



Hydro geochemistry and Isotopic Investigation of Barudab and Malusan springs of Nahavand area output from Carboniferous-Permian lime stones (Introduce ancients' host rocks in Sanandaj-Sirjan zone in Iran)

V. Kiyani¹, A. Esmaili², F. Alijani³ and S. Kiani⁴*

Abstract

Sanandaj-Sirjan zone is the most dynamic tectonic zone in Iran. The research method of the present study was survey-laboratory. The hydrogeochemical and isotopic properties of Malusan and Barudab springs (Nahavand) and their closest schist springs (Abolfazl and Siadreh) are investigated. To evaluate the water quality of springs, physical properties (electrical conductivity, temperature, TDS, and pH), turbidity, anion concentrations (Nitrate, nitrite, chloride, fluoride, and sulfate), carbonate and bicarbonate, main cations (sodium, potassium, calcium, and manganese), total concentration of 11 poisonous/heavy elements (ferric, arsenic, cadmium, cobalt, copper, zinc, lead, nickel, manganese, mercury and barium) and finally the stable isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ were analyzed. Discharge was measured with a volumetric and flowmetric method at the site. Based on alpha coefficient and field observations the karst of Barudab region is moderate karst and the karst of Malusan region is located between moderate karst and incomplete karst (Merv karst). Also, karst reservoir of Malusan has trinary porosity system due to the existence of cavity porosity and fractures along with primary porosity in synchronic, but karst reservoir of Barudab spring has only primary porosity. Stable oxygen isotopes $\delta^{18}\text{O}$ and deuterium of Barudab spring have concentrations higher than Malusan spring due to high feeding height. Catchment area of the springs is not the same as the surface boundary due to different slopes and drainage is done by stratifications and faults. so origin of karst springs is to some extent influenced by secondary and inter-structural processes, with autogenic recharge. Based on the findings, Malusan and Barudab springs are representatives of the oldest karst reservoirs in Sanandaj-Sirjan zone in Iran.

Keywords: Hydro Geochemistry, Ancients' Host Rocks, Barudab and Malusan Springs, Nahavand Area.

Received: April 11, 2021

Accepted: July 11, 2021

هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی چشمه‌های ملوسان و باروداب (شهرستان نهاوند) خروجی از آهک‌های کربونیفر- پرمین (معرف قدیمی‌ترین مخازن کارستی ناحیه سنندج- سیرجان در ایران)

واحد کیانی^۱، عباس اسماعیلی^{۲*}، فرشاد علیجانی^۳ و سارا کیانی^۴

چکیده

ناحیه سنندج- سیرجان پویاترین پهنه زمین‌ساختی ایران است، در این پژوهش خصوصیات هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی چشمه‌های ملوسان و باروداب (شهرستان نهاوند) و نزدیکترین چشمه‌های شیستی به آنها (ابالفضل باروداب و سیادره ملوسان) بررسی شدند. روش تحقیق پژوهش حاضر میدانی- آزمایشگاهی است؛ ویژگی‌های فیزیکی (دما، اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی و pH)، کدورت، آنیون‌ها (F^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- ، HCO_3^- ، غلظت کل ۱۱ عنصر سمی/سنگین (آهن، آرسنیک، کادمیوم، کبالت، مس، روی، سرب، نیکل، منگنز، جیوه، باریوم)، کاتیون‌های اصلی (Na^+ ، K^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+}) و نهایتاً اکسیژن $\delta^{18}\text{O}$ و دوتریم سنجش گردید. بر اساس ضریب فرود (درجه توسعه کارست) و همچنین مشاهدات میدانی (ژئومورفولوژی، دی، تعداد دهنه خروجی آب و غیره) کارست منطقه باروداب متوسط است و کارست منطقه ملوسان بین کارست متوسط و کارست ناقص (مرو کارست) واقع شده است. همچنین مخزن کارستی چشمه ملوسان به دلیل وجود همزمان تخلخل حفره‌ای و شکستگی‌ها به همراه تخلخل اولیه، دارای سیستم تخلخل سه‌گانه است ولی مخزن کارستی چشمه باروداب صرفاً دارای تخلخل اولیه است. ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن $\delta^{18}\text{O}$ و دوتریم چشمه باروداب به علت ارتفاع تغذیه بالا دارای غلظت بالاتری از چشمه ملوسان است، به دلیل تفاوت شیب، حوزه آبریز چشمه‌ها با مرز سطحی حوزه آبریز یکسان نیست و منشأ چشمه‌های کارستی متأثر از فرآیندهای ثانویه و بین سازندی است (تغذیه خارج از مرز آبریز توسط لایه‌بندی‌ها و گسل‌ها) که نشان دهنده حالت اوتوژنیک (تغذیه خود بستر) هستند که طبق بررسی‌های زمین‌شناختی، تصاویر ماهواره‌ای و مطالعات میدانی چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان از سنگ مخزن دوران کربونیفر- پرمین منشأ گرفتند که معرف قدیمی‌ترین مخازن کارستی ناحیه سنندج- سیرجان در ایران هستند.

کلمات کلیدی: هیدروژئوشیمی، قدیمی‌ترین مخازن کارستی، چشمه‌های ملوسان و باروداب، شهرستان نهاوند.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۴/۲۰

1- Ph.D. Student of Environmental Pollution, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Iran.

2- Professor, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Iran. Email: esmaili@modares.ac.ir

3- Assistant Professor, Faculty of Geology Sciences, Shahid Beheshti University, Iran.

4- Assistant Professor, Faculty of Geographic Sciences, Kharazmi University, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.2.6.9](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.2.6.9)

۱- دانشجوی دکتری آلودگی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، ایران.

۲- استاد دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس، ایران.

۳- استادیار دانشکده علوم زمین دانشگاه شهید بهشتی، ایران.

۴- استادیار دانشکده علوم جغرافیایی دانشگاه خوارزمی، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

(2016) Hassanzadeh and Wernicke اظهار کرد ناحیه سنندج- سیرجان شامل گسترده‌ترین و بهینه‌ترین سوابق حفظ شده از وقایع کلیدی در شکل‌گیری و تکامل دریای تیتیس جدیداً، از زمان تولد آن (در اواخر زمان پالئوزوئیک از طریق برخورد صفحه عربستان با اوراسیا) تاکنون است. (2012) Tavasoli اذعان کردند سنگ آهک‌های با قدمت بیشتر زمین‌شناسی مکان‌های مناسبی برای ایجاد چشمه‌های کارستی است؛ و به همین خاطر اغلب غارهای کشف شده (متأثر از پدیده کارست‌شدگی) مربوط به سنگ آهک‌های دوران‌های اول (پالئوزوئیک) و دوم زمین‌شناسی (مزوزوئیک) هستند. (2016) Owen بر ارتباط آبخوان و مدیریت منابع آب تأکید کردند و رهیافت‌های هیدروژئوشیمی و ویژگی‌های ایزوتوپی مرتبط با املاح آب زیرزمینی را به عنوان شاخص مطالعات آبخوان پیشنهاد کردند. (Qian et al. 2012) به منظور بررسی فرآیندهای هیدروشیمیایی آب زیرزمینی مناطق کارستی دشت هوایی چین به این نتیجه رسیدند علت افزایش غلظت کلراید و جامدات محلول و شور شدن آب منطقه جریان آب پایدار (کم تحرک) می‌باشد و آن هم به دلیل پایین بودن سطح آب زیرزمینی منطقه است. (2008) Simsek et al. به منظور بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمی و هیدرولوژی مناطق کارستی ترکیه نشان دادند که بین هدایت الکتریکی و ارتفاع محل نمونه‌برداری رابطه عکس وجود دارد به طوری که مناطق دارای ارتفاع بیشتر هدایت الکتریکی کمتری دارند؛ همچنین اظهار کردند چشمه‌های با دبی بالا از سنگ آهک دگر جا^۳ منشأ می‌گیرند، در حالی که چشمه‌های با دبی پایین‌تر حاصل برهم کنش سنگ‌های آهک و سنگ رس هستند. طبق تحقیقات (2017) Gil-Márquez et al. ارتفاع از سطح دریا و میزان معدنی شدن (غلظت املاح) رابطه وجود دارد بطوری که چشمه‌های ارتفاع پایین‌تر جریان‌های آب زیرزمینی با زمان ماند طولانی‌تر را تخلیه می‌کنند. (2011) Keshavarzi et al. اظهار کردند غلظت بالای Cl و Na در نمونه چشمه تراورتن (غرب ایران) به همراه دیگر فرایندهای هیدروژئوشیمی شاخص، مؤید چرخش عمیق آب زیرزمینی در بسترهای آتشفشانی است. (2014) Nazari and Abbasnejad به منظور بررسی منشأ و پراکنش آرسنیک در دشت راین (جنوب کرمان) به این نتیجه رسیدند دامنه تغییرات غلظت آرسنیک در منطقه از ۰/۱ تا ۰/۸ ppb تا ۲۰۴ متغییر است و آرسنیک در منطقه با pH همبستگی بالایی نشان می‌دهد؛ نهایتاً دو عامل تزریق آب‌های گرمابی به سفره آب زیرزمینی و واجذب از اکسید و هیدرواکسیدهای آهن را به عنوان عوامل اصلی افزایش غلظت آرسنیک در این دشت معرفی کردند. از طرفی (2008) Simsek et al. در مطالعه‌ای در مناطق کارستی ترکیه منشأ آرسنیک در چشمه‌های با ارتفاع مظهر بالا که عوارض انسانی (صنایع و مناطق مسکونی) مشهود نیست را مربوط به سنگ‌های رس حاوی کانی

منابع آب شیرین در رسوبات آبرفتی در حال حاضر برای تأمین نیازهای فزاینده کافی نیست، از طرفی به دلیل کیفیت منابع آب کارستی، منابع آب موجود در این سازندها نیز مورد توجه جدی برای مصرف شرب قرار گرفته است (Geological Survey of Iran, 2021). حدود ۲۵ درصد جمعیت جهان از منابع آب کارستی برای شرب استفاده می‌کنند (Xu et al., 2018)، از این رو ارزیابی کیفیت منابع آب شرب این سازندها اجتناب‌ناپذیر است. سرزمین‌های کارستی ۱۲ درصد سطح کره زمین (Husic et al., 2017) و حدود ۱۲ درصد از سطح کل ایران (Geological Survey of Iran, 2021) را تشکیل می‌دهند. با توجه به اینکه در این تحقیق چشمه‌های سنندج- سیرجان بررسی می‌شوند باید اذعان کرد (Ebrahimi and Seief, 2016): مناطق کارستی سنندج- سیرجان ۱۷ درصد کل نواحی کارستی ایران را به خود اختصاص داده‌اند که مطالعه و پایش اغلب چشمه‌های مذکور به دلیل مصرف دائمی برای شرب از نظر سلامت مصرف کنندگان اهمیت دارد. سنندج- سیرجان باریکه‌ای از جنوب غربی ایران است که در بلافضل شمال شرقی راندگی اصلی زاگرس قرار دارد. ترتیب رسوبات، چارچوب زمین‌ساختی و به ویژه رویدادهای زمین‌ساختی و فعالیت‌های ماگمایی- دگرگونی سبب شده تا گروهی بزرگ از زمین‌شناسان، ویژگی‌های سنندج- سیرجان را با مناطق پرتحرک مرکز و شمال ایران قیاس کرده و آن را ناحیه فرعی از ایران میانی بدانند. در زون سنندج- سیرجان، پدیده‌های دگرگونی و ماگماتیسیم هم‌آهنگ با فازهای زمین‌ساختی شناخته شده در مقیاس جهانی در بیشترین مقدار است. به همین خاطر، این زون پویاترین پهنة زمین‌ساختی ایران است.

