجی از چشمهٔ ارناوه از طریق گسل‌های موجود در منطقه از ارتفاعات بالادست تغذیه شده باشد که البته این فرضیه نیاز به بررسی بیشتر دارد.

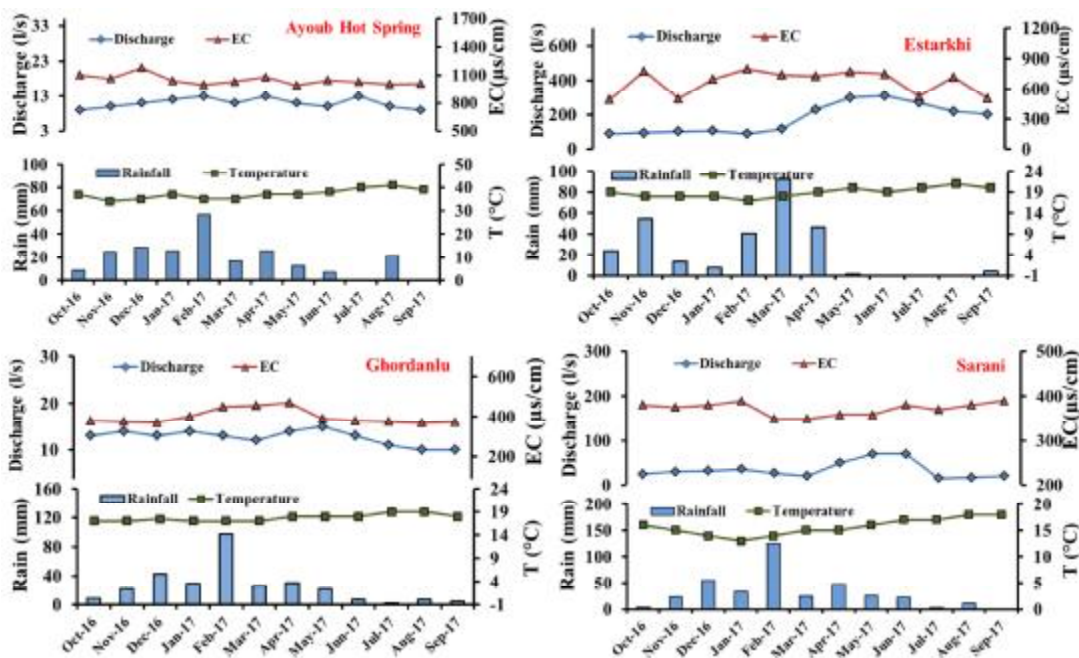
قبل به‌صورت برف بوده است. همچنین به‌دلیل وجود اختلاف ارتفاع زیاد بین منطقهٔ تغذیه و خروجی چشمه، احتمال وجود جریان‌های ناحیه‌ای عمیق و اختلاط بیشتر آب‌های تغذیه‌کننده نیز وجود دارد. احتمال دیگری نیز



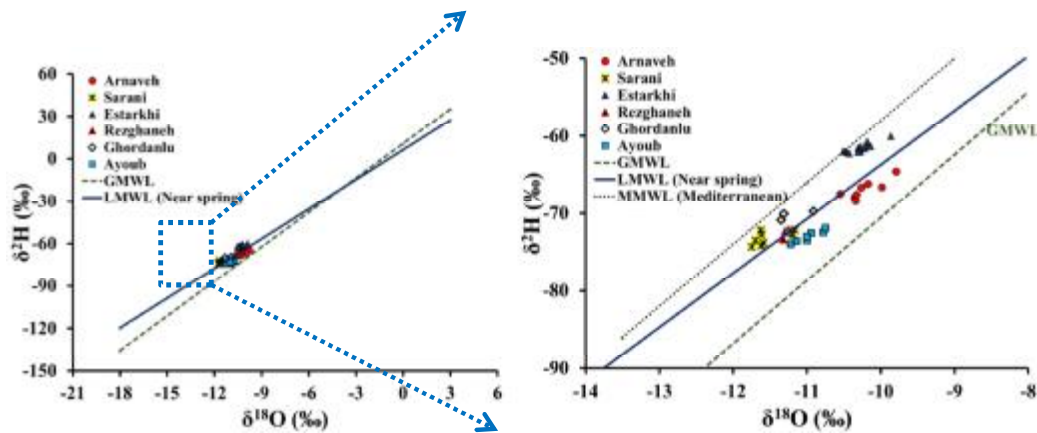
شکل ۴- نمودار TDS در برابر کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی نمونه‌های آب چشمه‌های مورد مطالعه



