

بِسْمِ تَعَالَى

پژوهش‌های دانش زمین  
(علمی - پژوهشی)

شماره ۵

سال دوم

بهار ۱۳۹۰

شماره استاندارد بین‌المللی: ۸۲۹۹-۲۰۰۸

تاریخ چاپ: زمستان ۱۳۹۱

بار علمی - پژوهشی پژوهش‌های دانش زمین طی ابلاغیه شماره ۴۵۸۶۰  
تاریخ ۱۳۹۰/۳/۱۱ کمیسیون بررسی نشریات کشور مورد تأیید قرار گرفته است.

متن کامل مجله در پایگاه‌های اطلاع‌رسانی زیر نمایه می‌شود:

پایگاه علوم استنادی جهان اسلام <http://www.ISC.gov.ir>

سایت اینترنتی جهاد دانشگاهی <http://www.SID.ir>

## مطالعه هیدروشیمیایی و ایزوتوپ های پایدار ( $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ ) منابع آب سطحی و زیرزمینی منطقه کارستی اندرخ (شمال شهر مشهد)

حسین محمد زاده<sup>۱\*</sup> و مجتبی حیدری زاد<sup>۲</sup>

۱-استادیار گروه زمین شناسی دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۲۰

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۰/۴/۱۸

### چکیده

منطقه کارستی اندرخ در ۴۰ کیلومتری شمال شهر مشهد و در مسیر جاده آسفالتی مشهد - کلات نادری واقع است. مطالعه کیفی منابع آب زیرزمینی (چشمه اندرخ، چاه های شماره ۴ و ۲) و سطحی (دریاچه سد کارده) در منطقه با استفاده از داده های هیدروشیمیایی و تحلیل مولفه های اصلی (PCA)<sup>\*</sup> نمونه های آب، نشان می دهد که کیفیت این منابع به طور گسترده ای وابسته به لیتولوژی منطقه می باشد. بررسی کانی های انحلال یافته (کربناته و سیلیکاته) در آب دریاچه سد کارده و منابع آب زیرزمینی با استفاده از نمودارهای ترکیبی  $\text{Log}(a\text{Ca}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  در مقابل  $\text{Log}(a\text{Mg}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  برای کانی های کربناته و نمودارهای  $\text{Log}(a\text{Ca}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  و  $\text{Log}(a\text{Mg}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  در مقابل  $\text{Log}(a\text{Na}^+/a(\text{H}^+))$  برای کانی های سیلیکاته، نشان می دهد که انحلال کانی های کربناته (کلسیت و دولومیت) و کانی های سیلیکاته (کائولینیت، لامونیت و کلینوکلر) بیشترین نقش را در کنار کانی سولفات زئپس در کنترل کیفیت منابع آب زیرزمینی و سطحی در منطقه دارا می باشند. اندازه گیری و بررسی داده های ایزوتوپ های پایدار ( $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$ ) در منابع آب زیرزمینی و سطحی و موقعیت آنها بر روی خط ایزوتوپی آب باران مشهد نشان دهنده ارتباط هیدرولیکی ما بین آب دریاچه سد کارده با منابع آب زیرزمینی پایین دست می باشد. نتایج ایزوتوپی همچنین تایید می کند که چشمه اندرخ نسبت به سایر منابع آب زیرزمینی در منطقه بیشتر از منابع آب سطحی تغذیه می شود.

کلمات کلیدی: ارتباط هیدرولیکی، ایزوتوپ های پایدار ( $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$ )، چشمه اندرخ، دریاچه سد کارده، داده های هیدروشیمیایی

## مقدمه

مطالعه منابع آب سازندهای کارستی به دلیل اینکه این سازندها تقریباً ۲۰ درصد از سطح کره زمین را می پوشانند و جمعیت قابل توجه ای از جهان آب مورد نیاز خود را از آن تامین می کنند دارای اهمیت فوق العاده زیادی است (LaMoreaux, 1991). در کشور ما نیز حدود ۱۱ درصد از سطح کل کشور (قسمت اعظم رشته کوه های زاگرس و کپه داغ) از سازندهای کارستی تشکیل شده است (ناصری، ۱۳۷۰). یکی از عوامل موثر بر فرایند کارستی شدن، کانی شناسی سنگ های کارستی شونده است. فرایند کارستی شدن در کانی کلسیت نسبت به کانی دولومیت به دلیل انحلال پذیری بیشتر یون کلسیم نسبت به منیزیم بالاتر است (Kehew, 2000).

بررسی منشا آب در داخل آبخوان های کارستی از طریق روش های گوناگونی از جمله روش های ایزوتوپی، هیدروژنولوژیکی و هیدروشیمیایی صورت می گیرد. با انتقال داده های هیدروشیمیایی نمونه های آب (سطحی، زیرزمینی و بارندگی) بر روی نمودارهای ترکیبی و یا با بکارگیری روش های نوین ایزوتوپی ( $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$ ) که دارای دقت بالاتری نیز می باشد و با تفسیر نتایج آن ها می توان به منشا آب در داخل آبخوان های کارستی پی برد. نمودار همبستگی بین مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$  برای نمونه های مختلف آب، به سوالات زیادی درباره منشا، اختلاط منابع آبی مختلف، ارتباط منابع آب و بارندگی و فرایندهای موثر بر کیفیت آنها (مثل تبخیر) پاسخ می دهد.

مطالعات بسیار زیادی تا کنون بر روی منشا آب در آبخوانهای کارستی صورت گرفته که از تحقیقات داخلی می توان به کریمی وردنجانی (۱۳۸۴) اشاره نمود، نامبرده با مطالعه داده های

