

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

حسین محمد زاده^{۱*} و مجتبی حیدری زاد^۲

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

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

پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۱/۲۰

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۰/۴/۱۸

چکیده

منطقه کارستی اندرخ در ۴۰ کیلومتری شمال شهر مشهد و در مسیر جاده آسفالت 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)*^۲ 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 (کائولونیت، 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

(۱۳۸۴) اشاره نمود، نامبرده با مطالعه داده های تخلیه و همچنین آنیون ها و کاتیون های اصلی چشمه های کارستی موگرون و سراسیاب به بررسی هیدروژئولوژیک 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 (^2H و ^{18}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 متقاطع جهانی عرض شمالی $35^{\circ}40'74''$ و طول شرقی $50^{\circ}22'40''$ 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 واحد های مختلف سازند مزدوران (واحدهای J_{mz1} ، J_{mz2} و J_{mz3}) تشکیل شده است. علاوه بر آن رسوبات دوران نئوژن (NGT) معروف به لایه های قرمز و متشکل

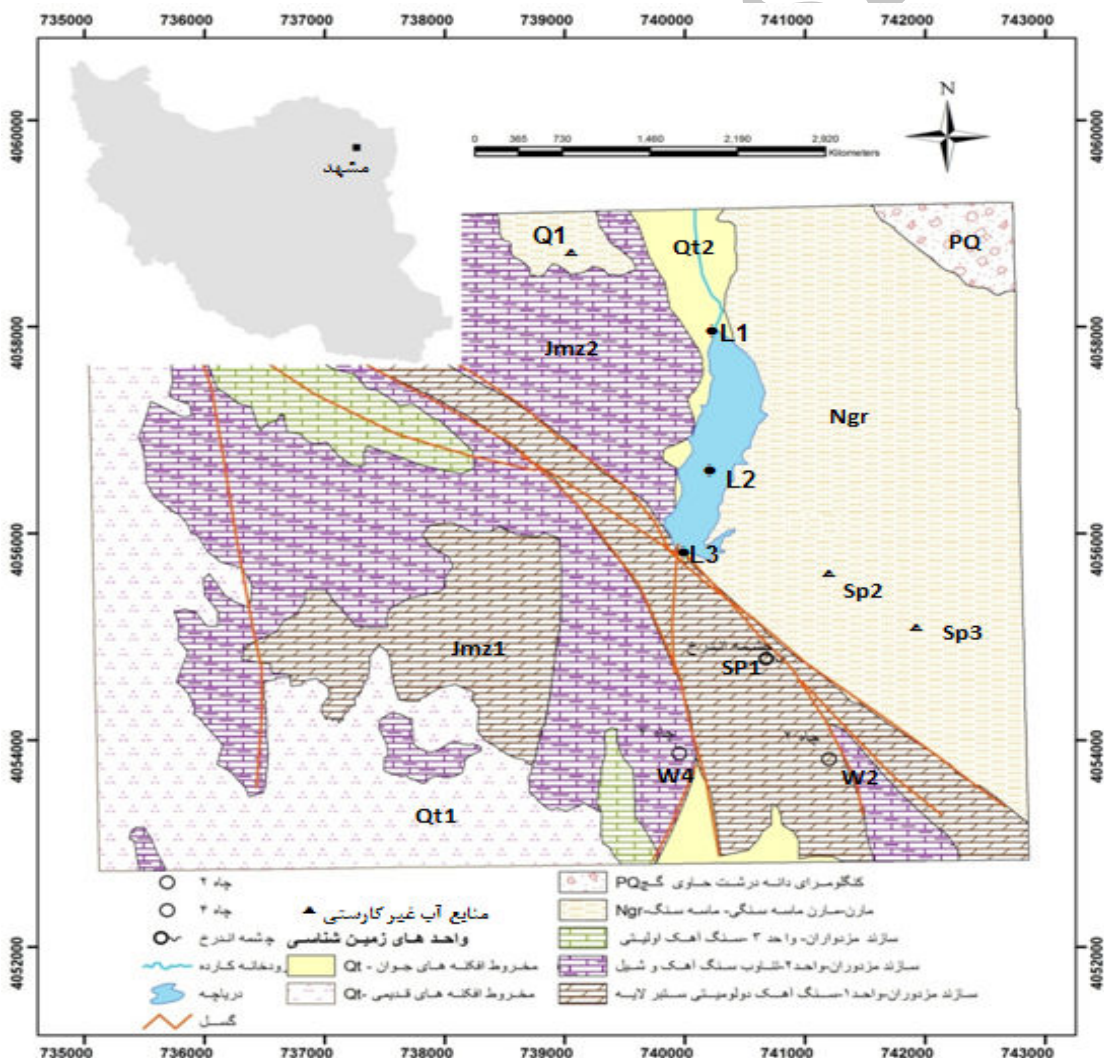
مطالعه منابع آب سازند های کارستی به دلیل اینکه این سازندها تقریباً ۲۰ درصد از سطح کره زمین را می پوشانند و جمعیت قابل توجه ای از جهان آب مورد نیاز خود را از آن تامین می کنند دارای اهمیت فوق العاده زیادی است (LaMoreaux, 1991). در کشور ما نیز حدود ۱۱ درصد از سطح کل کشور (قسمت اعظم رشته کوه های زاگرس و کپه داغ) از سازند های کارستی تشکیل شده است (ناصری، ۱۳۷۰). یکی از عوامل موثر بر فرایند کارستی شدن، کانی شناسی سنگ ها 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 هایی گوناگونی از جمله روش های ایزوتوپی، هیدروژئولوژیکی 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 (^{18}O و ^2H) که دارای دقت بالاتری نیز می باشد و تفسیر نتایج آن ها می توان به منشا آب در داخل آبخوان های کارستی پی برد. نمودار همبستگی بین مقادیر ^{18}O و ^2H 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

