

## بررسی ارتباط هیدرولیکی ساختارهای کارستی با روش‌های هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی منابع آب منطقه ایذه شمال استان خوزستان

زهرا سجادی\*<sup>۱</sup>، نصراله کلانتری<sup>۲</sup>، عباس چرچی<sup>۳</sup>، سید ساجدین موسوی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری آبشناسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۴- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

\* نویسنده مسئول: [sajadi\\_z@yahoo.com](mailto:sajadi_z@yahoo.com)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱

### چکیده

مدیریت صحیح منابع آبی وابسته به شناخت عوامل تأثیرگذار بر کیفیت و کمیت منابع آب می‌باشد. در این پژوهش، ارتباط هیدرولیکی بین ساختارهای منطقه کارستی ایذه با استفاده از اطلاعات هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی منابع آب منطقه ارزیابی شده است. برای بررسی تعداد ۳۱ نمونه آب (۱۷ چاه، ۸ چشمه و ۶ نمونه باران) در محدوده‌های تاق‌دیس‌های کم‌دراز، منگشت، شاپوش-تنوش و ناودیس نعل اسبی در دی‌ماه ۹۸ و خرداد ۱۴۰۰ گرفته شد و از نظر هیدروژئوشیمیایی و نیز ایزوتوپ‌های  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$  مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آنالیز هیدروژئوشیمیایی نمونه‌ها نشان داد که میزان غلظت یون‌ها تحت تأثیر انحلال سنگ‌های آهکی می‌باشد. محتوای ایزوتوپی نمونه‌های آب زیرزمینی به ترتیب از  $-۵/۶۲$  تا  $-۳/۴۹$  ‰ و از  $۲/۹۷$  تا  $-۱۲/۲۹$  ‰ برای  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$  می‌باشد. بررسی محتوای ایزوتوپی نمونه‌های آب چاه‌ها و چشمه‌های منطقه نشان‌دهنده سه گروه منبع آب می‌باشد، گروه اول چشمه‌های تاق‌دیس منگشت به دلیل تهی‌شدگی ایزوتوپی، از ارتفاعات تغذیه می‌شوند، جریان سریع آب در سیستم کانالی سبب زمان تأخیر کم در این چشمه‌ها گردیده است. گروه دوم غنی‌شده‌تر از گروه اول هستند و علاوه بر بارش، اختلاط آب‌های زیرزمینی نیز در تأمین آب آنها مؤثر است. گروه سوم به دلیل تبخیر و مسافت طولانی‌تر از محل تغذیه تا تخلیه و همچنین سیستم انتشاری غنی‌شدگی بیشتر از سایر نمونه‌ها دارند. روند کاهشی  $\text{Sr}^{+2}$  و افزایشی  $\text{Ba}^{+2}$  از نمونه‌های آب سازندهای آهکی دولومیتی (شاپوش-تنوش و منگشت) به سمت نمونه‌های آب تاق‌دیس کم‌دراز و ناودیس نعل اسبی و همچنین داده‌های ساختاری و ایزوتوپی نشان‌دهنده احتمال تغذیه آبخوان‌های کارستی منطقه از تاق‌دیس منگشت و همچنین رابطه هیدرولیکی بین این ساختارها می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** ارتباط هیدرولیکی، ایزوتوپ، ایذه، کارست، هیدروژئوشیمی.

### مقدمه

زیرزمینی در این مناطق ضروری است. این موضوع در ارتباط با آبخوان‌های کارستی و تکتونیزه شده به دلیل پیچیدگی‌های مسیرهای جریان از اهمیت بیشتری برخوردار است. چنین پیچیدگی‌هایی متأثر از سرعت انحلال‌پذیری توده‌سنگ، شرایط تکتونیک محلی، اقلیم منطقه و توپوگرافی منطقه است. شناخت ویژگی‌های جریان و نوع جریان، مسیرهای حرکت آب

سرزمین‌های کارستی ۱۲ درصد سطح کره زمین (Husic et al., 2017) و حدود ۱۲ درصد از سطح کل ایران (سازمان زمین‌شناسی ایران، ۱۳۹۹) را تشکیل می‌دهند. برای مدیریت پایدار تأمین آب از منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک، درک منابع تغذیه و چگونگی الگوی جریان آب

زمین بستگی دارد و این تغییرات می‌تواند جهت تعیین زمان تغذیه، سرعت جریان و مشخص نمودن اثر جریان‌های سریع استفاده گردد (Mazor, 2004). با توجه به اینکه در تغذیه افشان تبخیر بیشتری در زون غیراشباع انجام می‌گیرد تفکیک ایزوتوپی بیشتری صورت می‌گیرد و در نتیجه این نوع تغذیه نسبت به تغذیه نقطه‌ای دارای ایزوتوپ‌های سنگین بیشتری می‌باشد (Alsaaran, 2006). بنابراین، تحلیل‌های ایزوتوپی برای ارائه یک مدل مفهومی هیدروژئولوژیکی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. میزان ایزوتوپ اکسیژن ( $\delta^{18}\text{O}$ ) و هیدروژن ( $\delta^2\text{H}$ ) اغلب نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه ایزه با نمونه‌های آب جوی یکسان است و به همین دلیل اکثر نمونه‌های آب کارستی روی خط و یا نزدیک خط آب جوی قرار می‌گیرند که منعکس‌کننده تغذیه آب زیرزمینی از نزولات جوی محلی می‌باشد.

مطالعات بسیاری تاکنون بر روی منشأ آب در آبخوان‌های کارستی صورت گرفته است. کریمی وردجانی (۱۳۸۴)، با مطالعه داده‌های تخلیه و همچنین آنیون و کاتیون‌های اصلی چشمه‌های کارستی موگرون و سرآسیاب به بررسی هیدروژئولوژیکی این چشمه‌ها پرداخت. تحقیقات دیگر در این زمینه نیز توسط کیایی و جوادی (۱۴۰۱)، علیمرادی و همکاران (۱۳۹۹)، جمعدار و همکاران (۱۳۹۹)، کلانتری و روحی (۱۳۹۶)، کلانتری و همکاران (۱۳۹۰) انجام شده است.

در سطح بین‌المللی می‌توان به مطالعات Alimoradi et al. (2021) اشاره نمود که با استفاده از خصوصیات هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی به منظور تعیین منشأ و سازوکارهای تشکیل چشمه‌های گوگردی و آبگرم استان ایلام 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.

Jebreen et al. (2018) در بررسی تأثیر کانی‌شناسی و هیدروژئوشیمی سفره کارستی بر ویژگی‌های آب‌های زیرزمینی در منطقه کرانه باختری، فلسطین به این نتایج دست یافتند: ۱) بیشتر کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌های کارستی منطقه شامل کلسیت، دولومیت و نسبت کمی از فلدسپات و

زیرزمینی، آگاهی از ارتباطات ساختاری بین آبخوان‌ها و نیز تعیین موقعیت مرزهای جریان و نقاط تغذیه و تخلیه در سیستم‌های کارستی، اساس ساخت مدل مفهومی هیدروژئولوژیکی و مطالعات بعدی منابع آب زیرزمینی در این سیستم‌ها است (Ozler, 2015; Love et al., 2017; McCormack et al., 2017). تکنیک‌های هیدروشیمیایی و ایزوتوپی متداول‌ترین روش‌های شناسایی مکانیسم‌های تغذیه آب زیرزمینی و مسیرهای جریان هستند، که در شناخت پیچیدگی‌ها و ارتباطات بین مناطق کارستی نیز از کارایی مناسبی برخوردارند (Bourke et al., 2015, 2020; Chen et al., 2018).

سیستم‌های هیدروژئولوژیکی کارستی مختلفی در سرتاسر دنیا با استفاده از آنالیزهای هیدروشیمیایی و ایزوتوپ‌های پایدار ( $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$ )، توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفتند (Raesi and Ashjari, 2006; Setiawan et al., 2020; Alemayehu et al., 2020). همچنین، دسته‌بندی هیدروژئوشیمیایی آبخوان‌های کارستی که مبتنی بر توزیع آنیون کاتیون‌ها و شرایط فیزیکوشیمیایی آب‌های خروجی از منابع کارستی است توسط پژوهشگران مختلف برای شناسایی رفتار کارست و جریان آب زیرزمینی به کار گرفته شده است (Chihi Moradi et al., 2018; Kalantari and Rouhi, 2018; et al., 2015; Yuan et al., 2017).

ایزوتوپ‌های پایدار محیطی به‌ویژه  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$  به‌عنوان ردیاب‌های بسیار باارزشی در مطالعات هیدروژئولوژیکی در مقیاس ناحیه‌ای بکار می‌روند (Clark and Fritz, 1997; Mazor, 2004; Leketa and Abiye, 2021). محتوای ایزوتوپی بارش در طول سال، فرایندهای احتمالی کنترل‌کننده تغذیه آب زیرزمینی را مشخص می‌سازند، (Gat and Airey, 2006; Ladouche et al., 2009). همچنین، شناخت ترکیب ایزوتوپی در طول مسیر جریان آب نشان‌دهنده منشأ و رخداد فرایندهای مختلف ژئوشیمیایی و اختلاط است. ترکیب ایزوتوپی آب زیرزمینی اطلاعات باارزشی از منشأ تغذیه آب زیرزمینی، زمان تغذیه، واکنش‌های آب و سنگ و اختلاط آب زیرزمینی در اختیار قرار می‌دهد (Kohfahl et al., 2008; Pu et al., 2013). تغییرات ترکیب ایزوتوپی به تاریخچه آب از زمان تبخیر از اقیانوس‌ها، تشکیل ابر، زمان بارش و چگونگی نفوذ به داخل

هدف اصلی این تحقیق مطالعه خصوصیات هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی منابع آب کارستی منطقه و بررسی ساختارهای کارستی در منطقه ایذه می‌باشد. در این راستا، با استفاده از یون‌های اصلی، عناصر کمیاب و ایزوتوپ‌های پایدار منابع آب کارستی و مطالعه ساختاری چگونگی ارتباط بین ساختارهای منطقه (تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها) بررسی گردید.

### مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

منطقه کارستی ایذه در جنوب‌غرب ایران و در قسمت شمال‌شرق استان خوزستان قرار دارد. وسعت کل منطقه مورد مطالعه ۹۱۰ کیلومتر مربع است. بلندترین نقطه این محدوده ۳۲۰۰ متر و کمترین ارتفاع آن حدود ۸۰۰ متر از سطح دریا است. ارتفاعات محدوده مطالعاتی از سمت شرق، شمال، جنوب و غرب دشت ایذه را احاطه کرده‌اند. آب‌وهوای منطقه مورد مطالعه خشک و نیمه‌خشک است که بر اساس داده‌های ۳۰ ساله (۱۳۹۹-۱۳۶۹) ایستگاه‌های هواشناسی محدوده ایذه که از سازمان آب و برق خوزستان اخذ گردید، میانگین دمای سالانه ۲۰/۷ درجه سانتی‌گراد، حداقل دما (۵/۹) درجه سانتی‌گراد در دی‌ماه) و حداکثر دما (۳۳) درجه سانتی‌گراد در تیرماه) ثبت شده است. متوسط تبخیر و تعرق سالانه از سطح دریای آزاد ۱۶۳۲ میلی‌متر، میانگین بارندگی سالانه منطقه ۷۶۰ میلی‌متر است که معمولاً در اواخر پاییز تا اوایل بهار به صورت رگبار رخ می‌دهد. علی‌رغم بارندگی نسبتاً زیاد، دشت ایذه دچار کمبود منابع آبی می‌باشد و برای مصارف مختلف فقط به آب‌های زیرزمینی متکی است. رودخانه بزرگ کارون با میانگین دبی سالیانه ۲۰۰ مترمکعب، در قسمت شمالی منطقه مورد مطالعه جریان دارد، اما تأمین آب از رودخانه در منطقه مورد مطالعه به دلیل ارتفاعات بسیار مشکل است. از سوی دیگر، دشت آبرفتی ایذه عمدتاً از رسوبات رسی ریزدانه تشکیل شده و برای نفوذ و تجمع آب به‌منظور تشکیل یک سفره آبدار، مناسب نمی‌باشد.

### چینه‌شناسی سازندها

عمده‌ترین سازندهای زمین‌شناسی در محدوده مورد مطالعه به ترتیب از قدیم به جدید شامل سازندهای آهکی داریان- فهلان (کرتاسه پایینی)، سازندهای آهکی- دولومیتی

کوارتز می‌باشد. (۲) نمونه‌ها دارای محتوای کمی از عناصر کمیاب هستند. در مقابل، غلظت عناصر خاکی قلیایی (Ca, Mg, Ba, Sr) در نمونه‌های سنگ و آب‌های زیرزمینی زیاد بودند و همچنین مقدار Sr در نمونه‌های کلسیتی بیشتر از دولومیتی می‌باشد.

(Kalantari et al. 2019) در مقاله‌ای تحت عنوان مقایسه رفتار هیدرولیکی تخلیه دو چشمه کارستی در تاقدیس کوه سفید، خوزستان، ایران به بررسی رفتار هیدرولیکی دو چشمه کارستی برم جمال و پوتو پرداختند. نتایج نشان داد که هر یک از دو چشمه رفتار هیدرولیکی خاصی را بر اساس مقدار تخلیه و رژیم‌های ثبت شده نشان می‌دهد که ویژگی‌های آبخوان آن را منعکس می‌کند، در چشمه برم جمال جریان انتشاری بیشتر از جریان کانالی است، درحالی‌که برای چشمه پوتو جریان کانال غالب است که یک رفتار هیدرولیکی پیچیده است. (Shizhen et al. 2021) به مطالعه بر روی ویژگی‌های هیدروشمیایی حوضه‌های کارستی دولومیتی در مناطق نیمه‌گرمسیری در چین پرداختند. در این تحقیق مشخص شد که حوضه دولومیتی مناطق نیمه‌گرمسیری با مناطق آهکی و شیلی از نظر هیدروشمیایی متفاوت است. درجه اشباع کلسیت از سمت بالادست سفره کارستی به سمت پایین‌دست بیشتر شده و در فصل‌های بارانی اثر رقیق‌سازی وجود دارد. شیمی آب و ویژگی‌های هیدروشمی توسط عوامل زمین-شناسی به‌ویژه سنگ‌شناسی کنترل می‌شود.