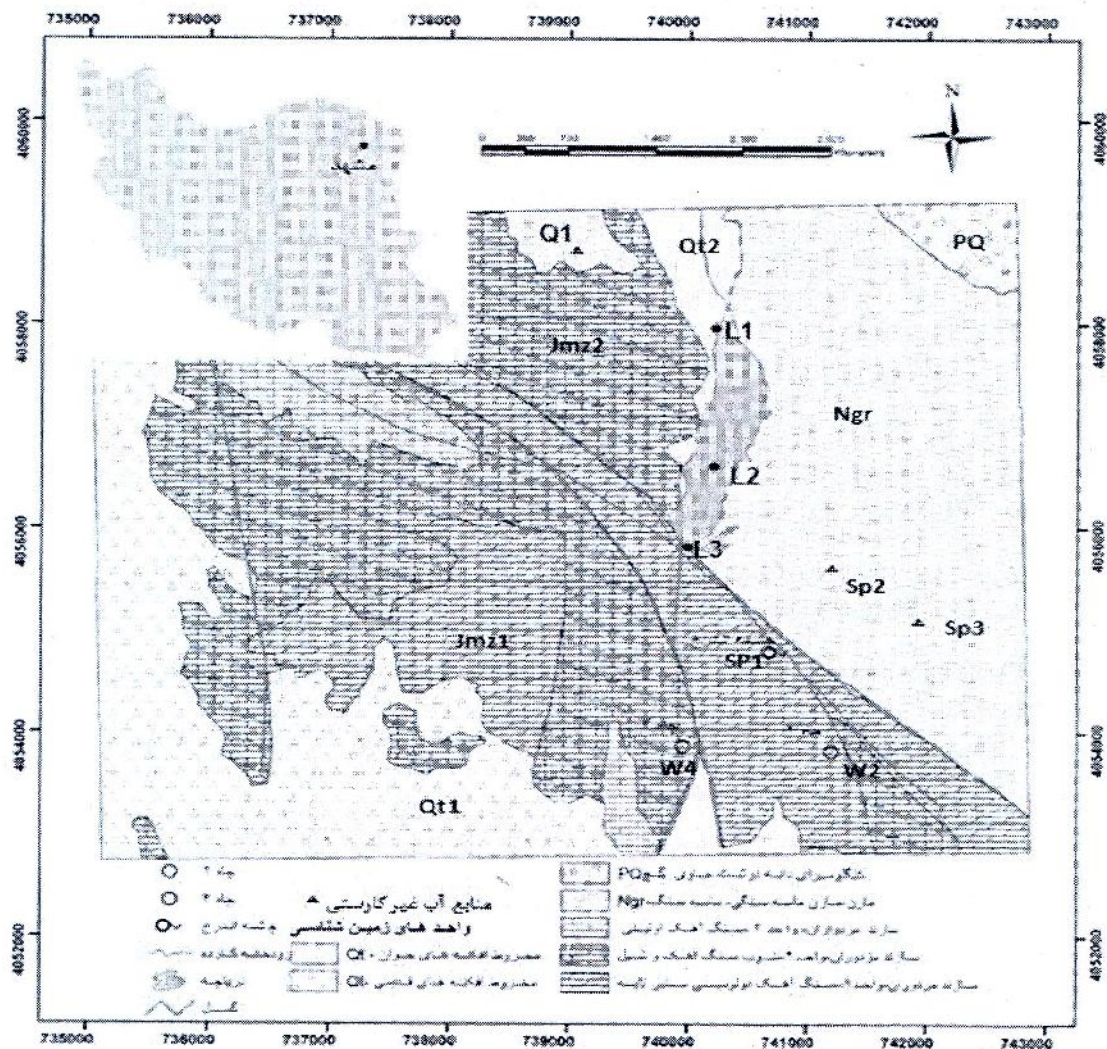
تخلیه و همچنین آنیون ها و کاتیون های اصلی چشمه های کارستی موگرون و سرآسیاب به بررسی هیدروژنولوژیکی این چشمه ها پرداخته است. از دیگر تحقیقات داخلی در این زمینه می توان به کریمی (۱۳۷۶)، کشاورز و همکاران (۱۳۸۲) و کریمی وردنجانی (۱۳۸۹) اشاره نمود. از تحقیقات در سطح بین المللی می توان به Frondini (2008) اشاره کرد، نامبرده با مطالعه منابع آب زیرزمینی منطقه Tuskany ایتالیا که از واحدهای آهکی و تبخیری همانند منطقه مورد مطالعه پوشیده شده است، عوامل ژئوشیمیایی موثر بر کیفیت آب را در منطقه مورد بررسی قرار داد. از دیگر تحقیقات بین المللی در این زمینه می توان به (Shuster and White 1971; Lopez et al., 2000; Bonacci, 2001; Panno et al., 2001; Bakalowicz, 2005; اشاره نمود. هدف از این تحقیق، مطالعه کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی دره اندرخ و بررسی ارتباط هیدرولیکی بین منابع آب سطحی (دریاچه سد کارده) با استفاده از داده های هیدروشیمیایی و ایزوتوپ های پایدار ( $\delta^2\text{H}$  و  $\delta^{18}\text{O}$ ) می باشد.

## زمین شناسی منطقه

منطقه مورد مطالعه در ۴۰ کیلومتری شمال شهر مشهد و در مسیر جاده آسفالت مشهد-کلات نادری و در مختصات سیستم UTM طول شرقی ۷۴۲۲۸۰-۷۳۵۰۴۰ و عرض شرقی ۴۰۵۲۲۵۰-۴۰۵۸۸۵۰ قرار گرفته و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا حدود ۱۴۰۰ متر است. با توجه به نقشه زمین شناسی منطقه (شکل ۱)، منطقه مورد مطالعه غالباً از واحدهای مختلف سازند مزدوران (واحدهای  $J_{mz1}$ ،  $J_{mz2}$  و  $J_{mz3}$ ) تشکیل شده است. علاوه بر آن رسوبات دوران نئوژن (Ngr) معروف به لایه های قرمز و متشکل از رس، مارن و مارن ماسه ای (درویش زاده،

آهک های ضخیم لایه و دولومیتی واحد  $J_{mz1}$  سازند مزدوران، نشان دهنده انحلال بالاتر واحد  $J_{mz1}$  نسبت به دیگر واحدهای این سازند در منطقه است. واحد  $J_{mz1}$  سازند مزدوران دارای کنتاکت گسلی (گسل تراستی کارده) با رسوبات نئوژن (سمت راست) و واحد  $J_{mz2}$  سازند مزدوران (سمت چپ) است که به احتمال بالا وجود این کنتاکت گسلی سبب ایجاد چشمه اندرخ در منطقه شده است.

۱۳۸۳) و مخروط افکنه های متعلق به دوران کواترنری Q1, Q2 نیز در منطقه وجود دارند. وجود گسل های تراستی از جمله گسل تراستی کارده که مهمترین گسل منطقه با روند شمال غربی جنوب شرقی (روند چین خوردگی اصلی کپه داغ) است، نشان دهنده فعالیت تکتونیکی بالا در منطقه می باشد. وجود اشکال کارستی فراوان ناشی از انحلال در مسیر درزه های عمود بر لایه بندی (Cleft Karren) و غار اندرخ در سنگ



شکل ۱- نقشه زمین شناسی، موقعیت منابع آب زیرزمینی و دریاچه سد کارده در منطقه

## مواد و روش ها

در طی این مطالعه، تعداد ۱۹ نمونه آب از چشمه اندرخ و چاه های ۲ و ۴ از اردیبهشت ۱۳۸۵ تا خرداد ۱۳۹۰ جمع آوری شده است. پارامترهای صحرائی دما (T)، هدایت الکتریکی (EC) و مواد جامد محلول (TDS) نمونه های آب در صحرا توسط دستگاه ORION و pH توسط دستگاه Jenway 3150 اندازه گیری شده است. نمونه های آب برای آنالیز غلظت آنیون ها و کاتیون های اصلی و فرعی در ظروف ۱ لیتری از جنس PET جمع آوری و در اسرع وقت به آزمایشگاه فیزیکوشیمیایی شرکت آب و فاضلاب مشهد انتقال داده شده است. در آزمایشگاه ابتدا غلظت یون بی کربنات توسط روش تیتراسیون مشخص و پس از آن کدورت نمونه های آب توسط دستگاه DR5000 اندازه گیری شده است. آنیون ها و کاتیون های نمونه های آب توسط دستگاه Compact IC 761 و BWB XP و flame photo meter و یون نیترات توسط دستگاه 801 stirror اندازه گیری شده است. در طی مطالعه فوق تعداد ۱۲ نمونه آب از منابع آب زیرزمینی و سطحی منطقه نیز در اسفند ۱۳۸۹ برای انجام آنالیز ایزوتوپ های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم برداشت شده است. برای آنالیز این ایزوتوپ ها، مقدار ۲۵ml آب در ظروف پلی اتیلنی جمع آوری و پس از انتقال به آزمایشگاه ایزوتوپی دانشگاه اتاوا کانادا (G.G. Hatch Isotope Lab)، میزان ایزوتوپ های  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$  توسط دستگاه Delta Plus XP isotope ratio mass spectrometer thermo Finnigan, Germany) اندازه گیری و نتایج در مقیاس (VSMOW) و بر حسب واحد ‰ ارائه شده است.

