

# بررسی مکانیسم جریان و منشأ آب قنات‌های دشت گناباد به وسیله روش‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی

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

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتر، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۲</sup>دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

<sup>۳</sup>استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۲۹

## چکیده

منطقه گناباد در مناطق خشک و نیمه بیابانی قرار دارد. مهمترین روش استفاده از آب‌های زیرزمینی در این منطقه قنات است. سالانه حدود ۱۹/۵ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی از طریق ۲۶ رشته قنات با دبی‌های متغیر حدود ۱۰ تا ۱۲۰ لیتر در ثانیه تخلیه می‌گردد. عمیق‌ترین قنات‌های دنیا در دشت گناباد قرار دارند برای مثال عمق مادر چاه قنات‌های قصبه و رهن به ترتیب برابر ۳۴۰ و ۲۶۰ متر است. از ۶ رشته قنات مهم دشت نمونه‌برداری جهت آنالیزهای هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی به هدف تعیین منشأ و مکانیسم جریان آب زیرزمینی قنات‌ها انجام شده است. میزان مواد جامد محلول آب قنات‌ها از ۵۲۴ تا ۲۳۷۵ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است. تیپ‌های غالب آب در قنات‌ها شامل بی‌کربناته سدیک منیزیک و کلروه سدیک است. آب قنات‌ها نسبت به کانی‌های کربناته اشباع و فوق اشباع و نسبت به کانی‌های تبخیری تحت اشباع است که نشان می‌دهد ترکیب آب زیرزمینی حوضه آبرگیر قنات‌ها توسط انحلال سنگ‌های کربناته حوضه کنترل می‌شود. نتایج ایزوتوپی پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم نشان‌دهنده منشأ جوی آب قنات‌ها بوده است. به گونه‌ای که مکانیسم جریان از طریق نفوذ مستقیم آب بارش قبل از تبخیراز طریق درز و شکاف‌های سازنده‌های آهکی و ماسه‌سنگی جنوب حوضه و همچنین نفوذ آب‌های سطحی در مخروط‌های آبرفتی دانه درشت حاشیه ارتفاعات حوضه می‌باشد. تغذیه آب زیرزمینی قنات‌ها از محدوده‌ای در ارتفاعات بین ۲۰۰۰ تا ۲۷۰۰ متر منشأ می‌گیرد. ترکیب ایزوتوپی قنات‌ها در فصل تر به دلیل تغذیه از بارش سبک تر و در فصل خشک به دلیل تغذیه از آب برگشتی کشاورزی قنات‌ها و چشمه‌های ارتفاعات جنوب حوضه سنگین تر است.

**کلمات کلیدی:** مادرچاه، هدایت الکتریکی، تبادل کاتیونی، شاخص اشباع، خط آب جوی.

\*نویسنده مسئول: غلامحسین کرمی

E-mail: g.karami@shahroodut.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

قنات مهم‌ترین روش استخراج آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک است. مقدار بارندگی کم، درجه حرارت بالا و در نتیجه مقدار تبخیر بالا، باعث شده در منطقه گناباد جریان آب سطحی وجود نداشته و تنها راه حیات استفاده از آب‌های زیرزمینی باشد. در دشت گناباد ۲۶ رشته قنات وجود دارد که بیشترین تخلیه آب زیرزمینی از طریق این قنات‌ها صورت می‌گیرد. میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی در این دشت توسط قنات‌ها سالانه برابر ۱۹/۵ میلیون مترمکعب و توسط چاه‌ها برابر ۱۱/۸ میلیون مترمکعب است. از ۲۶ رشته قنات موجود در دشت گناباد، ۹ رشته قنات مهم وجود دارد که آبدهی آنها از ۲۳ تا ۱۲۰ لیتر در ثانیه متغیر است. کهن‌ترین و عمیق‌ترین قنات‌های دنیا در دشت گناباد قرار دارند. چنانکه عمق مادر چاه برخی از این قنات‌ها همچون قصبه و رهن به ترتیب برابر ۳۵۰ و ۲۶۰ متر است (پاپلی یزدی و همکاران، ۱۳۷۹). براساس مطالعات باستان‌شناسی قدمت برخی از این قنات‌ها نیز مانند قصبه به ۲۷۰۰ سال قبل برمی‌گردد (پاپلی یزدی و همکاران، ۱۳۷۹). بنابراین قنات یک منبع آبی بسیار مهم در منطقه گناباد است ولی مطالعات هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی کمی در رابطه با قنات‌ها انجام گرفته و مطالعات انجام گرفته شامل معرفی قنات‌ها، ساختمان قنات و مطالعات آماری است.

تحلیل‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی برای ساخت یک مدل مفهومی هیدروژئولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترکیب هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی آب زیرزمینی اطلاعات با ارزشی از منشأ تغذیه آب زیرزمینی، زمان تغذیه، واکنش‌های آب و سنگ و اختلاط آب زیرزمینی در اختیار قرار می‌دهد (Pu et al., 2013; Kanduč et al., 2012; Wu et al., 2009; Kohfahl et al., 2008). درجه تکامل هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی اساساً توسط زمان ماندگاری آب درون سفره آب زیرزمینی تعیین می‌گردد (Moral et al., 2008). دولومیت‌زدایی که توسط انحلال ژپس القا می‌گردد اثر مهمی در تکامل شیمی آب زیرزمینی دارد (Capaccioni et al., 2001; Cardenal et al., 1994; Ma et al., 2014).

فرایند تبادل کاتیونی نقش مهمی در غلظت نهایی عناصر اصلی محلول در آب زیرزمینی دارد و به دو صورت عادی و معکوس به ترتیب مطابق معادله‌های ۱ و ۲ اتفاق می‌افتد (X نمایانگر مواد مبادله کننده مانند کانی‌های رسی است):



ایزوتوپ‌های پایدار محیطی مخصوصاً دوتریم و اکسیژن ۱۸ به عنوان ردیاب‌های با ارزش در فرایندهای هیدروژئولوژیکی در مقیاس ناحیه‌ای بکار می‌روند (Clark and Fritz, 1997; Herczeg et al., 1997; Liotta et al., 2013; Mazar, 1991). تغییرات ترکیب ایزوتوپی در طول مسیرهای جریان آب نشان‌دهنده منشأ و رخداد فرایندهای مختلف ژئوشیمیایی و اختلاط است. با توجه به محتوای ایزوتوپی بارش در طول سال، فرایندهای احتمالی کنترل کننده تغذیه آب زیرزمینی تعیین می‌گردد (Gat, 1996; Gat and Airey, 2006; Ladouche et al., 2009). در این تحقیق با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی به بررسی منشأ، مکانیسم جریان، فرایندهای هیدروژئوشیمیایی غالب و ارائه مدل هیدروژئولوژیکی اولیه آب قنات‌های مهم دشت گناباد پرداخته شده است (جدول ۱).