آهک های ضخیم لایه و دولومیتی واحد J_{mz1} سازند مزدوران، نشان دهنده انحلال بالاتر واحد J_{mz1} نسبت به دیگر واحد های 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.

از رس، مارن و مارن ماسه ای (درویش زاده، 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

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) ^۱ 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، γ 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) ^۲ رابطه ۳ محاسبه می شود؛ و m مولاریته یون مورد نظر در نمونه ها می باشد.

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

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

که در آن: Z_i ؛ بار یون A_m ، 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،

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. پارامتر های صحرایی 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 بیکربنات 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. 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.

نماینده اشباع کانیهای کربناته (کلسیت، دولومیت و آزگونیت) و کانی های سولفات (ژیپس و انیدریت)

فاکتورها، دو روش Kaiser criterion و Scree Plot بکار گرفته شده است (نصیری، ۱۳۸۳). هر دو روش نشان می دهند که برای داده های 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 داده ها را تحت پوشش خود دارد.

استخراج عامل ها و تفسیر نتایج حاصله از این داده ها است.

نتایج و بحث

در طی این مطالعه، برای تحلیل آماری داده های 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	منابع آب زیرزمینی منطقه			دریاچه سد کارده			
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F4
pH	-۰/۲۱۸	-۰/۱۷۷	-۰/۲۵۷	-۰/۹۳۱	-۰/۳۶۳	۰/۰۷۸	-۰/۲۲۴
TDS	۰/۴۰۲	۰/۴۶۳	۰/۱۴۲	-۰/۳۴۱	۰/۷۶۱	۰/۴۰۰	-۰/۲۲۳
Ca ²⁺	۰/۹۴۶	۰/۰۶۹	-۰/۱۰۰	-۰/۳۷۵	۰/۷۶۹	۰/۰۵۲	-۰/۳۰۸
Mg ²⁺	۰/۸۲۸	۰/۴۷۵	۰/۱۱۴	۰/۷۱۷	۰/۳۶۰	۰/۵۲۱	-۰/۰۹۰
Na ⁺	-۰/۸۹۳	۰/۳۸۱	-۰/۰۷۸	-۰/۴۷۳	-۰/۰۸۰	-۰/۱۹۰	۰/۸۲۱
K ⁺	۰/۰۰۴	۰/۴۸۴	۰/۱۱۸	-	-	-	-
HCO ₃ ⁻	۰/۹۶۳	۰/۲۱۲	-۰/۰۰۳	-۰/۵۲۳	۰/۳۰۲	۰/۷۴۹	۰/۱۶۷
SO ₄ ²⁻	-۰/۶۴۴	۰/۶۶۵	۰/۱۶۳	۰/۶۷۲	۰/۳۳۰	-۰/۵۲۰	-۰/۰۴۱
Cl ⁻	-۰/۸۶۴	۰/۳۸۶	-۰/۰۴۸	۰/۲۳۰	۰/۵۷۱	-۰/۴۲۵	۰/۵۴۲
SI _c	۰/۳۸۳	-۰/۰۲۸	۰/۷۶۵	۰/۸۶۱	-۰/۰۵۳	۰/۴۱۵	۰/۱۸۳
SI _d	۰/۰۶۰	-۰/۱۵۲	۰/۸۸۶	۰/۸۹۹	-۰/۱۲۰	۰/۳۷۶	۰/۱۲۸
SI _g	۰/۲۲۷	۰/۳۱۱	-۰/۵۸۸	۰/۶۲۲	۰/۶۰۹	-۰/۴۴۵	-۰/۱۶۰
درصد واریانس	۴۰/۱	۱۷/۰	۱۵/۰	۴۱/۵	۲۰/۰	۱۸/۰	۱۱/۰