نمایه اشباع کانیهای کربناته (کلسیت، دولومیت و آراگونیت) و کانی های سولفات (ژیپس و انیدریت)

توسط نرم افزار PHREEQC برای نمونه های آب محاسبه شده و در نهایت برای مشخص کردن کانی های کربناته و سیلیکاته انحلال یافته در نمونه های آب، میزان فعالیت شیمیایی (a)<sup>۱</sup> یون های کلسیم، منیزیم، سدیم و هیدروژن در هر یک از نمونه ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است (Broder *et al.*, 2008).

$$a = \gamma \times m \quad (1)$$

که در آن،  $\gamma$  ضریب فعالیت شیمیایی یون مورد نظر در نمونه های آب است و از طریق رابطه دی-هوکل ۲ و بر اساس قدرت یونی نمونه آب (I)<sup>۲</sup> رابطه ۳ محاسبه می شود و m، مولاریته یون مورد نظر در نمونه ها می باشد.

$$\text{Log} \gamma_i = (-A.z_i^2 . \sqrt{I}) / (1 + B.a \sqrt{I}) \quad (2)$$

$$I = 0.5 \sum m_i z_i^2 \quad (3)$$

که در آن: Z؛ بار یون اُم، a؛ پارامتری است که مقدار آن بستگی به اندازه یون در حالت آگیری دارد، A و B؛ ضرایبی هستند که مقادیر آنها بستگی به دما و فشار هوای محیط دارد و از جدول رابطه ضرایب اکتیویته به دست می آیند (Drever, 1997; Manov *et al.*, 1943).

در طی مطالعه فوق داده های هیدروشیمیایی منابع آب زیرزمینی و سطحی توسط نرم افزار SPSS نسخه شماره ۱۳ مورد پردازش و تحلیل آماری قرار گرفته اند و فرایند تحلیل عاملی برای داده های فوق با سطح معنای  $P < 0.05$  محاسبه شده است. فرایند تحلیل عاملی دارای سه مرحله تهیه ماتریس همبستگی از تمامی متغیرهای مورد مطالعه بر اساس ضریب همبستگی پیرسون،

فاکتورها، دو روش Kaiser criterion و Scree Plot بکار گرفته شده است (نصیری، ۱۳۸۳). هر دو روش نشان می‌دهند که برای داده‌های کیفی دریاچه سد کارده و منابع آب زیرزمینی باید به ترتیب ۴ و ۳ فاکتور اصلی (جدول ۱) انتخاب شود که به ترتیب ۹۰/۵٪ و ۷۲/۱٪ از واریانس کل داده‌ها را تحت پوشش خود دارد.

استخراج عامل‌ها و تفسیر نتایج حاصله از این داده‌ها است.

### نتایج و بحث

در طی این مطالعه، برای تحلیل آماری داده‌های کیفی منابع آب منطقه (۴۵ نمونه آب زیرزمینی و ۱۵ نمونه آب سطحی)، از فرایند تحلیل عاملی R-Mode استفاده شده است و برای تعیین تعداد

جدول ۱- فاکتورهای اصلی در آنالیز کیفی منابع آب زیرزمینی و دریاچه سد کارده

پارامتر	منبع آب زیرزمینی منطقه			دریاچه سد کارده			
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F4
pH	-۰/۲۱۸	-۰/۱۷۷	-۰/۲۵۷	-۰/۹۳۱	-۰/۲۶۳	-۰/۰۷۸	-۰/۲۲۴
TDS	-۰/۴۰۲	-۰/۴۶۳	-۰/۱۴۳	-۰/۲۴۱	-۰/۷۶۱	-۰/۴۰۰	-۰/۲۲۳
Ca <sup>2+</sup>	-۰/۹۴۶	-۰/۰۶۹	-۰/۱۰۰	-۰/۳۷۵	-۰/۷۶۹	-۰/۰۵۲	-۰/۳۰۸
Mg <sup>2+</sup>	-۰/۸۲۸	-۰/۴۷۵	-۰/۱۱۴	-۰/۷۱۷	-۰/۳۶۰	-۰/۵۲۱	-۰/۰۹۰
Na <sup>+</sup>	-۰/۸۹۳	-۰/۳۸۱	-۰/۰۷۸	-۰/۴۷۳	-۰/۰۸۰	-۰/۱۹۰	-۰/۸۲۱
K <sup>+</sup>	-۰/۰۰۴	-۰/۴۸۴	-۰/۱۱۸	-	-	-	-
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-۰/۹۶۳	-۰/۲۱۲	-۰/۰۰۳	-۰/۵۲۳	-۰/۳۰۲	-۰/۷۴۹	-۰/۱۶۷
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-۰/۶۴۴	-۰/۶۶۵	-۰/۱۶۳	-۰/۶۷۲	-۰/۳۳۰	-۰/۵۲۰	-۰/۰۴۱
Cl <sup>-</sup>	-۰/۸۶۴	-۰/۳۸۶	-۰/۰۴۸	-۰/۲۳۰	-۰/۵۷۱	-۰/۴۲۵	-۰/۵۴۲
SI <sub>c</sub>	-۰/۳۸۳	-۰/۰۲۸	-۰/۷۶۵	-۰/۸۶۱	-۰/۰۵۳	-۰/۴۱۵	-۰/۱۸۳
SI <sub>d</sub>	-۰/۰۶۰	-۰/۱۵۲	-۰/۸۸۶	-۰/۸۹۹	-۰/۱۲۰	-۰/۳۷۶	-۰/۱۲۸
SI <sub>g</sub>	-۰/۲۲۷	-۰/۳۱۱	-۰/۵۸۸	-۰/۶۲۲	-۰/۶۰۹	-۰/۴۴۵	-۰/۱۶۰
واریانس درصد	۴۰/۱	۱۷/۰	۱۵/۰	۴۱/۵	۲۰/۰	۱۸/۰	۱۱/۰

دریاچه سد کارده (با پوشش ۴۱/۵٪ از واریانس داده‌ها)، ارتباط مستقیم پارمتر منیزیم، سولفات و نمایه‌های اشباع کانی کلسیت (SI<sub>c</sub>)، دولومیت (SI<sub>d</sub>) و ژپس (SI<sub>g</sub>) و ارتباط معکوس pH با این مولفه، نشان‌دهنده اهمیت واکنش انحلال دولومیت هم‌زمان با رسوب کلسیت، یعنی فرایند "عدم تشکیل دولومیت (Dedolomitization)" می‌باشد (Rui et al., 2010). رسوب کلسیت هم‌زمان با انحلال دولومیت، می‌تواند در طول مسیر جریان بدلیل بالا بودن سرعت انحلال کلسیت در مقایسه با انحلال دولومیت در محیط‌های کارستی اتفاق بیافتد (Kehew, 2000).

با توجه به نتایج تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، مولفه اول در منابع آب زیرزمینی (با پوشش ۴۰/۱٪ از واریانس داده‌ها) نشان می‌دهد که بارگزاری پارامترهای کلسیم، بیکربنات، منیزیم مثبت (دارای ارتباط مستقیم قوی) و بارگزاری پارامترهای pH، سدیم و کلر منفی (دارای ارتباط معکوس) می‌باشند که نشان‌دهنده محیط کارستی منطقه و دلیل بر نقش هوازدگی و انحلال کانی‌های کربناته (کلسیت و دولومیت) و کانی‌های تبخیری (ژپس و هالیت) موجود در سازند مزدوران (درویش زاده، ۱۳۸۳) بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه می‌باشد. اما مولفه اول در

مزدوران را نمایش می دهد. از طرفی ارتباط معکوس نمایه اشباع کانی های کلسیت ( $\text{SI}_c$ ) دولومیت ( $\text{SI}_d$ ) با کانی تبخیری ژپیس ( $\text{SI}_g$ ) ناشی از واکنش انحلال ناسازگار می باشد (Fron dini, 2008). ارتباط مستقیم پارامتر منیزیم، بیکربنات در مولفه سوم در دریاچه سد کارده که ۱۸٪ از واریانس را تحت پوشش دارد، نشان دهنده انحلال کانی های کربناته در آب دریاچه سد کارده است. ارتباط مستقیم پارامترهای سدیم و کلر نیز در مولفه چهارم در آب دریاچه سد کارده که ۱۱٪ از واریانس داده ها را تحت پوشش قرار می دهد، نشان دهنده انحلال کانی تبخیری هالیت در آب دریاچه سد کارده می باشد.