## ۲- توصیف محدوده

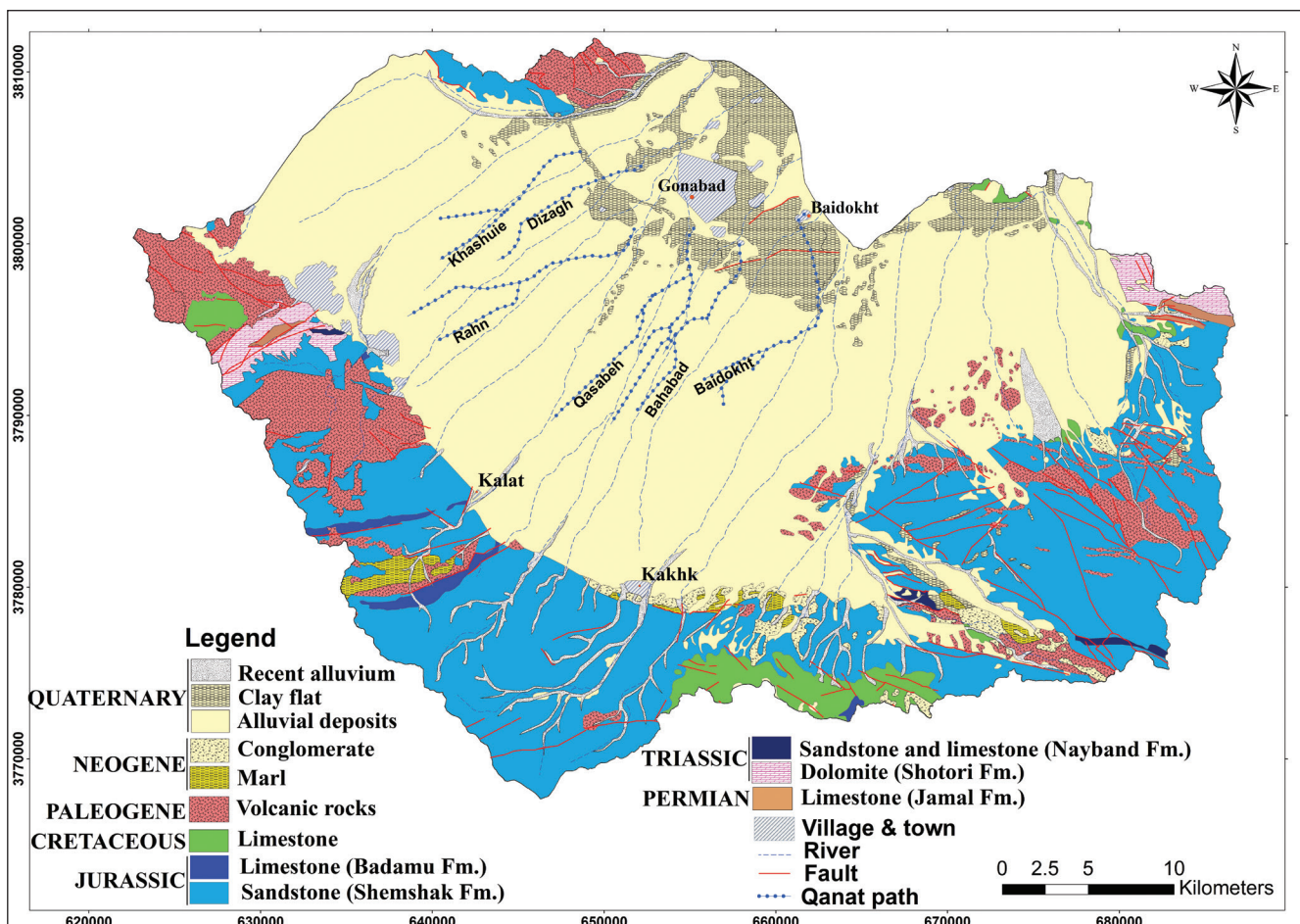
دشت گناباد در شرق ایران و در قسمت جنوب استان خراسان رضوی قرار دارد. وسعت کل حوضه آبریز گناباد ۱۸۷۲ کیلومترمربع است که ۹۳۹ کیلومترمربع آن را ارتفاعات و ۹۳۳ کیلومترمربع را دشت تشکیل می‌دهد. بلندترین نقطه این محدوده ۲۷۷۰ متر و کمترین آن کمتر از ۹۹۰ متر از سطح دریا می‌باشد. ارتفاعات محدوده از سمت شرق، جنوب و غرب دشت را احاطه کرده است. شاخه‌های جمع آوری کننده رواناب محدوده شامل تعدادی مسیل موازی با جهت جنوب به شمال است که از ارتفاعات جنوب سرچشمه گرفته و بعد از ورود به دشت گناباد با همان امتداد از

ایران مرکزی و بلوک لوت است. بر اساس نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۴)، قدیمی‌ترین سنگ‌های موجود در محدوده، سنگ آهک و دولومیت‌های توده‌ای متعلق به پرمین و اوایل تریاس هستند که بخش اعظم ارتفاعات شرق دشت گناباد را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). مهم‌ترین تشکیلات زمین‌شناسی متعلق به دوران مزوزوئیک، سازند شمشک (ژوراسیک) با لیتولوژی ماسه سنگ، شیل‌های تیره‌رنگ و شیل‌های آهکی است که گسترش وسیعی در جنوب و جنوب شرقی محدوده دارد. این تشکیلات به‌شدت گسل خورده بوده و شکستگی‌های فراوانی در آن وجود دارد. کانی‌های تشکیل‌دهنده ماسه‌سنگ‌ها به‌طور عمده شامل پلاژیوکلاز، کوارتز و بیوتیت است که با سیمان کربناته یا اکسید آهن در کنار هم قرار گرفته‌اند. از سازندهای دیگر مزوزوئیک، آهک بادامو به سن ژوراسیک پایانی است که به‌طور هم‌شیب بر روی سازند شمشک قرار گرفته است. این تشکیلات به‌صورت محدود در جنوب‌غربی محدوده رخنمون دارند. رسوبات کرتاسه شامل سنگ آهک‌های ضخیم و سنگ آهک‌های هیپوریت‌دار است که در شمال‌شرق و شرق و جنوب محدود به‌صورت محدود رخنمون دارند. در شمال‌شرق و شرق دشت گناباد این تشکیلات با دگرشیبی زاویه‌دار بر روی آهک‌ها و دولومیت‌های پرمین قرار گرفته‌اند.

مسیرهای خروجی حوضه در حد شمالی آن خارج می‌شوند. آب و هوای منطقه مورد مطالعه خشک و نیمه خشک است، فصل بارش از آذر تا اردیبهشت و فصل خشک از خرداد تا آبان ماه است. مقدار بارش از مکانی به مکانی و از فصلی به فصلی فرق می‌کند و از ۱۴۵ میلی‌متر در دشت (متوسط ارتفاع ۱۲۴۰ متر) تا ۲۶۴ میلی‌متر در ارتفاعات (متوسط ارتفاع ۱۶۰۴ متر) متغیر است. حوضه پتانسیل تبخیر بالایی دارد از ۲۷۵۴ میلی‌متر در سال در دشت تا ۲۳۳۹ میلی‌متر در سال در ارتفاعات متغیر است. متوسط دما از ۱۸ درجه در ارتفاعات تا ۲۴ درجه در دشت افزایش می‌یابد. دی ماه سردترین (۹ درجه سانتی‌گراد) و تیر گرمترین ماه (۳۶ درجه سانتی‌گراد) است (آمار ایستگاه‌های باران سنجی و تبخیرسنجی محدوده گناباد: آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۳). علاوه بر نفوذ مستقیم بارش از سازندهای ارتفاعات، آبرفت‌های دانه درشت بالادست و مجاور دشت نقش مهم در تغذیه آب قنات‌ها دارند. به‌طوریکه آب‌های سطحی که از ارتفاعات در زمان بارش تشکیل می‌شوند در طول مسیر جریان از مخروط افکنه‌های آبرفتی بالادست و نیز در بستر مسیل‌های با نفوذپذیری بالا نفوذ می‌کنند.

### ۳- زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه

از نظر جایگاه زمین‌شناسی حوضه آبریز گناباد جزئی از زون زمین‌شناسی



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی و مسیر قنات‌های مهم در حوضه آبریز گناباد.

جدول ۱- مشخصات قنات‌های اصلی دشت گناباد

نام قنات	طول قنات (کیلومتر)	عمق مادرچاه (متر)	آبدهی (لیتر بر ثانیه)
قصبه	۳۳	۳۴۰	۱۲۰
رهن	۲۸	۲۶۰	۱۴
بهباد	۱۲/۵	۱۷۰	۲۵
خشویی	۱۴	۱۷۰	۳۵
بیدخت	۱۸	۱۴۵	۲۸
دیزق	۱۰	۱۴۴	۶۰

بیدخت) در ۵ نوبت در سال ۹۶-۱۳۹۵ برداشت گردید. در هنگام برداشت هر نمونه مقدار pH، دما و هدایت الکتریکی در محل اندازه‌گیری شد. آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی نمونه‌ها در آزمایشگاه شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی آنالیز شدند. برای مطالعه ترکیب ایزوتوپی آب زیرزمینی قنات‌ها نیز نمونه‌برداری از خروجی قنات‌های دشت در دو نوبت آبان ماه ۹۵ به عنوان دوره خشک و مردادماه ۹۶ به عنوان دوره تر صورت گرفته است. به منظور تعیین رفتار ایزوتوپی بارش واقع در منطقه گناباد از ۴ ایستگاه باران‌سنجی در ارتفاعات مختلف از ۱۱۰۰ متر تا ۲۵۰۰ متر نمونه‌های بارش جمع‌آوری گردید. در هر ایستگاه ظرف جمع‌آوری نمونه بارش شامل یک ظرف پلاستیکی و یک قیف بود که درون ظرف پلاستیکی مقداری پارافین برای جلوگیری از تبخیر ریخته شد. نمونه‌ها جهت آنالیز ایزوتوپی پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم به شرکت مصباح انرژی ارسال شدند. نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن به صورت اختلاف نسبی (مقادیر δ) از استاندارد متوسط آب اقیانوس‌ها به قسمت در هزار بیان می‌گردد (Fontes, 1976):

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R_{\text{Sample}} - V_{\text{SMOW}}}{V_{\text{SMOW}}} \times 1000 \quad (3)$$

که  $R_{\text{sample}}$  نسبت ایزوتوپی نمونه ( $^2\text{H}/^1\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) و  $R_{\text{VSMOW}}$  نسبت ایزوتوپی استاندارد مرجع بین‌المللی است. میانگین وزنی اکسیژن ۱۸ و دوتریم بارش در هر ایستگاه بر اساس معادله زیر محاسبه شد (Paternoster et al., 2008):

$$R_{\text{mw}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \delta X_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (4)$$

که  $P_i$  مقدار بارش در هر واقعه بارش و  $n$  تعداد وقوع بارش است و  $X_i$  مقادیر  $\delta^2\text{H}$  یا  $\delta^{18}\text{O}$  هر بارش است.