دریاچه سد کارده (با پوشش ۴۱/۵٪ از واریانس داده ها)، ارتباط مستقیم پارامتر منیزیم، سولفات و نمایه های اشباع کانی کلسیت (SI_c)، دولومیت (SI_d) و ژپیس (SI_g) و ارتباط معکوس pH با این مولفه، نشان دهنده اهمیت واکنش انحلال دولومیت هم زمان با رسوب کلسیت، یعنی فرایند "عدم تشکیل دولومیت (Dedolomitization)" می باشد (Rui et al., 2010). رسوب کلسیت همزمان با انحلال دولومیت، می تواند در طول مسیر جریان بدلیل بالا بودن سرعت انحلال کلسیت در مقایسه با انحلال دولومیت در محیط های کارستی اتفاق بیافتد (Kehew, 2000).

با توجه به نتایج تحلیل مولفه های اصلی (PCA)، مولفه اول در منابع آب زیرزمینی (با پوشش ۴۰/۱٪ از واریانس داده ها) نشان می دهد که بارگزاری پارامترهای، کلسیم، بیکربنات، منیزیم مثبت (دارای ارتباط مستقیم قوی) و بارگزاری پارامترهای pH، سدیم و کلر منفی (دارای ارتباط معکوس) می باشند که نشان دهنده محیط کارستی منطقه و دلیل بر نقش هوازدگی و انحلال کانی های کربناته (کلسیت و دولومیت) و کانی های تبخیری (ژپیس و هالیت) موجود در سازند مزدوران (درویش زاده، ۱۳۸۳) بر کیفیت آب زیرزمینی منطقه می باشد. اما مولفه اول در

مزدوران را نمایش می دهد. از طرفی ارتباط معکوس نمایه اشباع کانی های کلسیت (SI_c) دولومیت (SI_d) با کانی تبخیری ژپس (SI_g) ناشی از واکنش انحلال ناسازگار می باشد (Frondini, 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

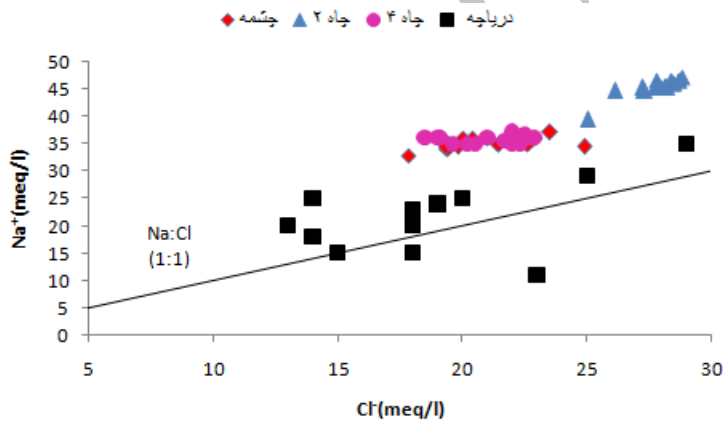
پارامترهای صحرائی اندازه گیری شده و نتایج آنالیز آنیون ها و کاتیون های اصلی و برخی عناصر فرعی نمونه های آب زیرزمینی (چشمه اندرخ (Sp1)، چاه های ۲ (W2) و ۴ (W4)) و آب دریاچه سد کارده (L) در جدول ۳ ارایه شده است. بررسی غلظت آنیون ها و کاتیون ها، نشان می دهد که کلسیم با متوسط غلظت (۵۲/۷ میلی گرم در لیتر) 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 ژپس 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 ژپس) و حل شدن آنها در طول مسیر جریان، باعث تسریع رسوب کلسیت و کاهش pH و افزایش P_{CO_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 & Frondini, 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 ژپس 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 ژپس 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 (SI_c)، دولومیت (SI_d) و ارتباط معکوس نمایه اشباع کانی ژپس (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 کائولونیت 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