#### بررسی منشا و غلظت یون های مختلف در منابع آب منطقه

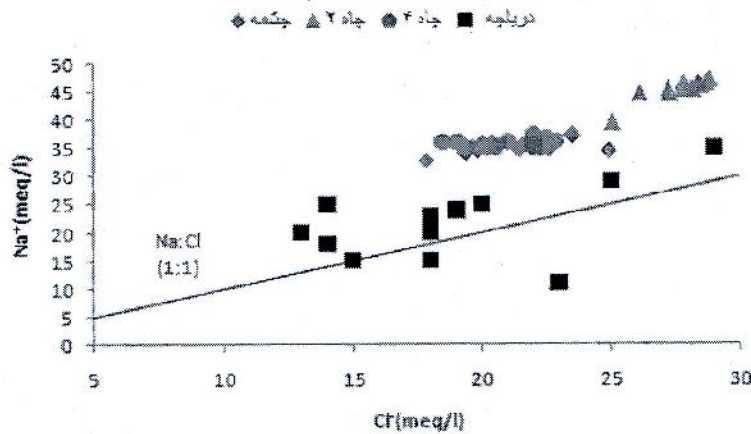
پارامترهای صحرایی اندازه گیری شده و نتایج آنالیز آنیون ها و کاتیون های اصلی و برخی عناصر فرعی نمونه های آب زیرزمینی (چشمه اندرخ (Sp1)، چاه های ۲(W2) و ۴(W4)) و آب دریاچه سد کارده (L) در جدول ۳ ارائه شده است. بررسی غلظت آنیون ها و کاتیون ها، نشان می دهد که کلسیم با متوسط غلظت (۵۲/۷ میلی گرم در لیتر) بالاترین غلظت را نسبت به سایر کاتیون ها در آب چشمه اندرخ دارد و از متوسط غلظت آن در آب دریاچه سد کارده (۵۲/۰ میلی گرم در لیتر) و آب چاه های ۲ و ۴ (۴۷/۶ میلی گرم در لیتر) بالاتر است. یون کلسیم، می تواند از انحلال کانی های کربناته موجود در سازند مزدوران و کانی ژپیس موجود در رسوبات نئوژن واقع در شمال شرق منطقه تامین شده باشد. پس از یون کلسیم، یون منیزیم دارای بالاترین غلظت با متوسط (۲۸/۱ میلی گرم در لیتر) در چشمه

زمانیکه دولومیت موجود در واحدهای آهکی سازند مزدوران در طول مسیر جریان حل می شود، به دلیل کمتر بودن انحلال دولومیت در آب نسبت به کلسیت، غلظت Mg کم و آب نسبت به دولومیت در حالت تحت اشباع باقی می ماند، درحالیکه کلسیت بخاطر سرعت بیشتر انحلالی زودتر به حالت تعادل می رسد. وجود کانیهای تبخیری (انیدریت و ژپیس) و حل شدن آنها در طول مسیر جریان، باعث تسریع رسوب کلسیت و کاهش pH و افزایش  $\text{Pco}_2$  آب و در نتیجه تحت اشباع شدن آب نسبت به کانی دولومیت می شود. به چنین واکنش ناسازگار انحلال (Incongruent Dissolution Reactions) دولومیت هم زمان با رسوب کلسیت، فرایند "عدم تشکیل دولومیت" گویند (Kehew, 2000 & Fron dini, 2008).

مولفه دوم در منابع آب زیرزمینی که ۱۷٪ از واریانس داده ها را تحت پوشش قرار می دهد، بیان کننده ارتباط مستقیم پارامتر TDS، منیزیم، پتاسیم و سولفات است و انحلال کانی های تبخیری از جمله اپسومیت موجود در رسوبات دوران نئوژن (Ngr) (میرزاخانی، ۱۳۸۹) را نشان می دهد. از طرفی، ارتباط مستقیم پارامتر TDS، کلسیم، سولفات و نمایه اشباع کانی ژپیس در مولفه دوم در دریاچه سد کارده (با پوشش ۲۰٪ از واریانس داده ها)، نشان دهنده انحلال کانی های تبخیری موجود در رسوبات نئوژن از جمله ژپیس و اپسومیت همانند منابع زیرزمینی است. مولفه سوم در منابع آب زیرزمینی که ۱۵٪ از واریانس داده ها را تحت پوشش قرار می دهد، نشان دهنده ارتباط مستقیم نمایه اشباع کانی های کلسیت ( $\text{SI}_c$ )، دولومیت ( $\text{SI}_d$ ) و ارتباط معکوس نمایه اشباع کانی ژپیس ( $\text{SI}_g$ ) با این مولفه است که فرایند اشباع شدگی کانی های کربناته ناشی از انحلال واحد های مختلف سازند

۴ (۴۰/۶ میلی گرم در لیتر) کمتر است. نمودار یون سدیم در مقابل کلر (شکل ۲)، نشان می دهد که نسبت  $Na^+/Cl^-$  تقریباً در تمامی نمونه ها بالاتر از نسبت واحد است و بیان می کند که یون سدیم از منابع دیگری به غیر از کانی هالیت وارد منابع آب شده است. با توجه به وجود رسوبات نئوژن (Ngr) و گسترده بودن آن در منطقه، غلظت بالای یون سدیم در منابع آبی را می توان به انحلال رس های حاوی کانی های سیلیکاتی سدیم دار از جمله مونت موریلونیت و تبدیل آن به کائولینیت مربوط دانست.

اندرخ می باشد که از متوسط غلظت این یون در آب دریاچه سد کارده (۲۸/۷ میلی گرم در لیتر) کمتر و از متوسط غلظت آن در آب چاه های ۲ و ۴ (۲۳/۵ میلی گرم در لیتر) بالاتر است. یون منیزیم در چشمه اندرخ از انحلال کلسیت دولومیتی موجود در واحد  $J_{mz1}$  سازند مزدوران و کانی های سیلیکاتی حاوی یون منیزیم در رسوبات واحد (Ngr) در بالادست چشمه اندرخ تامین می شود. متوسط غلظت یون سدیم در آب چشمه اندرخ (۳۵/۵ میلی گرم در لیتر) از متوسط غلظت آن در آب دریاچه سد کارده (۱۵/۷ میلی گرم در لیتر) بالاتر و از متوسط غلظت آن در آب چاه های ۲ و



شکل ۲- نمودار ترکیبی یون سدیم در مقابل یون کلر

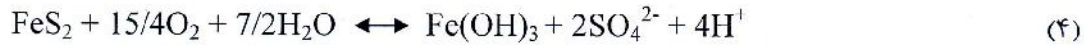
ایلیت است که در داخل رسوبات نئوژن قرار دارند و منشا دیگر مربوط به انحلال سیلیس کلسدونیک دانه ریز و کوارتز های دانه ریزی است که در سنگ های آهکی و آهکی دولومیتی سازند مزدوران به صورت پراکنده وجود دارند (پروین، ۱۳۸۵). متوسط غلظت یون آهن در آب چشمه اندرخ (۰/۰۵ میلی گرم در لیتر) اندکی بیشتر از متوسط غلظت آن در چاه های ۲ و ۴ (۰/۰۴ میلی گرم در لیتر) می باشد. غلظت یون آهن در آب دریاچه سد کارده اندازه گیری نشده است. فرم غالب آهن