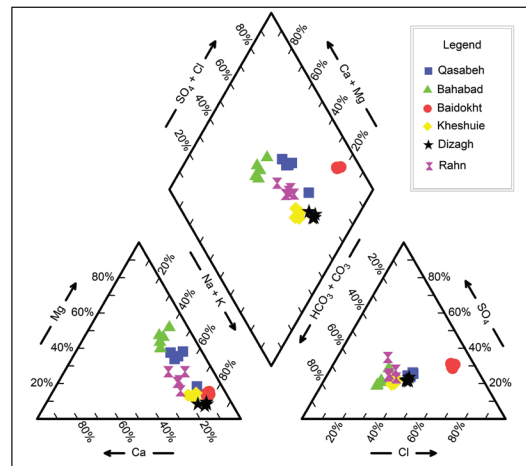
#### ۵- مشخصات هیدروژئوشیمیایی

نتایج آنالیز شیمیایی و ایزوتوپی آب قنات‌ها در جدول ۲ آمده است. در بین کاتیون‌ها سدیم و منیزیم و در بین آنیون‌ها کلر و بی‌کربنات غالب است. هدایت الکتریکی نمونه آب قنات‌ها از حداقل ۷۵۵ در قنات رهن تا حداکثر ۳۹۳۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در قنات بیدخت متغیر است. با استفاده از نمودار پایپر (شکل ۲) تیپ آب قنات‌ها تعیین گردید. تیپ آب قنات‌های خشویی و رهن بی‌کربناته سدیک، در قنات‌های دیزق و قصبه کلرووره بی‌کربناته سدیک، در قنات بهاباد بی‌کربناته منیزیک و در قنات بیدخت کلرووره سدیک است. در شرق دشت به دلیل گسترش مارن‌های نئوژن مقدار هدایت الکتریکی آب قنات‌ها افزایش می‌یابد چنانکه در قنات بیدخت به بیشترین مقدار می‌رسد. آب زیرزمینی قنات‌های رهن و بهاباد در تیپ آب‌های ترکیبی، بیدخت، قصبه و دیزق در تیپ آب‌های شور و قنات خشویی در تیپ آب‌های شیرین قرار دارد.

در دوره پالئوژن به‌واسطه تأثیر فازهای کوهزایی، فعالیت‌های آتشفشانی شدید در سطح منطقه رخ داده است. به‌واسطه عملکرد این فعالیت‌ها تشکیلات آذرین اسیدی شامل ریولیت، داسیت و توف سبز در ابتدا و سپس لاهای داسیتی و پیروکسن آندزیت‌ها در منطقه بوجود آمده‌اند. این تشکیلات در جنوب شرقی دشت گناباد به‌صورت توده باتولیتی دیده می‌شوند. همچنین گسترش قابل توجهی از این سنگ‌ها در غرب و شمال‌غرب دشت گناباد نیز وجود دارد. تشکیلات نئوژن را می‌توان به دو دسته رسوبات قدیمی که شامل کنگلومراهای پلیوسن و رسوبات جوان‌تر که شامل تشکیلات رس و مارنی بوده تقسیم نمود که در حاشیه جنوبی دشت رخنمون دارند. این تشکیلات نقش سنگ کف آبخوان آبرفتی محدوده گناباد را ایفا می‌نمایند. تراس‌ها و مخروط‌افکنه‌های آبرفتی دوره کواترنری در سطح وسیعی رخنمون داشته، بخش اعظم پهنه آبرفتی دشت گناباد را تشکیل داده و آبخوان آبرفتی این دشت را در خود جای داده است. این رسوبات در حاشیه ارتفاعات دانه‌درشت‌تر بوده و به‌واسطه نفوذ سیلاب‌ها تغذیه اصلی آبخوان آبرفتی دشت از طریق این رسوبات انجام می‌گیرد. به تدریج با نزدیک شدن به نقاط خروجی دشت، این تشکیلات ریزدانه‌تر شده و نفوذپذیری آنها کاهش می‌یابد، تا آنجایی که در حوالی شهر گناباد و خروجی این دشت پهنه‌های رسی می‌باشد. براساس نتایج عملیات ژئوفیزیک انجام گرفته در دشت گناباد در سال ۱۳۴۸ توسط کمپانی ژنرال ژئوفیزیک، ضخامت آبرفت‌ها در دشت گناباد از حداقل ۲۰ متر در بخش شرقی تا حداکثر ۳۰۰ متر در شمال شهر کاخک در نوسان است. فروافتادگی سنگ کف در بخش جنوبی دشت سبب افزایش ضخامت آبرفت به بیش از ۳۰۰ متر در این ناحیه شده است (آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۳). مادر چاه قنات‌ها (آخرین و عمیق‌ترین چاه قنات) در جنوب و جنوب غرب دشت قرار دارند و خروجی آنها در شمال دشت (شهر گناباد و روستاهای اطراف) قرار دارد. جهت جریان آب زیرزمینی در دشت گناباد تقریباً همسو با جهت جریانات سطحی دشت و از ارتفاعات جنوب و جنوب غرب به سمت شمال شرق محدوده (مهم‌ترین خروجی آبخوان) می‌باشد. تغییرات عمق در سطح آب زیرزمینی در دشت گناباد متأثر از توپوگرافی سطح زمین است. حداکثر عمق سطح آب زیرزمینی در حاشیه جنوب آبخوان به میزان ۲۲۰ متر اندازه‌گیری شده است. با فاصله گرفتن از ارتفاعات جنوب غربی به سمت شرق، شمال شرقی و شمال عمق سطح آب به سرعت کاهش یافته و به کمتر از ۶۰ متر در شمال غرب آبخوان، کمتر از ۲۵ متر در شمال شرق آبخوان و ۵۰ متر در شمال آبخوان می‌رسد (اطلاعات پیرومتری دشت گناباد: آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۳).

#### ۴- روش مطالعه

برای مطالعه مشخصات شیمیایی آب زیرزمینی قنات‌های مهم دشت گناباد ۳۰ نمونه آب از ۶ رشته قنات مهم دشت (قصبه، رهن، دیزق، خشویی، بهاباد و



شکل ۲- نمودار پایپر نمونه‌های آب قنات‌های مهم دشت گناباد.

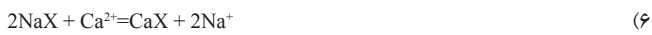
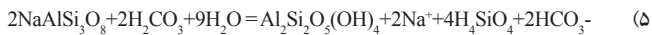
جدول ۲- نتایج آنالیز شیمیایی و ایزوتوپی آب زیرزمینی قنات‌های مهم دشت گناباد.

محل نمونه برداری	تاریخ نمونه برداری	EC (μS/cm)	TDS (mg/l)	pH	Ca <sup>2+</sup> (meq/l)	Mg <sup>2+</sup> (meq/l)	Na <sup>+</sup> (meq/l)	K <sup>+</sup> (meq/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/l)	(meq/l)	(meq/l)	δ <sup>18</sup> O (‰)	δ <sup>2</sup> H (‰)
قصبه	آبان ۹۵	1531	992	8.07	2	3	11.3	0	5	6.4	3.9	-4.91	-46.62
بهباد		1055	683	8.42	1.8	5.2	4	0	5.3	3	2.3	-6.37	-47.93
بیدخت		3850	2306	8.38	3.2	5.8	29	0.15	4.1	21	10.4	-5.89	-48.9
خشویی		833	541	8.62	1.3	1.3	6.3	0	3.5	3	1.9	-6.15	-49.87
دیزق		1112	726	8.5	2	1	8.9	0	4.2	4.6	2.4	-5.95	-47.1
رهن		795	524	8.52	1.2	2.3	5.1	0	3.2	2	2.8	-5.65	-46.22
قصبه	بهمن ۹۵	1554	1030	8.14	2.6	5.7	8.5	0	5.7	6.3	3.9	-	-
بهباد		1077	696	8.59	2.2	4.5	4.6	0	5.7	3	2.1	-	-
بیدخت		3930	2375	8.54	4	5.2	29.9	0.2	4	21	11.4	-	-
خشویی		845	556	8.63	1.5	1.2	6.4	0	3.7	2.9	2	-	-
دیزق		1122	737	8.6	1.7	0.9	9.6	0	4	4.7	2.7	-	-
رهن		821	532	8.55	1.8	1.8	5.1	0	3.6	2.5	2.1	-	-
قصبه	اردیبهشت ۹۶	1460	995	8.02	1.5	6.2	8.5	0.05	5	6.3	4	-	-
بهباد		1034	681	8.36	1	5.7	4.3	0	5.3	3.1	2.2	-	-
بیدخت		3790	2356	8.35	3	6	29.8	0.15	3.9	21.2	11.1	-	-
خشویی		815	541	8.57	1.5	1	6.4	0	3.7	3	1.7	-	-
دیزق		1115	722	8.48	1.5	1	9.4	0	4.1	4.7	2.4	-	-
رهن		805	539	8.38	1.7	1.9	5.2	0	3.6	3	2	-	-
قصبه	مرداد ۹۶	1440	954	8.06	2.44	5.86	7.25	0.05	5.58	6.21	3.58	-7.47	-46.02
بهباد		1010	654	8.3	1.9	4.6	4.1	0	5.5	2.8	1.9	-8.04	-50.75
بیدخت		3710	2243	8.25	3.6	5.3	28	0.1	4	20.6	9.9	-7.9	-51.26
خشویی		800	525	8.63	1.5	1.1	6	0	3.7	2.8	1.6	-8.35	-50.35
دیزق		1065	701	8.41	1.4	1.1	9.1	0	4.1	4.4	2.4	-7.96	-48.35
رهن		755	529	8.43	1.9	2.3	4.4	0	3.7	2.5	2	-7.73	-47.41
قصبه	آذر ۹۶	1480	1000	8.12	2.2	6	8.2	0.5	5.4	6.4	3.7	-	-
بهباد		1040	684	8.4	1.6	5	4.2	0	4.5	3	3	-	-
بیدخت		3800	2343	8.32	3.2	5.4	30	0.13	3.4	21.5	11.1	-	-
خشویی		820	543	8.65	1.7	1.2	6	0	3.6	3	1.8	-	-
دیزق		1120	726	8.55	1.5	1	9.5	0	4.1	4.6	2.5	-	-
رهن		810	538	8.56	1.9	1.4	5.5	0	3.3	2.7	2.3	-	-