منطقه مورد مطالعه آبخوان ایذه، از دیدگاه هیدروژئولوژیکی به دو بخش آبرفتی و سازند سخت تقسیم می‌گردد، با توجه به اینکه منطقه آبرفتی از رسوبات دانه‌ریز و نفوذناپذیر تشکیل شده است، فاقد ذخیره قابل‌توجه آب زیرزمینی می‌باشد. بنابراین، مطالعه آبخوان‌های کارستی اطراف ایذه، جهت تأمین آب موردنیاز محدوده ایذه ضروری می‌باشد. از طرف دیگر تاقدیس‌های متعددی در اطراف ایذه گسترش دارند و احتمال ارتباط هیدرولیکی بین این ساختارها وجود دارد. بنابراین، از دیدگاه هیدروژئولوژیکی انتظار می‌رود باید منبع قابل‌اعتمادی برای ذخیره آب در منطقه وجود داشته باشد و آب موردنیاز را تأمین نماید. نتایج این مطالعات می‌تواند، به شناسایی زون‌های تغذیه و تعیین مسیر جریان‌های زیرزمینی بین حوضه‌ها راهبردی مؤثر در تأمین آب شهر ایذه باشد.

### – تاقدیس شاپوش – تنوش

تاقدیس دو کوهانه شاپوش – تنوش در مجاورت هم با روند شمال غرب – جنوب شرق در جنوب ایزه واقع شده است. سطح تاقدیس از سازند آهکی ایلام – سروک پوشده شده است. محور این تاقدیس تقریباً روند شمال غربی – جنوب شرقی دارد. تمرکز شکستگی در یال شرقی بیشتر از یال غربی می باشد. چشمه ای با آبدهی قابل ملاحظه در این تاقدیس وجود ندارد.

### – تاقدیس کمر دراز

این تاقدیس فرسایش یافته تک یالی با روند کلی شمال – غربی – جنوب شرقی و به موازات تاقدیس شاپوش – تنوش قرار دارد و مهم ترین سازند تشکیل دهنده این تاقدیس سازند آسماری است. در یال شمال شرقی این تاقدیس یک گسل تراستی به طول تقریبی ۱۰ کیلومتر با شیب به سمت جنوب – غرب وجود دارد. در قسمت های جنوبی عملکرد نیروهای تکتونیکی باعث برگشتگی لایه ها در این تاقدیس گردیده است. گسل های ایجاد شده در این تاقدیس روند غالب شمال شرقی – جنوب غربی دارند. یال های سازند آسماری در این تاقدیس در اکثر نواحی توسط سازندهای نفوذناپذیر پابده و گورپی احاطه شده است.

### – ناودیس نعل اسبی

ارتفاعات ناودیس نعل اسبی به صورت متقارن به طول ۱۲ کیلومتر و عرض ۲ کیلومتر بین تاقدیس های پیون و شاپوش – تنوش با روند شمال غربی – جنوب شرقی قرار گرفته اند که متشکل از سازند آسماری هستند. تنش های تکتونیکی فشارشی و کششی موجب تشکیل شکستگی های فراوان در این توده سنگ های آهک شده است. توسعه درزه ها و مجاری انحلالی در این توده آهکی شرایط مناسب جهت تشکیل مخازن آب کارستی را فراهم آورده است. این ناودیس از زیر توسط سازند پابده مسدود شده است و سفره آبدار کارستی با قابلیت آبدهی مناسب جهت بهره برداری در منطقه ایزه می باشد.

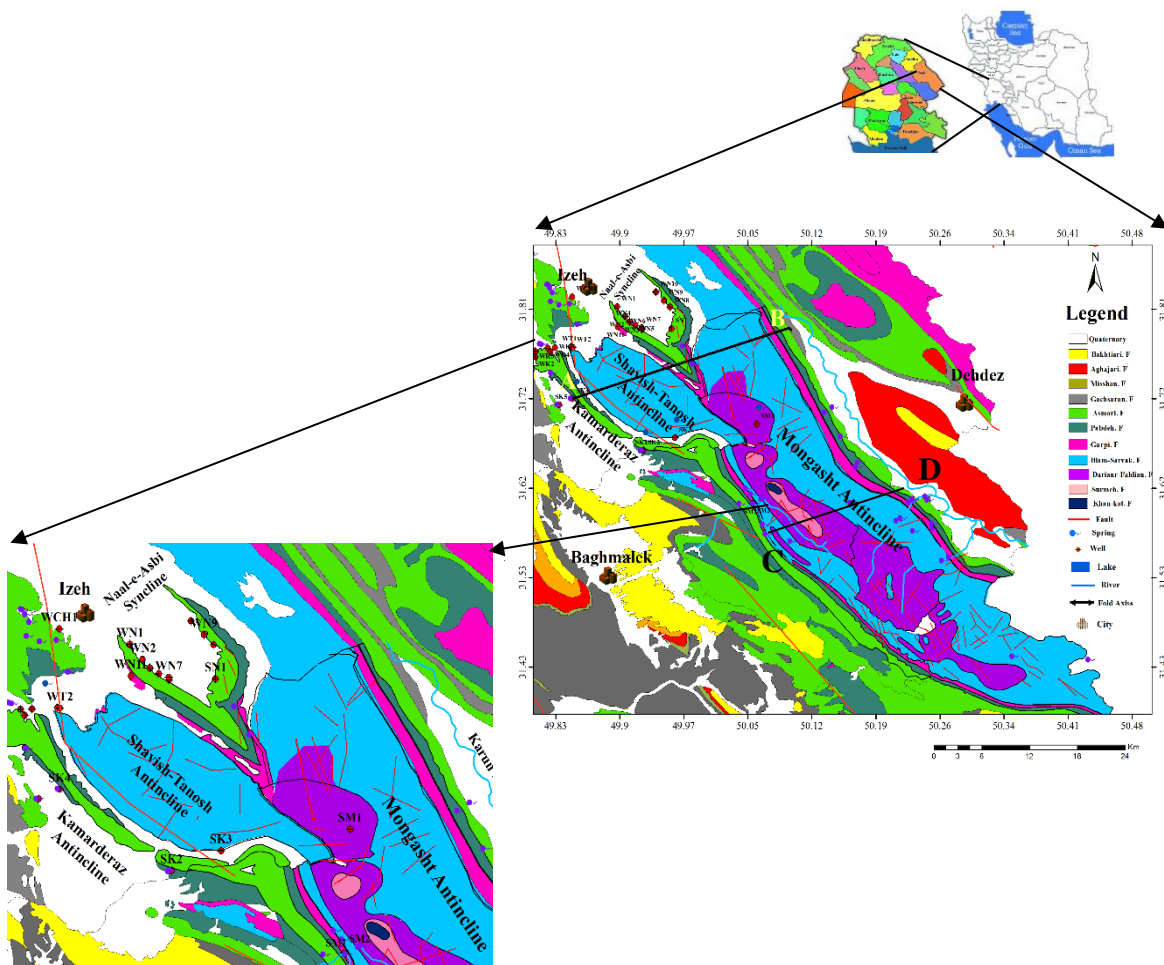
ایلام – سروک (کرتاسه فوقانی)، سازندهای شیلی – مارنی پابده و گورپی (کرتاسه بالایی تا ائوسن) و سازند آهکی آسماری (الیگوسن تا میوسن) می باشد. سازند ایلام – سروک در تاقدیس منگشت و تاقدیس شاپوش و تنوش رخنمون دارد و مساحت بیشتری را نسبت به بقیه سازندها در منطقه پوشش می دهد (شکل ۱).

### ساختارهای منطقه

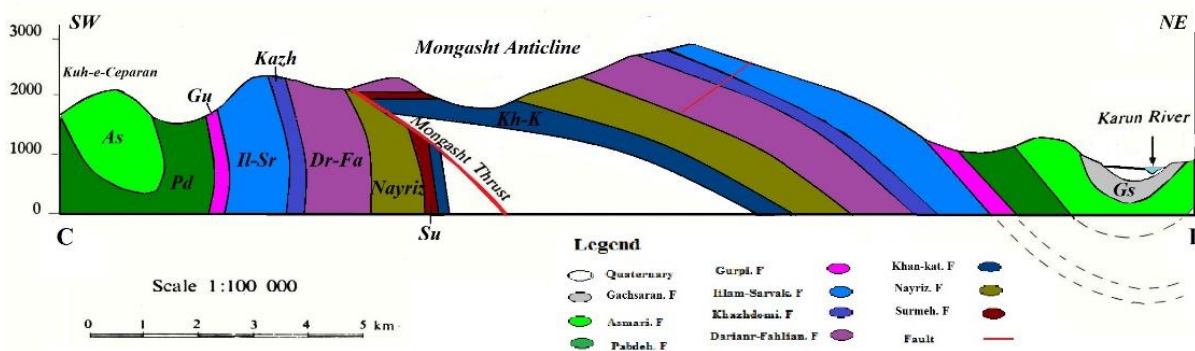
#### – تاقدیس منگشت

تاقدیس منگشت بلندترین ساختار چین خورده منطقه است. تاقدیس منگشت استوانه ای شکل است که در هر دو یال سازندهای شیلی – مارنی پابده و گورپی قرار دارند. در ارتفاعات سازندهای کربناتی فهلیان – داریان و ایلام – سروک رخنمون دارند. قسمت های غربی تاقدیس با خطوط گسل NE-SW با دامنه های تاقدیس شاپوش – تنوش شدیداً ادغام می شوند. شیب یال شمال شرقی تاقدیس ملایم تر است، که دو یال تاقدیس ارتباط هیدرولیکی ندارند.

مقاطع زمین شناسی رسم شده در راستای عمود بر محور تاقدیس منگشت نشان می دهد به دلیل هسته غیر قابل نفوذ بودن و بالا بودن هسته نفوذناپذیر تاقدیس، ظاهراً ارتباط عرضی هیدرولیکی بین یال های شرقی و غربی آن وجود ندارد. لیکن در هم ریختگی شدید این تاقدیس و وجود گسل های متعدد، می تواند باعث گردد که این ارتباط از طریق ناپیوستگی های موجود برقرار گردد سیستم های گسلی طولی و عرضی در جهات مختلف این تاقدیس را تحت تأثیر قرار داده اند. گسل ایزه باعث تغییر روند تاقدیس منگشت گردیده است و خمیدگی محور میانی تاقدیس نیز نتیجه عملکرد این گسل است. در نتیجه گسلش و لایه های نفوذناپذیر تعداد زیادی چشمه در بخش های مختلف این تاقدیس ظهور یافته است. تنوع شواهد ژئومورفولوژی کارست در بخش های مختلف این تاقدیس نشانگر گسترش کارست در این تاقدیس است.



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و مکان‌های نمونه‌برداری چاه‌ها و چشمه‌های کارستی حوضه آبریز ایذه.



شکل ۲- مقطع زمین‌شناسی در مسیر C-D (شکل ۱) تاقدیس منگشت.

### روش انجام کار

محدوده مورد مطالعه از تصویر ماهواره‌ای منطقه استخراج گردید، سپس برای بررسی ارتباط بین تراکم شکستگی‌ها و نفوذ و همچنین خروج آب به صورت چشمه نقشه هم‌تراکم شکستگی‌های منطقه مورد مطالعه رسم گردید. برای تهیه نقشه تراکم شکستگی‌های منطقه، ابتدا شکستگی‌ها، از روی نقشه‌های زمین‌شناسی، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای

با استفاده از نقشه زمین‌شناسی دهدز و کوه آسماری ۱/۱۰۰۰۰۰ شرکت نفت ملی ایران و تصویر ماهواره‌ای منطقه، نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه ترسیم و به روزرسانی شده است (شکل ۱). با به کارگیری توانایی‌های سنجش از دور و GIS گسل‌ها، شکستگی‌ها و درزه‌های

شکستگی‌ها، گسیختگی‌های شکننده در لایه‌های سنگی هستند که عمدتاً در اثر تنش‌های تکتونیکی اعمال شده به سنگ‌ها تشکیل می‌شوند. از دیدگاه هیدروژئولوژی شکستگی‌ها نقش مهمی در گسترش کارست و استنتاج اولیه مسیرهای جریان آب دارند. مشخصات درزه‌ها در برخی قسمت‌های منطقه برداشت گردیده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نمودارهای گل‌سرخ‌ی مربوط به این ایستگاه‌ها ارائه شد. از نقشه هم‌تراکم شکستگی‌ها و محل به‌منظور بررسی ارتباط تکتونیک با خروجی آب تاقدیس منگشت با شکستگی‌های منطقه امتداد و شیب درزه‌ها و گسل‌های موجود با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS اکستنشن Polar Plot دیاگرام گل‌سرخ‌ی آنها رسم گردید (شکل ۳). نمودارهای رسم شده نشان می‌دهد که سه گروه شکستگی اصلی در منطقه وجود دارد که امتداد آنها ۲۳۰، ۲۱۰ درجه (درزه‌های کششی طولی و عرضی) و شمالی-جنوبی است که مرتبط با چین‌خوردگی‌ها و سیستم تنش تکتونیکی حاکم بر منطقه هستند. در شکل (۳) موقعیت چشمه‌های منطقه نسبت به گسل‌ها، محور تاقدیس‌ها، ناودیس‌ها و خطوط‌ها نیز نشان داده شده است. نقشه هم‌تراکم شکل (۳)، جهت بررسی ارتباط نواحی با پتانسیل زیاد نفوذپذیری (شکستگی زیاد) و خروجی جریان آب (چشمه‌های منطقه) تهیه گردید. همان‌گونه که در شکل مشخص است در مناطقی که تراکم این عناصر بیشتر است، چشمه‌های بیشتری نیز ظاهر گردیده‌اند.