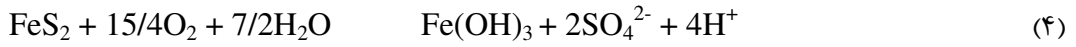


شکل (۲) - نمودار ترکیبی یون سدیم در مقابل یون کلر

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

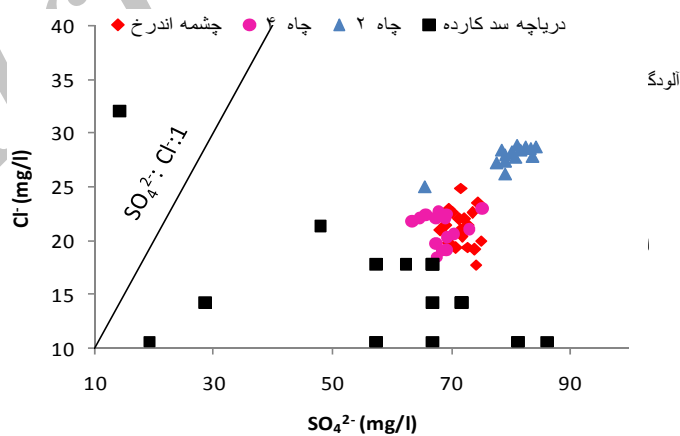
متوسط غلظت یون سیلیس در آب چشمه اندرخ (۹/۳ میلی گرم در لیتر) بالاتر از متوسط غلظت آن در چاه های ۲ و ۴ (۹/۰ میلی گرم در لیتر) می باشد. غلظت یون سیلیس در آب دریاچه سد کارده اندازه گیری نشده است. یون سیلیس در آب چشمه اندرخ با توجه به مطالعه مقاطع نازک تهیه شده از سازندهای موجود در منطقه (مطالعه منتشر نشده)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

اکسیداسیون یون Fe^{2+} ناشی از انحلال کانی آنکریت و سیدریت در آب در طی واکنش های ۵ و ۴ تامین شود (Sivalls, 2010).



دریاچه سد کارده و چاه ۴ (بترتیب 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 ژیپس و اکسیداسیون کانی پیریت و منشأ مصنوعی ناشی از کودهای کشاورزی و فاضلاب های خانگی و صنعتی می باشد. نمودار کالر در مقابل سولفات (شکل ۳)، نشان می دهد که منشأ یون سولفات در چشمه اندرخ طبیعی است.

در بین آنیون ها، یون بیکربنات 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 بیکربنات 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 بیکربنات دارای بالاترین غلظت در نمونه های آب چشمه اندرخ است. متوسط غلظت آن در آب



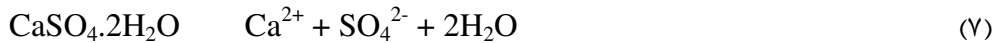
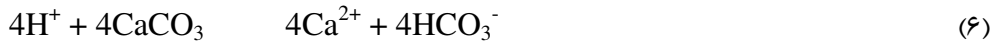
شکل (۳) - نمودار ترکیبی یون کالر در مقابل یون سولفات

کلسیت در حضور یون 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

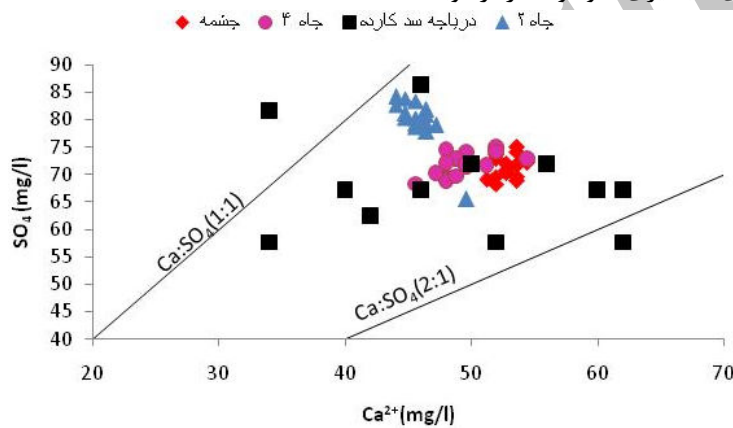
(2001).