## ۶- تکامل شیمیایی و منشأ آب زیرزمینی

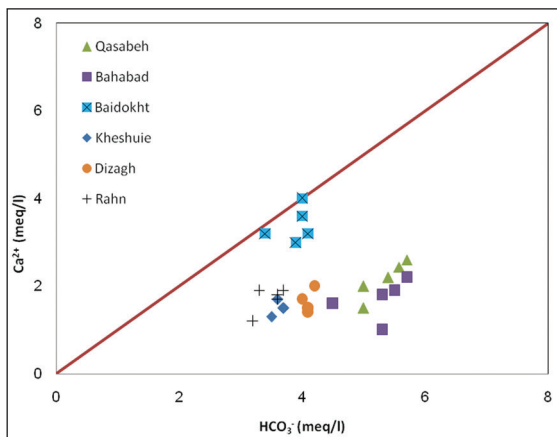
اضافه نسبت به کلر است که احتمالاً در اثر هوازدگی پلاژیوکلازهای سدیم دار مطابق معادله شماره ۵، انحلال دیگر ترکیبات سدیم مانند سولفات سدیم (میرابیلیت) یا تبادل کاتیونی عادی کلسیم آب با سدیم در کانی‌های رسی مطابق معادله شماره ۶ اتفاق افتاده است. اگر هوازدگی سیلیکات‌ها به عنوان منشأ احتمالی یون سدیم در نظر گرفته شود، در این صورت، بی کربنات می بایستی آنیون غالب در نمونه‌ها باشد (Rogers, 1989):



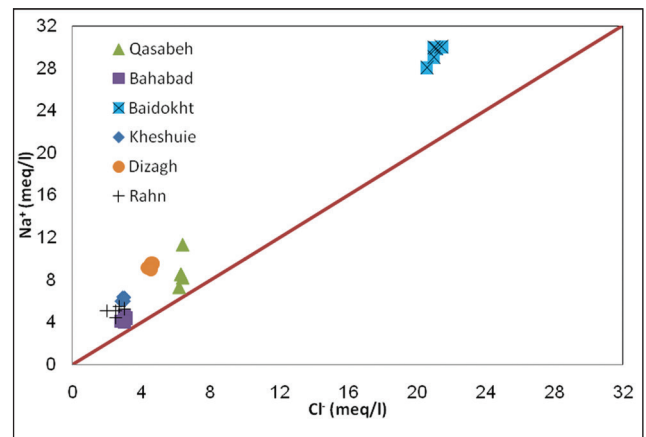
انحلال کانی‌های کربناته سبب ورود یون‌های منیزیم و کلسیم به آب زیرزمینی می شود نمودار ترکیبی کلسیم در مقابل بی کربنات (شکل ۴)، نشان دهنده مقدار بی کربنات اضافه نسبت به مقدار کلسیم نمونه‌ها است که احتمالاً در اثر هوازدگی سیلیکات‌ها که در بالا اشاره شد و یا کاهش کلسیم در اثر خروج آن از آب به دلیل تبادل کاتیونی عادی و یا اثر یون مشترک اتفاق افتاده است. غلظت بیشتر کلسیم در قنات بیدخت نسبت به دیگر قنات‌ها احتمالاً به سبب انحلال ژپس در قسمت‌های شرق محدوده است.

در مطالعات هیدروژئوشیمیایی از نمودارهای ترکیبی یا دو متغیره (Scatter Plots) بین اجزاء محلول جهت تعیین فرایندهای ژئوشیمیایی موثر بر ترکیب آب زیرزمینی و شناسایی منشأ اجزای محلول آن استفاده می‌شود. با آگاهی از ترکیب آب‌های زیرزمینی و آشنایی از منشأ احتمالی متشکله‌های شیمیایی آنها، می‌توان به طور دقیق‌تری از روی روابط نسبی بین یون‌ها و نمودارهای ترکیبی، درباره محیط جریان آب اظهار نظر نمود. ارتباط بین سدیم و کلر اغلب برای تعیین مکانیسم شوری و پدیده هجوم آب‌های شور در مناطق نیمه خشک مورد استفاده قرار می‌گیرد (Sami, 1992). انحلال هالیت مقادیر مساوی (مول) از یون‌های سدیم و کلر ایجاد می‌نماید. انحراف از خط ۱:۱ در نمودار ترکیبی سدیم در مقابل کلر، نشان دهنده ارتباط یون سدیم با آنیون‌های دیگر به غیر از کلر می باشد. علاوه بر انحلال هالیت، سدیم از دو طریق یکی انحلال پلاژیوکلازهای سدیم دار و دیگری توسط تبادل کاتیونی با کلسیم وارد آب می‌شود (Iwatsuki and Yoshida, 1999). حتی اگر هالیت منشأ غالب یون‌های سدیم و کلر باشد به دلیل تأثیر تبادل کاتیونی، نسبت مولی  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  می تواند تغییر کند (Wayland et al., 2003).

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود تمام نمونه‌های آب قنات‌ها دارای سدیم



شکل ۴- نمودار کلسیم در مقابل بی کربنات نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.



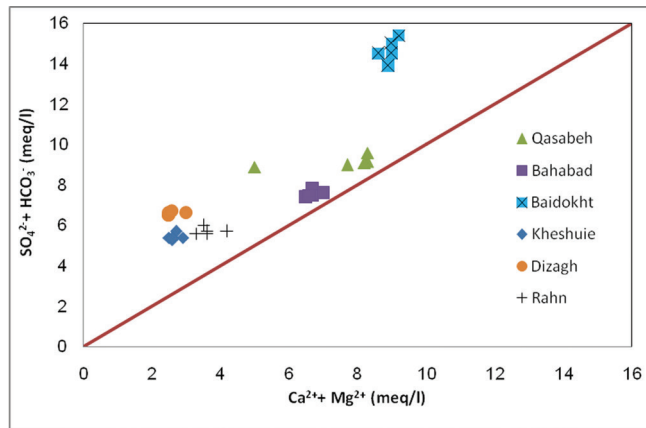
شکل ۳- نمودار کلر در مقابل سدیم نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.

(شکل ۷) که به دلیل وجود مارن‌های ژپس‌دار نوژن در حوضه آبرگیر قنات‌هاست. در نمونه‌های قنات‌های بیدخت، قصبه به میزان بیشتر و در بقیه نمونه‌ها به میزان کمتر، مقدار سولفات از مقدار کلسیم بیشتر است و با توجه به میزان سدیم اضافه نمونه‌ها نسبت به کلر احتمالاً در نتیجه انحلال سایر سولفات‌ها مانند میرابیلیت (سولفات سدیم)، خارج شدن کلسیم از محیط آب به علت رسوب کلسیت بعد از انحلال ژپس و همچنین رسوب کلسیت در اثر خروج دی اکسید کربن از آب در کوره قنات و تبادل کاتیونی مستقیم کلسیم با سدیم رخ داده است.