به منظور دستیابی به اطلاعات بیشتر بررسی تاریخ زمین‌شناسی چشمه‌های کارستی اهمیت بسزایی دارد. بطور کلی زمین را به ۱۱ دوره تقسیم‌بندی می‌کنند (Sedaghat, 2003): دوره کربونیفر و پرمین به ترتیب پنجمین و ششمین دوره آن هستند که ۱۱۵ میلیون سال طول کشیدند (وقوع دوره کربونیفر از ۳۶۰ تا ۲۸۶ میلیون سال پیش و دوره پرمین از ۲۸۶ تا ۲۴۵ میلیون سال پیش بوده است). واحد کربونیفر- پرمین (CP^۱) کهن‌ترین واحد سنگ چینه‌ای دوران پالئوزوئیک^۱ که در شهرستان نهاوند شناخته شده است شامل ردیفی از سنگ آهک نازک لایه همراه با میان لایه‌هایی از سنگ ماسه قهوه‌ای و بخش دیگری از آن به صورت سنگ ماسه درشت دانه و سنگ آهک آواری همراه با مرجان، کرینوئید و خرده‌هایی از صدف گاستروپود است.

طبقه‌بندی آن بر اساس سن زمین‌شناسی را نشان می‌دهد و جدول ۱ هم جنس واحدهای زمین‌شناسی مظهر/سنگ مخزن چشمه‌ها را بر اساس نقشه زمین‌شناسی و مشاهدات صحرائی تشریح کرده است.

با توجه به اینکه در ناحیه سندرچ- سیرجان فقط شیست‌های دگرگونه وجود دارند که در تماس با آهک‌ها هستند و به علت کانه‌زایی ترکیبات فلزی و عناصر فرعی (یا نادر) را در آبخوان‌های کارستی این زون وارد می‌کنند؛ بنابراین جهت مقایسه ترکیبات چشمه‌ها در این ناحیه انتظار می‌رود منشأ یون‌هایی فرعی و کمیاب که در ناحیه سندرچ- سیرجان هستند را با نمونه‌برداری و تحلیل چشمه‌های شیستی مشخص کرد. با استناد بازدید میدانی سه دهنه چشمه شیستی با فواصل ۱، ۲ و ۲ کیلومتر با دبی متوسط ۰/۵، ۲ و ۳ لیتر بر ثانیه در نزدیکی چشمه باروداب از سنگ شیست خارج می‌شود که به منظور مقایسه از چشمه ابالفصل به علت دبی بیشتر نسبت به سایر چشمه‌های شیستی و ارتفاع پایین‌تر (نسبت به چشمه کارستی باروداب) نمونه‌برداری شد. ضمناً از تنها چشمه شیستی نزدیک چشمه ملوسان (سیادره) هم نمونه‌برداری شد. شیست نوعی سنگ دگرگونی است که در اطراف چشمه ابالفصل و چشمه سیادره و همچنین چشمه قشلاق نجف شهرستان نهاوند به وفور دیده می‌شوند (خصوصاً شیست سبز). موضوع اصلی پژوهش حاضر چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان (شکل ۲) در محدوده شمالی شهرستان نهاوند است که از چند سده گذشته تا کنون آب شرب و کشاورزی این روستاها و روستاهای پایین‌دست را تأمین می‌کنند.

چشمه- قنات سیادره در مطالعه حاضر که نوعی چشمه شیستی است آب شرب یک روستا با همین نام را تأمین می‌کند. علت نام‌گذاری چشمه سیادره هم واقع شدن در امتداد دره‌ای است که به علت بودن وفور سنگ شیست در منطقه از دور دست به رنگ سیاه به نظر می‌رسد و به همین خاطر این منطقه به سیادره مشهور است؛ لازم به ذکر است گاهی افراد بومی به منظور دستیابی به آب بیشتر چشمه‌ها را به سمت منبع تغذیه حفر می‌کردند که طول گالری آنها زیاد نبوده و اصطلاح چشمه- قنات را می‌توان برای آنها به کار برد که بر اساس وضعیت زمین‌شناختی مظهر چشمه می‌توان آنها را نام‌گذاری کرد. جدول ۲ ویژگی‌های هیدروژئولوژیک و مختصات چشمه‌ها را نشان می‌دهد.

تغذیه اولیه اغلب چشمه‌ها به دلیل بالا بودن تراز آب زیرزمینی منطقه است که به علت برخورد با لایه‌های نفوذناپذیر در سطح زمین جاری می‌شوند، لذا در جدول ۲ تغذیه ثانویه چشمه‌های مورد مطالعه بر اساس تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی آمده است.

سولفات اکسید دانستند. (Nadir et al. 2018) به منظور شناسایی ناهنجاری‌های آرسنیک در حوضه سد سهند از فنون شبیه‌سازی نرم مبتنی بر خطر استفاده کردند و اذعان کردند این چارچوب یک مدل ادراکی از سیستم فیزیکی است که در آن آرسنیک با ریشه‌های ژئوتکنیک پخش می‌شود و از طریق شکستگی‌های گسترده (ایجاد شده در طول دوره میوسن) به سازندها وارد شده است. (Alimoradi et al. 2021) با استفاده از خصوصیات هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی بمنظور تعیین منشأ و سازوکارهای تشکیل چشمه‌های گوگردی و آبگرم استان ایلام را استفاده کردند و نشان دادند که گسل‌های عمیق موجود باعث ارتباط هیدرولیکی سازندهای کارستی ایلام و سروک با سازند تبخیری قدیمی و زیرین شده‌اند و اذعان کردند دمای بالای چشمه‌ها به دلیل گردش عمیق آب‌های نفوذی حاصل از ریزش‌های جوی در امتداد شکستگی‌ها و گسل‌ها می‌باشد.

با بررسی انجام شده تاکنون (تابستان ۱۴۰۰) تا جایی که دسترسی اطلاعات، گزارشات و مقالات الکترونیکی و غیر الکترونیکی امکان‌پذیر بود، مطالعه‌ای در خصوص چشمه‌های منشأ گرفته از سنگ مخزن دوران کربونیفر- پرمین در ایران گزارش نشده بود؛ لذا نوآوری پژوهش حاضر بررسی دو دهنه چشمه معرف قدیمی‌ترین مخزن کارستی ناحیه سندرچ- سیرجان در ایران با تلفیق فراسنج‌های فیزیکوشیمیایی، هیدرولوژی، ایزوتوپی، داده‌های زمین‌شناسی و مطالعات میدانی است (در منطقه مورد مطالعه تا کنون چنین مطالعه جامعی خصوصاً سنجش ایزوتوپی انجام نشده بود). لازم بذکر است بحث قدیمی‌ترین در این گزارش مربوط به زمان ماندآب^۴ یا سن آب چشمه^۵ نیست، بلکه مربوطه به قدمت شکل‌گیری سنگ مخزنی است که چشمه از آن منشأ گرفته است.

۲- مواد و روشها

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

دشت نهاوند از نظر زمین‌شناختی در محدوده بین دو زون معروف ایران قرار گرفته، یکی رشته کوه‌های زاگرس مرتفع در جنوب استان همدان (گرین نهاوند) و دیگری توده بزرگ باتولیت الوند که متأثر از فعالیت‌های آتشفشانی است و به موازات رشته کوه‌های زاگرس کشیده شده است (تحت عنوان زون سندرچ- سیرجان) که در واقع این دشت زون سندرچ- سیرجان^۶ را از زون زاگرس چین‌خورده (مرتفع)^۷ در شهرستان نهاوند جدا می‌کند (Alayi Taleghani, 2011). شکل ۱ موقعیت منطقه مور مطالعه (شهرستان نهاوند) در غرب ایران و

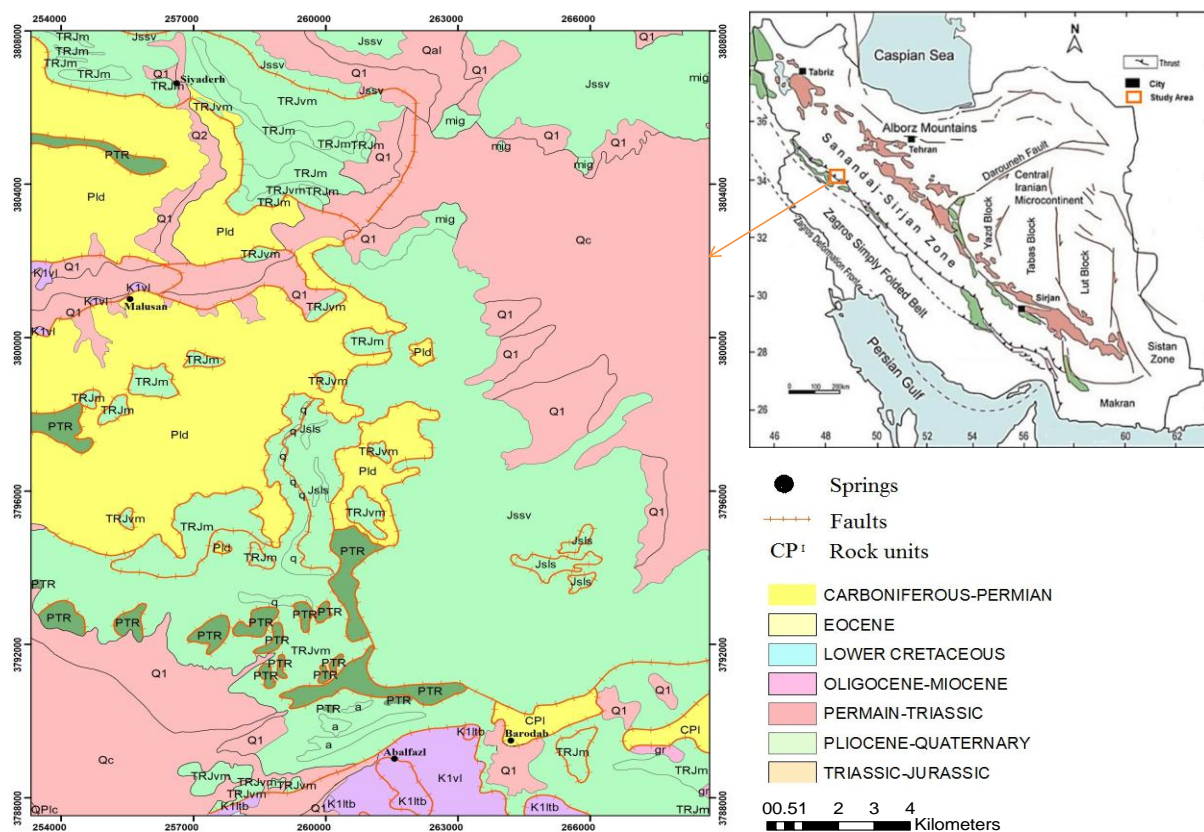


Fig. 1- Location of the study area (Nahavand) in western of Iran and its age-based geological map
 شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه (شهرستان نهاوند) در غرب ایران و نقشه زمین شناسی آن بر اساس سن

Table 1- Description of geological units of output/host rock of the springs using the age-based geological map and field investigation

جدول ۱- شرح واحدهای زمین شناسی مظهر/سنگ مخزن چشمه‌ها بر اساس نقشه زمین شناسی و مشاهدات صحرایی

Spring name	Rock units	Description of main geological units
Barodab	CP ¹	Thinly-bedded, detritic limestones with corals, crinoids and gastropoda, interbedded with reddish brown locally coarse-grained sandstones
Abalfazl	K1V1	Red to purple pyroclastic rocks composed of porphyritic and non-porphyritic dacitic to andesitic fragments mixed with recrystallized limestones of lower Cretaceous age
Malusan	Pld	Dark gray to black thinly-bedded recrystallized, fossiliferous (Fusulinidae, Crinoids and Corals) limestones, buff massive dolomites and dolomitic limestones
Siyaderh	TRJVM	Interbedded metavolcanics (lava flows and tuffs) and thin bedded, well foliated marbles with thin, upward increasing slate layers

(تریاس- ژوراسیک) و آهک‌های سبتر لایه کرتاسه پائین قرار گرفته است (Mahdavi, 1994). اطراف مظهر چشمه‌های ابالفصل و سیادره به شعاع حدود ۸ کیلومتر متشکل از سنگ شیست معمولی (بنفش) است، به همین خاطر در جدول مذکور از عبارات شیست منطقه‌ای استفاده شده است.