انحلال کانی ژئوپس (واکنش ۷) این نسبت
(Panno et al., ۱:۱ می باشد Ca^{2+}/SO_4^{2-})



نئوزن بالادست چشمه اندرخ می باشد و منشا ثانویه احتمالاً مربوط به اکسیداسیون کانی پیریت موجود در لایه 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

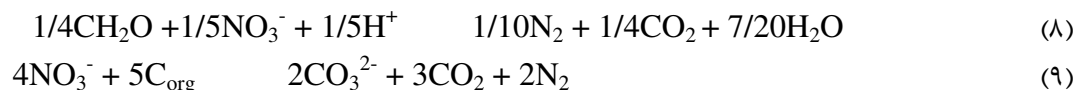


شکل (۴)- نمودار یون سولفات در مقابل یون کلسیم

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 (بترتیب 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 دینیتریفیکاسیون بی

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 (بترتیب 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 سازند های 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 زیر زمینی ناشی از انحلال کانی های حاوی یون کلر در واحدهای تبخیری موجود در سازندهای زمین

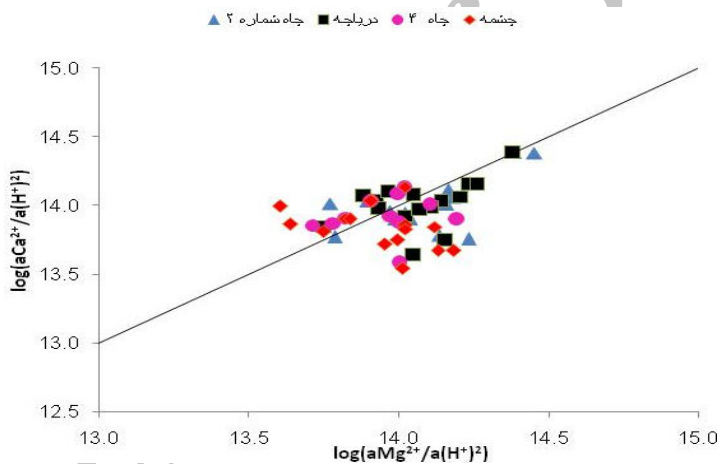
هوازی (واکنش ۹) در دریاچه سد کارده می باشد (e.g. Lang et al., 2006).



(چشمه اندرخ، چاه های شماره ۲ و ۴) و دریاچه سد کارده 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

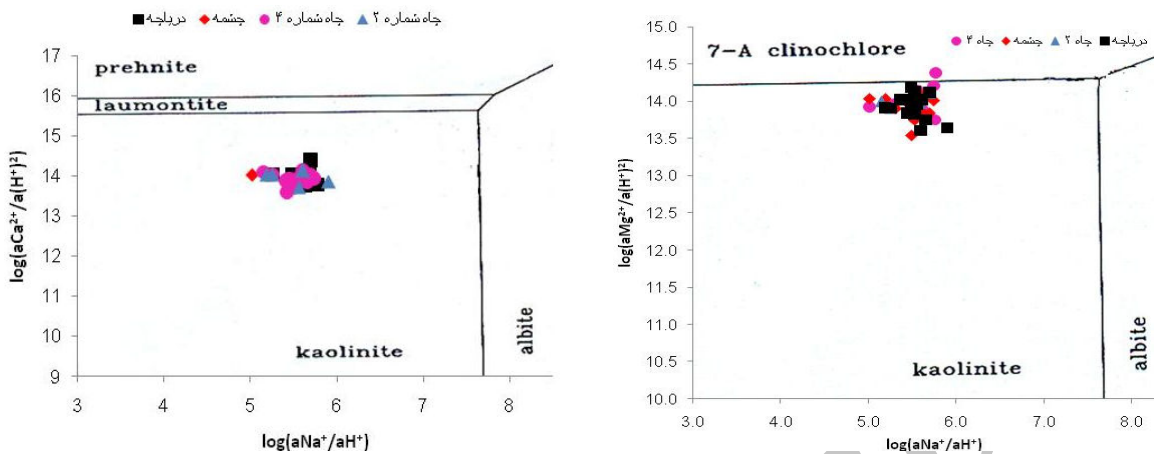


شکل (۵) - نمودار ترکیبی $\text{Log}(a\text{Ca}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$ در مقابل $\text{Log}(a\text{Mg}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$