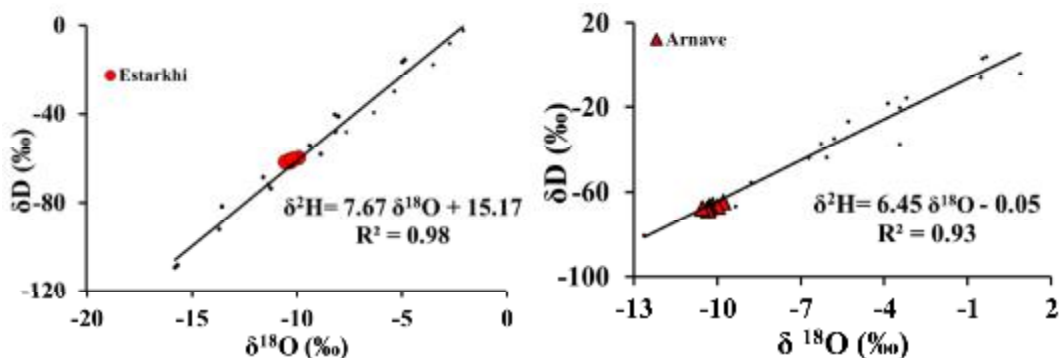
شکل ۵- بررسی پارامترهای فیزیکو- شیمیایی چشمه‌های مورد مطالعه



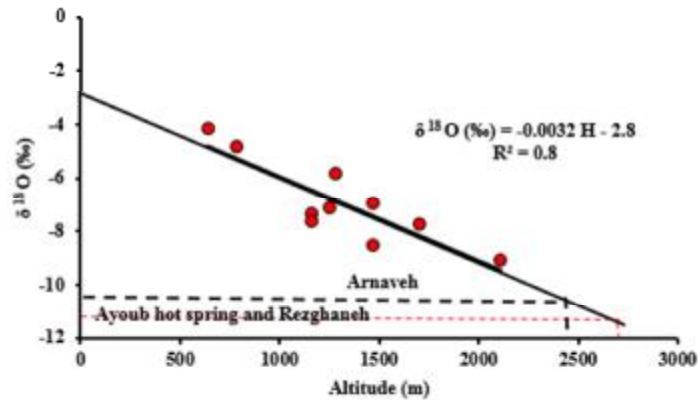
ادامه شکل ۵- بررسی پارامترهای فیزیکی- شیمیایی چشمه‌های مورد مطالعه



شکل ۶- نمودار  $\delta^2\text{H}$  نسبت به  $\delta^{18}\text{O}$  چشمه‌های مورد مطالعه نسبت به خط آب جوی محدوده چشمه‌های مورد مطالعه (LMWL near spring)، خط آب جوی جهانی (GMWL) و خط آب جوی مدیترانه‌ای (MMWL)



شکل ۷- نمودار  $\delta^2\text{H}$  نسبت به  $\delta^{18}\text{O}$  چشمه الف) اسطرخی نسبت به خط آب جوی اسطرخی ب) ارناره نسبت به خط آب جوی قلعه بربر



شکل ۸ - مقدار میانگین وزنی  $\delta^{18}\text{O}$  بارش و ارتفاع ایستگاه‌ها و پلات مقدار میانگین  $\delta^{18}\text{O}$  چشمه‌ها برای به دست آوردن ارتفاع تغذیه

جدول ۲- ارتفاع تغذیه محاسبه شده بر اساس محتوی ایزوتوپی بارش‌ها و چشمه‌های کارستی منطقه