مظهر چشمه‌های کارستی باروداب در واحد سنگ‌شناختی CP¹ واقع شده است که مربوط به دوره کربونیفر- پرمین هستند (شکل ۲)، بر اساس مطالعات میدانی و تطبیق با نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر هوایی موجود هم خروجی این چشمه‌ها از آهک‌های کربونیفر- پرمین است. در برشی نزدیک چشمه باروداب واحد کربونیفر- پرمین با همبری گسلی در مجاورت سری اسلیت‌های سیاه^۸ و توده ولکانیک



Fig. 2- Schematic of Malusan spring (right) and Barudab spring (left)-direct view to North West
شکل ۲- نمای چشمه ملوسان (راست) و چشمه باروداب (چپ)- دید به سمت شمال غرب

Table 2- Age of host rock and hydro geological furthers of the springs

جدول ۲- سن سنگ مخزن و ویژگی‌های هیدروژئولوژیک چشمه‌ها

Spring name	Host rock	Geological age	Discharge (l/s)	Secondary Recharge
Barudab	Karst	Carboniferous-Permian	80	Upstream springs and river
Abalfazl	Schist	Lower Cretaceous	3	Upstream springs
Malusan	Karst	Carboniferous-Permian	200	Falul and seasonal river
Siyaderh	Schist	Triassic-Jurassic	8	seasonal river

آلاینده‌های غیرآلی و عناصر سمی/سنگین است که حتی در میزان خیلی کم بر روی سلامت انسان‌ها تأثیر گذارند؛ لازم به ذکر است میزان ایزوتوپ‌های پایدار چشمه‌های کارستی هم سنجش گردید.

۲-۲- روش جمع‌آوری و آنالیز داده‌ها

در تحقیق حاضر از دو ظرف ۵۰۰ میلی‌لیتری برای سنجش کاتیون‌ها و آنیون‌ها و از ظرف ۷۰ میلی‌لیتری برای سنجش ایزوتوپی و عناصر سمی/سنگین استفاده شد. در محل نمونه‌برداری پس از دو بار شستشو ظروف پلاستیکی، نمونه آب از مظهر چشمه‌ها برداشت شد. شایان ذکر است طبق استاندارد، ویژگی‌های فیزیکی (دما، اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی و pH) با استفاده از مولتی متر HQ40d در محل سنجش شد؛ کدورت نمونه‌ها با استفاده از دستگاه کدورت‌سنج HACH 2100N قرائت شد. برای سایر آزمایشات ظرف نمونه‌ها در طی مسیر در جعبه یخ^۱ و در آزمایشگاه ابتدا آنیون‌های (SO₄⁻، F⁻، NO₂⁻، NO₃⁻) با دستگاه اسپکتروفوتومتر DR5000 سنجش شد و سپس HCO₃⁻، کلیاییت و Cl⁻ هم با روش تیتراسیون محاسبه شد. غلظت کل ۱۱ عنصر سمی/سنگین (آهن، آرسنیک، کادمیوم، کبالت، مس، روی، سرب، نیکل، منگنز، جیوه، باریوم) و کاتیون‌های اصلی (Mg²⁺، Na⁺، K⁺، Ca²⁺) با استفاده از دستگاه ICP-MS دانشگاه علوم

روش تحقیق پژوهش حاضر میدانی- آزمایشگاهی است و بررسی چشمه‌های معرف قدیمی‌ترین مخزن کارستی ناحیه سنندج- سیرجان در ایران با تلفیق فراسنج‌های فیزیکوشیمیایی، هیدرولوژی، ایزوتوپی، داده‌های زمین‌شناسی و مطالعات میدانی انجام شد. ابتدا با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهرستان نهاوند و همچنین مشاهدات میدانی، عوارض تأثیرگذار در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی برداشت گردید. در واقع علاوه بر اطلاعات هیدروشناسی، نقشه زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی^۲)، لایه‌بندی شیب، شکستگی و گسل) هم در تفکیک حوزه آبریز چشمه‌ها (شکل ۵) بمنظور تمایز آهک‌ها با مرز سطحی حوزه آبریز در نظر گرفته شد (به دلیل کارستی بودن منطقه). در مرحله بعد اقدام به تهیه مستندات و نمونه‌گیری فیزیکوشیمیایی و ایزوتوپی چشمه‌های منتخب گردید. نمونه‌برداری در اوایل آبان (به دلیل پایین‌ترین حد سطح آب زیرزمینی طی سال) به عنوان فصل خشک و در اوایل اردیبهشت (به دلیل بیشترین تأثیر تحت شرایط بارندگی و حداکثر دبی طی سال) به عنوان فصل تر از ۲ دهانه چشمه کارستی باروداب و ملوسان و ۲ دهانه چشمه شیبی نزدیک آنها انجام شد (۴ دهانه چشمه). از فراسنج‌های مختلف فیزیکوشیمیایی آب بر اساس تأثیرات آن بر روی کیفیت آب و همچنین مصرف کننده استفاده شد؛ این فراسنج‌ها شامل فراسنج‌های فیزیکوشیمیایی،

شرب و نوع رخساره آب زیرزمینی) بر اساس اطلاعات موجود مشخص و همبستگی بین ترکیبات آب در طی مطالعات هیدروژئوشیمیایی بررسی شد. در پژوهش حاضر با توجه به اینکه داده‌ها توزیع نرمال نداشتند از ضریب همبستگی ناپارامتریک اسپیرمن (نرم‌افزار SPSS) برای تحلیل آماری و از محیط EXCEL هم برای رسم هیدروگراف، نمودارهای هیدورشمی و منحنی ایزوتوپی استفاده شد. به منظور بررسی صحت سنجش داده‌ها از خطای موازنه یونی استفاده می‌شود؛ در این تحقیق میزان خطای موازنه یونی نتایج سنجش کاتیون‌ها و آنیون‌های چشمه‌های ابالفضل، سیادره، باروداب و ملوسان به ترتیب ۱/۶۲، ۴/۷، ۳/۲ و ۴/۱۳ به دست آمد که با عنایت به اینکه زیر ۵ درصد هستند صحت سنجش داده‌ها مورد تأیید است.

در سال‌های اخیر استفاده از ترکیبات ایزوتوپی دوتریوم و اکسیژن ۱۸ بمنظور تخمین اختلاط ترکیبات منابع کارستی رواج یافته است (Perrin et al., 2003). رابطه بین ترکیب ایزوتوپی بارش و آب زیرزمینی این امکان را به وجود می‌آورد که شرایط آب و هوایی گذشته را با توجه به ترکیب ایزوتوپی بارش‌های بجای مانده از گذشته (آب‌های زیرزمینی) بررسی نمود؛ ترکیب ایزوتوپی آب‌های کارستی به دلیل اینکه منعکس کننده ترکیب ایزوتوپی بارش با آب‌های سطحی می‌باشند در ارتباط مستقیم و یا خیلی نزدیک به خط آب جوی محلی هستند (Mazor, 2004). در این پژوهش هم به منظور بررسی تخمین اختلاط منابع کارستی و منشأ این چشمه‌ها و بررسی سن زمین‌شناسی از ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ و دوتریوم استفاده شد. در همین راستا داده‌های موجود با برخی خطوط جوی ایزوتوپی محلی غرب ایران (Mohammadzadeh and Amiri, 2019) بر اساس هم‌پوشانی زمان نمونه‌برداری با داده‌های بارش آن تحقیقات و نزدیکترین منطقه مطالعاتی به شهرستان نهاوند مقایسه شد و در نهایت خط آب جوی کرد غرب با R^2 حدود ۰/۷۹ به عنوان خط آب جوی منطقه مطالعاتی (شهرستان نهاوند) انتخاب شد:

$$\delta^2H = 6.53 * \delta^{18}O + 5.56 \quad (3)$$

که در آن δ^2H دوتریوم و $\delta^{18}O$ اکسیژن ۱۸ می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی

با توجه به اینکه داده‌های دبی برای دو دهنه چشمه کارستی موجود بود، هیدروگراف فقط برای چشمه‌های کارستی ارائه شد؛ شکل ۳ هیدروگراف چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان در مقابل بارش تجمعی را نشان می‌دهد.

پزشکی تهران سنجش شد و نهایتاً اکسیژن ۱۸ و دوتریوم هم با استفاده از دستگاه اسپکترومتر جرمی MAT250 سازمان انرژی اتمی ایران با ۲ تکرار سنجش گردید و بر اساس میانگین استاندارد آب اقیانوس وین (VSMOW)^{۱۱} تصحیح شدند.

برای پی بردن به وضعیت هیدروژئوشیمیایی از نرم افزار تحلیل کیفیت آب Chemistry استفاده شد. با توجه به اینکه داده‌های دبی فقط برای دو چشمه کارستی موجود بود نسبت به محاسبه ضریب فرود و حجم ذخیره دینامیکی آنها اقدام شد. روش پیشنهادی Mal'and Vojtkova (2012) برای تعیین درجه توسعه یافتگی کارست بر اساس هیدروگراف یکساله طراحی شده است. با استفاده از لگاریتم معادله فوق می‌توان ضریب تخلیه را بشرح ذیل محاسبه نمود:

$$\log Q_t = \log Q_0 - 0.4343t\alpha$$

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0.4343 (t - t_0)} \quad (1)$$

که در آن Q_0 و Q_t به ترتیب میزان تخلیه (دبی، لیتر در ثانیه) در ابتدا و در انتهای دوره اندازه‌گیری و t_0 و t به ترتیب زمان (روز) ابتدا و انتهای دوره اندازه‌گیری است. ضریب ۰/۴۳۴۳ در معادله فوق برای بیان آبدی (مترمکعب بر ثانیه) و زمان (روز) می‌باشد.

برای تعیین مساحت آبخوان‌های کارستی روشهای متعددی از جمله بیلان هیدرولوژی، بده وزنی، ردیابی، درصد نفوذ و غیره جهت تعیین حوزه آبخیز مطرح است؛ در این پژوهش برای تعیین حوزه آبخیز واقعی چشمه‌های کارستی از روش درصد نفوذ استفاده گردیده است:

$$A = V/F.P \quad (2)$$

که در آن A: مساحت (مترمربع)، V: حجم آب نفوذی یا تخلیه سالانه چشمه (مترمکعب)، F: میزان نفوذ (درصد) و P: بارش (متر) هستند. در بسیاری موارد لازم است با استفاده از نظر کارشناسی و مقایسه منطقه مورد مطالعه با مناطق مشابه (که ضریب نفوذ با دقت محاسبه شده) نسبت به تخمین این ضریب اقدام نمود. ضریب نفوذپذیری به عوامل متعددی از قبیل شدت، میزان و نوع نزولات جوی سیستم درزها گسترش و عمق بازشدگی درزها، درصد پوشش خاک، شیب توپوگرافی و وجود یا عدم وجود آب‌فروچاله‌ها بستگی دارد و بر این اساس بین ۴۰ تا ۹۰ درصد متغیر است. بهرحال چون منطقه کارستی است علاوه بر بررسی سازند، نقشه زمین‌شناسی و تصاویر هوایی موجود هم در تفکیک حوزه آبخیز واقعی چشمه‌ها، جهت تفکیک آهک‌ها با مرز سطحی حوزه آبریز در نظر گرفته شود.