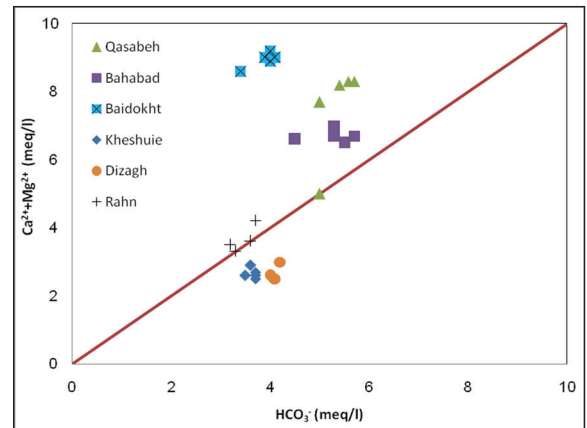
با توجه به نمودار ترکیبی  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4$  در مقابل  $\text{HCO}_3^-$  (شکل ۸)، نمونه‌های آب قنات‌های قصبه و بهاباد تقریباً نزدیک خط ۱:۱ قرار می‌گیرند که احتمالاً نشان‌دهنده انحلال کمی دولومیت است. نمونه آب قنات‌های رهن و خشویی کمبود کلسیم و منیزیم غیرسولفات دارند و نمونه‌های قنات بیدخت و دیزق فاقد کلسیم و منیزیم غیرسولفات هستند. مقادیر سولفات مازاد موجود در نمونه‌ها به دلیل انحلال سولفات سدیم (میرابیلیت) است. همچنین ممکن است کاهش میزان کلسیم در اثر تبادل کاتیونی عادی با سدیم یا فرایند دولومیت‌زدایی رخ داده باشد.

در شکل ۵ مقدار کلسیم و منیزیم نمونه‌ها در مقابل بی کربنات آمده است. در این نمودار نمونه‌هایی که روی خط ۱:۱ قرار گیرند انحلال دولومیت را نشان می‌دهند. قنات‌های شرق دشت کلسیم و منیزیم اضافه نسبت به میزان بی کربنات دارند که در نتیجه انحلال ژپس و هوازدگی کانی‌های فرومنیزین مانند بیوتیت است. نمونه‌های قنات رهن روی خط ۱:۱ قرار می‌گیرند. قنات‌های غرب دشت مقدار کلسیم و منیزیم اندکی از مقدار بی کربنات کمتر است که احتمالاً در نتیجه تبادل کاتیونی عادی با سدیم، خروج کلسیم از آب به دلیل رسوب کلسیت در کوره قنات به دلیل خروج دی اکسید کربن از آب در نتیجه کاهش فشار و افزایش سرعت آب در کوره قنات، همچنین اثر یون مشترک است. همچنین با توجه به رابطه بین  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  نمونه‌ها در مقابل  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$  در شکل ۶ نمونه‌ها در بالای خط ۱:۱ قرار دارند و مقدار سولفات و بی کربنات نمونه‌ها نسبت به مقدار کلسیم و منیزیم آنها افزایش نشان می‌دهد که نشان می‌دهد علاوه بر انحلال ژپس و کربنات‌ها، هوازدگی سیلیکات‌ها و تبادل کاتیونی عادی در آب زیرزمینی حوضه آبرگیر قنات‌ها اتفاق می‌افتد.

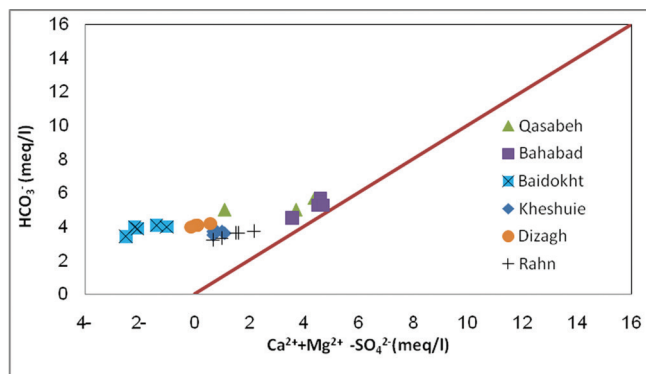
انحلال سولفات در نمونه‌های آب قنات‌ها به مقدار کمی وجود دارد



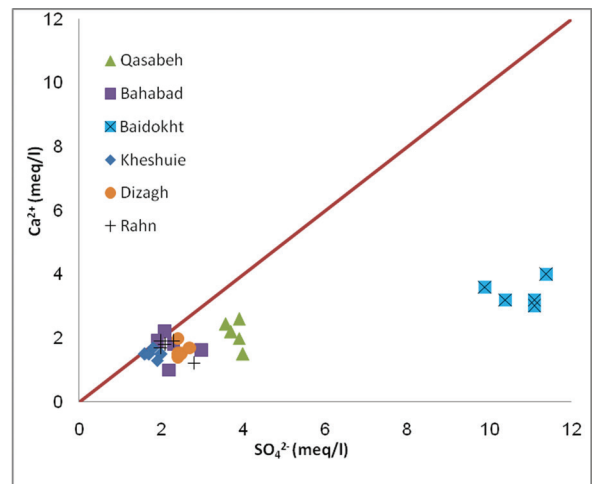
شکل ۶- نمودار  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  در مقابل  $HCO_3^-+SO_4^{2-}$  در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.



شکل ۵- نمودار کلسیم و منیزیم در مقابل بی‌کربنات نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.



شکل ۸- نمودار ترکیبی  $Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}$  در مقابل  $HCO_3^-$  در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.



شکل ۷- نمودار سولفات در مقابل کلسیم در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.

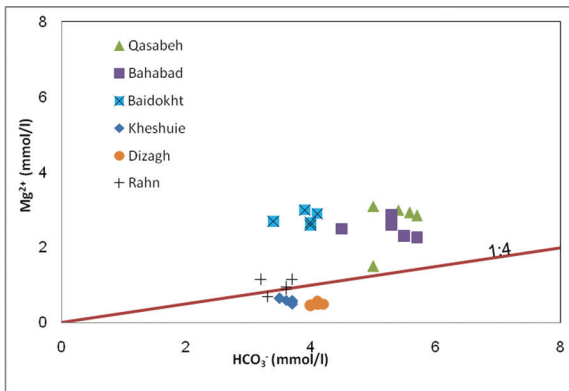
و بنابراین مقدار منیزیم محلول افزایش می‌یابد (Vallejos et al., 2015) به نقل از (Back et al., 1983; Deike, 1990; Ma et al., 2011; Saunders and Toran, 1994). نتایج اصلی اینکه انحلال ژپس سبب تبدیل دولومیت به کلسیت در نمونه سنگ و تشکیل آب‌هایی با غلظت‌های افزایش یافته منیزیم و سولفات می‌شود. دولومیت‌زدایی در ارتفاعات محدوده و در بالادست جریان اتفاق می‌افتد، در آن هنگام آب با انحلال دی‌اکسید کربن خاک خاصیت اسیدی داشته و موجب انحلال کلسیت و دولومیت می‌گردد بعد از عبور آب از سازندهای ارتفاعات و مواد آبرفتی بالادست زون آبدۀ قنات‌ها و با ورود آب به کوره قنات، در نتیجه کاهش فشار و افزایش سرعت آب دی‌اکسید کربن خارج شده، آب قلیایی شده و نسبت به کلسیت و دولومیت اشباع می‌گردد. منشأ دیگر برای منیزیم در نمونه‌های آب زیرزمینی قنات‌های مذکور دگرسانی بیوتیت است. ماسه سنگ شمشک در ارتفاعات محدوده حاوی بیوتیت است که مطابق معادله ۷ هوازده می‌شود. نمونه‌های قنات رهن تقریباً روی خط ۱:۴ قرار دارد و انحلال دولومیت را نشان می‌دهد. نمونه‌های قنات‌های خوشویی و دیزق در زیر خط قرار دارند در این قنات‌ها انحلال همزمان دولومیت و کلسیت اتفاق می‌افتد:

$$KMgFe_2AlSi_3O_{10}(OH)_2 + 3CO_2 + 10H_2O = K^+ + Mg^{2+} + 3H_4SiO_4 + Al(OH)_3 + 2Fe(OH)_2 + 3HCO_3^- \quad (7)$$

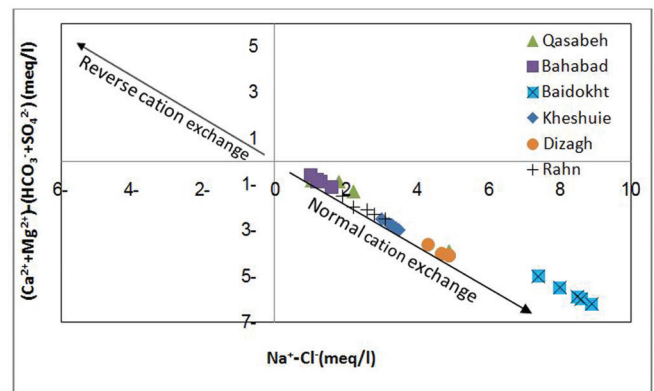
در شکل ۹ نمودار  $Na^+-Cl^-$  در مقابل  $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(HCO_3^-+SO_4^{2-})$  برای نمونه‌های آب قنات‌ها آمده است. با توجه به نمودار مقدار کمبود کلسیم و منیزیم نمونه‌ها متناسب با سدیم اضافی نمونه‌ها بوده و بر این اساس فرایند غالب در شیمی آب نمونه‌ها تبادل کاتیونی عادی است.