متوسط غلظت یون سیلیس در آب چشمه اندرخ (۹/۳ میلی گرم در لیتر) بالاتر از متوسط غلظت آن در چاه های ۲ و ۴ (۹/۰ میلی گرم در لیتر) می باشد. غلظت یون سیلیس در آب دریاچه سد کارده اندازه گیری نشده است. یون سیلیس در آب چشمه اندرخ با توجه به مطالعه مقاطع نازک تهیه شده از سازندهای موجود در منطقه (مطالعه منتشر نشده) از دو منشا متفاوت تامین می شود، اولین منشا یون سیلیس مربوط به کانی های سیلیکاتی از جمله مونت موریلونیت، کائولینیت و



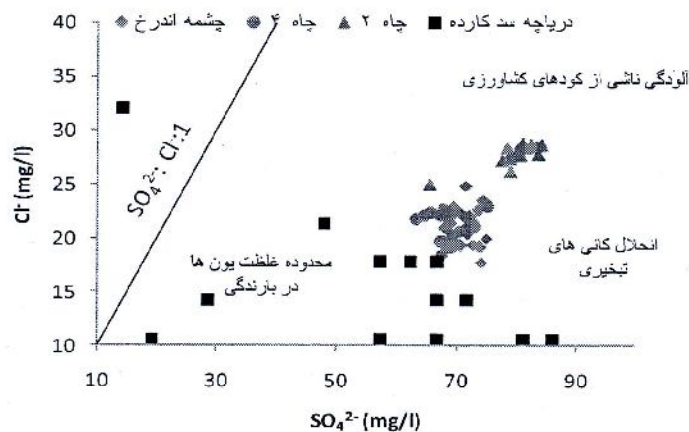
اکسیداسیون یون  $\text{Fe}^{2+}$  ناشی از انحلال کانی آنکريت و سیدريت در آب در طی واکنش های ۴ و ۵ تامین شود (Sivials, 2010).

در آب چشمه اندرخ و منابع آب زیرزمینی منطقه با توجه به مطالعه مقاطع نازک  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  است که نشان دهنده شرایط اکسیداسیون می باشد که می تواند ناشی از اکسیداسیون کانی پیریت و یا



آب دریاچه سد کارده و چاه ۴ (به ترتیب ۶۷/۹ و ۶۸/۵ میلی گرم در لیتر) بالاتر و از متوسط غلظت آن در آب چاه ۲ (۷۹/۹ میلی گرم در لیتر) پایین تر است. یون سولفات در آب های زیرزمینی دارای دو منشأ طبیعی ناشی از انحلال کانی های تبخیری از جمله ژپس و اکسیداسیون کانی پیریت و منشأ مصنوعی ناشی از کودهای کشاورزی و فاضلاب های خانگی و صنعتی می باشد. نمودار کلر در مقابل سولفات (شکل ۳)، نشان می دهد که منشأ یون سولفات در چشمه اندرخ طبیعی است.

در بین آنیون ها، یون بی کربنات نسبت به سایر یونها دارای بالاترین غلظت در آب چشمه اندرخ است. متوسط غلظت آن (۲۵۶/۴ میلی گرم در لیتر) بیشتر از متوسط غلظت آن در آب دریاچه سد کارده (۲۳۱ میلی گرم در لیتر) و آب چاه های ۲ و ۴ (۲۲۳ میلی گرم در لیتر) می باشد. یون بی کربنات در آب چشمه اندرخ و سایر منابع مورد مطالعه از انحلال کانی های کربناته در طی واکنش های ۱ تا ۳ تامین می شود. یون سولفات با متوسط غلظت (۷۱/۷ میلی گرم در لیتر) پس از یون بی کربنات دارای بالاترین غلظت در نمونه های آب چشمه اندرخ است. متوسط غلظت آن در

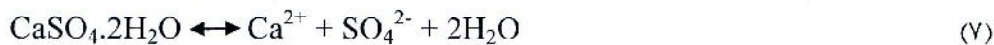
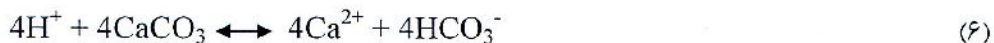


شکل ۳- نمودار ترکیبی یون کلر در مقابل یون سولفات

کلسیت در حضور یون  $\text{H}^+$  شروع به انحلال می کند (واکنش ۶) و نسبت یون کلسیم به سولفات ( $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ ) در محلول ۲:۱ خواهد بود، اما در

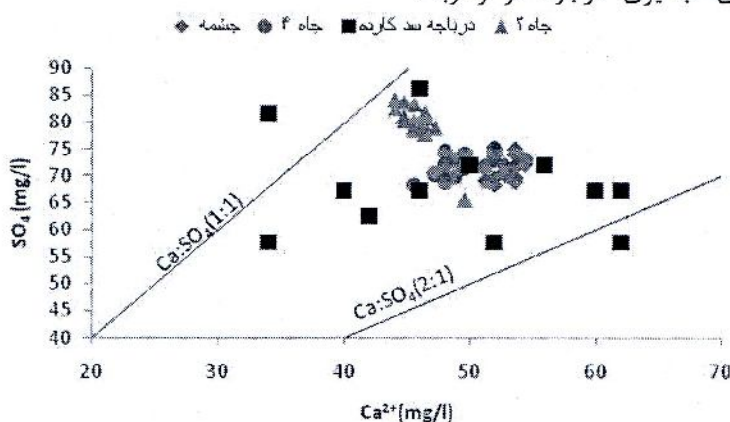
برای تشخیص کانی منشأ یون سولفات باید به این نکته توجه شود که زمانی که کانی پیریت دچار فرایند اکسیداسیون می شود (واکنش ۴)، کانی

انحلال کانی ژئوپس (واکنش ۷) این نسبت (Panno *et al.*, ۱:۱ می باشد، 2001)



نئوزن بالادست چشمه اندرخ می باشد و منشا ثانویه احتمالاً مربوط به اکسیداسیون کانی پیریت موجود در لابه های شیلی موجود در آهک مزدوران است (e.g. Panno *et al.*, 2001).

با توجه به نمودار یون سولفات در مقابل کلسیم (شکل ۴) مشخص می شود که یون سولفات موجود در آب چشمه اندرخ دارای دو منشا متفاوت است. منشا اولیه به احتمال زیاد مربوط به انحلال کانی های تبخیری موجود در رسوبات

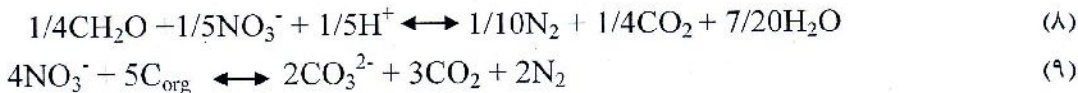


شکل ۴- نمودار یون سولفات در مقابل یون کلسیم

شناسی حوضه و همچنین به مقدار اندک از فاضلاب های خانگی تامین می شود. متوسط غلظت یون نیترات نیز در آب چشمه اندرخ (۱۰/۶ میلی گرم در لیتر) کمتر از حداکثر غلظت یون نیترات مجاز در منابع آب آشامیدنی (۴۵ میلی گرم در لیتر) بر اساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی در سال ۱۹۸۳ میلادی می باشد. غلظت یون نیترات در آب چشمه اندرخ بالاتر از غلظت این یون در آب دریاچه سد کارده و چاه های ۲ و ۴ (به ترتیب ۴/۰ و ۱۰/۱ میلی گرم در لیتر) است. علت کمتر بودن غلظت یون نیترات در دریاچه سد کارده نسبت به منابع آب زیرزمینی در منطقه مربوط به مصرف یون نیترات در طی فرایند تجزیه مواد آلی (واکنش ۸) و فرایند