روند بیشتر گسل‌های منطقه همان روند غالب زاگرس، شمال-غرب-جنوب شرق می‌باشد. نمودارهای گل‌سرخ‌ی یال‌های شرقی و غربی تاقدیس منگشت و در جایی که فراوانی چشمه‌ها زیاد است، نشان می‌دهند که فراوانی شکستگی‌ها و گسل‌ها در این نواحی بیشتر بوده و در یک راستا قرار دارند. به نظر می‌رسد جهت جریان آب زیرزمینی در مجاری کارستی تابع روند این شکستگی‌هاست و جهت جریان در مجاری کارستی سازند ایلام-سروک شمال شرقی-جنوب غربی (عمود بر امتداد محور تاقدیس) است. با توجه به جهت غالب شکستگی‌ها و گسل‌های موجود (NE-SW)، جهت جریان از سمت تاقدیس منگشت به طرف تاقدیس شاپوش-تنوش می‌باشد، که نشان‌دهنده ارتباط هیدرولیکی این دو تاقدیس می‌باشد. همچنین، نقشه زمین‌شناسی و بازدید صحرایی از چشمه‌ها و محل ظهور آنها

(گوگل ارث و ترکیب باندی ۷۴۱) مربوط به محدوده مورد مطالعه استخراج گردید، سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10 به صورت لایه raster درآمده و با استفاده از همین نرم‌افزار لایه تراکم شکستگی‌ها تهیه گردید. همچنین ۳۱ نمونه آب زیرزمینی (۱۷ چاه و ۸ چشمه) و ۶ نمونه آب باران در فصل تر (دی‌ماه ۱۳۹۸) و فصل خشک (خرداد ۱۴۰۰) و از چاه‌های در حال پمپاژ و چشمه‌های منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری شده است (شکل ۱). پارامترهای کیفیت آب شامل هدایت الکتریکی، دما و pH در محل اندازه‌گیری شد. نمونه-برداری جهت آنالیز ایزوتوپی، به‌منظور دستیابی به اطلاعات مربوط به روابط متقابل منابع آب در افق‌های کارستی منطقه انجام شد. غلظت یون‌های اصلی نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتر جذب اتمی در آزمایشگاه زاگرس آب‌شناس شیراز مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت، میزان فلزات سنگین و عناصر کمیاب نمونه‌ها با روش طیف‌سنج جرمی پلاسمای زوج القایی (ICP-MS) در آزمایشگاه زرآزمای تهران تعیین شد. آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$  در شرکت مصباح انرژی اراک انجام شد. نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن به صورت اختلاف نسبی (مقادیر) از استاندارد متوسط آب اقیانوس‌ها به قسمت در هزار بیان می‌گردد (رابطه ۱) (Fontes, 1976):

$$\delta(\%) = \frac{R_{\text{Sample}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \times 1000 \quad (1)$$

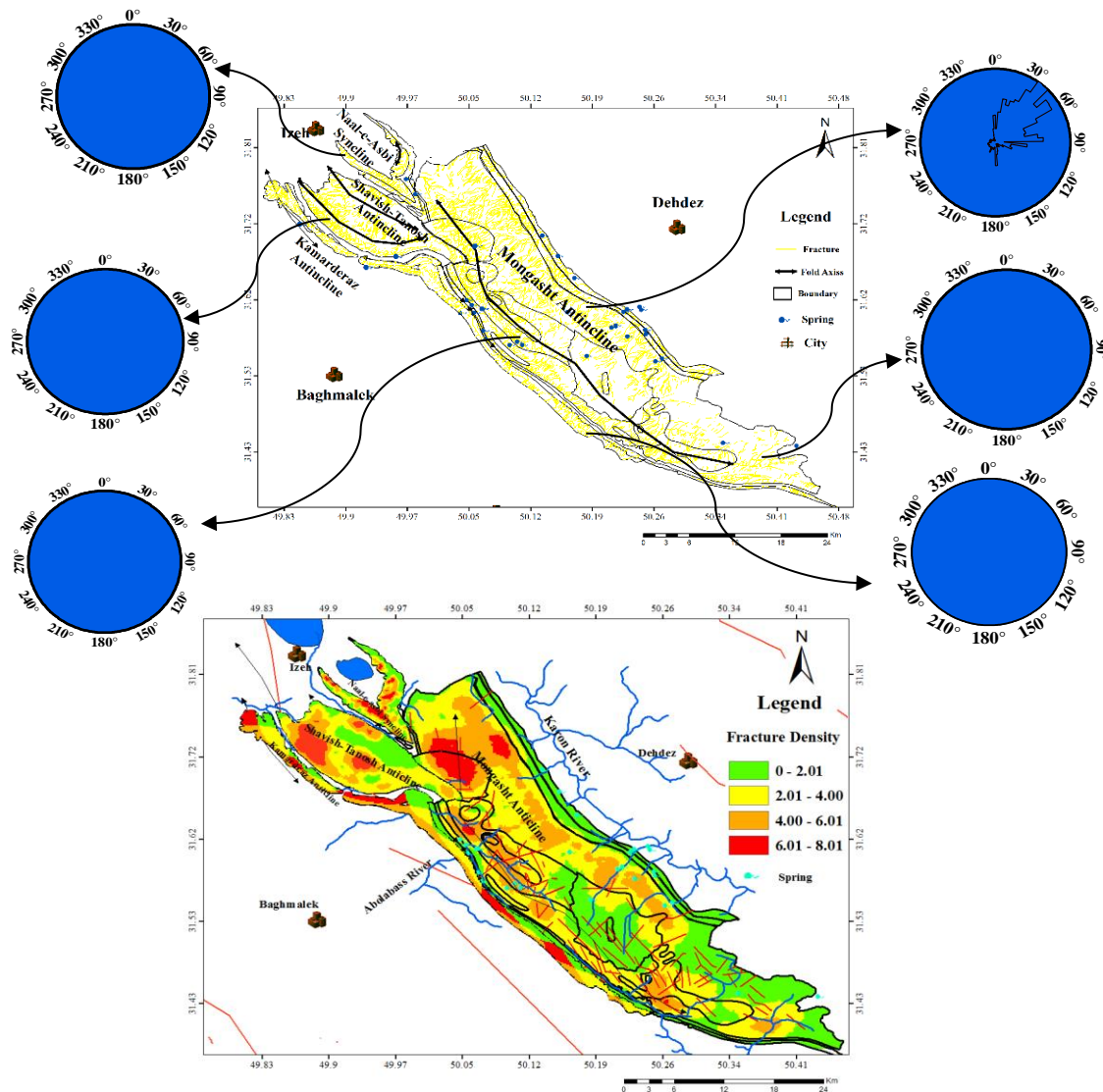
که  $R_{\text{sample}}$  نسبت ایزوتوپی نمونه ( $^2\text{H}/^1\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) و  $R_{\text{SMOW}}$  نسبت ایزوتوپی استاندارد مرجع بین‌المللی است. برای رسم نمودارهای هیدروشیمی و ایزوتوپی از نرم‌افزارهای Microsoft Office Excel, RockWare Aq.QA (2006) و برای تحلیل عاملی PCA (Pearson, 1990) از نرم‌افزار SPSS 16.0 استفاده شده است. جهت تفسیر هیدروشیمیایی به-منظور بررسی ارتباط هیدرولیکی بین ساختارهای تکتونیکی و آبخوان‌های کارستی منطقه و نیز شناسایی مشخص نمودن مسیر جریان آب زیرزمینی از نمودارهای مختلفی مانند Piper, Gibb و Langelier استفاده گردید.

## نتایج و بحث

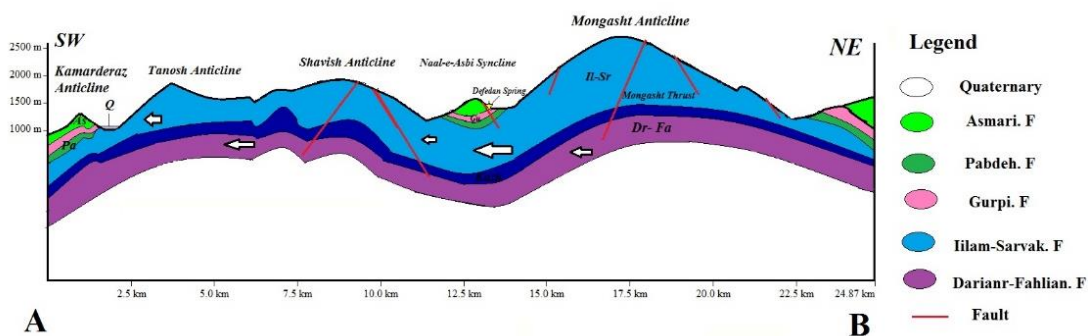
### نقش شکستگی‌ها در توسعه آبخوان کارستی

نشان می‌دهد که موقعیت مظهر و تا حدودی آبدهی این چشمه‌ها متأثر از روند شکستگی‌ها می‌باشد. مقطع زمین-شناسی ترسیم‌شده در راستای عمود بر محور تاقدیس‌های منگشت، شاویش-تنوش و کمردراز و نیز ناودیس نعل اسبی نشان می‌دهد که تاقدیس منگشت با ناودیس نعل اسبی

احتمالاً از طریق گسل عرضی ارتباط هیدرولیکی دارد. این تاقدیس با تاقدیس شاویش-تنوش از طریق گسل طولی که سازند فهلیان-داریان و کژدمی را در قسمت جنوب‌شرقی تاقدیس شاویش-تنوش قطع می‌کند، ارتباط هیدرولیکی دارد (شکل ۴).



شکل ۳- نقشه تراکم شکستگی و چشمه‌ها و دیگر گسل‌ها و شکستگی‌های محدوده مورد مطالعه.



شکل ۴- مقطع زمین‌شناسی در مسیر A-B (شکل ۱) و جهت جریان عمومی در منطقه و ارتباط ساختارهای منطقه مورد مطالعه.

### بررسی خصوصیات شیمیایی منابع آب منطقه

آهکی است که موجب افت سطح ایستابی سفره کارستی نسبت به سفره آبرفتی گردیده است (Kalantari et al., 2008). غلظت سدیم ( $\text{Na}^+$ ) از ۱ تا ۵۵ mg/L و کمتر از حد مجاز ( $200 \text{ mg/L}$ ) (WHO, 2004) و غلظت یون‌های پتاسیم  $\text{K}^+$  بین ۰/۳ تا ۱/۵ mg/L، کلسیم بین ۴۰/۱ تا ۱۰۹/۲ mg/L متغیر هستند، حد مجاز کلسیم ۷۵ mg/L می‌باشد (WHO, 2011)، مقدار منیزیم از ۱/۲ تا ۳۲/۸ mg/L می‌باشد. غلظت یون  $\text{HCO}_3^-$  از ۱۴۰/۳ تا ۳۸۱/۴ mg/L متغیر و ۴۵ درصد نمونه‌های آب زیرزمینی بالاتر از مقدار استاندارد جهانی WHO ( $250 \text{ mg/L}$ ) قرار دارند. غلظت یون  $\text{Cl}^-$  در نمونه‌های آب از ۷/۱ تا ۸۱/۵ mg/L می‌باشند. غلظت یون  $\text{SO}_4^{2-}$  بین ۱/۹ تا ۱/۷۲ mg/L با میانگین ۱۵/۶ mg/L قرار دارند.

پارامترهای فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار pH کمی قلیایی و بین ۷/۱۸ تا ۸/۲۲، میزان جامدات محلول (TDS) از ۲۰۹ تا ۹۴۴ mg/L متغیر می‌باشد و دمای آب از ۱۲/۸ تا ۲۴/۸ درجه سانتی‌گراد نوسان دارد. مقدار EC بین ۲۷۸ تا  $1325 \mu\text{S/cm}$  می‌باشد، افزایش EC در چاه‌های  $\text{WN}_1$ ،  $\text{WN}_2$  و  $\text{WN}_4$  واقع در ناودیس نعل اسبی را می‌توان به معکوس شدن جهت جریان آب زیرزمینی از سفره آبدار آبرفتی به سمت سفره کارستی نعل اسبی دانست. معکوس شدن جهت جریان، بر اثر خشکسالی‌های اخیر و برداشت بیش از حد آب از سفره آبدار

جدول ۱- مشخصات فیزیکو-شیمیایی چاه‌ها و چشمه‌های کارستی منطقه ایذه (میلی‌گرم در لیتر).