نمودار بی‌کربنات در مقابل منیزیم (شکل ۱۰) به تعیین فرایندهای توزیع یون در نمونه‌ها کمک می‌کند. در این نمودار نسبت ۱:۴ نشان دهنده انحلال متجانس دولومیت است. نسبت کمتر از ۰/۲۵ نشان دهنده انحلال همزمان کلسیت و دولومیت است. انحلال کربنات‌ها در دو سیستم باز و بسته اتفاق می‌افتد. در سیستم باز (زون غیر اشباع) انحلال کربنات‌ها همزمان با تولید دی‌اکسید کربن توسعه می‌یابد ولی در سیستم بسته (زون اشباع) انحلال کربنات و تولید دی‌اکسید کربن جدا از یکدیگر است. انحلال کربنات‌های منیزیم بطور شاخصی در زون اشباع و در شرایط سیستم بسته اتفاق می‌افتد (Vallejos et al., 2015) به نقل از Clark and Fritz, 1997; Appelo and Postma, 2005).

نمونه‌های قنات‌های قصبه، بهاباد و بیدخت مقادیر منیزیم اضافه دارند که نشان‌دهنده بدیده دولومیت‌زدایی و یا دگرسانی بیوتیت است. در نتیجه انحلال ژپس، مقدار کلسیم محلول اضافه تولید می‌شود که موجب رسوب کلسیت می‌شود



شکل ۱۰- نمودار بی کربنات در مقابل منیزیم در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.



شکل ۹- نمودار  $Na^+ - Cl^-$  در مقابل  $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})$  در قنات‌های دشت گناباد.

گردید. محدوده تغییرات مقادیر اکسیژن ۱۸ و دوتریم در نمونه‌های بارش منطقه به ترتیب از حداقل ۹/۱۵ تا ۳/۲۲ پرمیل و از ۵۰/۶۳ تا ۱۱/۰۸ می باشد. همچنین مقادیر اکسیژن ۱۸ و دوتریم در آب زیرزمینی قنات‌های منطقه در فصل تر به ترتیب از ۸/۳۵ تا ۷/۴۷ پرمیل و از ۵۱/۲۶ تا ۴۶/۰۲ پرمیل در تغییر است و در فصل خشک محدوده تغییرات مقادیر مذکور در نمونه‌های آب قنات‌ها از ۶/۳۷ تا ۴/۹۱ پرمیل و از ۴۹/۸۷ تا ۴۶/۲۲ پرمیل می باشد. خط آب جوی محلی مطابق معادله ۸ ترسیم گردید:

$$\delta^2H = 6.3 \times \delta^{18}O + 8.3 \quad (8)$$

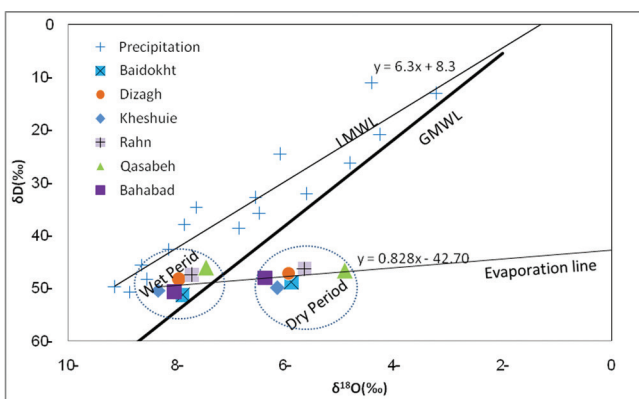
شیب خط برابر ۶ و عرض از مبدا آن برابر ۸ است (شکل ۱۲) و با خط جوی جهانی تفاوت دارد که به دلیل تغییرات فصلی در بارش‌های منطقه می باشد. نمونه‌های آب قنات‌ها در اطراف خط آب جوی جهانی و محلی قرار دارند که نشان می دهد آب زیرزمینی این قنات‌ها عمدتاً از بارش‌های محلی حوضه گناباد منشأ می گیرد.

## ۷- شاخص‌های اشباع

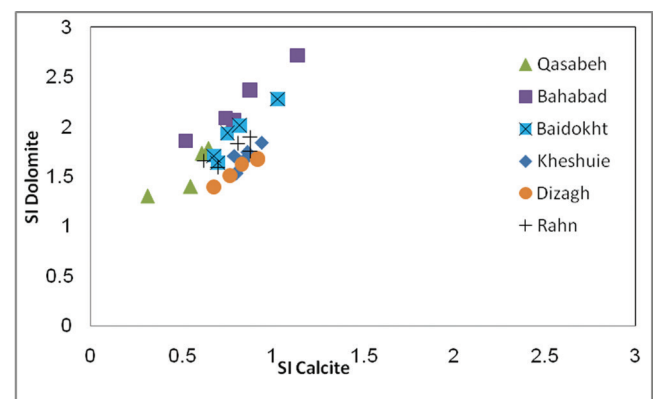
شاخص اشباع یک توصیف کمی از تعادل آب با کانی‌های محلول ارائه می دهد. تغییرات در شاخص اشباع برای تشخیص مراحل مختلف تکامل هیدروژئوشیمیایی همچنین شناسایی واکنش‌های شیمیایی که تعیین کننده شیمی آب هستند مورد استفاده قرار می گیرد. تمامی نمونه‌های آب قنات‌ها نسبت به کلسیت و دولومیت فوق اشباع و نسبت به هالیت و ژینس تحت اشباع می باشند (جدول ۳). شکل ۱۱ نسبت شاخص اشباع کلسیت بر اساس شاخص اشباع دولومیت را نشان می دهد که روند خطی نشان می دهد فرایندهای غالب در نمونه‌ها انحلال کربنات‌هاست. قنات‌های شرق دشت به دلیل گسترش سازندهای تبخیری (مارن‌های نوژن) و آهک‌های کرتاسه دارای شاخص اشباع بالاتری نسبت به قنات‌های غرب دشت می باشند. همچنین تغییرات شاخص اشباع قنات‌های مذکور در طول سال بیشتر از قنات‌های غرب دشت است.

## ۸- مشخصات ایزوتوپی

برای تعیین محتوای ایزوتوپی بارش‌های منطقه ۱۶ نمونه بارش از ۴ ایستگاه جمع آوری



شکل ۱۲- ارتباط بین اکسیژن ۱۸ و دوتریم برای نمونه‌های آب قنات‌ها و بارش‌های منطقه.



شکل ۱۱- نمودار شاخص اشباع کلسیت در مقابل شاخص اشباع دولومیت در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.

جدول ۳- شاخص اشباع کانی‌های مختلف در نمونه‌های آب قنات‌ها.

نام قنات	فصل نمونه برداری	انیدریت	آراگونیت	کلسیت	دولومیت	ژیس	هالیت
قصبه	آبان ۹۵	-1.95	0.4	0.55	1.4	-1.73	-5.98
بهاباد		-2.2	0.74	0.88	2.36	-1.98	-6.61
بیدخت		-1.54	0.67	0.82	2.01	-1.32	-4.96
خشویی		-2.32	0.65	0.79	1.71	-2.1	-6.4
دیزق		-2.08	0.78	0.92	1.67	-1.86	-6.07
رهن		-2.21	0.48	0.62	1.66	-1.99	-6.67
قصبه	بهمن ۹۵	-1.88	0.63	0.77	2.02	-1.66	-5.98
بهاباد		-2.16	1	1.14	2.72	-1.93	-6.54
بیدخت		-1.41	0.88	1.03	2.28	-1.19	-4.95
خشویی		-2.25	0.72	0.86	1.74	-2.02	-6.4
دیزق		-2.1	0.77	0.92	1.69	-1.88	-6.03
رهن		-2.15	0.74	0.88	1.9	-1.93	-6.57
قصبه	اردیبهشت ۹۶	-2.1	0.16	0.31	1.3	-1.87	-5.96
بهاباد		-2.47	0.37	0.52	1.86	-2.23	-6.55
بیدخت		-1.54	0.6	0.75	1.93	-1.33	-4.95
خشویی		-2.31	0.66	0.8	1.53	-2.07	-6.38
دیزق		-2.2	0.63	0.77	1.5	-1.98	-6.04
رهن		-2.19	0.56	0.7	1.59	-1.97	-6.48
قصبه	مرداد ۹۶	-1.94	0.5	0.65	1.78	-1.71	-6.05
بهاباد		-2.24	0.65	0.79	2.07	-2.01	-6.62
بیدخت		-1.5	0.55	0.7	1.64	-1.27	-4.98
خشویی		-2.33	0.72	0.87	1.71	-2.1	-6.44
دیزق		-2.22	0.54	0.68	1.39	-2	-6.08
رهن		-2.15	0.66	0.81	1.83	-1.93	-6.63
قصبه	آذر ۹۶	-1.98	0.46	0.61	1.73	-1.74	-5.97
بهاباد		-2.13	0.59	0.74	2.09	-1.91	-5.58
بیدخت		-1.51	0.54	0.68	1.71	-1.29	-4.94
خشویی		-2.24	0.79	0.94	1.84	-2.01	-6.42
دیزق		-2.18	0.69	0.83	1.62	-1.96	-6.04
رهن		-2.09	0.73	0.88	1.75	-1.87	-6.5