ابتدا ویژگی‌های آبخوان منطقه (سنگ کف یا مخزن، دبی منابع آب

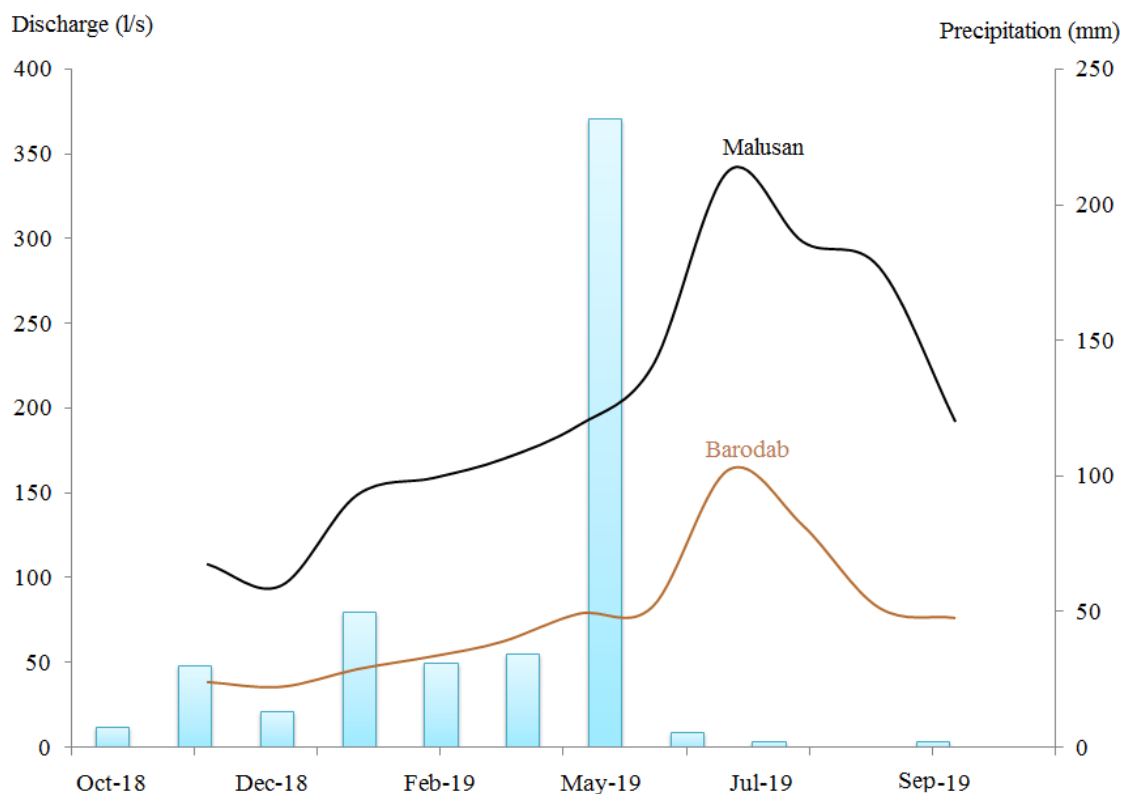


Fig. 3- Hydrograph of karst springs of Barudab and Malusan versus the accumulative precipitation

شکل ۳- هیدروگراف چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان در مقابل بارش تجمعی

با استناد به مشاهدات میدانی میدانی و همچنان که در شکل ۱ مشاهده می‌شود (نقشه‌های موجود سازمان زمین‌شناسی) همه چشمه‌ها به غیر از چشمه سیادره در نزدیکی گسل واقع شده‌اند و احتمالاً از طریق گسل هم تغذیه می‌شوند. از طرفی به زیاد بودن سرعت جریان چشمه باروداب تأییدی بر نوع جریان مجرای آن است؛ چشمه ملوسان دارای ۵ مظهر (خروجی) با فواصل تقریباً ده متری از هم هستند که در چهار مظهر سرعت جریان بالا و در یک مظهر سرعت جریان پایین است که نوع جریان آن را می‌توان مجرای - افشان نامید (جدول ۴). شکل ۴ منحنی فرود چشمه‌های کارستی را نشان می‌دهد.

حجم ذخیره دینامیکی چشمه ملوسان حدود ۴ برابر بیشتر از چشمه باروداب است.

مساحت آبخوان‌های کارستی به شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه بستگی دارد و در زمان و مکان تغییر می‌کند؛ در واقع برای تعیین مرز حوضه آبریز نمی‌توان تعریف خاصی ارائه کرد چون ممکن است تغذیه خارج از مرز آبریز (توسط لایه‌بندی‌ها، گسل‌ها و غیره) صورت گیرد. همچنین چون منطقه کارستی است علاوه بر بررسی سازند باید نقشه زمین‌شناسی هم در تفکیک حوضه آبریز چشمه‌ها جهت تفکیک آهک‌ها با مرز سطحی حوضه آبریز در نظر گرفته شود. مساحت آبریز ظاهری چشمه بر اساس مرز سطحی حوضه آبریز محاسبه شده است و مساحت آبریز واقعی هم با استفاده از روش درصد نفوذ برآورد گردیده است (جدول ۳)؛ متوسط بارندگی ناحیه سندج- سیرجان با توجه به منحنی ارتفاع- بارندگی ۵۰۰ میلی‌متر برآورد گردیده است.

Table 3- Surface and real catchment of springs
جدول ۳- مساحت آبریز ظاهری و واقعی چشمه‌های مورد مطالعه

Spring name	Surface catchment (km ²)	Penetrate percent	Annual discharge (m ³)	Real catchment (km ²)
Barudab	0.63	50	2522880	100.9
Abalfazl	Non detect	45	94608	-
Malusan	8.72	60	6307200	210.2
Siyaderh	Non detect	55	252288	-

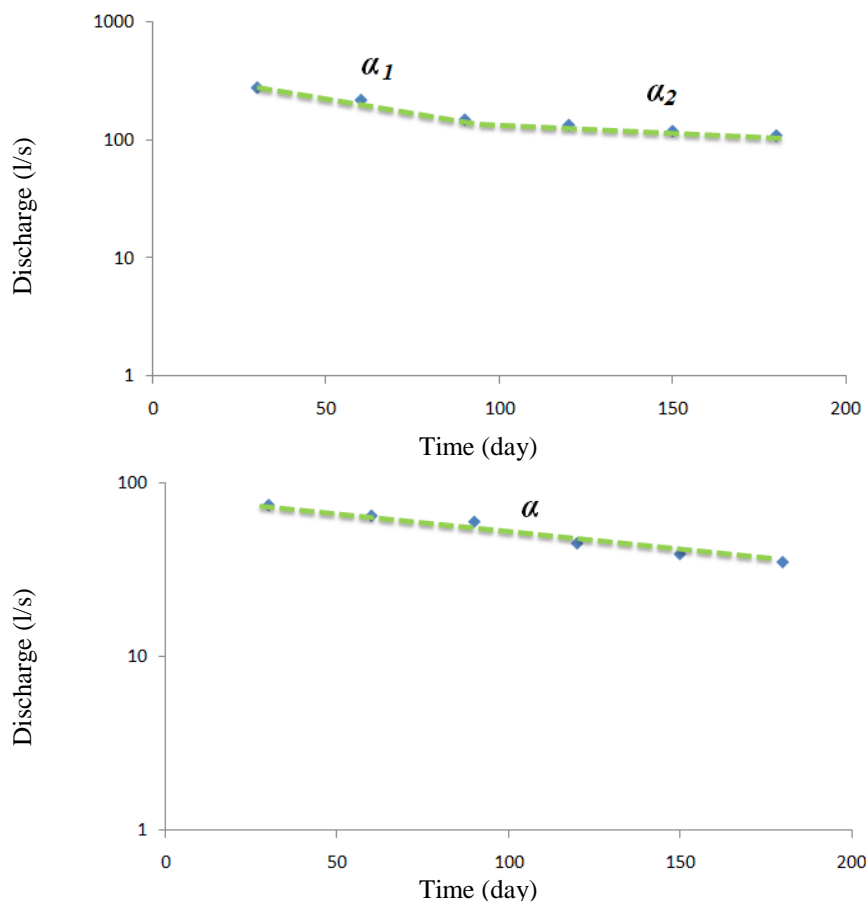


Fig. 4- Recession curve of Malusan (right) and Barudab (left) springs in water-year 2018-2019
 شکل ۴- منحنی فرود چشمه ملوسان (راست) و چشمه باروداب (چپ) در سال آبی ۹۷-۹۸

Table 4- Recession coefficient and dynamic storage volume of the springs

جدول ۴- ضریب فرود و حجم ذخیره دینامیکی چشمه‌ها

Springs	Recession coefficient	Dynamic storage volume (mm ³)	Karst degree	Type of Current	Description of Karst classification	Type of porosity
Barudab	0.005242	1.3	2	Conduit	Combination of two or more sub regimes with different discharge. Aquifer with irregularly developed fissure network, with majority of open macro fissures, also with possible presence of karst conduits of limited extent. In extreme cases, even short-term	Trinary (primary, cavity and fractures)
Malusan	0.009554 0.004607	5.1	3.7	Conduit-fissure	Single laminar sub-regime. Tectonic faults filled with crushed material with higher permeability and lower buffering capability in relation to discharge. In some cases deeper groundwater circulation	Primary

مشاهده می‌شود در چشمه ملوسان با توجه به اینکه نوع جریان ترکیبی (مجرای- افشان) است، درجه توسعه کارست شدگی بیشتر است، مطالعات میدانی (بررسی‌های ژئومورفولوژیکی) و بررسی نقشه

هر چه ضریب آلفا بالاتر و حجم ذخیره دینامیکی پایین‌تر باشد، درجه کارست‌شدگی بیشتر است و در اغلب مواقع جریان مجرای درجه توسعه کارست‌شدگی بیشتری دارد؛ ولی همچنان که در جدول ۴

امکان پذیر نبود و برای این منظور از داده‌های خطوط جوی محلی غرب کردند غرب بر اساس هم‌پوشانی زمان نمونه‌برداری و نزدیکی آن به منطقه مطالعاتی (شهرستان نهاوند) استفاده شد.

برای بررسی رابطه پارامترهای فیزیکی شیمیایی نمونه‌های آب از ضریب همبستگی استفاده می‌شود که می‌تواند نشان دهنده منشأ مواد محلول و فرآیندهای تشکیل آب مورد نظر باشد (Karimi et al., 2017): جدول ۶ و ۷ به ترتیب همبستگی پیرسون بین داده‌های فصل خشک و تر چشمه‌های کارستی و شیستی را به عنوان نماینده آب زیرزمینی دشت نهاوند (بطور کلی) نشان می‌دهند (داده کافی جهت تمایز چشمه‌های کارستی و شیستی بصورت مجزا وجود نداشت).

بر اساس نتایج تحلیل همبستگی اسپیرمن در فصل تر بین سولفات-سدیم رابطه مستقیم، و بین کلر-روی و نیتريت-باريوم رابطه معکوس در سطح معنی‌داری یک درصد وجود دارد؛ همچنین در فصل تر بین دما-کلر، کدورت-کلسیم، کدورت-سختی، سولفات-منیزیم و منیزیم-نیکل رابطه مستقیم در سطح معنی‌داری یک درصد وجود دارد. آنچه در اینجا حائز اهمیت است رابطه معکوس کلر-روی در فصل خشک و رابطه مستقیم نیکل-منیزیم در فصل تر است؛ در این خصوص می‌توان گفت انحلال سنگ دولومیت ناخالص (دارای ناخالص زیاد) منجر به آزاد شدن منیزیم و احتمالاً نیکل با هم شده است، البته وجود نیکل با غلظت بالا خود می‌تواند تأییدکننده عمق گردش آب زیرزمینی باشد که بیشترین مقدار مشاهده شده مربوط به چشمه شیستی سیادریه است (جدول ۵).

۳-۳- هیدروژن‌نوشیمی چشمه‌های مطالعاتی

همچنان که از نمودار پایپر (شکل ۵) هم مشخص است چشمه‌های کارستی و شیستی در فصل خشک و تر دارای تیپ بی‌کربناته کلسیک هستند. در چشمه ابالفضل و سیادریه ارتباط بین سنگ و آب زیاد است و باعث افزایش سختی (انحلال سنگ کلسیت و دولومیت و به تبع آن آزاد شدن کلسیم و منیزیم) می‌شود که همین فرآیند طبق جدول ۵ هم تأیید شده است. در مناطق کارستی در صورت وجود دولومیت غالب نسبت Ca/Mg به یک نزدیک می‌شود (Ford & Williams, 2007). همانطور که مشاهده می‌شود جنس سنگ مخزن چشمه‌های باوداب و ملوسان دولومیت-آهکی است و جنس سنگ مخزن چشمه‌های ابالفضل و سیادریه شیست است.