Cl (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> (mg/L)	K (mg/L)	Na (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	TDS (mg/L)	EC (μS/cm)	pH	ID	Structure	Name
1.4	7.2	9.2	0.4	0.7	1.6	3.6	22.5	35	6.6	Rain <sub>A</sub>		Aghgil
6.7	13	19.5	0.4	5.1	1.1	9.2	55	86	7	Rain <sub>AB</sub>		Abkhogan
7.1	1.9	183.1	0.4	1.1	9.7	44.1	247.2	320	8.2	SM <sub>1</sub>	Mongasht	Abgol
8.9	28.8	198.3	0.4	1.8	10.3	64.1	312.4	429	8.2	SM <sub>2</sub>		Malagha1
12.4	2.9	173.9	0.4	1.4	12.2	40.1	242.9	330	8.1	SM <sub>3</sub>		Malagha2
10.6	5.3	140.3	0.4	3.2	1.2	48.1	209	278	8.2	SN <sub>1</sub>		Takab
33.7	7.2	366.1	1.2	20.2	32.8	72.1	532.7	707	7.4	WN <sub>1</sub>		Kaldozakh
31.9	7.2	308.1	1.2	19.8	29.2	70.1	466.9	674	7.4	WN <sub>2</sub>		Gamoshi
14.2	5.3	195.3	0.4	13.1	12.2	48.1	288.2	377	7.9	WN <sub>3</sub>		Lavaii1
46.1	12	335.6	1.2	27.8	32.8	66.1	521	744	7.5	WN <sub>4</sub>		Lavaii2
17.7	7.7	216.6	0.4	13.6	10.9	56.1	322.7	471	7.7	WN <sub>5</sub>	Naale-Asbi	Bardboran 1
26.6	4.3	250.2	0.8	14.7	14	63.1	373.3	498	7.6	WN <sub>6</sub>		Bardboran2
28.4	5.8	259.3	0.8	16.6	16.4	68.1	394.9	551	7.6	WN <sub>7</sub>		Porarshad
21.3	8.6	204.4	0.4	12.2	15.8	52.1	314.5	469	7.8	WN <sub>8</sub>		Abtrak
81.5	10.6	195.3	1.2	25.3	22.5	60.1	396.1	593	7.7	WN <sub>9</sub>		Kohbad1
65.6	19.2	186.1	0.8	33.3	19.4	58.1	382.3	582	7.7	WN <sub>10</sub>		Kohbad2
16	4.8	308.1	0.8	11	25.5	66.1	431.8	584	7.4	WN <sub>11</sub>		Chega
14.2	19.2	381.4	1.2	19.1	28	86.2	548.5	716	7.2	SK <sub>1</sub>		Tekyeh1
12.4	24	329.5	1.2	17.7	30.4	64.1	478.7	626	7.8	SK <sub>2</sub>		Tekyeh2
19.5	9.6	381.4	1.2	14.7	19.4	109.2	554.5	782	7.9	SK <sub>3</sub>		Abgorazi
14.2	8.6	238	0.8	7.1	15.8	64.1	348.3	455	8.1	SK <sub>4</sub>		Monareh
70.9	72.1	231.9	1.6	55.4	18.2	70.1	519.8	721	7.7	WK <sub>1</sub>	Kamarderaz	1 Rostaii
23	36	238	1.2	19.1	20.7	50.1	387.6	542	7.8	WK <sub>2</sub>		2 Halayejan
8.9	28.8	231.9	0.8	14.7	17	52.1	353.8	451	7.8	WK <sub>3</sub>		3 Halayejan
26.6	38.4	222.7	1.2	26.2	13.4	60.1	388.3	528	7.8	WK <sub>4</sub>		4 Halayejan
7.1	9.6	280.7	1.2	12	18.2	70.1	398.4	500	7.6	WT <sub>1</sub>	Shavish-Tanosh	5 Halayejan
8.9	12	274.6	1.2	12.6	7.3	88.2	404.4	500	7.6	WT <sub>2</sub>		6 Halayejan

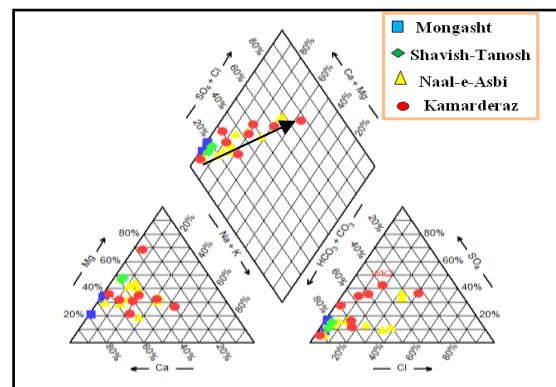
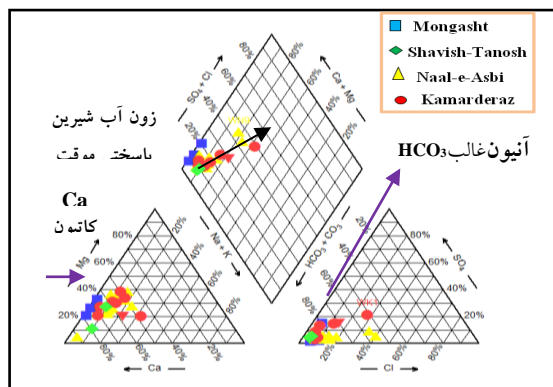
### ارزیابی ژئوشیمیایی

از نمودار پایپر (Piper (1994) استفاده شده است (شکل ۴). این نمودار جهت تعیین نوع آب، رخساره‌های هیدروشیمیایی، مسیر تکامل هیدروژئوشیمیایی، نمایش تعداد زیاد نمونه در یک نمودار، نمایش تشخیص و

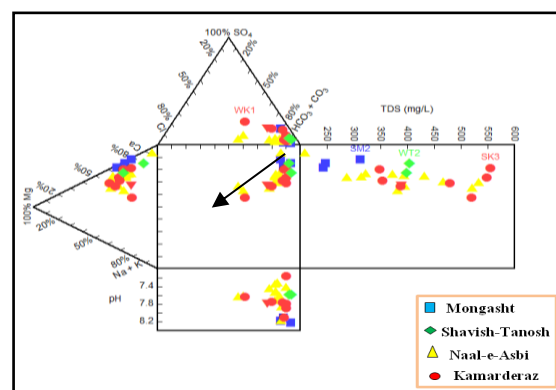
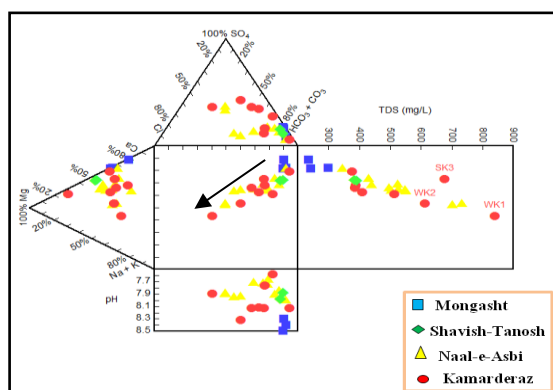
جهت ارزیابی ژئوشیمیایی آب زیرزمینی (تیپ و رخساره) و طبقه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی حوضه آبریز ایذه بر اساس کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ )

سروک- فهلیمان- داریان و آسماری) و انحلال کانی‌های کربناته منشأ اصلی یون‌های کلسیم و منیزیم در آب چاه‌ها و چشمه‌ها می‌باشد و غلظت زیاد یون بی‌کربنات در نتیجه فرسایش و هوازدگی کانی‌های کربناته است. ویژگی‌های هیدروشیمیایی آب چاه‌ها و چشمه‌ها تأییدکننده منشأ کارستی آنها می‌باشد. به‌طور کلی، نمودار دورو فرایندهای اصلی هیدروشیمیایی مؤثر بر شیمی آب (تبادل یونی، تبادل یونی معکوس، انحلال و اختلاط) را نشان می‌دهد (Ravikumar et al., 2015). برای آب‌های کارستی منطقه مورد مطالعه، نمودار دورو (شکل ۶) نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌های آب‌ها قلیایی و با TDS کمتر از  $500 \text{ mg/L}$  می‌باشند، که تأثیر سنگ‌شناسی سنگ آهک را بر ترکیب آب تأیید می‌کند. آب چشمه‌های  $SK_1$  و  $SK_3$  دارای TDS بیشتری هستند که منعکس‌کننده جریان انتشاری می‌باشد. برای همه نمونه‌ها، فرایند انحلال و انتقال آب در سنگ‌های آهکی و تا حدی دولومیتی تعیین‌کننده اصلی شیمی آب می‌باشد.

شبهات‌ها بین نمونه‌های آب، تأثیر اختلاط آب‌های مختلف و بررسی تغییرات زمانی و مکانی نمونه‌ها کاربرد دارد. نمودار Piper برای دو دوره مرطوب و خشک در شکل ۵، نشان می‌دهد که مجموع عناصر قلیایی خاکی ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ) بیشتر از مجموع عناصر قلیایی ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) است. همچنین، مجموع آنیون‌های اسیدی ضعیف ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ) بیشتر از مجموع آنیون‌های اسیدهای قوی ( $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ ) است. نکته قابل توجه در نمودار پایپر قرارگیری بسیاری از نمونه‌های آب زیرزمینی در امتداد یک خط است، این خط تأثیر اختلاط بین آب‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به ساختارهای منطقه مورد مطالعه و فراوانی درزه‌ها و گسل‌های متعدد در این محدوده (شکل ۳)، انتقال آب‌های با شیمی مختلف در امتداد این شکستگی‌ها و اختلاط آنها در محل تقاطع درزه‌ها علت روند خطی نمونه‌ها در نمودار پایپر است. با مطالعه و تفسیر زمین‌شناسی منطقه می‌توان نتیجه گرفت که گسترش سنگ‌های کربناته (سازنده‌های آهکی ایلام-



شکل ۵- نمودارهای پایپر (الف) دی ماه ۱۳۹۸، (ب) خرداد ۱۴۰۰ برای نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه.

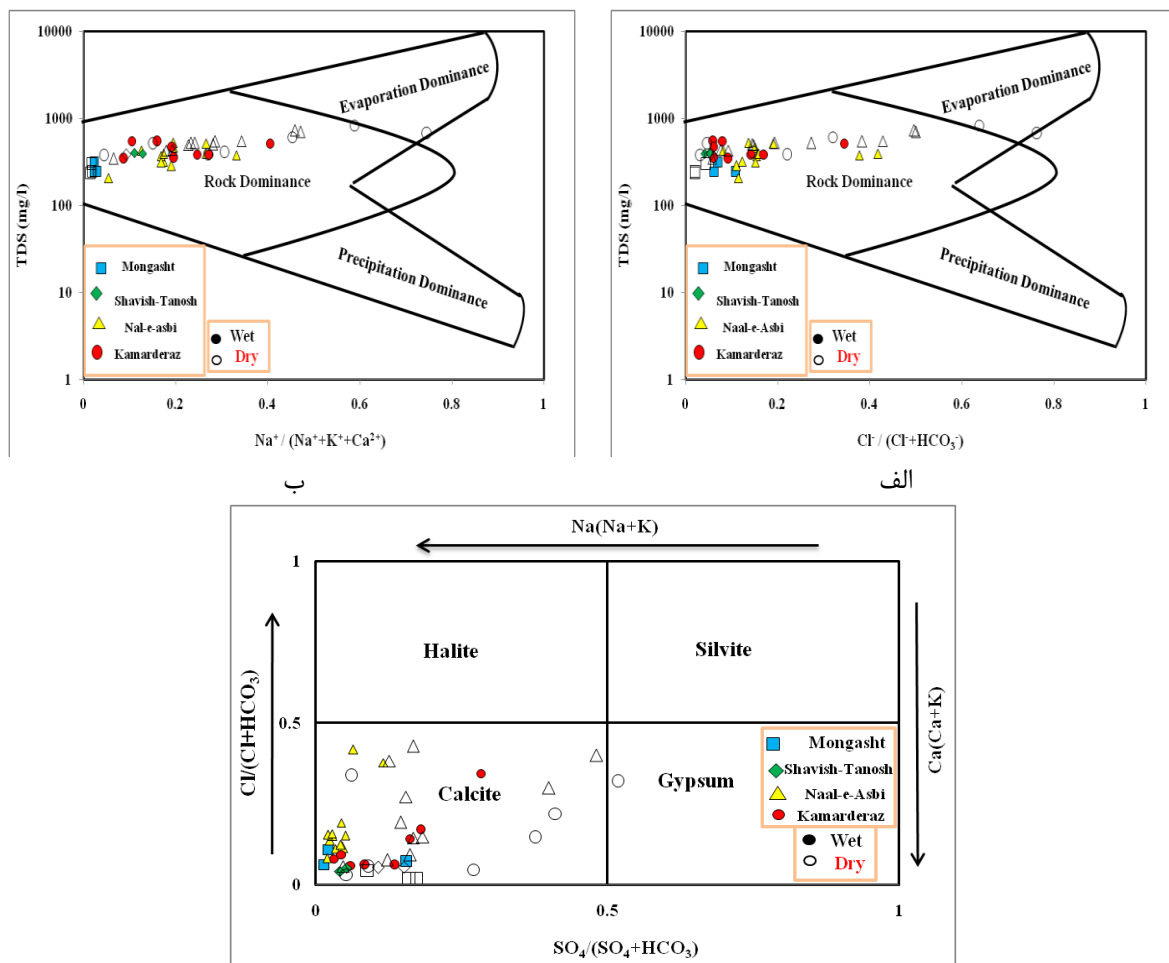


شکل ۶- نمودار دورو (الف) دی ماه ۱۳۹۸، (ب) خرداد ۱۴۰۰ برای نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه.

فهلپان-داریان و آسماری در منطقه هستند. موقعیت نمونه-های مورد مطالعه روی نمودار گیبس نشان می‌دهد که کیفیت شیمیایی تمام نمونه‌ها تحت تأثیر واکنش بین آب و سنگ‌های آهکی می‌باشد (شکل ۷). با توجه به ترکیب سنگ‌شناسی منطقه، عوامل هوازگی و انحلال کربنات‌ها (سازندهای آهکی-دولومیتی کرتاسه و سازند آسماری) کنترل‌کننده‌های اصلی شیمی آب چاه‌ها و چشمه‌های منطقه می‌باشند (اشکال ۶ و ۷).

نمودارهای گیبس (Gibbs, 1970)، با استفاده از مقدار لگارتیم TDS در مقابل نسبت کاتیونی  $Na^+/(Na^++K^++Ca^{2+})$  و آنیونی  $Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$  ترسیم می‌شود و جهت تعیین منشأ یون-های محلول در آب استفاده می‌شود.

تجزیه و تحلیل نمودار گیبس (شکل ۷ الف و ب) نشان می‌دهد که چاه‌ها و چشمه‌ها از منبع مشابهی تغذیه می‌شوند. با توجه به شرایط چینه‌شناسی و هیدروژئولوژیکی منطقه، این واحدها سنگ‌های آهکی کرتاسه تا میوسن سازندهای ایلام-سروک،



شکل ۷-الف-نمودارهای گیبس نمونه‌های آب چاه‌ها و چشمه‌های کارستی حوزه آبخیز ایذه ب- TDS در برابر  $Cl^-/(Cl^-+HCO_3^-)$  ج-  $Na^+/(Na^++Ca^{2+})$ .