خشک احتمالاً به دلیل تبخیر در طول نفوذ و تبخیر از آب در داخل کوره قنات است. ترکیب ایزوتوپی آب قنات‌ها در فصل تر نشان دهنده تأثیر تبخیر ضعیف و مکانیسم جریان شامل نفوذ سالانه ۲۹ میلیون مترمکعب آب حاصل از بارش از طریق سنگ‌های درزو و شکاف‌دار ارتفاعات و نیز رسوبات دانه درشت مخروط افکنه‌های موجود در حاشیه ارتفاعات جنوب دشت گناباد است. در دوره خشک تغذیه قنات‌ها از آب برگشتی کشاورزی قنات‌ها و چشمه‌های ارتفاعات است که حجم سالانه آن ۶ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود و به دلیل تبخیر از آنها در طول جریان سطحی قبل از نفوذ در آبرفت‌ها، مقدار ایزوتوپی آنها تا حدودی سنگین‌تر می‌گردد. برداشت از منابع آب و خروجی آب زیرزمینی از حوضه آبرگیر قنات‌ها سالانه برابر ۳۸/۶ میلیون مترمکعب و حجم آب ورودی به محدوده سالانه برابر ۳۵ میلیون مترمکعب است در نتیجه سالانه حدود ۳/۶ میلیون مترمکعب بیش از مقدار تغذیه حوضه آبرگیر برداشت می‌شود.

نمونه‌های آب قنات‌ها علاوه بر آن که در دوره تر و خشک دارای ترکیب ایزوتوپی متفاوت می‌باشند در یک دوره نمونه‌برداری نیز محتوای ایزوتوپی آنها با یکدیگر متفاوت است. نمونه‌های قنات‌های قصبه و رهن نسبت به سایر قنات‌ها غنی شدگی اکسیژن ۱۸ و دوتریم نشان می‌دهند. ترکیب ایزوتوپی آب زیرزمینی در اثر مواردی همچون رخداد واکنش آب و سنگ در طی زمان ماندگاری طولانی، عمق زیاد قنات‌ها، ارتفاع حوضه آبرگیر و میزان بارش و تبخیر می‌تواند تغییر کند. در فصل تر به دلیل حجم بارش بیشتر و دبی زیاد سیلاب‌ها، امکان تبخیر قابل ملاحظه از آنها در شرایط دمای کمتر و رطوبت بیشتر وجود ندارد در نتیجه در فصل تر به علت تغذیه ناشی از بارش ترکیب ایزوتوپی آب قنات‌ها نیز سبک‌تر است. در دوره خشک نمونه آب قنات‌ها از نظر ایزوتوپی غنی شدگی نسبت به دوره تر نشان می‌دهند. به طوری که بر روی خط تبخیر با شیب کم نسبت به دوره تر قرار گرفته‌اند. انحراف از خط بارش محلی در فصل

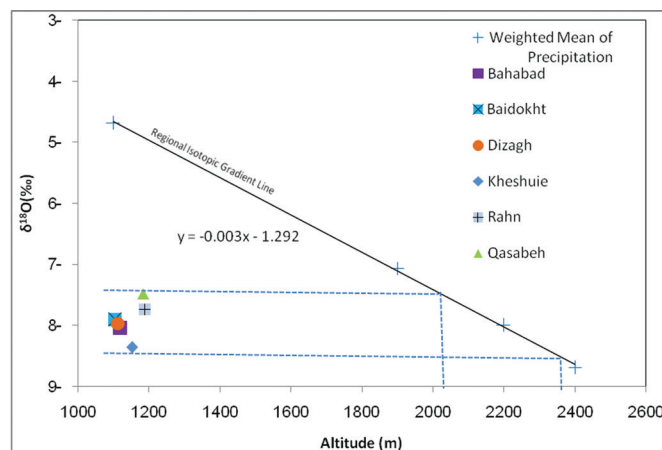


تغذیه از ارتفاع ۲۴۰۰ متر است. سه قنات بهاباد، دیزق و بیدخت دارای ارتفاع تغذیه تقریباً یکسان و در حدود ۲۲۰۰ متر است. در حوضه آبگیر گناباد حداکثر ارتفاع در ارتفاعات غربی محدوده برابر ۲۶۰۰ متر و در ارتفاعات جنوبی محدوده برابر ۲۷۷۰ متر است. البته به دلیل تأثیر ضعیف تبخیر در فصل تر، ارتفاع تغذیه کمتر از مقدار واقعی محاسبه می‌گردد و در اصل تغذیه از بارش‌های ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۲۷۰۰ متر و رواناب حاصله از آنهاست که به دلیل تبخیر ضعیف ارتفاع تغذیه قنات‌ها کمتر محاسبه می‌گردد.

جهت تعیین ارتفاع منطقه تغذیه، رابطه بین مقدار ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و ارتفاع برای ایستگاه‌های بارش محدوده گناباد ترسیم شد (شکل ۱۳):

$$\delta^{18}O = (-0.0031 \times \text{altitude} - 1.3) \quad (9)$$

مقدار تهی‌شدگی اکسیژن هجده در بارش‌های منطقه مطابق رابطه ۹ حدود ۰/۳ پرمیل در ۱۰۰ متر افزایش ارتفاع می‌باشد. تغذیه آب زیرزمینی قنات‌ها در محدوده مورد مطالعه از حوضه‌ای در ارتفاعات بین ۲۰۰۰ تا ۲۴۰۰ متر منشأ می‌گیرد. تغذیه آب زیرزمینی در قنات قصبه از ارتفاع ۲۰۰۰ متر منشأ می‌گیرد و در قنات خشویی



شکل ۱۳- خط شیب ایزوتوپی منطقه و تخمین ارتفاع تغذیه با استفاده از مقادیر اکسیژن ۱۸ در مقابل ارتفاع.

## ۹- نتیجه‌گیری

قنات‌ها شامل هوازگی سیلیکات‌ها مانند پلاژیوکلازهای سدیم‌دار و بیوتیت، انحلال کربنات‌ها، انحلال تبخیری‌ها، دولومیت زدایی و تبادل کاتیونی عادی است. چنانکه در قنات‌های شرق دشت به دلیل گسترش سازندهای ماسه‌سنگی و مارنی هوازگی سیلیکات‌ها و انحلال تبخیری‌ها و در قنات‌های غرب دشت به دلیل گسترش سازندهای جمال و شتری انحلال کربنات‌ها غالب است. با نفوذ آب بارش در ارتفاعات جنوب منطقه و انحلال دی اکسید کربن موجود در هوا و خاک، خاصیت اسیدی آب افزایش یافته موجب انحلال کربنات‌ها می‌گردد با ادامه مسیر و انحلال سولفات فرایند دولومیت‌زدایی نیز در حین عبور از ارتفاعات اتفاق می‌افتد و میزان یون منیزیم آب افزایش می‌یابد. همچنین حین عبور آب از مواد آبرفتی سفره تبادل کاتیونی عادی نیز اتفاق می‌افتد. با ورود آب به کوره قنات و خروج دی اکسید کربن از آب در نتیجه کاهش فشار و افزایش سرعت آب، آب قلیائی شده و نسبت به کانی‌های کربناته اشباع و فوق اشباع می‌گردد. ترکیب ایزوتوپی قنات‌ها در فصل خشک به دلیل تبخیر از آب حین حرکت در کوره قنات، همچنین تغذیه قنات‌ها از آب برگشتی منابع آبی ارتفاعات و تبخیر آب در طول جریان سطحی قبل از نفوذ در آبرفت‌ها در شرایط دمای بالاتر و رطوبت کمتر نسبت به فصل تر سنگین‌تر است.

## سپاسگزاری

از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی به خاطر حمایت مالی تقدیر و تشکر می‌گردد.