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 ^{18}O و دوتریم است. نتایج آنالیز ایزوتوپی کلیه نمونه های آب زیرزمینی، آب دریاچه سد کارده و آب رودخانه کارده 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 کارده) 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)

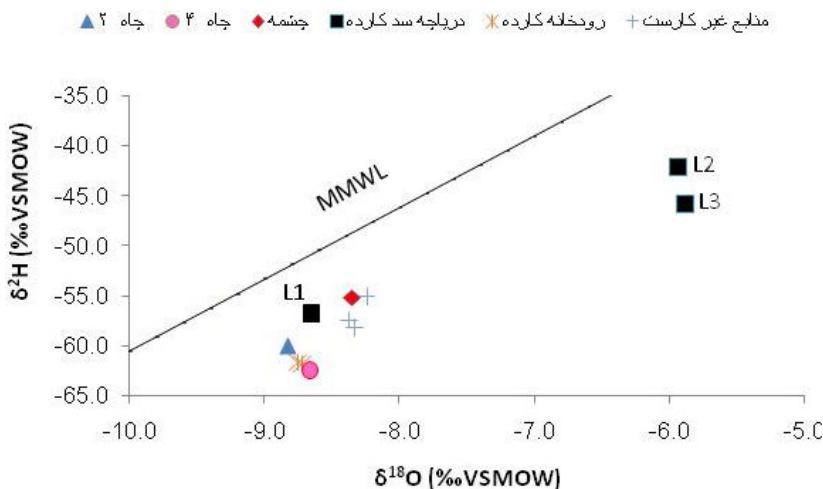
$d_{(excess)}$	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	TDS (mg/l)	Salinity (%)	$T_{(oC)}$	شماره	نوع منبع
۱۰/۶	-۵۹/۹۷	-۸/۸۳	۵۸۴	۲۸۰	-۰/۳	۲۲/۵	W۲	چاه کارستی شماره ۲
۶/۸	-۶۲/۴۵	-۸/۶۶	۵۵۷	۲۶۷	-۰/۳	۱۹/۹	W۴	چاه کارستی شماره ۴
۱۱/۶	-۵۵/۱۵	-۸/۳۵	۵۸۳	۲۷۹	-۰/۳	۲۰/۷	Sp۱	چشمه کارستی اندرخ
۱۰/۸	-۵۵/۱۲	-۸/۲۴	۵۲۰	۲۴۹	-۰/۲	۱۹/۱	Sp۲	چشمه غیر کارستی قیروز آباد
۹/۵	-۵۷/۴۵	-۸/۲۷	۷۲۰	۳۴۷	-۰/۳	۱۷/۲	Sp۳	چشمه غیر کارستی خواجه حسین
۸/۴	-۵۸/۲۴	-۸/۲۳	۸۷۰	۴۳۱	-۰/۴	۱۸/۱	Q۱	قنات گوشک آباد (غیر کارستی)
۱۲/۳	-۵۶/۸۴	-۸/۶۵	۵۷۰	۲۸۰	-۰/۳	۱۹/۲	L۱	دریاچه سد کارده
۵/۲	-۴۲/۱۵	-۵/۹۳	۶۲۰	۳۱۰	-۰/۳	۱۹/۶	L۲	دریاچه سد کارده
۱/۲	-۴۵/۸۴	-۵/۸۸	۶۳۰	۳۲۵	-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

های آب دریاچه سد کارده و منابع آب زیرزمینی کارستی به علاوه منابع غیر کارستی (Sp_3, Sp_2 و Q_1) واقع در رسوبات نئوزن 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 (Mohammadzadeh, 2010) فاصله گرفته اند. نمونه های مربوط به منابع آب زیرزمینی (کارستی و غیرکارستی) مابین نمونه

مقدار ایزوتوپ های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم در نمونه آب چشمه اندرخ (Sp_1) (بترتیب $8/4\text{‰}$ و $55/2\text{‰}$) می باشد که از ترکیب ایزوتوپی آب چاه های ۴ (W_4) (بترتیب $8/7\text{‰}$ و $62/5\text{‰}$) و چاه ۲ (W_2) (بترتیب $8/8\text{‰}$ و $60/0\text{‰}$) غنی تر و از نمونه های آب دریاچه سد کارده (L_2 و L_3) و $44/0\text{‰}$ و $5/9\text{‰}$) تهی تر ولی از نمونه (L_1) ($8/6\text{‰}$ و $55/1\text{‰}$) که مربوط به ورودی رودخانه کارده به دریاچه سد است، غنی تر می باشد. انتقال داده های نمونه

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).