(Yuan et al., 2014; Bhat et al., 2017). برای بررسی واکنش بین آب و سازندهای کارستی و مشخص نمودن منشأ احتمالی یون‌های موجود در آب‌های زیرزمینی، نمودارهای ترکیبی یون‌ها (شکل ۷) ترسیم گردید. برای شناسایی منبع سدیم و

**نمودارهای ترکیبی آب‌های زیرزمینی منطقه**  
واکنش آب با مواد معدنی نقش مهمی در کنترل شیمیایی آب‌های زیرزمینی دارد. نسبت بین یون‌های اصلی نوع واکنش آب با سنگ (انحلال، هوازگی یا تبادل یونی) را نشان می‌دهد

چشمه‌های منطقه از سازند آهکی داریان-فهلپان و سازند آهکی-دولومیتی ایلام-سروک می‌باشد.

در نمودار ( $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ ) در مقابل  $HCO_3^-$  (شکل ۸-د)، نمونه‌ها در زیر یا روی خط ۱:۱ قرار دارند. قرارگیری نمونه‌ها بر روی خط تعادل، ناشی از هوازگی و انحلال دولومیت‌ها (سازند ایلام-سروک) می‌باشد. نمونه‌های زیر خط تعادل نشان‌دهنده ورود کلسیم و منیزیم از منشأ غیر از دولومیت (سازند آهکی آسماری) به آب می‌باشد. در نمودار ( $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ) در مقابل  $HCO_3^-$  پراکنش نمونه‌ها در دو فصل تر و خشک در زیر خط تعادلی نشان‌دهنده تبادل یونی معکوس همچنین افزایش کلسیم و منیزیم نسبت به بی‌کربنات می‌باشد. که این شرایط نمایانگر این است که افزایش کلسیم و منیزیم می‌تواند دارای منشأ به‌غیراز دولومیت و سازندهای کربناتی منطقه باشد.

نمودار ( $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ) در مقابل ( $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ )، جهت بررسی هم‌زمان تبادلات کلسیم و منیزیم در آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صورتی که قرارگیری نمونه‌ها روی خط تعادل ۱:۱ قرار گیرند، این موضوع نشان‌دهنده هم‌زمانی فرآیند انحلال کلسیت، دولومیت و ژپیس در این منابع می‌باشد. اگر غلظت ( $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ ) در نمونه‌هایی که روی خط راست قرار می‌گیرند کمتر از ۱۰ (meq/L) باشد، انحلال کلسیت و دولومیت غالب است و اگر این غلظت بیشتر از ۱۰ (meq/L) باشد، انحلال غالب ژپیس می‌باشد. همچنین اگر مقادیر ( $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ) بیشتر از ( $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ ) باشد تبادل یونی و چنانچه ( $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ ) بیشتر از ( $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ) باشد، تبادل یونی معکوس را نشان می‌دهند (Zaidi et al., 2015; Krishnaraj, 2011). نمودار ( $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ) در مقابل ( $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ )؛ (شکل ۸-ه) نشان می‌دهد که بیشتر نمونه‌ها در نزدیک خط ۱:۱ و کمتر از ۱۰ (meq/L) قرار می‌گیرند که بیانگر واکنش آب زیرزمینی با سازندهای کربناته و انحلال کلسیت و دولومیت (سازند ایلام-سروک و آسماری) است (Zaidi et al., 2015).

همان‌طور که در نمودار ( $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ ) در مقابل  $SO_4^{2-} + HCO_3^-$  ۰.۵ آب‌های کارستی منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود (شکل ۸-و)، تغییر غلظت منیزیم و کلسیم نسبت به سولفات و بی‌کربنات به‌صورت خطی است. روند خطی فوق

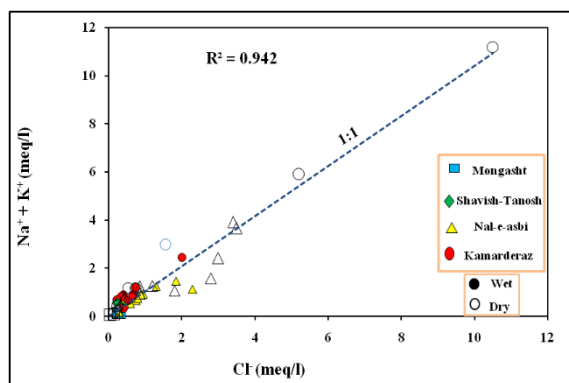
کلرید از نمودار پراکندگی  $Na^+ + K^+$  در برابر  $Cl^-$  استفاده شد (شکل ۷-الف). بر این اساس، رابطه بین  $Na^+$  و  $Cl^-$  نشان‌دهنده: ۱- انحلال هالیت است اگر نسبت  $Na^+/Cl^-$  تقریباً ۱ باشد. ۲- هوازگی فلدسپات‌ها یا تبادل کاتیونی در صورتی که نسبت  $Na^+ / Cl^- > 1$  باشد (Zhanget al., 2020). در سفره‌های آبدار کارستی، غلظت  $Na^+$  و  $K^+$  بسیار کمتر از  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  می‌باشد، که یون‌های  $Na^+$  و  $K^+$ ، احتمالاً از انحلال فلدسپات‌های موجود در سازندهای مارنی وارد آب زیرزمینی می‌گردند (Verbovsek and Kanduc, 2016). شکل ۸ الف نشان می‌دهد که نمونه‌های آب منطقه مورد مطالعه، در امتداد خط ۱:۱ قرار دارند و منشأ یون‌های  $Na^+$  و  $K^+$  آب‌های این مناطق هم از تبادل یونی و تبادل یونی معکوس آب با سازندهای کربناته می‌باشد. نمونه‌های آب متعلق به تاکدیس‌های کم‌رداز و شلویش-تنوش نیز بالای خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند، که نشان‌دهنده انحلال هالیت و هوازگی فلدسپات‌های موجود در سازندهای مارنی منطقه می‌باشد. با استفاده از نسبت یونی  $Na^+/Na^++Cl^-$  می‌توان تبادل یونی در نمونه‌های آب زیرزمینی را اثبات نمود. چنانچه این نسبت بیشتر از ۰.۵ باشد، نشان می‌دهد که سدیم منبع دیگری به‌جز هالیت و مارن دارد و همچنین ممکن است تبادل یونی اتفاق افتاده باشد. با محاسبه این نسبت در نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (شکل ۸-ب) مشخص گردید که نمونه‌های آب تاکدیس کم‌رداز و شلویش-تنوش و برخی نمونه‌های ناودیس نعل اسبی مقدار این نسبت بیشتر از ۰.۵ می‌باشد و نشان‌دهنده تبادل یونی معکوس می‌باشد و منشأ سدیم به‌دلیل وجود رس می‌باشد.

نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه از نظر دولومیت در حالت فوق-اشباع قرار دارند، همچنین نمونه‌های تاکدیس منگشت نسبت به سایر نمونه‌ها از نظر شاخص اشباع دولومیت بیشتر می‌باشد. مقدار نسبت  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  در سنگ‌های دولومیتی کم و در سنگ‌های آهکی زیاد می‌باشد (Langmuir, 1971; Eftimi, 2006). در منطقه آلبانی (Albania) میانگین نسبت  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  را برای چشمه‌های سنگ آهک خالص ۱۱/۸ و برای اغلب چشمه‌های سنگ‌های دولومیتی ۲/۹ محاسبه کرده است. در نمودار (شکل ۸-ج)، میانگین نسبت  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  نمونه‌های آب منطقه ۲/۳ می‌باشد، که بیانگر تغذیه بیشتر چاه‌ها و

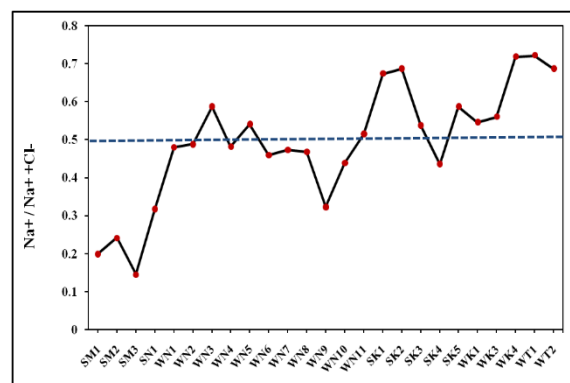
و نمونه‌های تاکدیس کمردراز و ناودیس نعل اسبی بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ قرار گرفته‌اند (سازند آهکی آسماری). دلیل بیشتر بودن نسبت ( $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ ) در نمونه‌های آب نعل اسبی و کمردراز، حرکت آب زیرزمینی و زمان طولانی‌تر اقامت آب زیرزمینی از سمت محل تغذیه تا محل تخلیه، تفاوت در سرعت انحلال کلسیت و دولومیت در پایین‌دست آبخوان می‌باشد، با توجه به فوق‌اشباع بودن دولومیت نسبت به کلسیت در نمونه‌های آب زیرزمینی و بیشتر بودن این نسبت در تاکدیس منگشت نسبت به سایر ساختارهای منطقه، این نسبت می‌تواند به‌عنوان شاخص کیفی زمان اقامت در جهت افزایش نسبت  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  با توجه به حرکت آب زیرزمینی از سمت محل تغذیه به سمت محل تخلیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، فرآیندهای اصلی ژئوشیمیایی در آبخوان‌های کارستی ایذه، نشان می‌دهد که فرایند هیدروشمیایی غالب در منطقه انحلال سازندهای دولومیتی و کلسیتی، رسوب کلسیت و غنی‌شدگی منیزیم در آب‌های زیرزمینی از سمت محل تغذیه (تاکدیس منگشت) به سمت محل تخلیه (سایر سازندهای منطقه) است.

نشان‌دهنده انحلال آهک و دولومیت سازند ایلام-سروک در مسیر جریان از محل تغذیه (تاکدیس منگشت) به سمت محل تخلیه چاه‌ها و چشمه‌های منطقه (تاکدیس‌های شاپوش-تنوش، کمردراز و ناودیس نعل اسبی) می‌باشد. شکل (۸-ز) نمودار  $Mg^{2+}$  در مقابل  $Ca^{2+}$  را نشان می‌دهد، نسبت ( $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ ) در آب بستگی به نسبت کلسیت و دولومیت موجود در سنگ‌های سفره آبدار، قدرت انحلال و همچنین زمان عبور آب در سازندها دارد (Fairchild et al., 2000). مقدار کلسیت و دولومیت در سفره‌های آبدار کربناته تنها عامل تعیین‌کننده نسبت ( $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ ) آب‌های زیرزمینی نمی‌باشد و عامل اساسی دیگر، سرعت انحلال کلسیت و دولومیت می‌باشد. کلسیت سریع‌تر از دولومیت حل می‌شود و در آب زیرزمینی در کمتر از ده روز به تعادل می‌رسد، درحالی‌که دولومیت برای رسیدن به تعادل مدت‌زمان زیادی نیاز دارد (White, 2001).

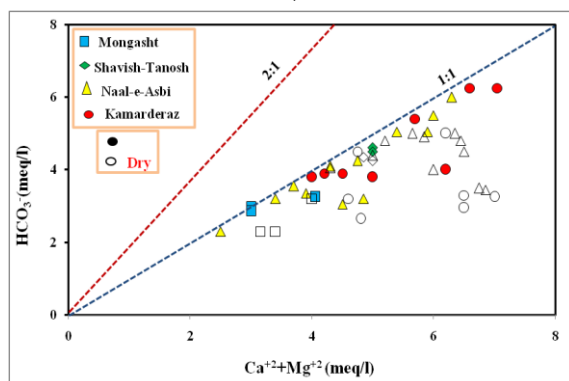
همان‌طور که در نمودار (۸-ز) مشاهده می‌گردد، نمونه‌های تاکدیس منگشت و شاپوش-تنوش دارای نسبت  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  کمتر از ۰/۵ هستند (سنگ‌های آهک دولومیتی، ایلام-سروک)



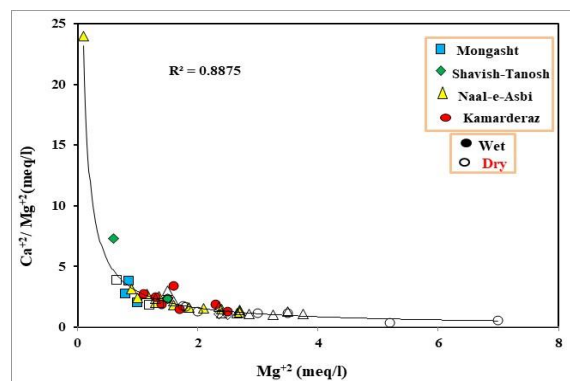
ب



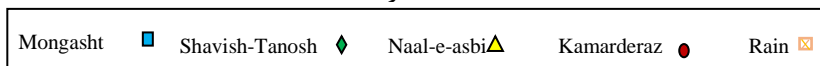
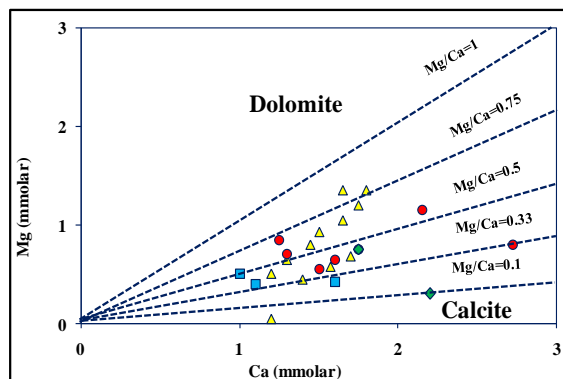
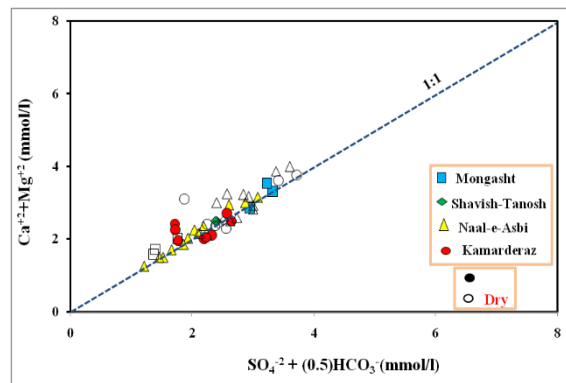
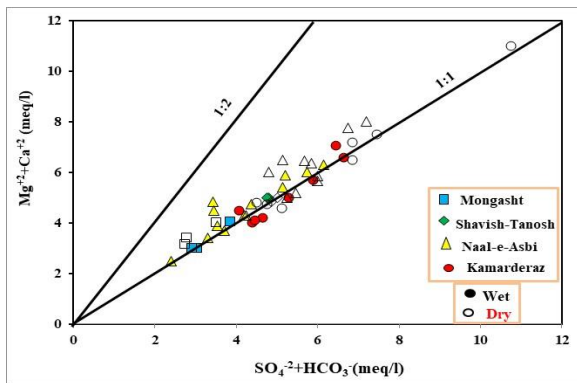
الف



د



ج



شکل ۸- نمودار پراکنده‌گی الف)  $\text{Na}^+/\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ ، ب)  $\text{K}^+ + \text{Na}^+$  در مقابل  $\text{Cl}^-$ ، ج)  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  در مقابل  $\text{Mg}^{2+}$ ، د)  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  در مقابل  $\text{HCO}_3^-$ ، ه) شکل ۹- نمودار پراکنده‌گی الف)  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  در مقابل  $\text{SO}_4^{2-} + (0.5)\text{HCO}_3^-$  و ب)  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  در مقابل  $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$  (ز) نمودار نسبت  $\text{Ca}^{2+}$  در مقابل  $\text{Mg}^{2+}$  برای نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه.