زمین‌شناسی (وجود سنگ آهک و دولومیت بیشتر بر اساس سطح حوزه آبرگیر مطابق جدول ۳ و شکل ۴) تأییدکننده درجه توسعه کارست بیشتر در چشمه ملوسان نسبت به چشمه باروداب است.

با توجه به اینکه نوع بارش در رفتار منحنی فرود مؤثر است (Mirhasani et al., 2018)، نمی‌توان پایین‌تر بودن ضریب فرود در چشمه‌های مورد مطالعه را دلیل بر توسعه کمتر کارست منطقه دانست چرا که طبق بررسی داده‌های هواشناسی بخشی از تغییرات ضریب فرود به علت بارش سیل‌آسای فرودین ۹۸ اتفاق افتاد که در غرب کشور (مخصوصاً در شهرستان نهاوند) بارش بصورت برف اتفاق افتاد؛ در نتیجه با افزایش تغذیه از طریق برف به دلیل کاهش شدت نفوذ، مقدار ضریب نفوذ و به دنبال آن ضریب فرود کاهش یافته است. البته نوع پوشش گیاهی و شیب منطقه، میزان خلل و فرج و غیره هم تا حدودی در این فرآیند تأثیر دارند. لازم به ذکر است مخزن کارستی چشمه ملوسان به دلیل وجود همزمان تخلخل حفره‌ای و شکستگی‌ها به همراه تخلخل اولیه، دارای سیستم تخلخل سه‌گانه است ولی مخزن کارستی چشمه باروداب صرفاً دارای تخلخل اولیه است.

بر اساس ضریب فرود (درجه توسعه کارست) و همچنین مشاهدات میدانی (ژئومورفولوژی، دبی، تعداد دهنه خروجی آب و غیره) با توجه به اینکه سازندهای آهکی اطراف چشمه ملوسان دارای مواد ناخالص (رس) ناچیز تا متوسط هستند و درز و شکاف‌ها نسبتاً یکنواخت توسعه یافته‌اند و چشمه مذکور دارای پنج دهنه خروجی با آبدی مناسب است (جمعاً ۲۰۰ لیتر بر ثانیه) می‌توان اذعان کرد کارست منطقه باروداب کارست متوسط است. همچنین با توجه به اینکه سازندهای آهکی اطراف چشمه باروداب دارای مواد ناخالص (رس) متوسط تا زیاد هستند و درز و شکاف‌ها بخوبی توسعه پیدا نکرده‌اند و چشمه مذکور آبدی نسبتاً کمی است (۸۰ لیتر بر ثانیه) می‌توان اذعان کرد کارست منطقه ملوسان بین کارست متوسط و کارست ناقص (مرو کارست) واقع شده است.

۳-۲- نتایج سنجش داده‌ها و همبستگی آنها

جدول ۵ نتایج آزمایشات فیزیکی شیمیایی، فلزات سنگین و ایزوتوپی را نشان می‌دهد. همچنان که مشاهده می‌شود عبارت <0.049 بطور مثال برای کادمیوم نشان‌دهنده دقت سنجش داده برای عنصر مورد نظر در این محدوده است و در واقع یعنی با دستگاه ICP-MS غیر قابل تشخیص و عمدتاً ناچیز بودند. همچنین لازم به ذکر است امکان سنجش داده‌ها ایزوتوپی بارش جهت ترسیم خط آب جوی منطقه مورد

Table 5- Physicochemical, heavy metal and stable isotope
جدول ۵- نتایج آزمایشات فیزیکیوشیمیایی، فلزات سنگین و ایزوتوپی*

Spring name Parameter / Ion	Barudab		Abalfazl (schistic)		Malusan		Siyaderh (schistic)	
	October 2018	April 2019	October 2018	April 2019	October 2018	April 2019	October 2018	April 2019
Discharge±10%	46	164	2	44	149	340	5	9
Turbidity (NTU)	0.47	2.49	0.89	4.07	1.17	1.14	1.54	1.55
Temperature (°C) ±0.1	14	16.5	15.8	20	17.2	16.7	18	13.4
pH ±0.1	6.1	7.84	5.94	7.43	8.06	8.2	6.38	7.89
EC (µc/cm) ±1	366	401	384	420	267	261	288	325
TDS (mg/l)	225	233	227	225	183	149.5	165.8	202.5
DO (")	7.38	7.68	6	-	7.28	6.36	-	-
Cl (")	17	13.99	-	31.09	17.2	17.72	6	4
F (")	0.79	0.44	1.07	-	0.38	0.25	0.18	0
NO ₂ (")	0.0021	0.0013	-	-	0.003	0.0013	0.0023	0.0025
NO ₃ (")	28.12	27.8	3.9	4.7	9.99	3	13.5	15.2
SO ₄ (")	19.76	7.38	-	21.06	7.68	4.91	4.17	2.94
CO ₃ (")	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO ₃ (")	280	164	200	120	125	190	180	160
Ca (")	31.769	28.767	-	48.09	14.756	12.928	44.403	21.274
Mg (")	19.434	11.753	-	23.08	9.017	8.266	15.165	6.671
Na (")	25.262	20.034	-	19.08	12.872	8.722	9.355	4.992
K (")	0.211	0.791	-	0.39	0.138	0.114	0.284	0.237
Total Hardness	236	162	-	225	98	76	160	160
Alkalinity	262.5	122	192.5	215	73.98	66.32	173.33	80.6
Fe (micro g/l)	59.37	17.885	-	-	42.496	33.443	-	13.75
As (")	<0.179	9.962	-	-	<0.179	<0.179	<0.179	<0.179
Cd (")	<0.049	<0.049	-	-	<0.049	<0.049	<0.049	<0.049
Co (")	<0.043	<0.043	-	-	<0.043	<0.043	<0.043	<0.043
Cu (")	23.6	0.319	-	-	1.776	1.206	25	0.556
Zn (")	24.5	3.516	-	-	24.24	3.4	39.8	9.245
Pb (")	<2.166	<2.166	-	-	<2.166	<2.166	<2.166	<2.166
Ni (")	2.1	2.1	-	-	7.804	1.49	4.5	1.221
Mn (")	<0.066	0.421	-	-	1.949	0.504	0.1	0.536
Hg (")	<0.351	<0.351	-	-	<0.351	<0.351	<0.351	<0.351
Ba (")	22.3	30.024	-	-	6.303	7.385	18.8	11.393
δ ¹⁸ O (‰)± 2%	-7.3	-6.74	-	-	-7.88	-7.15	-	-
δ ² H (‰)± 2%	-43.58	-48.78	-	-	-46.42	-49.29	-	-
Altitude (m)	1884		1803		1598		1973	

شاخص کلر- قلیائیت هم تبادل یونی بین آب زیرزمینی و محیط اطراف را نشان می‌دهد؛ با توجه به مثبت بودن مقادیر مذکور در چشمه کارستی ملوسان و چشمه شیستی ابالفصل در فصل تر می‌توان اذعان کرد بین آب زیرزمینی این چشمه‌ها و محیط اطراف تبادل یون بیشتری برقرار است.

Table 6- Pearson correlation between dry season data
جدول ۶- جدول همبستگی (پیرسون) بین داده‌های فصل خشک

	Turbidity	Temperature	TDS	pH	No ₂	Cl	SO ₄	Hco ₃	Mg	Cu
Temperature	.988*									
F			.966*							
SO ₄		-1*	.998*	-426						
Hco ₃							-.999*			
Na		-1*		-434			1**			
Hardness								.997*		
Zn									-1**	
Mn										-.997*
Ba										.999*

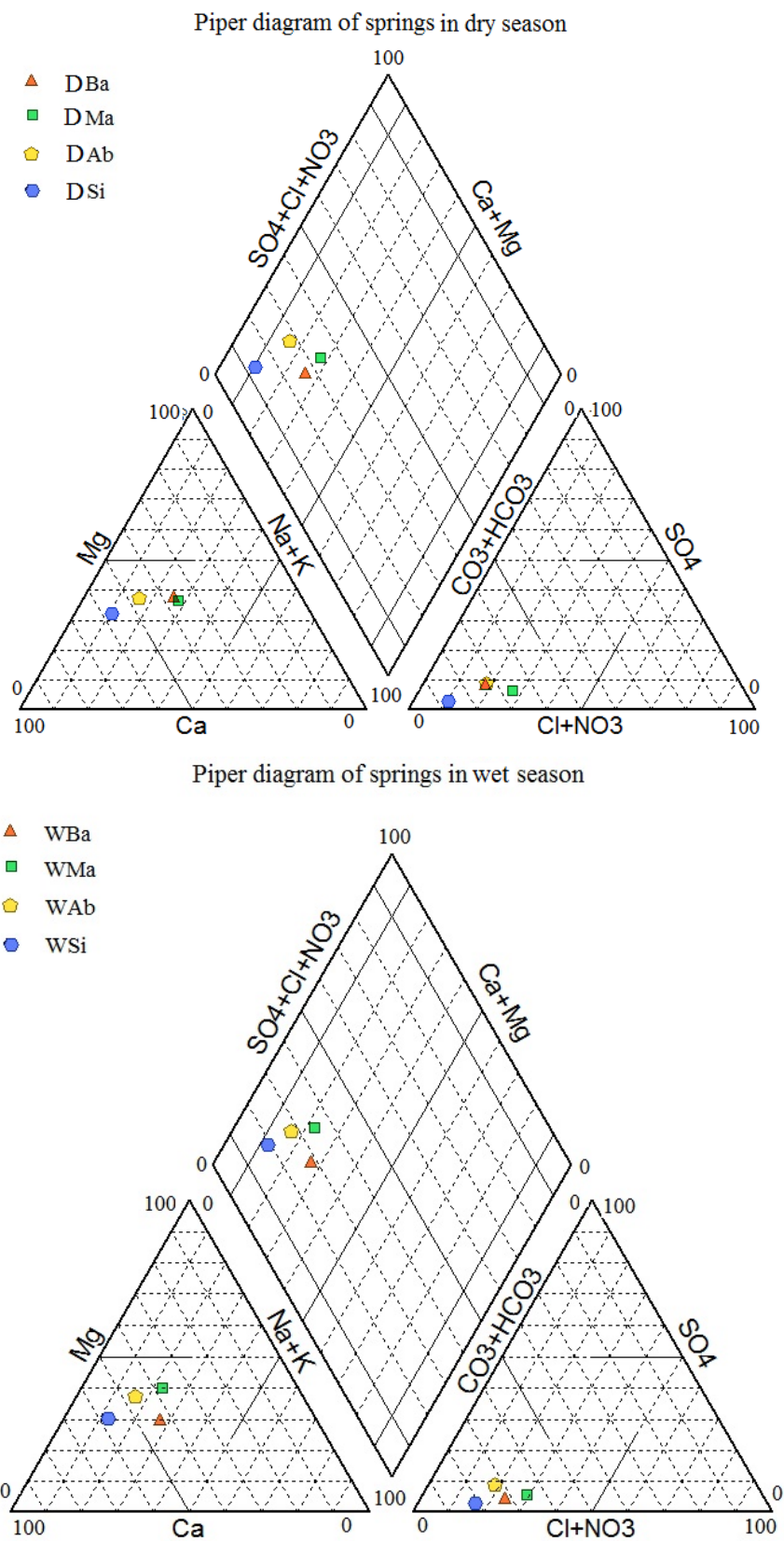


Fig. 5- Piper diagram of the springs in dry season (above) and wet season (down)
 شکل ۵- نمودار پایپر چشمه‌ها در فصل خشک (بالا) و فصل تر (پایین)

Table 7- Pearson correlation between wet season data
جدول ۷- جدول همبستگی (پیرسون) بین داده‌های فصل تر

	Turbidity	Temperature	pH	No ₂	SO ₄	Hco ₃	Ca	Mg	Na	K	Ni
pH	-.957*										
Cl		.992**									
No ₂		-.999*									
Hco ₃	.989*		-.968*								
Ca	.994**		-.982*			.990*					
Mg	.965*				.997**						
Alkalinity			-.981*								
Hardness	.996**				.972*	.973*	.989*	.982*			
Zn		-.999*		1*							
Ni								1**	.998*		
Mn								-.999*	-.999*		-1*
Ba										1**	

Table 8- Host rock, water type and Index ratios (me/l)
جدول ۸- سنگ مخزن چشمه‌ها، تیپ آب و نسبت‌های معرف (میلی اکی والان/لیتر)

Spring name	Ca/Mg	Host rock	Index of cloroalkalinity	Na/Ca	Water type
Barodab (dry)	0.98	Dolomite-Calcite	-1.34	0.15	Bicarbonate-Calcite
Barodab (wet)	1.47	Dolomite-Calcite	-1.26	0.18	Bicarbonate-Calcite
Malusan (dry)	0.98	Dolomite	-0.16	0.04	Bicarbonate-Calcite
Malusan (wet)	0.96	Dolomite	0.23	0.23	Bicarbonate-Calcite
Abalfazl (wet)	1.25	Schist-Calcite	0.04	0.04	Bicarbonate-Calcite
Siyaderh (dry)	1.76	Schist-Calcite	-1.45	0.07	Bicarbonate-Calcite
Siyaderh (wet)	1.91	Schist-Calcite	-0.98	0.06	Bicarbonate-Calcite

موضوع هم با توجه به جریان کم آب نسبت به دیگر چشمه‌های کارستی زاگرس تا حدودی توجیه‌پذیر است.