متوسط غلظت یون کلر در آب چشمه اندرخ (۲۱/۲ میلی گرم در لیتر) است که بیشتر از غلظت متوسط آن در دریاچه سد کارده و چاه ۴ (به ترتیب ۱۳/۳ و ۲۱/۱ میلی گرم در لیتر) و کمتر از غلظت متوسط آن در چاه ۲ (۲۷/۷ میلی گرم در لیتر) می باشد. یون کلر در منابع آب زیرزمینی دارای منشا طبیعی، ناشی از انحلال کانی های حاوی یون کلر در سازندهای زمین شناسی و منشا مصنوعی ناشی از کودهای کشاورزی، فاضلاب خانگی و صنعتی است. نمودار کلر در مقابل سولفات (شکل ۳)، نشان می دهد که منشا یون کلر در چشمه اندرخ و سایر منابع آب زیرزمینی ناشی از انحلال کانی های حاوی یون کلر در واحدهای تبخیری موجود در سازندهای زمین

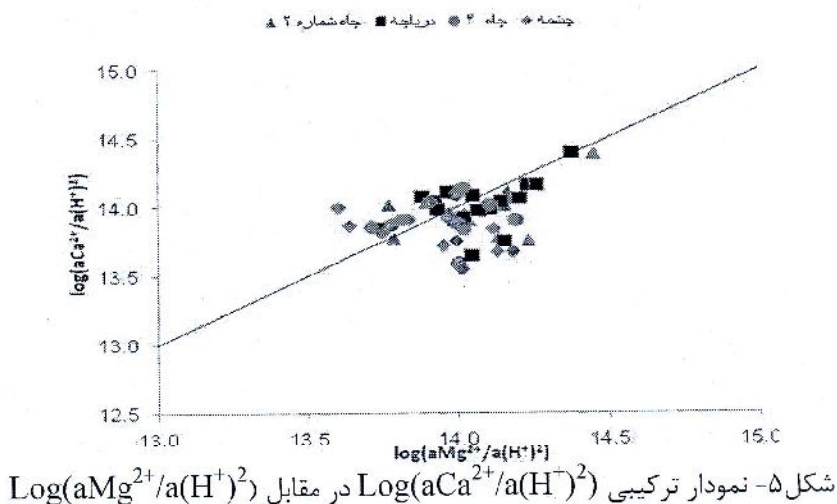
دینتریفیکاسیون بی هوازی (واکنش ۹) در دریاچه سد کرده می باشد ( e.g. Lang *et al.*, 2006).



(چشمه اندرخ، چاه های شماره ۲ و ۴) و دریاچه سد کرده در نمودار  $\text{Log}(a\text{Ca}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  در مقابل  $\text{Log}(a\text{Mg}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  (شکل ۵) نشان می دهد که انحلال کانی های کلسیت و دولومیت هر دو در شیمی منابع آبی موجود در منطقه نقش عمده ای دارند (Marini, 2000).

### تشخیص کانی های انحلال یافته در منابع آب سطحی و زیرزمینی منطقه

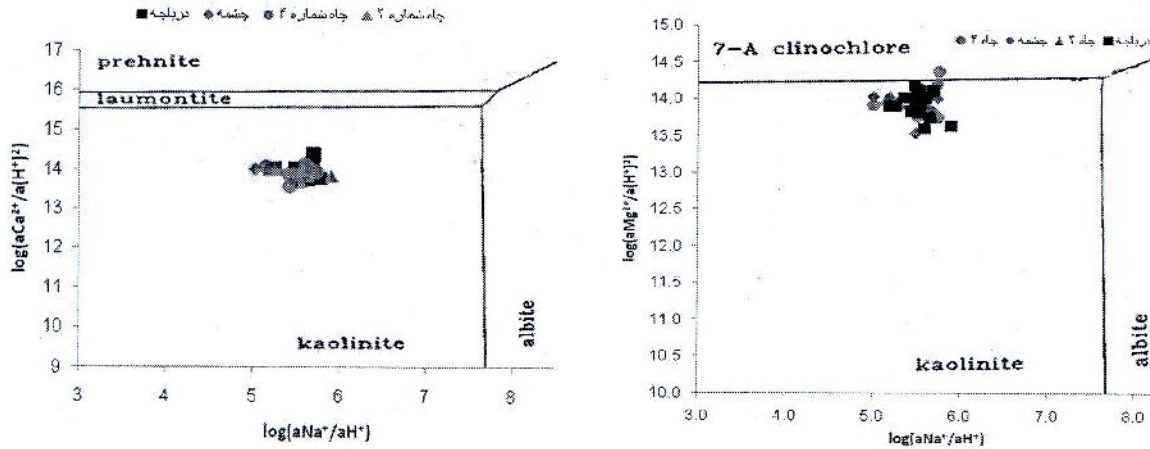
یکی از روش های تعیین کانی های انحلال یافته در آب، بررسی میزان فعالیت شیمیایی (a) یون های موجود در آب است. مطالعه کیفی نمونه های منابع انتخابی آب زیرزمینی موجود در منطقه



مطالعه منابع آبهای زیرزمینی و سطحی منطقه و اختلاط آنها با استفاده از داده های ایزوتوپی ( $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^2\text{H}$ )

یکی از روش های نوین و دقیق در مطالعه منشأ منابع آب استفاده از ایزوتوپ های پایدار اکسیژن و دوتریم است. نتایج آنالیز ایزوتوپی کلیه نمونه های آب زیرزمینی، آب دریاچه سد کرده و آب رودخانه کرده در جدول (۲) ارائه شده است.

در نمودار های ترکیبی  $\text{Log}(a\text{Ca}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  و  $\text{Log}(a\text{Mg}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  در مقابل  $\text{Log}(a\text{Na}^+/a(\text{H}^+))$  (شکل ۶) که برای تعیین کانی های سیلیکاته محلول در آب استفاده می شوند، اکثر نمونه های مربوط به منابع آب زیرزمینی (چشمه اندرخ، چاه های شماره ۲ و ۴) و سطحی (دریاچه سد کرده) در محدوده کانی کائولینیت قرار می گیرد و تنها در نمونه های مربوط به چاه شماره ۴ علاوه بر کانی کائولینیت کانی کلینوکلر نیز انحلال پیدا کرده است.