قرار گرفت. نتایج آماری غلظت برخی از عناصر کمیاب آب‌های زیرزمینی منطقه ایزه در جدول ۲ ارائه شده است. داده‌های هیدروشیمیایی نشان می‌دهد که تمام عناصر کمیاب در نمونه های آب وجود دارند ولی غلظت عناصر کمیاب و فلزات انتقالی به‌استثنای  $(\text{Ba}^{+2}, \text{Sr}^{+2})$  کم هستند. عموماً غلظت اندک عناصر کمیاب در آب‌های کارستی به‌علت خاصیت لیتولوژیکی و کوتاه بودن زمان اقامت می‌باشد.

### بررسی عناصر کمیاب آب زیرزمینی منطقه

بعضی از سازندهای زمین‌شناسی نسبت به بعضی عناصر نادر غنی‌شدگی بیشتری دارند که می‌توانند در شناسایی آب سازندهای مجاور بسیار کمک‌کننده باشند. در این تحقیق، ۲۵ نمونه آب از مکان‌های مختلف جمع‌آوری و برای اندازه‌گیری غلظت عناصر  $\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Cr}, \text{Bi}, \text{Pb}, \text{Ti}, \text{Ba}, \text{Al}, \text{B}, \text{Li}$ ،  $\text{Cu}, \text{Ni}, \text{Sr}, \text{Zn}, \text{Ag}, \text{Mo}$  مورد سنجش و تجزیه و تحلیل

جدول ۲- جدول توصیفی (max, min و متوسط) mg/L، عناصر کمیاب نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه (N = 25).

Elements	Al	S	Si	Sr	Ba	Mo	Li	Zn
Minimum	0.01	1.6	2.03	0.15	0.0078	0.001	0.0001	0.001
Maximum	0.18	61.4	9.22	4.09	0.21	0.018	0.0044	0.29
Mean	0.02	13.1	6.2	1.6	0.05	0.007	0.0009	0.02

یون‌های کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم با عناصر کمیاب سیلیسیم، باریم و لیتیوم و گوگرد همبستگی بالایی وجود دارد. این همبستگی، احتمالاً نشانگر منشأ مشترک این عناصر (سازندهای آهکی) در آب زیرزمینی می‌باشد که در ارتباط با خصوصیات زمین‌شناسی محل‌های نمونه‌برداری است (Mahlknecht, 2003).

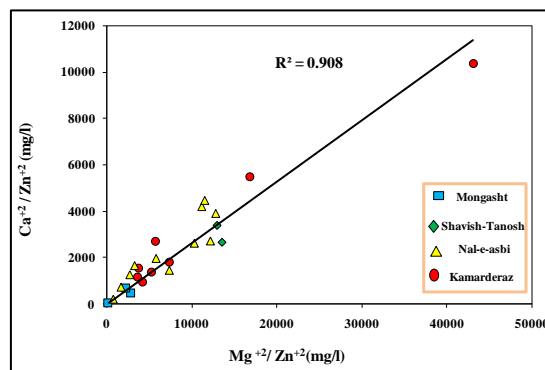
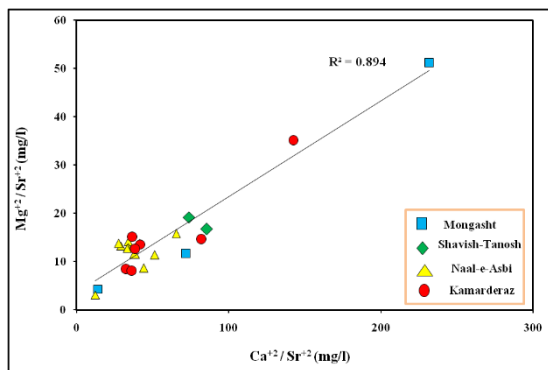
معمولاً از ماتریس همبستگی پیرسون برای بررسی روابط بین پارامترهای مختلف نمونه‌های هیدروشیمیایی در مطالعات آب زیرزمینی استفاده می‌شود. ماتریس همبستگی برای تعیین روابط بین متغیرها و عوامل تأثیرگذار مفید است، که به شناسایی منابع عناصر مختلف با مقادیر مشخص کمک می‌کند (جدول ۳). همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بین

جدول ۳- جدول ماتریکس همبستگی بین عناصر شیمیایی و کمیاب نمونه‌های آب زیرزمینی.

	Sr	Ba	Cr	Li	Mo	Zn	S	Si	Ca	Mg	Na	K	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	TDS	EC	pH
Sr	1																	
Ba	0.14	1																
Cr	0.05	<b>0.56</b>	1															
Li	0.47	<b>0.74</b>	0.49	1														
Mo	0.41	<b>0.53</b>	0.17	0.82	1													
Zn	-0.31	-0.16	-0.07	-0.27	-0.21	1												
S	0.39	-0.12	-0.27	0.12	0.20	-0.18	1											
Si	0.39	-0.12	-0.27	0.12	0.20	-0.18	1	1										
Ca	0.12	<b>0.61</b>	0.34	<b>0.56</b>	0.38	-0.25	0.42	0.42	1									
Mg	0.38	<b>0.62</b>	0.36	<b>0.69</b>	0.47	-0.17	0.28	0.28	0.36	1								
Na	0.47	-0.05	-0.13	0.16	0.11	-0.1	<b>0.9</b>	<b>0.90</b>	0.48	0.38	1							
K	0.31	0.29	0.02	0.39	0.32	-0.21	<b>0.75</b>	<b>0.75</b>	<b>0.69</b>	<b>0.57</b>	<b>0.70</b>	1						
HCO <sub>3</sub>	0.05	<b>0.91</b>	<b>0.54</b>	<b>0.81</b>	<b>0.58</b>	-0.19	-0.08	-0.08	<b>0.68</b>	<b>0.63</b>	-0.02	0.38	1					
SO <sub>4</sub>	0.47	-0.08	-0.09	0.11	0.008	-0.1	<b>0.83</b>	<b>0.83</b>	0.41	0.42	<b>0.94</b>	<b>0.77</b>	-0.09	1				
Cl	0.4	-0.14	-0.24	0.08	0.11	-0.11	<b>0.97</b>	<b>0.97</b>	0.43	0.28	<b>0.97</b>	<b>0.75</b>	-0.1	0.8	1			
TDS	0.42	0.41	0.15	<b>0.53</b>	0.37	-0.21	<b>0.77</b>	<b>0.77</b>	<b>0.78</b>	<b>0.65</b>	<b>0.86</b>	<b>0.89</b>	0.47	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	1		
EC	0.44	0.39	0.19	0.51	0.33	-0.20	<b>0.78</b>	<b>0.78</b>	<b>0.76</b>	<b>0.64</b>	<b>0.87</b>	<b>0.88</b>	0.42	<b>0.8</b>	<b>0.8</b>	<b>0.99</b>	1	
pH	-0.28	-0.44	-0.43	-0.74	-0.48	0.30	-0.14	-0.14	-0.42	-0.66	-0.27	-0.5	-0.63	-0.26	-0.14	-0.52	-0.5	1

عناصر، حاکی از این است که منشأ ورود و تغییرات عنصر روی متفاوت از سایر عناصر می‌باشد. با توجه به نمودار (شکل ۸ الف) بین نسبت‌های  $Ca^{+2}/Zn^{+2}$  و  $Mg^{+2}/Zn^{+2}$  رابطه خطی وجود دارد که حاکی از ارتباط قوی بین تغییرات این سه یون در سازندهای آهکی و دولومیتی می‌باشد. در آب‌های زیرزمینی مناطق کارستی، انحلال سنگ‌های کربناته، منجر به ورود  $Mg^{+2}$ ،  $Ca^{+2}$  و  $Sr^{+2}$  در آب‌های زیرزمینی می‌گردد و با استفاده از نسبت‌های  $Ca^{+2}/Sr^{+2}$  و  $Mg^{+2}/Sr^{+2}$  می‌توان منشأ آب‌های کارستی را مشخص کرد (Negrel and Petelet, 2005). شکل (۹ ب) رابطه بسیار نزدیک بین  $Ca^{+2}/Sr^{+2}$  و  $Mg^{+2}/Sr^{+2}$  در آب‌های زیرزمینی کارستی منطقه منشأ مشترک این عناصر را نشان می‌دهد ( $r^2 = 0.83$ ). نمونه‌های منشأ گرفته از سازندهای آهکی دولومیتی (ایلام-سروک و فهلیان-داریان) در مقایسه با نمونه‌های سازندهای آهکی (آسماری) نسبت  $Mg^{+2}/Sr^{+2}$  بیشتری دارند.

همبستگی منفی EC با pH نشانگر ارتباط معکوس آنها در فرآیندهای انحلال است که با افزایش اسیدیته (کاهش pH) انحلال و در نتیجه آن مواد محلول افزایش می‌یابد. همبستگی منفی pH با دیگر یون‌ها به خوردگی بالای محیط اسیدی نسبت به خاک و سنگ میزبان نسبت داده می‌شود که غلظت بیشتر یون‌ها را افزایش می‌دهد (Helena et al., 2000). همبستگی کلی بین سدیم و کلرید را می‌توان به انحلال هالیت در آبرفت و معکوس شدن جریان از سمت آبخوان ایذه به سمت آبخوان کارستی منطقه نسبت داد (Srivastava and Ramanathan, 2008). به‌طور کلی غلظت فلزاتی همچون باریم، لیتیوم، کروم، مولیبدن، گوگرد و سیلیس دارای همبستگی مثبت نسبتاً بالایی با یون‌های اصلی می‌باشند، که نشان می‌دهد منشأ این عناصر می‌تواند انحلال سنگ‌ها و سازندهای موجود در منطقه باشد. (Ju et al., 2007). همبستگی منفی روی ( $Zn^{+2}$ ) با یون‌ها نشانگر منشأ متفاوت این عنصر نسبت به یون‌های موجود می‌باشد. این همبستگی منفی بین روی با سایر

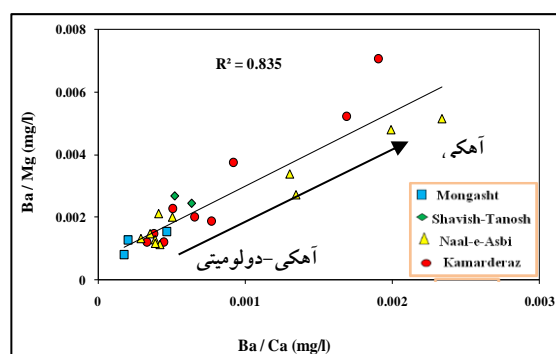
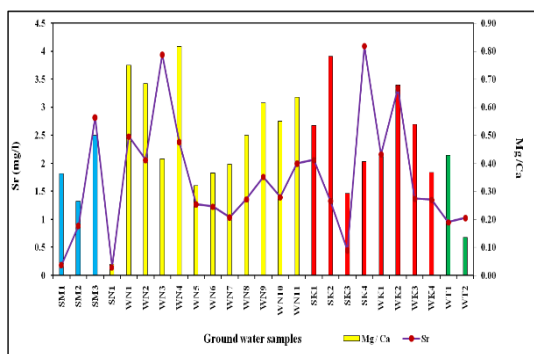


شکل ۹- الف) نمودار  $Ca^{+2}/Zn^{+2}$  در مقابل  $HCO_3^-/Zn^{+2}$ ، ب)  $Mg^{+2}/Sr^{+2}$  در مقابل  $Ca^{+2}/Sr^{+2}$  آب‌های زیرزمینی منطقه.

(شکل ۱۰ الف). همان‌طور که در (شکل ۹ ب) نشان داده شده است، نمونه‌های تاقدیس منگشت در قسمت ابتدایی نمودار  $Ba^{+2}/Mg^{+2}$  در مقابل  $Ca^{+2}/Ba^{+2}$  قرار گرفته‌اند که مؤید این مطلب می‌باشد. روند خطی بین نمونه‌ها و همچنین افزایش این نسبت‌ها از سمت سازندهای آهکی- دولومیتی (ایلام- سروک) به طرف سازندهای آهکی آسماری نیز نشان‌دهنده ارتباط هیدرولیکی این سازندها و مسیر جریان آب در مناطق کارستی می‌باشد.