۳-۴- تفسیر نتایج هیدروشیمی و ایزوتوپی

زمان ماندگاری (شاخص سن آب چشمه) یک نشان‌گر مطمئن از کانی‌سازی منیزیم است به شرطی که حوزه آبخیز شامل حاوی مواد معدنی منیزیم‌دار باشد؛ با توجه به این که Mg^{2+} آرامتر از Ca^{2+} آزاد می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که افزایش غلظت منیزیم و یا افزایش نسبت Mg/Ca به سن (زمان ماند) بیشتر آب اشاره دارد (Goldscheider and Drew, 2007). بر اساس این شاخص، سن آب چشمه‌ها به ترتیب زیاد به کم عبارتند از ملوسان، باروداب، ابالفصل و سیادره؛ همچنین با توجه به قرارگیری مظهر چشمه‌ها در سنگ کربونیفر- پرمین انتظار می‌رود چشمه‌های کارستی قدمت بیشتری داشته باشند.

همچنان که در جدول ۳ مشاهده می‌شود با افزایش دبی از فصل خشک به فصل تر غلظت گروه طبیعی (یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم، کلر، فلوراید و سولفات) کاهش یافت است و غلظت گروه غیر طبیعی (نیترات) در چشمه‌های کارستی کاهش و در چشمه‌های

ولی در چشمه کارستی باروداب و چشمه شیبستی سیادره این نسبت منفی است که نشان می‌دهد بین آب زیرزمینی و محیط اطراف تبادل یون کمتری برقرار است. بطور کلی تیپ آب غالب ۴ دهنه چشمه مطالعاتی هم بی‌کربنات کلسیک است که به نوعی نشان‌دهنده کارستی بودن منطقه است.

شاخص نسبت یونی Na/Ca کمتر از ۱ نشان‌دهنده انحلال سنگ دولومیت و نسبت بیشتر از ۱ نشان‌دهنده انحلال سیلیکات‌ها است (Goldscheider and Drew, 2007)، با توجه به اینکه این شاخص در اغلب چشمه‌ها کمتر از ۱ است به نظر می‌رسد در منطقه مورد مطالعه انحلال سنگ‌های آهکی (دولومیت) در جریان است. افزایش سدیم به کلر در چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان هم در ارتباط با انحلال نمک هالیت می‌باشد؛ انحلال این کانی‌ها باعث افزایش مقدار سدیم و افزایش pH در چشمه‌های مذکور طی فصل خشک و تر شده است.

از طرفی Qian et al. (2012) اظهار کردند جریان آب پایدار (کم تحرک) و پایین بودن سطح آب زیرزمینی منطقه باعث افزایش غلظت کلراید و جامدات محلول و شور شدن منابع کارستی می‌شود، این

هیدروژنوشیمیایی در درجه تکامل بیشتری قرار دارند و به نوعی انحلال عناصر اصلی سازندهای کارستی (کلسیم و منیزیم) بیشتر اتفاق افتاده است؛ در واقع اختلاف بین غلظت کلسیم (حدود ۳ میلی گرم در لیتر) و منیزیم (حدود ۴ میلی گرم در لیتر) در فصل تر و خشک چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان اندک است (بارش‌ها علاوه بر نفوذ و عبور از مجاری کارستی که منجر به افزایش دبی شده است، زمان کافی برای انحلال هم داشته است) و به نظر می‌رسد زمان ماندگاری آب چشمه‌های کارستی بیشتر از چشمه‌های شیبی است. بر عکس در چشمه‌های شیبی ابالفصل و سیاده بارش هنگام عبور از لایه‌های شیبی زمان کافی برای انحلال هم نداشته است به دلیل اینکه اختلاف بین غلظت کلسیم (حدود ۲۳ میلی گرم در لیتر) و منیزیم (حدود ۹ میلی گرم در لیتر) در فصل تر و خشک زیاد است (در فصل تر این غلظت‌ها کاهش یافته است).

اختلاف ارتفاع چشمه‌های باروداب و ابالفصل ۸۱ متر است (چشمه شیبی ابالفصل پایین تر است) ولی اختلاف ارتفاع چشمه‌های ملوسان و سیاده ۳۷۵ متر است (چشمه کارستی ملوسان پایین تر است). چشمه ملوسان پایین‌ترین اختلاف ارتفاع را نسبت به سایر چشمه‌ها دارد (۱۵۹۸ متر) و متوسط هدایت الکتریکی کمتری دارد (متوسط هدایت الکتریکی چشمه‌های ملوسان، سیاده، باروداب و ابالفصل به ترتیب ۲۶۴، ۳۰۶، ۳۸۳ و ۴۰۲ میکروزیمنس بر سانتیمتر است) که علت آن را می‌توان به دلیل حوزه آبرگیر گسترده‌تر و دبی بیشتر آن نسبت داد. در چشمه‌های کارستی با افزایش ارتفاع، هدایت الکتریکی افزایش و دبی کاهش یافته است؛ و بر عکس در چشمه‌های شیبی با افزایش ارتفاع، هدایت الکتریکی کاهش و دبی افزایش یافته است.

درجه تکامل آبخوان کارستی و وجود گسل یا شکستگی و فاصله آنها از چشمه در مسیر جریان آب زیرزمینی بر کیفیت آب چشمه‌های کارستی تأثیر دارد، مثلاً در منطقه مورد مطالعه همه چشمه‌ها به غیر از چشمه سیاده در نزدیک گسل واقع شده‌اند و احتمالاً تفاوت زیاد غلظت آهن، آرسنیک، مس و روی طی فصل تر و خشک در این چشمه‌ها، تغذیه جریان چشمه از طریق گسل و شکستگی‌ها است که درجه تکامل کارست هم در این فرآیند قابلیت هم‌افزایی دارد. تغییرات بین فصل خشک و تر هدایت الکتریکی چشمه‌های شیبی (۶۳/۵) نسبت به چشمه‌های کارستی (۲۰/۵) زیاد است. اوج این تغییرات را می‌توان بین چشمه ابالفصل (اختلاف هدایت ۶۴) و چشمه ملوسان (اختلاف هدایت ۶) مشاهده کرد که علت آن هم قرار گرفتن چشمه ابالفصل در راستای گسل نیمه فعال (شکل ۱) و تغذیه از طریق آن می‌باشد.

شیبسی افزایش یافته است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که زمان مانداب در فصل تر به اندازه کافی زیاد نبوده که باعث انحلال کانی‌ها گردد. از طرفی احتمالاً به دلیل عمق جریان آب زیرزمینی آلودگی غیر طبیعی (ثانویه) مانند نترات به آبخوان کمتر راه پیدا کرده است (تفاوت فصل تر و خشک زیاد نیست). در چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان غلظت برخی عناصر سمی/آرسنیک (آرسنیک، منگنز و باریوم) با افزایش دبی طی فصل خشک و تر افزایش یافته و برخی دیگر (روی، آهن، مس، کلسیم، منیزیم و سدیم) غلظت‌شان کاهش یافته است. می‌توان گفت که افزایش آرسنیک و باریوم دلیلی بر انحلال سنگ‌های دگرگونی ناحیه سندنج- سیرجان است.

غلظت منیزیم از ۱۹ به ۱۱ میلی گرم بر لیتر کاهش یافته است، به نظر می‌رسد آب از طریق مجراهایی که از سنگ‌های آهکی می‌گذرند، جمع‌آوری می‌شود و زمان تماس کافی برای انحلال املاح ندارند؛ این امر خود تأییدکننده مجرای بودن جریان چشمه باروداب است. از طرفی در چشمه ملوسان هم غلظت منیزیم از ۹ به ۸ میلی گرم بر لیتر کاهش یافته است (تغییر معنی‌داری نداشته)، به نظر می‌رسد آب از طریق رگه‌های افشان که از سنگ‌های آهکی می‌گذرند، جمع‌آوری می‌شود و زمان تماس کافی برای انحلال املاح دارند؛ این فرآیند به نوعی تأییدکننده افشان بودن جریان چشمه ملوسان است. طبق جدول همبستگی (جدول ۵) منیزیم در فصل تر با نیکل رابطه مستقیم و با منگنز رابطه عکس دارد. همچنین غلظت عناصر نیکل، مس و روی چشمه‌های شیبی به علت ماهیت دگرگونی آن‌ها بیشتر است.

(Rezaee et al. 2017) به منظور بررسی شیمی آب زیرزمینی مناطق کارستی شمال ایران نشان دادند عامل مهمی که مسئول حدود ۲۵ درصد تغییرات کیفی آب زیرزمینی است با کلسیم و سولفات ارتباط دارد و این عامل همبستگی بالایی نیز با کل جامدات محلول نشان می‌دهد، این عامل را می‌توان مرتبط با انحلال کانی‌های تبخیری از جمله ژپس و انیدرید دانست.

پژوهش حاضر هم تأکید می‌کند که کلسیم و سولفات جزء ترکیبات تأثیرگذار در کیفیت هستند ولی بین آنها با جامدات محلول همبستگی وجود ندارد که علت آن متفاوت بودن میزان دما و بارش در غرب ایران با مناطق شمالی و همچنین حضور کم رنگ کانی‌های تبخیری ژپس و انیدرید است.

بین ترکیبات (یون/عناصر اصلی و فرعی) چشمه‌های کارستی و شیبسی تفاوت معنی‌داری وجود دارد و چشمه‌های کارستی از نظر

غلظت بالای سدیم و کلر (به ترتیب حدود ۳۲ و ۱۹ میلی‌گرم بر لیتر) و همچنین وجود سنگ‌های دگرگونی شیبستی می‌توان اذعان کرد آب زیرزمینی چشمه ابالفضل از بسترهای آتشفشانی (Keshavarzi et al., 2011) یا دگرگونی عبور می‌کند و شاید همین امر موجب افزایش دمای چشمه ابالفضل در فصل تر نسبت به چشمه سیادره باشد (اختلاف دمای ۷ درجه‌ای). طبق تحقیقات Alimoradi et al. (2021) گسل‌های عمیق موجود باعث ارتباط هیدرولیکی سازندهای کارستی با سازندهای قدیمی و زیرین می‌شوند و دمای بالای چشمه‌ها به دلیل گردش عمیق آب‌های نفوذی حاصل از ریزش‌های جوی در امتداد شکستگی‌ها و گسل‌ها است؛ با توجه به اینکه چشمه ابالفضل بر روی گسل منطبق شده است و میانگین دمای آن از سایر چشمه‌ها بیشتر است، این پدیده مورد تأیید است.

مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ از $-7/3$ تا $-6/74$ در چشمه باروداب و از $-7/88$ تا $-7/15$ در چشمه ملوسان طی فصل خشک تا تر متغیر است؛ مقادیر $\delta^2\text{H}$ از $-43/58$ تا $-48/78$ در چشمه باروداب و از $-46/42$ تا $-49/29$ در چشمه ملوسان طی فصل خشک تا تر متغیر است. بین ارتفاع مظهر چشمه و اکسیژن ۱۸ و دوتریم رابطه معنی‌داری وجود دارد ($R^2=1$)؛ غلظت اکسیژن ۱۸ با افزایش دبی افزایش یافت (رابطه مستقیم) و غلظت دوتریم با افزایش دبی کاهش یافت (رابطه معکوس). همچنان که مشاهده می‌شود روند تغییرات اکسیژن ۱۸ افزایشی و روند تغییرات دوتریم کاهشی بوده است. با این تغییرات میزان هدایت الکتریکی و آرسنیک هم در چشمه باروداب افزایش یافته است ولی در چشمه ملوسان تغییر محسوسی مشاهده نشد. تحقیقات Mohammadzadeh and Amiri (2019) نشان دادند چشمه‌های با ارتفاع پایین‌تر دارای بیشترین غنای ایزوتوپی هستند و اظهار کردند با توجه به اینکه این چشمه‌ها دمای بالاتری هم نسبت به سایر چشمه‌ها دارند از اعماق بیشتری منشأ می‌گیرند. Gil- Gil-Márquez et al. (2017) هم اظهار کردند چشمه‌های با ارتفاع بالاتر به دلیل نوسانات ایزوتوپی آب زیرزمینی در زهکشی جریان‌ات گران‌ش محور نقش دارند و چشمه‌های ارتفاع پایین‌تر جریان‌های آب زیرزمینی با زمان ماند طولانی‌تر را تخلیه می‌کنند.

دما عامل تهی‌سازی ایزوتوپی آب‌های عمیق زیرزمینی تحت فشار است و بنابراین چشمه‌های منشأ گرفته از این مناطق دارای مقادیر ایزوتوپی کمتری نسبت به دیگر چشمه‌ها هستند. ارتفاع هم از جمله عوامل کنترل‌کننده ترکیب ایزوتوپی است؛ با افزایش ارتفاع، کاهش تدریجی دما باعث تقویت میعان شده (بارش کوهبارشی) و ایزوتوپ‌های سنگین هم به تدریج خارج می‌شود و در نتیجه بارش

میانگین اختلاف دمای فصل خشک با فصل تر چشمه کارستی باروداب ۲/۵ و ملوسان ۰/۵ درجه و میانگین اختلاف دمای فصل خشک با فصل تر چشمه شیبستی ابالفضل ۴/۲ و سیادره ۴/۶ درجه است. علت افزایش نوسانات دمایی چشمه‌های شیبستی را می‌توان خاصیت دگرگونی نواحی شیبستی دانست. همچنین بین دمای چشمه‌ها با تغییرات ایزوتوپی رابطه وجود دارد. در چشمه باروداب افزایش دما به میزان ۲/۵ درجه منجر به کاهش ۵/۲ واحدی میزان دوتریم شده ولی در چشمه ملوسان افزایش دما به میزان ۰/۵ درجه منجر به کاهش ۲/۸۷ واحدی میزان دوتریم شده است، به نظر می‌رسد در چشمه ملوسان تأثیر دما بیشتر بوده یا عوامل دیگری نقش دارند.

بر خلاف نتایج کار Simsek et al. (2008) نتایج این پژوهش نشان داد بین هدایت الکتریکی و ارتفاع رابطه مستقیم و معنی‌داری وجود دارد (عواملی مانند میزان و نوع بارش، زمین‌شناسی منطقه و غیره ممکن است باعث تفاوت در این فرآیندها شوند). از فصل تر به فصل خشک غلظت نیترات چشمه‌های کارستی روند کاهشی و چشمه‌های شیبستی روند افزایشی داشته‌اند؛ علت این امر را می‌توان به آیشویی بیشتر نیترات در چشمه‌های شیبستی دانست. طبق جدول ۳ با افزایش دبی مقادیر اکسیژن ۱۸ افزایش و دوتریم کاهش یافته است. چشمه‌های دارای ارتفاع بالاتر به دلیل تکامل کمی کمتر غلظت ترکیبات و دبی کمتری نسبت به چشمه‌های دارای ارتفاع پایین‌تر دارند که الزاماً به معنای تکامل شیمیایی نبوده و عوامل دیگری از جمله تغذیه از طریق گسل هم تأثیر گذارند؛ از طرفی ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم چشمه باروداب به علت ارتفاع تغذیه بالا دارای غلظت بالاتری از چشمه ملوسان است.

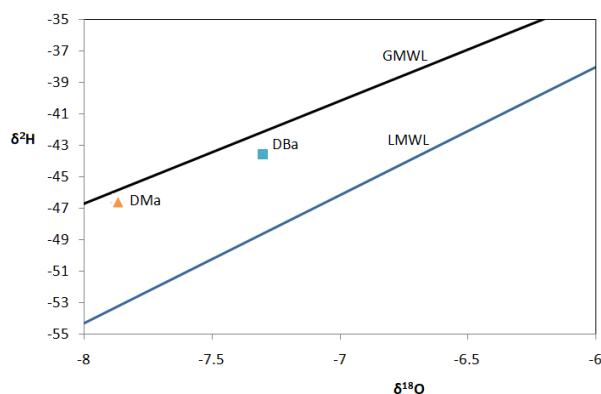
بین کدورت آب و غلظت برخی فلزات رابطه معنی‌داری وجود دارد، با افزایش کدورت از حدود ۰/۵ به ۲/۵ در چشمه باروداب غلظت آهن از ۵۹/۳۷ به ۱۷/۸۸۵ ppb کاهش و غلظت آرسنیک از حدود ۰/۱۷ به ۹/۹۶۲ ppb (نزدیک حد مجاز استاندارد آب شرب ۱۰ ppb) افزایش یافت. طبق نتایج این تحقیق بین غلظت آهن و آرسنیک رابطه معکوس وجود دارد. با توجه به رابطه معکوس آهن و سولفات با آرسنیک (Nazari and Abbasnejad, 2014) و با توجه به اینکه یکی از عوامل افزایش آرسنیک واجذب از اکسید و هیدرواکسیدهای آهن و سولفات اکسید است (Simsek et al., 2008) می‌توان اذعان کرد علت کاهش غلظت آهن و سولفات در چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان (جدول ۳) انعقاد آن با سایر ترکیبات و علت افزایش آرسنیک هم آزاد شدن آرسنیک از سنگ‌های حاوی اکسید و هیدرواکسیدهای آهن یا سولفات اکسید است.

در مطالعه حاضر میانگین دبی چشمه باروداب (80 l/s) از چشمه ملوسان (200 l/s) کمتر است ولی غنای ایزوتوپی چشمه باروداب از چشمه ملوسان بیشتر است، احتمالاً چشمه باروداب در اثر برهمکنش سازندهای زمین‌شناختی با زمان گردش طولانی شکل گرفته است و علت دامنه تغییرات دمایی و هدایت الکتریکی بیشتر نسبت به چشمه ملوسان هم تأثیر تغذیه از گسل و آب‌های با عمق کمتر است و به همین خاطر غنای ایزوتوپی بیشتری هم دارد (جدول ۵).

با توجه خط آب جوی شهرستان نهاوند و معادله خط آب جوی جهانی ($\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$)، رابطه $\delta^2\text{H}$ و $\delta^{18}\text{O}$ چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان و خط آب جوی نهاوند در مقابل خط ایزوتوپی جهانی در قالب شکل ۶ ارائه شده است.

آب‌های بین‌سازندی و یا آب‌های که از فرآیندهای ثانویه اثرپذیری داشته‌اند معمولاً بر روی خط آب جوی منطبق نمی‌شوند و اغلب مواقع در سمت راست خط آب جوی قرار می‌گیرند (Karimi Verdenjan, 2010). طبق نتایج تحقیق حاضر داده‌های ایزوتوپی چشمه‌ها در فصل تر در سمت راست خط آب جوی محلی است (شکل ۶) و به نظر می‌رسد منشأ این چشمه‌ها تا حدودی متأثر از فرآیندهای ثانویه و بین‌سازندی باشند. در فصل خشک داده‌های ایزوتوپی چشمه‌ها بین خط جوی محلی و خط جوی جهانی قرار گرفته است (بارش روی آبدهی آنها تأثیر بسزایی دارد).

در اکثر چشمه‌های کارستی ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های فصل خشک با نمونه‌های فصل تر تقریباً یکسان است (Karimi Verdenjan, 2010)؛



ارتفاعات دارای ایزوتوپ‌های سبک‌تری است (Karimi Verdenjan, 2010). به بیانی دیگر اگر مقادیر ایزوتوپی یک چشمه کارستی کم باشد نشان‌دهنده تغذیه از بارش‌های حاصل از ارتفاعات است.

از این نظر بین چشمه‌های کارستی مذکور تفاوت معنی‌داری دیده نشد ولی چشمه ملوسان با اینکه ارتفاع پایین‌تری داشت نوسانات ایزوتوپی و دمایی جزئی و غنای ایزوتوپی اندکی نسبت به چشمه باروداب داشت. با مقایسه نتایج نمونه‌برداری فصل تر و فصل خشک (سال آبی ۹۸-۹۷) با داده‌های خط آب جوی نهاوند (شکل ۱۰) و باتوجه به اینکه نمونه آب چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان بطور کلی غنای کمتری از داده‌های بارش دارند می‌توان گفت زمان ماندآب (سن آب چشمه‌ها) به احتمال زیاد بیش از ۱ سال است و به همین دلیل خط ایزوتوپی چشمه‌ها منطبق با خط آب جوی محلی نیستند و به نوعی نشان‌دهنده حالت اوتوژنیک (تغذیه خود بستر) هستند.

(Simsek et al. 2008) با بررسی سنجش ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و دوتریوم نشان دادند که چشمه‌های با دبی کمتر در اثر برهم‌کنش سازندهای زمین‌شناختی با زمان گردش طولانی شکل گرفته‌اند؛ به طور معمول چشمه‌های با زمان گردش طولانی (در اثر زمان ماندگاری بالا) انتظار می‌رود نوسانات دمایی و هدایت الکتریکی کمتری داشته باشند.

(Gil-Márquez et al. 2017) هم اظهار کردند افزایش دمای آب در چشمه‌های کارستی مطالعاتی در جنوب اسپانیا با افزایش هدایت الکتریکی همراه بوده است. البته جهت اظهار نظر دقیق در این خصوص بررسی چند دور نمونه‌برداری و در نظر گرفتن سایر اطلاعات (زمین‌شناختی، بارش و غیره) ضروری خواهد بود.