شکل ۶- نمودارهای ترکیبی  $\text{Log}(a\text{Ca}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  و  $\text{Log}(a\text{Mg}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  در مقابل  $\text{Log}(a\text{Na}^+/a\text{H}^+)$

جدول ۲- نتایج آنالیز ایزوتوپی نمونه های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه، دریاچه سد و آب رودخانه کارده (اسفند ۱۳۸۹)

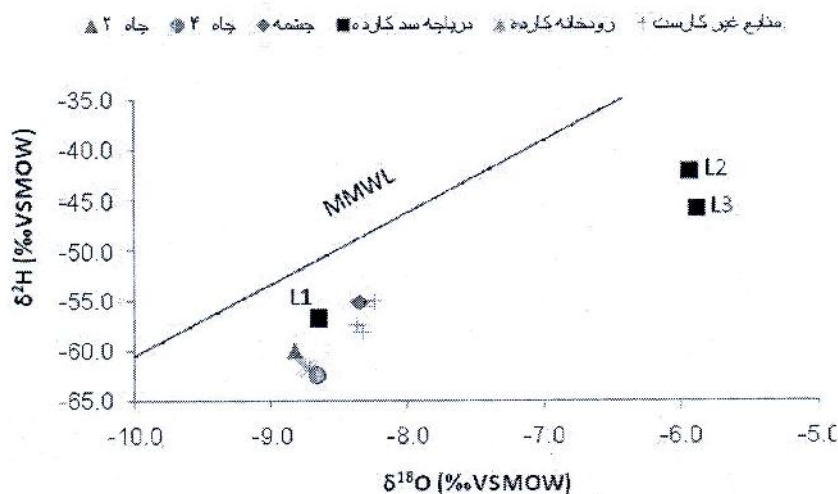
$d_{\text{excess}}$	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	EC (μs/cm)	TDS (mg/l)	Salinity (%)	$T_{\text{p}}(\text{°C})$	شماره	نوع منبع
۱۰/۶	-۵۹/۹۷	-۸/۸۳	۵۸۴	۲۸۰	۰/۳	۲۲/۵	W۲	چاه کارستی شماره ۲
۶/۸	-۶۲/۴۵	-۸/۶۶	۵۵۷	۲۶۷	۰/۳	۱۶/۹	W۴	چاه کارستی شماره ۴
۱۱/۶	-۵۵/۱۵	-۸/۳۵	۵۸۳	۲۷۹	۰/۳	۲۰/۷	Sp۱	چشمه کارستی اندرخ
۱۰/۸	-۵۵/۱۲	-۸/۲۴	۵۲۰	۲۴۹	۰/۲	۱۶/۱	Sp۲	چشمه غیر کارستی قیروز آباد
۹/۵	-۵۷/۴۵	-۸/۳۷	۷۲۰	۳۴۷	۰/۳	۱۷/۲	Sp۳	چشمه غیر کارستی خواچه حسین
۸/۴	-۵۸/۲۴	-۸/۳۳	۸۷۰	۴۳۱	۰/۴	۱۸/۱	Q۱	قنات گوشک آباد (غیر کارستی)
۱۲/۳	-۵۶/۸۴	-۸/۴۵	۵۷۰	۲۸۰	۰/۳	۱۶/۳	L۱	دریاچه سد کارده
۵/۲	-۴۲/۱۵	-۵/۹۳	۶۲۰	۳۱۰	۰/۳	۱۶/۶	L۲	دریاچه سد کارده
۱/۲	-۴۵/۸۴	-۵/۸۸	۶۳۰	۳۳۵	۰/۳	۲۰/۰	L۳	دریاچه سد کارده
۸/۳	-۶۱/۶۸	-۸/۷۵	۵۴۵	۲۶۰	۰/۲	۱۷/۵	R۱	رودخانه کارده
۷/۹	-۶۱/۸۴	-۸/۷۲	۵۵۵	۲۶۴	۰/۳	۱۸/۸	R۲	رودخانه کارده

است، غنی تر می باشد. انتقال داده های نمونه های آب دریاچه سد کارده و منابع آب زیرزمینی کارستی به علاوه منابع غیر کارستی (Sp<sub>۲</sub>، Sp<sub>۳</sub> و Q<sub>۱</sub>) واقع در رسوبات نئوژن منطقه در نمودار همبستگی بین اکسیژن ۱۸ و دوتریم (شکل ۷) نشان می دهد که تمامی نمونه های آب زیرزمینی و آب دریاچه سد کارده، بدلیل غنی شدگی ایزوتوپی ناشی از فرایند تبخیر ثانویه، از خط آب جوی شهر مشهد

مقدار ایزوتوپ های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم در نمونه آب چشمه اندرخ (Sp<sub>۱</sub>) (بترتیب ۸/۴‰ و -۵۵/۲‰) می باشد که از ترکیب ایزوتوپی آب چاه های ۴ (W<sub>۴</sub>) (بترتیب ۸/۷‰ و ۶۲/۵‰) و چاه ۲ (W<sub>۲</sub>) (بترتیب ۸/۸‰ و ۶۰/۱‰) غنی تر و از نمونه های آب دریاچه سد کارده (L<sub>۲</sub> و L<sub>۳</sub>) (-۴۴/۰‰ و -۵/۹‰) تهی تر ولی از نمونه (L<sub>۱</sub>) (-۵۵/۱‰ و -۸/۶‰) که مربوط به ورودی رودخانه کارده به دریاچه سد

آب سطحی و زیرزمینی است ولی در منابع غیر کارستی مربوط به فرایند تبخیر ثانویه آب بارندگی در داخل آبخوان می باشد (Kohfal et al., 2008 & Ryu et al., 2007).

(Mohammadzadeh, 2010) فاصله گرفته اند. نمونه های مربوط به منابع آب زیرزمینی (کارستی و غیرکارستی) مابین نمونه های آب سطحی و خط آب جوی قرار می گیرند که در نمونه های کارستی نشان دهنده فرایند اختلاط بین منابع



شکل ۷- نمودار  $\delta^2\text{H}$  در مقابل  $\delta^{18}\text{O}$  نمونه های آب سطحی و زیرزمینی

سد کارده) می باشد. از طرفی، در منابع غیرکارستی منطقه که در واحدهای تبخیری (Ngr) قرار گرفته اند میزان  $\delta^{18}\text{O}$  مشابه منابع آب کارستی ولی میزان EC به مراتب بالاتر از منابع آب کارستی می باشد که ناشی از انحلال کانی های تبخیری در این منابع آبی و افزایش EC است.

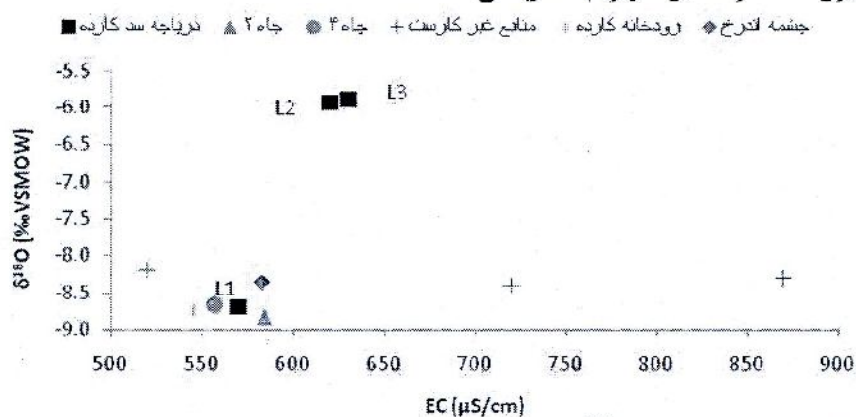
#### نتیجه گیری

مطالعه هیدروشیمیایی منابع آب در منطقه نشان می دهد که انحلال واحدهای زمین شناسی مختلف در منطقه بر کیفیت منابع آب تاثیر بسیار زیادی می گذارد. رسم نمودارهای ترکیبی "  $\text{Log}(a\text{Ca}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  در مقابل  $\text{Log}(a\text{Ca}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  و  $\text{Log}(a\text{Mg}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  و  $\text{Log}(a\text{Mg}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$  در مقابل ( Log )