ارتفاع دهانه چشمه (m)	ارتفاع منطقه تغذیه بر اساس $\delta^{18}\text{O}$ (m)	نام چشمه
۱۶۰۰	۲۷۰۰	سرانی
۸۲۰	۲۲۰۰	ارناوه
۱۳۰۰	۲۶۰۰	رزقانه
۱۷۴۰	۲۳۴۰	اسطرخی
۱۴۷۰	۲۷۰۰	قوردانلو
۱۳۰۰	۲۵۰۰	ایوب

### نتیجه‌گیری

بر اساس پارامترهای فیزیکی شیمیایی، افزایش هدایت الکتریکی آب چشمه‌ها می‌تواند نتیجه بیرون رانده شدن آب‌های موجود در زون اپی‌کارست و شکستگی‌های ریز آبخوان کارستی با زمان ماندگاری بالا باشد که املاح زیادی در خود حل کرده‌اند. رخساره‌های غالب در این آبخوان کارستی، رخساره بیکربناته کلسیک- منیزیک ناشی از انحلال سنگ کربناته و سولفات-کلسیک ناشی از انحلال ژپس و پیریت در چشمه ایوب هستند. در چشمه ارناوه، ایوب و رزقانه، میزان غلظت یون‌های سدیم و پتاسیم نیز وجود اپی‌کارست و لایه‌های شیلی و مارنی زیادتر در حوضه آبرگیر این چشمه‌ها، غالب بودن جریان افشان و زمان ماندگاری زیادتر آب افزایش یافته است. معادله خط بارش ایزوتوپی محدوده چشمه‌ها بر اساس داده‌های برداشت شده به صورت  $\delta^2\text{H} = 7 \delta^{18}\text{O} + 6.32$  است و همه چشمه‌های مورد مطالعه روی خط آب جوی محلی و در نزدیکی خط مدیترانه واقع شده‌اند که می‌توان نتیجه گرفت که بارش‌هایی که باعث تغذیه این چشمه‌ها می‌شوند منشأ جوی دارند که بیشتر از توده‌های هوایی مدیترانه‌ای نشأت می‌گیرند. با توجه به زمین‌شناسی،

مورفولوژی منطقه و بیلان هیدرولوژیکی، مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌های ارناوه، رزقانه، سرانی، قوردانلو و اسطرخی به ترتیب ۱۶۶، ۶۰، ۷، ۳/۵ و ۴۶ کیلومترمربع است که تاقدیس بابابند در محدوده چشمه ارناوه و تاقدیس کونجوخور در محل چشمه سرانی ظرفیت آبدی بالاتری دارند. همچنین ارتفاع به دست آمده از رابطه ایزوتوپی بارش - ارتفاع نیز حوضه آبرگیر چشمه‌ها را تأیید می‌کند.

### سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان شمالی و دانشگاه صنعتی شاهرود به سبب همکاری در راستای راهبرد این پژوهش کمال تشکر را دارند.

### منابع

۱. باقری ر. ۱۳۸۶. پتانسیل فرار آب از ساختگاه سد سیمره. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شیراز. ۱۲۰ ص.
۲. باقری ر. رئیسی ع. زارع م. محمدی ز. بهادری ف. ۱۳۸۶. منشأ چشمه‌های کارستی قسمت شرقی