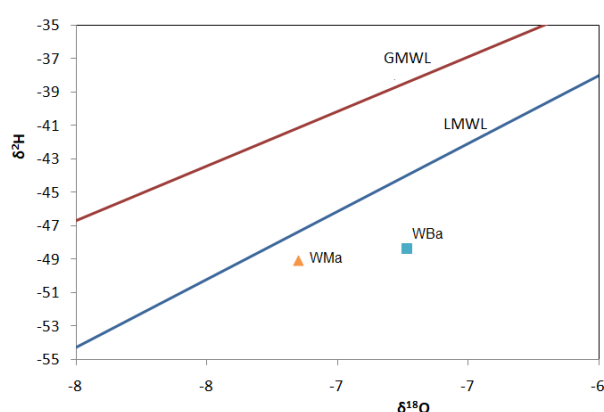


Fig. 6- Relationship between $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of Barudab and Malusan Karst springs vs. Local Meteoric Water Line (LMWL) of Nahavand and Global Meteoric Water Line (GMWL)
شکل ۶- رابطه $\delta^2\text{H}$ و $\delta^{18}\text{O}$ چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان و خط آب جوی نهاوند در مقابل خط ایزوتوپی جهانی

زمین‌شناسی و اطلاعات هیدرولوژیکی به دست آمد در منطقه مورد مطالعه به دلیل متفاوت بودن شیب، حوزه آبریز چشمه‌ها با مرز سطحی حوزه آبریز یکسان نیست و احتمالاً تغذیه خارج از مرز آبریز توسط لایه‌بندی‌ها و گسل‌ها صورت می‌گیرد. طبق نتایج این تحقیق منشأ چشمه‌های کارستی تا حدودی متأثر از فرآیندهای ثانویه و بین‌سازندی باشند که به نوعی نشان دهنده حالت اوتوژنیک (تغذیه خود بستر) هستند. با استناد به نتایج داده‌های موجود خط ایزوتوپی چشمه‌ها منطبق با خط آب جویی محلی نیست و باتوجه به اینکه نمونه آب چشمه‌های کارستی است به نوعی نشان دهنده حالت اوتوژنیک (تغذیه خود بستر) هستند. طبق نتایج منشأ این چشمه‌ها تا حدودی متأثر از فرآیندهای ثانویه و بین‌سازندی باشند. کارست منطقه باروداب کارست متوسط است و کارست منطقه ملوسان بین کارست متوسط و کارست ناقص (مرو کارست) واقع شده است. باروداب و ملوسان بطور کلی غنای کمتری از داده‌های بارش دارند، زمان ماند آب و سن چشمه‌ها به احتمال زیاد بیش از ۱ سال است. واحد کربونیفر- پرمین (CP¹) کهن‌ترین واحد سنگ چینه‌ای دوران پالئوزوئیک^۱ که در شهرستان نهاوند شناخته شده است که طبق بررسی‌های زمین‌شناختی، تصاویر ماهواره‌ای و مطالعات میدانی چشمه‌های کارستی باروداب و ملوسان منشأ گرفته از سنگ مخزن دوران کربونیفر- پرمین هستند که معرف قدیمی‌ترین مخازن کارستی ناحیه سندر- سیرجان در ایران هستند؛ چراکه تا کنون مطالعه‌ای در خصوص چشمه‌های منشأ گرفته از سنگ مخزن دوران کربونیفر- پرمین در ایران گزارش نشده است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده نمونه‌برداری مناسب از چشمه‌های مذکور صورت گیرد که بتوان با تخمین دقیق‌تری، حوضه آبریز و ارتفاع تغذیه چشمه‌ها را تعیین نمود؛ همچنین از شاخص‌های ایزوتوپی کربن-۱۳ و کربن-۱۴ به همراه عوامل اثرگذار بر روی تغییرات ایزوتوپی استفاده شود.

۵- سپاسگزاری

با توجه به اینکه نگارندگان در حین مطالعه دیگری به موضوع مقاله رسیدند، امکان سنجش همه داده‌ها نبود و با داده‌های موجود رساله دکتری آقای واحد کیانی تحقیق حاضر ارائه شد؛ در پایان از حمایت‌های دانشگاه تربیت مدرس و شرکت آبفا همدان تقدیر می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Paleozoic
- 2- Neotethys

در این پژوهش هم کمترین تغییرات فصلی ترکیب ایزوتوپی در ۲ چشمه چشمه‌های کارستی دیده می‌شود و به همین خاطر آب این چشمه‌ها دارای بیشترین زماندگاری در سازند است (سن نسبی آب چشمه‌های کارستی بیشتر است). با توجه به اینکه حوزه آبریز چشمه ملوسان دارای ارتفاعات کوهستانی و سنگلاخی بیشتری نسبت به چشمه باروداب است و همچنین مساحت آن بیش از دو برابر چشمه باروداب است به نظر می‌رسد این عامل به همراه سایر عوامل منجر به افزایش دبی حدود ۲/۵ برابری این چشمه شده است. هرچه مساحت حوضه‌های آبریز بیشتر باشد تغییرات دوتریوم از فصل خشک به فصل تر کمتر است؛ در این تحقیق دامنه تغییرات دوتریوم چشمه ملوسان که دارای حوزه آبریز واقعی بیش از دو برابر (۲۱۰ در مقابل ۱۰۰ کیلومتر مربع) بزرگتر از چشمه باروداب است ۲/۸۷ است در مقابل ۵/۲ چشمه باروداب. آنچه بر اساس شواهد میدانی، نقشه زمین‌شناسی و اطلاعات هیدرولوژیکی به دست آمد در منطقه مورد مطالعه به دلیل متفاوت بودن شیب، حوزه آبریز چشمه‌ها با مرز سطحی حوزه آبریز یکسان نیست و احتمالاً تغذیه خارج از مرز آبریز توسط لایه‌بندی‌ها و گسل‌ها صورت می‌گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

انحلال سنگ دولومیت ناخالص (دارای ناخالص زیاد) چشمه شیستی سیاده منجر به آزاد شدن منیزیم و احتمالاً نیکل با هم شده است، البته وجود نیکل با غلظت بالا خود می‌تواند تأییدکننده عمق گردش آب زیرزمینی باشد که بیشترین مقدار مشاهده شده نیکل مربوط به همین است. بر اساس ضریب فرود (درجه توسعه کارست) و همچنین مشاهدات میدانی (ژئومورفولوژی، دبی، تعداد دهنه خروجی آب و غیره) منطقه باروداب کارست متوسط است و کارست منطقه ملوسان بین کارست متوسط و کارست ناقص (مرو کارست) واقع شده است. همچنین مخزن کارستی چشمه ملوسان به دلیل وجود همزمان تخلخل حفره‌ای و شکستگی‌ها به همراه تخلخل اولیه، دارای سیستم تخلخل سه‌گانه است ولی مخزن کارستی چشمه باروداب صرفاً دارای تخلخل اولیه است. با توجه به اینکه حوزه آبریز چشمه ملوسان دارای ارتفاعات کوهستانی و سنگلاخی بیشتری نسبت به چشمه باروداب است و همچنین مساحت آن بیش از دو برابر چشمه باروداب است به نظر می‌رسد این عامل به همراه سایر عوامل منجر به افزایش دبی حدود ۲/۵ برابری این چشمه شده است. ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریوم چشمه باروداب به علت ارتفاع تغذیه بالا دارای غلظت بالاتری از چشمه ملوسان است؛ بر اساس شواهد میدانی، نقشه

- Mohammadzadeh H, Amiri H (2019) Investigation of groundwater residence time (alluvial and karst) in Pol-e-Zahab study area due to the spatiotemporal variations of isotopic composition ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) of rainfall and groundwater. *Journal of Iran-Water Resource Reserch* 15(1):327-340 (In Persian)
- Nazari Y, Abbasnejad A (2014) Determination the origin and dispersion of arsenic in groundwater in the Rayen plain (southern Kerman) using statistical techniques. *Journal of Environmental Geology* 24(94):117-128 (In Persian)
- Mahdavi M A (1994) Geological map of 1/100000 Nahavand sheet. Geological Survey of Iran Press (In Persian)
- Geological Survey of Iran (2021) Preparation of karst water potential map of Pars province in order to identify groundwater resources. gsi.ir/fa/news/22925
- Nadiri A A, Sadeghi Aghdam F, Khatibi R, Asghari Moghaddama A (2018) The problem of identifying arsenic anomalies in the basin of Sahand dam through risk-based 'soft modelling'. *Science of the Total Environment* 613-614:693-706
- Mali'k P, Vojtkova S (2012) Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs. *Environmental Earth Science* 65:2245-2257
- Xu Z, Massei N, Padilla I, Hartmann A, Hu B (2018) Characterization, modeling, and remediation of karst in a changing environment. *Environmental Earth Sciences* 77(12):476
- Ford D, Williams P (2007) *Karst hydrogeology and geomorphology*. Wiley and Sons Publishing, Chichester of England 576 pp.
- Simsek C, Elci A, Gunduz O (2008) Hydrogeological and hydrogeochemical characterization of a karstic mountain region. *Environmental Geology* 54(2):291-308
- Mazor E (2004) *Applied chemical land isotopic groundwater hydrology*. Halstead Prees, a Division of John Wiley and Sons
- Gil-Márquez J M, Barberá J A, Andreo B, Mudarra M (2017) Hydrological and geochemical processes constraining groundwater salinity in wetland areas related to evaporitic (karst) systems: A case study from Southern Spain. *Journal of Hydrology* 544:538-554
- Keshavarzi B, Moore F, Mosaferi M, Rahmani F (2011) The source of natural arsenic contamination in groundwater, west of Iran. *Water Qual Expo Health* 3(1):135-147
- 3- Allochthonous Limestone
4- Water Residence Time
5- Water Date
6- Sanandaj-Sirjan Zone
7- Zagros Folded Belt
8- Black Slate
9- Litology
10- Cool Box
11- Vienna Standard Mean Ocean Water

۶- مراجع

Alayi Taleghani M (2011) *Geomorphological of Iran*. Qomes Press, 352 p (In Persian)

Alimoradi S, Nassery H R, Alijani F, Karimi H (2021) Source determination and formation mechanisms of sulfur and thermal springs of Siah-Kuh anticline, south-west of Iran, using hydrogeochemistry and isotope characteristics. *Journal of Hydrogeology* 5(2):16-31 (In Persian)

Tavasoli A (2012) *Karst geology and morphology (A view on how caves are formed)*. Federation of Mountaineering and Sport Climbing (Caving Department), 45 p (In Persian)

Goldscheider N, Drew D (2007) *Methods in karst hydrogeology*. Taylor and Francis, 385 pp.

Sedaghat M, Daneshfar H, Hosini A, Madani H, Hashemi A (2003) *Earth sciences (pre-university experimental field)*. Publications of Iran Textbook Publishing Company, 164 P (In Persian)

Karimi Verdenjani H (2010) *Karst hydrogeology*. Eram Shiraz Perss, 399 P (In Persian)

Ebrahimi B, Seif A (2016) Using GIS for evaluation of karstification in carbonate rocks in Zagros based on geological and climatic factors. *Journal of Geoscience* 25(98):333-348

Rezaee M, Zivari R, Ashjari J, Kaboli A (2017) Geochemical processes affecting groundwater chemistry in the Khosh Yilagh carbonate formation, northern Iran. *Journal of Environment Science* 43(2):219-231 (In Persian)

Karimi S, Mohammadi Z, Samani N (2017) Evaluation of hydrochemical characteristics of groundwater and salinity evolution in Semnan Plain. *Journal of Hydrogeology* 2(1):1-19 (In Persian)

Mirhasani G, Bagheri R, Nik Ghogh Y (2018) Hydrogeology of karstic springs in Kalaleh Region, Golestan Province. *Journal of Ecohydrology* 5(2):387-397 (In Persian)

- Engineering Faculty, Queensland University of Technology
- Perrin J, Jeannin Y, Zwahlen F (2003) Implications of the spatial variability of infiltration-water chemistry for the investigation of a karst aquifer: A field study at Milan drettest site. *Hydrogeology Journal* 11(6):1-14
- Qian H, Li P, Howard K W F, Yang C, Zhang X (2012) Assessment of groundwater vulnerability in the Yinchuan Plain, Northwest China using OREADIC. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment* 184(6):3613–3628
- Hassanzadeh J, Wernicke B P (2016) The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics* 35(3):586–621
- Husic A, Fox J, Agouridis C, Currens J, Ford W, Taylor C (2017) Sediment carbon fate in phreatic karst (Part 1): Conceptual model development. *Journal of Hydrology* 549:179–193
- Owen D (2016) Hydrochemical and isotopic indicators of hydrological processes within coal seam gas formations and adjacent aquifers, Condamine River catchment, QLD. Ph.D Thesis, Science and