از آنجایی که سنگ‌های دولومیتی نسبت به سنگ‌های کلسیتی، مقدار منیزیم بیشتر و استرانسیوم و باریوم کمتری دارند، در نتیجه آب زیرزمینی که از سازندهای آهکی منشأ می‌گیرند، دارای  $Mg^{+2}$  نسبتاً کمتر و  $Ba^{+2}$  و  $Sr^{+2}$  بیشتری نسبت به سازندهای دولومیتی مناطق کارستی می‌باشند (Fairchild et al., 2000).

مقدار  $Sr^{+2}$  نمونه‌های آب زیرزمینی با منشأ سازند آهکی آسماری (میانگین  $1/9$  mg/L) بیشتر از نمونه‌های سازندهای دولومیتی ایلام-سروک (میانگین  $1/0.5$  mg/L) می‌باشند



شکل ۱۰- الف) مقدار نسبت یونی  $Mg^{+2}/Ca^{+2}$  و میزان عنصر  $Sr^{+2}$  ب-  $Mg^{+2}/Ba^{+2}$  در مقابل  $Ca^{+2}/Ba^{+2}$  آب‌های زیرزمینی منطقه.

هیدروژن ( $\delta^2H$ )، دما و ارتفاع نمونه‌ها در جدول ۴ آورده شده است. ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های بارش در منطقه مورد مطالعه برای  $\delta^{18}O$  بین  $-4/9\%$  تا  $-1/87\%$  و برای  $\delta^2H$  بین  $14/24\%$  تا  $2/9\%$  می‌باشد. معادله خط جوی محلی  $\delta^2H \% = 7.450 \delta^{18}O \% + 16.57$  (LMWL) و معادله خط

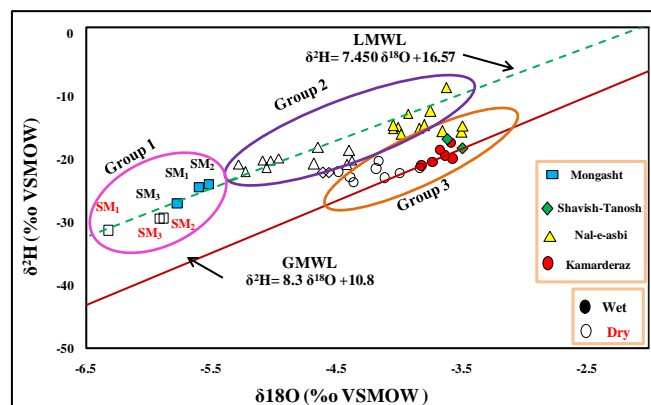
### بررسی‌های ایزوتوپی

برای ارزیابی میزان ایزوتوپ‌های پایدار چشمه‌ها و چاه‌های آبخوان کارستی منگشت، کمردراز، نعل اسبی و شاویش-تنوش (۶ نمونه آب چشمه، نمونه آب ۱۷ چاه و ۶ نمونه آب باران) نمونه‌گیری انجام گردید. ترکیبات ایزوتوپ اکسیژن ( $\delta^{18}O$ ) و

جوی جهانی (GMWL)،  $\delta^2\text{H} = 10\text{‰} + 8 \times \delta^{18}\text{O}$  (Craig, 1961)، در شکل ۱۰ نشان داده شده است، خط جوی محلی به شرایط آب و هوایی محلی مربوط می‌شود. بالاتر از خط جوی جهانی قرار دارد (شکل ۱۱). که این تفاوت

جدول ۴- مقادیر بارش و دما و مقادیر ایزوتوپی (‰) نمونه‌های آب باران و آب زیرزمینی.

Altitude	T <sup>°C</sup>	<sup>18</sup> O/ <sup>16</sup> O تابستان	D/ <sup>2</sup> H تابستان	<sup>18</sup> O/ <sup>16</sup> O زمستان	D/ <sup>2</sup> H زمستان	Sample	Location	ردیف
1153	12.9	-	-	-3.33	-9.11	RA	RA	1
1334	12.1	-	-	-4.85	-24.14	RAB	RAB	2
681	14.1	-	-	-1.87	-4.32	RB	RB	3
889	12.4	-	-	-3.1	-8.68	RK1	RK1	4
1003	13.4	-	-	-2.87	-2.9	RK2	RK2	5
973	9.5	-	-	-4.9	-18.45	RT	RT	6
853	23	-5.09	-20.14	-3.65	-15.44	WN <sub>1</sub>	Kaldozakh	7
847	23	-4.96	-19.8	-3.5	-15.54	WN <sub>2</sub>	Gamoshi	8
861	22	-5.03	-20.1	-3.75	-12.29	WN <sub>3</sub>	Lavaii1	9
861	22	-5.28	-20.77	-3.49	-14.58	WN <sub>4</sub>	Lavaii2	10
859	21	-5.23	-21.93	-3.62	-8.57	WN <sub>5</sub>	Bardboran 1	11
862	22	-5.06	-21.32	-3.93	-12.65	WN <sub>6</sub>	Bardboran2	12
839	21.5	-4.68	-20.66	-4.01	-14.79	WN <sub>7</sub>	Porarshad	13
861	22.9	-4.42	-20.74	-4.05	-15.13	WN <sub>8</sub>	Abtrak	14
853	23.7	-4.38	-20.15	-3.84	-15.04	WN <sub>9</sub>	Kohbad1	15
845	17.8	-4.4	-18.48	-3.8	-14.53	WN <sub>10</sub>	Kohbad2	16
920	16.5	-4.65	-18	-4.05	-14.5	WN <sub>11</sub>	Chega	17
1915	12.8	-6.32	-31.26	-5.62	-23.04	SM <sub>1</sub>	Abgol	18
2237	18	-5.88	-29.33	-5.6	-21.47	SM <sub>2</sub>	Malagha1	19
1883	20	-5.91	-29.47	-4.87	-27.06	SM <sub>3</sub>	Malagha2	20
815	24.6	-4.36	-23.62	-3.98	-16.02	WK <sub>1</sub>	1 Rostaii	21
819	22.7	-3.99	-22.22	-3.47	-19.87	WK <sub>2</sub>	1 Halayejan	22
847	24.7	-4.11	-22.94	-3.63	-19.37	WK <sub>3</sub>	2 Halayejan	23
810	23.2	-4.18	-22.87	-3.58	-17.39	WK <sub>4</sub>	3 Halayejan	24
1037	24	-4.16	-20.3	-3.73	-20.04	SK <sub>1</sub>	Tekyeh	25
1121	20.9	-3.78	-21.49	-3.67	-18.48	SK <sub>3</sub>	Abgorazi	26
916	25.1	-4.11	-21.34	-3.82	-20.97	SK <sub>4</sub>	Monareh	27
843	23.7	-4.56	-22	-3.49	-18.24	WT <sub>1</sub>	5 Halayejan	28
844	23.7	-4.61	-22.12	-3.61	-16.72	WT <sub>2</sub>	6 Halayejan	29



شکل ۱۱- موقعیت ترکیب ایزوتوپی منابع آب منطقه نسبت به خط آب باران -جهانی (GMWL) و خط آب باران ایذه (LMWL) دو فصل تر و خشک. (نمونه‌های توپر مربوط به فصل خشک می‌باشند).

فصل‌های مرطوب تهی‌شدگی دارند، این نشان می‌دهد که منابع آب زیرزمینی در زمستان از بارش‌های محلی و در بهار بیش از ذوب برف وجود دارد.

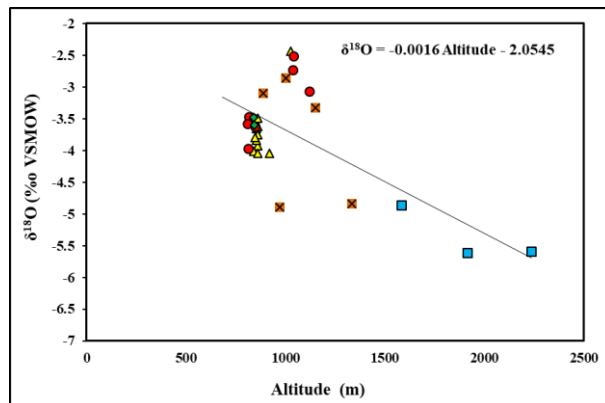
#### گرادیان ایزوتوپی در برابر ارتفاع و تخمین ارتفاع متوسط منطقه تغذیه چشمه‌های کارستی منطقه مورد مطالعه

متوسط ارتفاع منطقه تغذیه هر چشمه و منبع آب را می‌توان با استفاده از گرادیان ارتفاعی ایزوتوپی محاسبه کرد (Kohfahl et al., 2008). گرادیان ارتفاعی ایزوتوپی را می‌توان با استفاده از نمونه‌های بارندگی که از ارتفاعات مختلف در منطقه مورد مطالعه جمع‌آوری می‌شود، محاسبه کرد. براین اساس؛ ارتفاع تغذیه چشمه‌های منطقه مورد مطالعه از ترکیب گرادیان‌های ارتفاع در برابر مقادیر دلتای ایزوتوپ اکسیژن 18 حاصل از داده‌های ایزوتوپی بارندگی محدوده مطالعاتی (جدول ۴) و از رابطه (۲) به دست آمده است.

$$\text{Altitude (masl)} = -331.8 \times (\delta^{18}\text{O} + 231.9) \quad (2)$$

شکل ۱۱ مقادیر ایزوتوپ  $\delta^{18}\text{O}$  را نسبت به ارتفاع نشان می‌دهد که ارتباط معنی‌داری باهم دارند. با افزایش ارتفاع، میزان  $\delta^{18}\text{O}$  نمونه‌های آب کاهش می‌یابد. مقدار تهی‌شدگی  $\delta^{18}\text{O}$  در نمونه‌های آب منطقه مطابق رابطه ۲ حدود ۳ پرمیل در ۱۰۰ متر افزایش ارتفاع می‌باشد، چون باران و برف مناطق مرتفع بر میزان ایزوتوپ چشمه‌های کارستی تأثیر می‌گذارد (Liu et al., 2008). همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، آب خروجی از چشمه‌های ( $SM_1$ ,  $SM_2$ ,  $SM_3$ ) در تاقدیس منگشت، که در ارتفاع بالاتری نسبت به سایر نمونه‌ها قرار دارند، مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  کمتری دارند. چون نوع تغذیه (باران و برف) نیز بر مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  و تهی‌شدگی یا غنی‌شدگی نمونه‌های آب تأثیر دارند. بنابراین، یکی دیگر از دلایل تفاوت مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  نمونه‌های آب تاقدیس منگشت با سایر نمونه‌ها را می‌توان نوع تغذیه (برف) در این منطقه دانست.

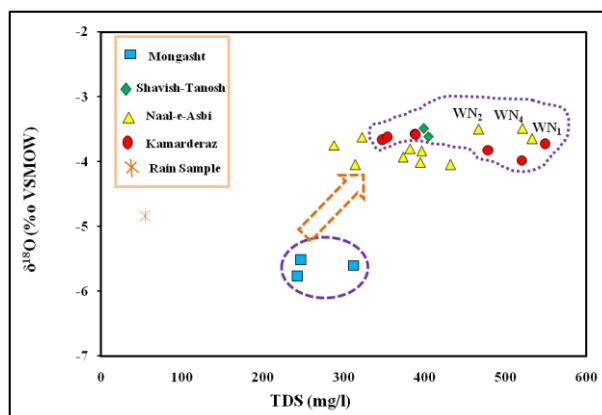
با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل ایزوتوپی منابع آب منطقه مورد مطالعه (جدول ۴)، میانگین مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  در فصول مرطوب و خشک به ترتیب  $3/98\text{‰}$  و  $4/7\text{‰}$  و میانگین  $\delta^2\text{H}$  در فصول مرطوب و خشک به ترتیب  $17/21\text{‰}$  و  $20/22\text{‰}$  می‌باشد. با رسم نمودار ایزوتوپی  $\delta^{18}\text{O}$  در برابر  $\delta^2\text{H}$  نمونه‌های آب در فصول مرطوب و خشک، (شکل ۱۰) مشاهده می‌شود که نمونه‌ها بین دو خط GMWL و LMWL قرار می‌گیرند. منابع آب به سه گروه تقسیم شدند، در فصل خشک، به دلیل عملکرد تبخیر، نمونه‌ها نسبت به هم پراکندگی بیشتری دارند. گروه اول، چشمه‌های تاقدیس منگشت هستند که در سمت چپ خط LMWL قرار دارند. این منابع تهی‌شدگی دارند و در فصول سرد سال از ارتفاعات تغذیه می‌شوند. این چشمه‌ها به دلیل سیستم مجرای، زمان ماندگاری کوتاهی دارند و آب در مجاری کارستی سریع حرکت کرده و تبخیر بر ترکیب ایزوتوپی آنها تأثیر نگذاشته است. گروه دوم (نمونه‌های ناودیس نعل اسبی، نمونه‌های تاقدیس‌های کمردراز و شاپوش-تنوش) هستند، این نمونه‌ها به دلیل تبخیر، به موازات خط و زیر خط جوی ایذه (LMWL) قرار دارند. علاوه بر بارندگی، اختلاط آب‌های زیرزمینی نیز در تأمین آب این منابع نقش داشته است. در گروه سوم، نمونه‌ها در سمت راست خط LMWL و GMWL قرار دارند و بیشتر نمونه‌های آب شامل نمونه‌های آب تاقدیس کمردراز هستند. احتمالاً به دلیل تغذیه منابع آب کارستی با سیستم‌های مختلف (مجرای و افشان) و زمان ماندگاری بیشتر آب در سیستم و در نتیجه تعامل بیشتر آب و سنگ، محتوای  $\delta^{18}\text{O}$  این نمونه‌ها غنی‌شده است. معمولاً تغییرات فصلی  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$  تحت تأثیر ورودی برف ذوب‌شده در زمستان و اوایل بهار (از نظر ایزوتوپی سبک‌تر)، در پایان بهار به دلیل بارندگی‌های بهاری و رگباری نسبتاً غنی‌تر و سرانجام در تابستان به خاطر فرایند تبخیر غنی‌شده‌تر می‌باشند. مشاهده می‌شود، نمونه‌های فصل خشک بیشتر از



شکل ۱۲- رابطه ارتفاع تغذیه نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه بر اساس مقادیر بارندگی  $\delta^{18}\text{O}$  در برابر ارتفاع نقاط نمونه برداری.