- isotopic investigation and water quality assessment of groundwater in the Siseb El Alem Nadhour Saouaf aquifer (SANS), northeastern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*. 141: 148-163.
15. Karami G. H. Bagheri R. and Rahimi F. 2016. Determining the groundwater potential recharge zone and karst springs catchment area: Saldoran region, western Iran. *Hydrogeology Journal*. 24(8): 1981-1992.
  16. Karimi H. Raeisi E. and Zare M. 2005. physicochemical time series of karst springs as a tool to differentiate the source of spring water Carbonates and Evaporites. 20(2): 138-147.
  17. Kovacs A. 2005. A quantitative method for the characterisation of karst aquifers based on spring hydrograph analysis. *Journal of hydrology*. 303(1-4):152-160.
  18. Kukacka. M. 2009. Self-organization for the detection of local features. WDS 09 Proceedings of Contributed. 1: 62-67.
  19. Liu J. Chen Z. Zhang Y. Li Z. Zhang L. Liu F. 2016. Stable isotope evidences on sources and mechanisms of groundwater recharge in Hohhot basin, China. *Environmental Earth Sciences*. 75(5): 1-10.
  20. Milanovic. P. 1981. Karst hydrogeology. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA. 434 p.
  21. Mohammadi Z. Bagheri R. and Jahanshahi R. 2010. Hydrogeochemistry and geothermometry of Changanal thermal springs, Zagros region, Iran. *Geothermics*. 39: 242-249.
  22. Raeisi E. 2008. Ground-water storage calculation in karst aquifers with alluvium or no-flow boundaries. *Journal of Cave and Karst Studies*. 70(1): 62-70.
  23. Raeisi E. and Karami G. H. 1996. The governing factors of the physical and hydrochemical characteristics of karst springs. *Carbonates and Evaporates*. 2: 162-168.
  24. Raeisi E. and Karami G. H. 1997. Hydrodynamic of Berghan karst spring as indicators of aquifer characteristics: *Journal of Cave and Karst Studies*. 59(3): 112-118.
  25. Rittenhouse G. 1967. Bromine in oil-field waters and its use in determining possibilities of origin of the seawaters. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 51: 2430-2440.
  26. Schwartz F. W. and Zhang M. 2003. *Fundamental of groundwater*. John Wiley & Sons. Inc.
  - تاقیدیس راوندی با ایزوتوپ‌های  $^2\text{H}$ - $^{18}\text{O}$ ، هیدروشیمیایی و بیلان آب. یازدهمین کنفرانس انجمن زمین‌شناسی ایران، مشهد.
  ۳. شرکت مهندس مشاورهای طوس آب. ۱۳۸۹. نتایج آنالیز عناصر موجود در سازندهای حوضه آبریز سد شیرین‌دره.
  ۴. صدری ب. ۱۳۹۳. بررسی کمی و کیفی منابع آب و رسوبات حوضه آبریز سد شیرین دره (خراسان شمالی). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه فردوسی مشهد. ۱۵۰ ص.
  ۵. کاظمی م. ۱۳۹۳. مطالعه هیدروژئوشیمیایی، علت دمای آب و ارائه مدل مفهومی از شرایط زیر سطحی چشمه آب گرم ایوب پیغمبر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه فردوسی مشهد. ۲۵۶ ص.
  ۶. محمدی بهزاد ح. ر. ۱۳۹۰. شناسایی منشأ تغذیه و بررسی ویژگی‌ها فیزیکی- شیمیایی چشمه کارستی بی بی تلخون. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۲۰۶ ص.
  7. Ahmed M. 1996. Lineament as groundwater exploration guides in hard-rock terranes of arid regions. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 22(1): 108-116.
  8. Ashjari J. 2007. In Influences of anticlinal structure on regional flow, Zagros, Iran. *Journal of Cave and Karst Studies*. 68(3): 118-129.
  9. Bogli A. 1980. *Karst Hydrogeology and Physical Speleology*. New York: Springer. 270 p.
  10. Bonacci O. 1993. Karst Springs Hydrographs as Indicators of Karst Aquifers *Journal of Hydrological Sciences*. 38(1): 24-37.
  11. Clark I. and Fritz P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press. Boca Raton. Fla. 328 p.
  12. Ford D. C. and Williams P. W. 2007 *Karst Geomorphology and Hydrogeology*. Wiley Chichester, 2nd ed. 576 p.
  13. Hamed Y. and Dhahri F. 2013. Hydrogeochemical and isotopic composition of groundwater, with emphasis on sources of salinity, in the aquifer system in northwestern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*. 83: 10-24.
  14. Hamdi M. Faouzi Zagrarni M. Jerbi H. and Tarhouni J. 2018. Hydrogeochemical and