ارتباط بین پارامتر هدایت الکتریکی و میزان اکسیژن ۱۸ نمونه های آب زیرزمینی و سطحی در نمودار  $\text{EC}^{18}$  در مقابل  $\delta^{18}\text{O}$  (شکل ۸)، نشان می دهد که نمونه های مربوط به رودخانه کارده دارای میزان EC و  $\delta^{18}\text{O}$  پایین و نمونه های آب دریاچه سد کارده دارای EC نسبتاً پایین ولی مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  بالایی می باشند که ناشی از فرایند تبخیر آب دریاچه است. نمونه های آب زیرزمینی کارستی (چشمه اندرخ و چاه های ۲ و ۴) دارای  $\delta^{18}\text{O}$  مشابه آب رودخانه و میزان EC اندکی بالاتر از آب رودخانه است که نشان دهنده زمان ماندگاری پایین آب در آبخوان کارستی و تبخیر ناچیز آب در آبخوان کارستی است و افزایش اندک میزان EC نیز مربوط به ارتباط منابع آب کارستی با منابع آب سطحی (رودخانه و دریاچه

دهد که نمونه های آب دریاچه سد کارده و منابع آب زیرزمینی نسبت به آب بارندگی به دلیل فرایند تبخیر ثانویه در این نمونه ها، غنی تر شده اند و منابع آب زیرزمینی کارستی با منابع آب سطحی ارتباط هیدرولیکی داشته و در میان منابع آب زیرزمینی، تغذیه چشمه اندرخ از منابع آب سطحی بیشتر است.

$(aNa^+/a(H^-)^2)$  نشان می دهد که کانی های کربناته (کلسیت و دولومیت) و سیلیکاته (کائولینیت، لامونیت و کلینوکلر) بیشترین کانی های انحلال یافته در منابع آب زیرزمینی و سطحی در منطقه می باشند. انتقال داده های ایزوتوپ های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم نمونه های آب (آب زیرزمینی و سطحی منطقه) بر روی نمودار اکسیژن ۱۸ در مقابل دوتریم نشان می



شکل ۸- نمودار ترکیبی  $^{18}O$  در مقابل EC نمونه های آب زیرزمینی و سطحی در منطقه

مدیریت آزمایشگاه فیزیکوشیمیایی شرکت آب و فاضلاب شهر مشهد و جناب آقای مهندس بشارتی مدیریت آزمایشگاه شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی برای فراهم آوردن داده های مورد نیاز و کمک به انجام نمونه گیری و آزمایشات هیدروشیمیایی نمونه های آب، کمال تشکر را داریم.

#### تقدیر و تشکر

از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد بخاطر فراهم آوردن امکانات لازم برای این تحقیق و از مسئولین محترم شرکت آب و فاضلاب شهر مشهد و شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی بخصوص از زحمات آقای مهندس علیپور مدیریت بخش آزمایشگاه ها و خانم مهندس غیائی

#### منابع

بختیاری، بیست دومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور. -کریمی، ح.، ۱۳۷۶. بررسی هیدروژئولوژیک و هیدروشیمیایی چشمه ها و پیژومترهای تاقدیس پودونو فیروز آباد، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز. -کریمی وردنجانی، ح.، ۱۳۸۴. بررسی هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی موگرون و

-پروین، ح.، ۱۳۸۵. سنگ شناسی رسوبی، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۳۰۲ صفحه. -درویش زاده، ع.، ۱۳۸۳. زمین شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر، ۴۳۴ صفحه. -کشاوری، ت.، کریمی وردنجانی، ح.، محمدی، ض.، و رئیس، ع.، ۱۳۸۲. بررسی هیدروژئولوژیک چشمه کارستی آتشفشان واقع در استان چهارمحال

ارشد زمین شناسی). گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد.

-ناصری، ح.، ۱۳۷۰. مطالعه هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی حوضه آبریز سد درودزن: (پایان نامه کارشناسی ارشد آب شناسی). گروه زمین شناسی دانشگاه شیراز.

-نصیری، ر.، ۱۳۸۷. آموزش گام به گام نرم افزار Spss17 مقدماتی و پیشرفته، انتشارات نشر گستر، تهران، ۲۹۲ صفحه.

-Manov, G., G., Bates, W., and Acree, S.F., 1943. Values of the constant in Debye-Huckle equation for activity coefficient. Journal of the American chemical society, v. 65, p.1765-1767.

-Marini, L., 2000. Water-rock interaction in the Bisagno valley. Geichemica et cosmochimica acta, v.64, p.2617-2635.

-Mohammadzadeh, II., 2010. The meteoric relationship for  $18\text{O}$  and  $2\text{H}$  in precipitations and isotopic compositions of water resources in Mashhad area (NE Iran), the first Azad university international geology conference, Mashhad, p. 555-559.

-Panno, S. V., Hackley, K. C., Hwang, H. H., and Kelly, W. R., 2001. Determination of the Sources of nitrate contamination in Karst Spring using isotopic and chemical indicators. Chemical geology, v. 179, p. 113-128.

-Rui, M., Wang, Y., Ziyong, S., Chunmiao, Z., Teng, M., and Henning, P., 2010. Geo chemical evaluation of ground water in carbonate aquifers in Taiyuan, northern China. Applied geochemistry, v. 26, p. 884-897.

-Ryu, J., Lee, k., and Chang, H., 2007. Hydrogeochemical and isotopic investigation of the Han river, South Korea. Journal of Hydrology, v. 345, p. 50-60.

-Shuster, E.T., and White, W.B., 1971. Seasonal fluctuation in the chemistry of limestone spring, Journal of hydrology, v. 14, p. 93-128.

-Sivials, G., and Lambarakis, N., 2010. Water origin of the Kokkino Stefani spring (w Greece) Based on hydro geochemical Data. Advances in research in Karst media. P. 195-201.

سرآسیاب، نهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران.

-کریمی وردنجانی، ح.، ۱۳۸۹. هیدروژئولوژی کارست (مفاهیم و روش ها)، انتشارات ارم شیراز، ۴۳۲ صفحه.

-میرزاخانی، ص.، ۱۳۸۹. مطالعه ژئوشیمیایی رسوبات ماسه سنگی سازند (Ngr) در منطقه ارداک (شمال شهر مشهد): (پایان نامه کارشناسی

-Bakalowicz, M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. Hydrogeology Journal v. 13, p. 148-160.

-Bonacci, O., 2001. Analysis of the Maximum discharge of karst springs. Hydrogeology Journal, v. 9, p. 328-338.

-Border, J., Merkel, B., and Friedrich, P., 2008. Ground water Geochemistry. Springer publication, 320 p.

-Drever, J.I., 1997. The Geochemistry of Natural Waters: Prentice Hall, New Jersey, 520 p.

-Froncini, F., 2008. Geochemistry of regional aquifer hosted by carbonate-evaporative formations in Umbria Tuscany (Central Italy). Applied Geochemistry, v. 23, 2091-2104.

-Kehew, A., 2000. Applied Chemical Hydrogeology: prentice Hall, New Jersey, 370 p.

-Kohfal, c., Sprenger, c., and Meyer, H., 2008. Recharge sources and hydrogeochemical evaluation of groundwater in semiarid and karstic environments: A field study in granda basin. Applied geochemistry, v. 23, p. 846-862.

-Lang, Y., Liu, C., Zho, Z., and Li, S., 2006. Geochemistry of surface and ground water in Guiyang, -China: Water/ rock interaction and pollution in a karst hydrological system. Applied Geochemistry, v. 21, p. 887-903.

-La Moreaux, P.E., 1991. History of Karst Hydrogeological studies: Proceeding of the national Conference on Environmental Changes in Karst Areas. Padova, Italy.

-Lopez, M., Bouamama, M., Vallejos, A., and Pulido, B., 2000. Factors which determine the hydro chemical behavior of Karstic Spring. A case study from the Betic Cordilleras, Spain. Applied Geochemistry, v. 16, p. 1179-1192.