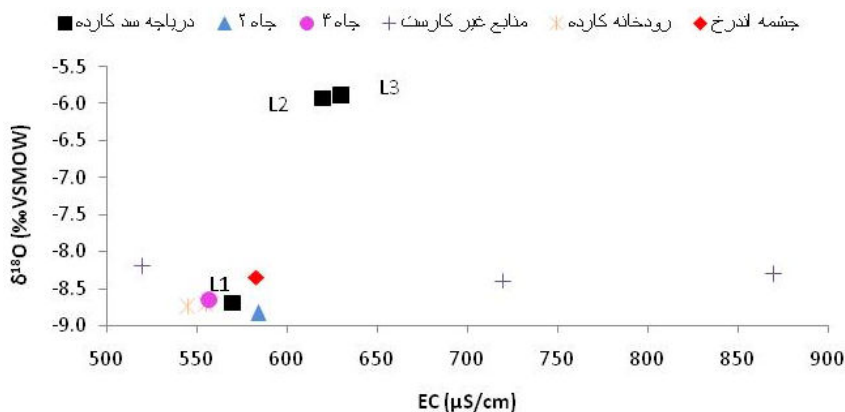
های آب سطحی و خط آب جوی قرار می گیرند که در نمونه های کارستی نشان دهنده فرایند اختلاط بین منابع آب سطحی و زیرزمینی است



شکل (۷) - نمودار ^2H در مقابل ^{18}O نمونه های آب سطحی و زیرزمینی

(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.

ارتباط بین پارمتر هدایت الکتریکی و میزان اکسیژن ۱۸ نمونه های آب زیرزمینی و سطحی در نمودار EC*¹ 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 نسبتا 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 سد کارده) می باشد. از طرفی، در منابع غیر کارستی منطقه که در واحدهای تبخیری



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

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.

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 مدیریت آزمایشگاه فیزیوشیمیایی 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 هیدرووشیمیایی نمونه های آب، کمال تشکر را داریم.

نتیجه گیری

مطالعه هیدرووشیمیایی 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 $\text{Log}(a\text{Mg}^{2+}/a(\text{H}^+)^2)$ و $\text{Log}(a\text{Na}^+/a(\text{H}^+)^2)$ نشان می دهد که کانی های کربناته (کلسیت و دولومیت) و سیلیکاته (کائولونیت، لامونتیت 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 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

منابع

- کشاورز، ت.، کریمی وردنجانی، ح.، محمدی، ض.، و رئیس، ع.، ۱۳۸۲. بررسی هیدروژئولوژیک چشمه کارستی آتشفشان واقع در استان چهارمحال بختیاری، بیست دومین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- پروین، ح.، ۱۳۸۵. سنگ شناسی رسوبی، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۳۰۲ صفحه.

- درویش زاده، ع.، ۱۳۸۳. زمین شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر، ۴۳۴ صفحه.

- 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 enviroments: A filed 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.
- 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, H., 2010. The meteoric relationship for ^{18}O and 2H in precipitations and isotopic compositions of water resources in Mashhad area(NE Iran), the first Azad university international geology conference, Mashad, 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.
- کریمی، ح.، ۱۳۷۶. بررسی هیدروژئولوژیک و هیدروشیمیایی چشمه ها و پیزومترهای تاقدیس پودونو فیروز آباد، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.
- کریمی وردنجانی، ح.، ۱۳۸۴. بررسی هیدروژئولوژیکی چشمه کارستی موگرون و سراسیاب، 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 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 مقدماتی و پیشرفته، انتشارات نشر Sps17
- 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.
- Fron dini, F., 2008. Geochemistry of regional aquifer hosted by carbonate-evaporatie formations in Umberia Tuscany (Central Italy). Applied Geochemistry, v. 23, 2091-2104 .

limestone spring, Journal of hydrology, v. 14, p. 93-128.

-Sivalls, 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

-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

Archive of SID