سمت ناودیس نعل اسبی و تاقدیس کمردراز افزایش TDS و غنی‌شدگی  $\delta^{18}\text{O}$  را نشان می‌دهد، که توجیه حرکت آب از سمت منبع تغذیه به محل خروجی آب و همچنین اختلاط آب آبرفتی با آب کارستی می‌باشد.

نمودار شکل ۱۳، مجموع غلظت یون‌ها TDS، در برابر  $\delta^{18}\text{O}$  را نشان می‌دهد. هرچه نمونه‌ها از نظر ایزوتوپی تهی‌تر باشند، TDS کمتری دارند و تأثیر نوع تغذیه و زمان ماندگاری آب و تعاملات بین سنگ و آب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، نمونه‌های آب تاقدیس منگشت به



شکل ۱۳- رابطه TDS و مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه.

دسته‌درزه می‌باشد. جهت جریان عمومی منطقه از سمت تاقدیس منگشت به طرف تاقدیس شاویش-تنوش، کمردراز و ناودیس نعل اسبی و ارتباط هیدرولیکی این ساختارها باهم می‌باشد. با استفاده از نمودار پایپر، تیپ غالب آب زیرزمینی با توجه به سنگ میزبان که از جنس آهکی-دولومیتی و آهکی (سازند ایلام-سروک و آسماری) است، بی‌کربناته کلسیک می‌باشد. با توجه به نمودار گیبس، کیفیت شیمیایی نمونه‌های آب منطقه تحت تأثیر هوازدگی و انحلال سنگ‌ها است. روند خطی مشخص در نمودارهای ترکیبی یون‌های آب‌های

### نتیجه‌گیری

فعالیت‌های تکتونیکی منطقه و غسل خوردگی‌های شدید در سازندهای آهکی محدوده ایذه، یک زون کاملاً خردشده را به‌وجود آورده که همراه با انحلال منجر به توسعه آبخوان کارستی و رژیم هیدروتکتونیکی در این ناحیه شده است. بر اساس نمودارهای گل‌سرخ، یک دسته‌درزه غالب (NE-SE) در منطقه وجود دارد، جهت جریان آب زیرزمینی در مجاری کارستی با توجه به این روند و محل خروجی چشمه‌ها در یال-های تاقدیس‌های منطقه به احتمال قوی به موازات این



- Criss, R., Davisson, L., Surbeck, H., Winston, W., 2007. Isotopic methods. Methods in karst hydrogeology. International contribution to hydrogeology. Taylor and Francis, London, 123-145.
- Dindan, K., Bouchaou, Y., Hsissou, Y., Krimissa, M., 2003. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Souss Upstream Basin, southwestern Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 36, 315-327.
- Edwards, T.W.D., Wolfe, B.B., Gibson, J.J., Hammarlund, D., 2004. Use of water isotope tracers in high-latitude Hydrology and paleohydrology. In: Pienitz, R., Douglas, M.S.V., Smol, J.P. (Eds.), *Long-term Environmental Change in Arctic and Antarctic Lakes*. Springer, Dordrecht, the Netherlands, 187-207 pp.
- Eftimi, R., 2006. Hydraulic characteristics of the big capacity water supply wells of Korça City, in Albania: in *Proceedings of XVIIIth Carpathian-Balkan Geological Association*, Sudar M. Ercegovac M. Grubić A., eds. Belgrade. 118-122. pp.
- Fairchild, I.J., Borsato, A., Tooth, A.F., Frisia, S., Hawkesworth, C.J., Huang, Y., McDermott, F., Spiro, B., 2000. Controls on trace element (Sr-Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climatic records. *Chem. Geol.*, 166: 255-269.
- Fontes, J.C., 1976. *Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles: quelques aspects*. Ph.D. Thesis, University of Paris.
- Ford, D.C., Williams, P.W., 2007. *Karst Geomorphology and Hydrogeology*, Wiley Chichester, 2nd Ed, 576 p.
- Gat, J.R., Airey, P.L., 2006. Stable water isotopes in the atmosphere/ biosphere/ lithosphere interface: scaling-up from the local to continental scale, under humid and dry conditions. *Global Planet. Change*, 51, 25-33.
- Gibbs, R.J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science* 17:1088-1090.
- Goldscheider, N., Drew, D., 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*, Taylor and Francis, 279 p.
- Hamed, Y., Ahmadi, R., Demdoun, A., Bouri, S., Gargouri, I., Ben Dhia, H., Al-Gamal, S., Laouar, R., Choura, A., 2014. Use of geochemical, isotopic, and age tracer data to develop models of groundwater flow. A case study of Gafsa mining basin-Southern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 100, 418-436.
- Alsaaran, N., 2006. Using environmental isotopes for estimating the relative contributions of groundwater recharge mechanisms in an arid Basin, Central Saudi Arabia. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 31, 3-13
- Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Second ed. 10 Balkema, Rotterdam.
- Ashjari, J., Raeisi, E., 2006. Anticline structure influences on regional flow, Zagros, Iran. *Journal of Cave and Karst studies*, 68(3), 119-127.
- Bhat, N.A., Jeelani, G., Bhat, M.Y., 2014. Hydrogeochemical assessment of groundwater in karst environments, Bringi watershed, Kashmir Himalayas, India. *Curr. Sci.*, 106, 1000-1007.
- Bourke, S.A., Cook, P.G., Dogramaci, S., Kipfer, R., 2015. Partitioning sources of recharge in environments with groundwater recirculation using carbon-14 and CFC-12. *Journal of Hydrology*, 525, 418-428.
- Bourke, S.A., Shanafield, M., Hedley, P., Dogramaci, Sh., 2020. A hydrological framework for persistent river pools in semi-arid environments. *Journal of Hydrology and Earth system sciences*, CRC Press, 672 p.
- Chen, W., Liu, Q., Huh, C. A., Dai, M., Miao, Y. C., 2010. Signature of the Mekong River plume in the western South China Sea revealed by radium isotopes, *J. Geophys. Res.*, 115, C12002.
- Chen, W., Peng, J., Hong, H., Shahabi, H., Pradhan, B., Liu, J., Zhu, A. X., Pei, X., Duan, Z., 2018. Landslide susceptibility modelling using GIS-based machine learning techniques for Chongren County, Jiangxi Province, China. *Sci. Total Environ.*, 626, 1121-1135.
- Chih, H., de Marsily, G., Belayouni, H., Yahyaoui, H., 2015. Relationship between tectonic structures and hydrogeochemical compartmentalization in aquifers: example of the "Jeffara de Medenine" system, south-east Tunisia. *Journal of Hydrology* 2015. *Regional Studies*, 4 (Part B): 410-430.
- Clark, I.D., Fritz P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, New York, 328p.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Savard, M.M., Bourque, E., Therrien, R., 2006. Hydrogeochemistry and groundwater origin of the Basses-Laurentides sedimentary rock aquifer system, St. Lawrence Lowlands, Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 14: 573-590.

- contamination investigations. *Geosciences*, 1(1), 16–25.
- Ladouche, B., Luc, A., Nathalie, D., 2009. Chemical and isotopic investigation of rainwater in Southern France (1996–2002): Potential use as input signal for karst functioning investigation. *Journal of Hydrology*, 367(1–2): 150–164.
- Langmuir, D., 1971. The geochemistry of some carbonate ground waters of Central Pennsylvania, *Geochem. Cosmochim. Acta*, 35, 1023-1045.
- Leketa, K., Abiye, T., 2021. Using environmental tracers to characterize groundwater flow mechanisms in the fractured crystalline and karst aquifers in upper Crocodile River basin, Johannesburg, South Africa, *Hydrology*, 8(1), 50.
- Mahlknecht, J., 2003. Estimation of recharge in the Independence aquifer, central Mexico, by combining geochemical and groundwater flow models. PhD Thesis, Institute of Applied Geology, University of Agricultural and Life Sciences (BOKU) Vienna, Austria, 296 p.
- Mazor, E., 2004. *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. Third Edition, John Wiley, New York, 453 p.
- Milanovic, P., 1981. *Karst Hydrogeology 2004*. W.R.P., Colorado, 434 p.
- Moradi, S., Kalantari, N., Charchi, A., 2018. Karstification potential mapping in northeast of Khuzestan province, Iran, using fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) techniques. *Geopersia*, 6 (2), 265-282.
- Negrel, P., Petelet-Giraud, E., 2005. Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study. *J Hydrol.*, 205:99-119.
- Paternoster, M., Liotta, M., Favara, R., 2008. Stable isotope ratios in meteoric recharge and groundwater at Mt. Vulture volcano, southern Italy. *Journal of Hydrology* 2008. 348, 87–97.
- Pearson, K., 1990. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Phil. Mag.*, (6)2, 559–572.
- Pu, T., He, Y., Zhu, G., Zhang, N., Du, J., Wang, C., 2013. Characteristics of water stable isotopes and hydrograph separation in Baishui catchment during the wet season in Mt. Yulong region, south western China. *Hydrological Processes*, 27: 3641-3648.
- Ravikumar, P., Somashekar, R.K., Prakash, K. L., 2015. A comparative study on usage of Durov and Hamed, Y., 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.
- Helena, B., Prardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, JM., Fernandez, L., 2000. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Research*, 34:807-816.
- Hounslow, A., 1995. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*, CRC press, 416 p.
- Husic, A., Fox, J., Agouridis, C., Currens, J., Ford, W., Taylor, C., 2017. Sediment carbon fate in phreatic karst (Part Conceptual model development. *Journal of Hydrology*, 549:179–193.
- Jebreen, H., Banning, A., Wohnlich, S., Niedermayr, A., 2018. The influence of karst aquifer mineralogy and geochemistry on groundwater characteristics: West Bank, Palestine. *Journal of Water*, 10, 1829.
- Ju, X., Kou, C., Christie, P., Dou, Z., Zhang, F., 2007. Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain. *Environment Pollution*, 145: 497-506.
- Kalantari, N., Rouhi, H., 2018. Discharge hydraulic behavior comparison of two springs in Khu-Safid anticline, Khuzestan, Iran Carbonate and evaporates. 34(4): 2-26.
- Karanth, K. R., 2001. *Ground Water Assessment Development and Management*. Tata McGraw-Hill, 720 p.
- Keshavarzi, B., Moore, F., Mosafieri, M., Rahmani, F., 2011. The source of natural arsenic contamination in groundwater, west of Iran. *Water Qual Expo Health*, 3(1):135–147.
- Kohfahl, C., Sprengel, Ch., Benavente Herrera, J., Meyer, H., Fernandez Chacon, d. F., Pekdeger, A., 2008. Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in semiarid and karstic environments: A field study in the Granada Basin (Southern Spain). *Applied Geochemistry Journal*, 23: 846–862.
- Krishnaraj, S., Murugesan, V., Vijayaraghavan, K., Sabarathinam, C., Paluchamy, A., Ramachandran, M., 2011. Use of hydrochemistry and stable isotopes as tools for groundwater evolution and

- World Health Organization. 2011. Guidelines for Drinking Water Quality, 3rd ed.; World Health Organization (WHO): Geneva, Switzerland.
- Xiao, Sh., Zeng, Ch., Lan, J., Di, Y., He, Y., Xiao, H., Wang, J., 2021. Hydrochemical characteristics and controlling factors of typical dolomite karst basin in humid subtropical zone. *Hindawi Geofluids* 2021, Article ID 8816097, 14 p.
- Yuan, H., Yuan, W., Bao, Z., Chen, K., Liu S., 2017. Development of two new copper isotope standard solutions and their copper isotopic compositions. *Geostand. Geoanal. Res.* 41, 77–84.
- Yuan, J., Xu, F., Deng, G., Tank, Y., Li, P., 2017. Hydrogeochemistry of shallow groundwater in a karst aquifer system of Bijie City, Guizhou Province. *Water*, 9, 625.
- Zaidi, F. K., Nazzal, Y., Ahmed, I., Al-Bassam, A. M., Al-Arifi, N.S., Ghrefat, H., Al-Shaltoni, S. A., 2015. Hydrochemical processes governing groundwater quality of sedimentary aquifers in Central Saudi Arabia and its environmental implications. *Environmental Earth Sciences*, 74(2): 1555–1568.
- Zhang, B., Zhao, D., Zhou, P., Qu, S., Liao, F., Wang, G., 2020. Hydrochemical characteristics of groundwater and dominant water–rock interactions in the Delingha Area, Qaidam Basin, Northwest China. *Water*, 12, 836.
- Piper diagrams to interpret hydrochemical processes in groundwater from Srlis river basin, Karnataka, India. *Elixir Earth Sci.*, 80, 31073-31077.
- Jang, S., Hamm, Y., Yoon, H., Kim, G.B., Park, J. H., Kim, M., 2015. Predicting long-term change of groundwater level with regional climate model in South Korea *Geosci. J.*, 19(3): 503-513.
- Setiawan, T., Yoseph, C.S.S.B., Alam, S., Haryono, E., Darmawan, H., 2020. Hydrochemical and environmental isotopes analysis for characterizing a complex karst hydrogeological system of Watuputih area, Rembang, Central Java, Indonesia. *Hydrogeology Journal*, 28(5): 1635-1659.
- Sharp, Z., 2007. Principles of stable isotope geochemistry. Farhikhtegan Alavi Press, 606 p.
- Skelton, A., Andren, M., Kristmannsdottir, H., Stockmann, G., Morth, C., Sveinbjornsdottir, A., Kockum, I., 2014. Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland. *Journal of Nature Geoscience*, 7: 752-756.
- Srivastava, S.K., Ramanathan, A.L., 2008. Geochemical assessment of groundwater quality in vicinity of Bhalswa landfill, Delhi, India, using graphical and multivariate statistical methods. *Environmental Geology*, 53.1509–1528.
- White, W.B., 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Eng. Geol.*, 65, 85–105.