قنات مهم‌ترین منبع تامین کننده آب کشاورزی و شرب در منطقه خشک و بیابانی گناباد از ۲۷۰۰ سال پیش تاکنون است که در این منطقه هیچ گونه منبع آب سطحی وجود ندارد. مشخصات شیمیایی و ترکیب ایزوتوپی ۶ رشته قنات مهم دشت گناباد به همراه ترکیب ایزوتوپی بارش‌های منطقه جهت تعیین تکامل شیمیایی، منشأ و مکانسیم تغذیه قنات‌ها استفاده شد. کیفیت آب زیرزمینی قنات‌ها از سمت غرب به شرق دشت به دلیل گسترش مارن‌های نئوژن بدتر شده چنانکه هدایت الکتریکی از ۷۵۰ میکرومومس بر سانتی‌متر در غرب دشت تا ۳۹۰۰ میکرومومس بر سانتی‌متر در شرق دشت افزایش می‌یابد. جهت جریان عمومی آب زیرزمینی در دشت گناباد منطبق بر توپوگرافی سطحی و از ارتفاعات جنوب دشت به سمت شمال شرق دشت است. با مقایسه محتوای ایزوتوپی قنات‌ها در فصل تر و بارش‌های منطقه مشخص گردید که منشأ تغذیه قنات‌ها بارش‌های محلی محدوده گناباد (ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۲۷۰۰ متری با تأثیر تبخیر ضعیف) بوده و مکانسیم جریان شامل نفوذ مستقیم بارش‌ها در درز و شکاف‌های سازندهای ارتفاعات حوضه (مخصوصاً سازندهای آهکی و ماسه‌سنگی)، همچنین نفوذ رواناب حاصل از بارش‌های ارتفاعات مذکور در مخروط افکنه‌های حاشیه ارتفاعات و بستر مسیل‌های درون دشت (قسمت‌های ابتدایی و بالادست مسیل‌ها) در فصول سرد و مرطوب سال (آذر تا اردیبهشت ماه هر سال) است. آب حاصل از بارش‌ها بعد از نفوذ و عبور از سازندهای ارتفاعات وارد آبرفت دشت شده و پس از طی مسافتی در حدود ۵ تا ۱۵ کیلومتر (در قنات‌های مختلف متفاوت است) درون مواد آبرفتی به تره کار (زون آبگیر قنات) می‌رسد. فرایندهای هیدروشیمیایی غالب در سفره آب زیرزمینی

## کتابخانه

آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۳- گزارش پیشنهاد تمدید ممنوعیت دشت گناباد.

پاپلی یزدی، م.، لباف خانیکی، ر.، لباف خانیکی، م.، جلالی، ع. و وثوقی، ف.، ۱۳۷۹- قنات قصبه گناباد یک اسطوره، شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی، مشهد، ۲۹۲ ص.  
سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۴- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گناباد.

## References

- Appelo, C. A. J. and Postma, D., 2005- *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd ed. A.A. Balkema, Leiden, The Netherlands (649 pp.).
- Back, W., Hanshaw, B. B., Plummer, L. N., Rahn, P. H., Rightmire, C. T. and Rubin, M., 1983- Process and rate of dedolomitization: mass transfer and <sup>14</sup>C dating in a regional carbonate aquifer. *Geol. Soc. Am. Bull.* 94, 1415–1429, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94<1415:PARODM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<1415:PARODM>2.0.CO;2).
- Capaccioni, B., Didero, M., Paletta, C. and Salvadori, P., 2001.- Hydrogeochemistry of groundwaters from carbonate formations with basal gypsiferous layers: an example from the Mt Catria–Mt Nerone ridge (Northern Appennines, Italy). *J. Hydrol.* 253, 14–26, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00480-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00480-2).
- Cardenal, J., Benavente, J. and Cruz-San Julián, J. J., 1994- Chemical evolution of groundwater in Triassic gypsum bearing carbonate aquifers (Las Alpujarras, South Spain). *J. Hydrol.* 161, 3–30, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90119-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90119-8).
- Clark, I. and Fritz, P., 1997- *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, New York (328 pp.).
- Deike, R. G., 1990- Dolomite dissolution rates and possible Holocene dedolomitization of water-bearing units in the Edwards aquifer, South-Central Texas. *J. Hydrol.* 112, 335–373, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(90\)90023-Q](https://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90023-Q).
- Fontes, J. C., 1976- *Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles: quelques aspects*. Ph.D. Thesis, University of Paris VI, 208 p.
- Gat, J. R. and 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. Chang.* 51, 25–33, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2005.12.004>.
- Gat, J. R., 1996- Oxygen and hydrogen stable isotopes in the hydrological cycle. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 24, 225–262, <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.earth.24.1.225>.
- Herczeg, A. L., Leaney, F. W. J., Stadler, M. F., Allan, G. L. and Fifield, L. K., 1997- Chemical and isotopic indicators of point-source recharge to a karst aquifer, South Australia. *J. Hydrol.* 192, 271–299, [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03100-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03100-9).
- Iwatsuki, T. and Yoshida, H., 1999- Groundwater chemistry and fracture mineralogy in the basement granitic rock in the Tono uranium mine area, Gifu Prefecture, Japan Groundwater composition, Eh evolution analysis by fracture filling minerals. *Geochemical Journal* 33, 19–32, <https://doi.org/10.2343/geochemj.33.19>.
- Kanduč, T., Mori, N., Kocman, D., Stibilj, V. and Grassa, F., 2012- Hydrogeochemistry of Alpine springs from North Slovenia: insights from stable isotopes. *Chem. Geol.* 300–301, 40–54, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.01.012>.
- Kohfahl, C., Sprenger, C., Benavente, J. B. H., Meyer, H., FernándezChacón, F. and Pekdeger, A., 2008- Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in semiarid and karstic environments: a field study in the Granada Basin (Southern Spain). *Appl. Geochem.* 23, 846–862, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.09.009>.
- Ladouche, B., Luc, A. and Dörfli, N., 2009- Chemical and isotopic investigation of rainwater in Southern France (1996–2002): Potential use as input signal for karst functioning investigation. *J. Hydrol.* 367, 150–164, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.012>.
- Liotta, M., Grassa, F., D'Alessandro, W., Favara, R., Gagliano Candela, E., Pisciotta, A. and Scaletta, C., 2013- Isotopic composition of precipitation and groundwater in Sicily, Italy. *Appl. Geochem.* 34, 199–206, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.03.012>.
- Ma, R., Wang, Y., Sun, Z., Zheng, C., Ma, T. and Prommer, H., 2011- Geochemical evolution of groundwater in carbonate aquifers in Taiyuan, Northern China. *Appl. Geochem.* 26(5), 884–897, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.02.008>.
- Mazor, E., 1991- *Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. Halsted Press, New York (274 pp.).
- Moral, F., Cruz-San Julián, J. J. and Olias, M., 2008- Geochemical evolution of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera, southern Spain). *J. Hydrol.* 360, 281–296, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.012>.
- Paternoster, M., Liotta, M. and Favara, R., 2008- Stable isotope ratios in meteoric recharge and groundwater at Mt. Vulture volcano, southern Italy. *J. Hydrol.* 348, 87–97, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.038>.
- Pu, T., He, Y., Zhang, T., Wu, J., Zhu, G. and Chang, L., 2013- Isotopic and geochemical evolution of ground and river waters in a karst dominated geological setting: a case study from Lijiang basin, South-Asia monsoon region. *Appl. Geochem.* 33, 199–212, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.02.013>.
- Rogers, R. J., 1989- Geochemical comparison of groundwater in areas of New England, New York and Pennsylvania, *Groundwater*, Vol. 27, pp. 690–712, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1989.tb00483.x>.
- Sami, K., 1992- Recharge mechanisms and geochemical processes in a semi-arid sedimentary basin, Eastern Cape, South Africa, *Journal of Hydrology*, Vol. 139, pp. 27–48, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90193-Y](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90193-Y).
- Saunders, J. A. and Toran, L. E., 1994- Evidence for dedolomitization and mixing in Paleozoic carbonates near Oak Ridge, Tennessee. *Ground Water* 32 (2), 207–214, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1994.tb00635.x>.
- Vallejos, A., Diaz-Puga, M. A., Sola, F., Daniele, L., Pulido-Bosch, 2015- Using ion and isotope characterization to delimitate a hydrogeological macrosystem, Sierra de Gador (SE, Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, GEXPLO-05544, 12p, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.03.006>.
- Wayland, K. G., Long, D. T., Hyndman, D. W., Pijanowski, B. C., Woodhams, S. M. and Haack, Sh. K., 2003- Identifying relationships between base flow geochemistry and land use with synoptic sampling and R-Mode factor analysis, *Journal of Environmental Quality*, Vol. 32, pp. 180–190, [10.2134/jeq2003.0180](https://doi.org/10.2134/jeq2003.0180).
- Wu, P., Tang, C., Zhu, L., Lui, C., Cha, X. and Tao, X., 2009- Hydrogeochemical characteristics of surface water and groundwater in the karst basin, southwest China. *Hydrol. Process.* 23, 2012–2022, <https://doi.org/10.1002/hyp.7332>.

# Study on flow mechanism and origin of groundwater of Gonabad plain qanats using hydrochemical and isotopic methods

H. Miranimoghadam<sup>1</sup>, G. H. Karami<sup>2\*</sup> and R. Bagheri<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD. Student, Faculty of Earth Science, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>2</sup>Associated Professor, Faculty of Earth Science, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Faculty of Earth Science, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 2019 January 15

Accepted: 2019 July 20

## Abstract

Gonabad area is an arid and semi-arid region. Qanat is the most important method for the exploitation of groundwater in Gonabad regions where 19.5 million cubic meters of groundwater is annually extracted from 26 qanats whose flow rates vary from 10 to 120 lit/s. The deepest qanats of the world are located in Gonabad Plain. For instance, the mother well depths of Qasabeh and Rahn Qanats are 340 and 260 meters, respectively. Six major qanats of Gonabad Plain were sampled for hydrochemical and isotopic analyses to determine the origin and flow mechanism of the groundwater of these qanats. The total dissolved solids of the groundwater of these qanats vary from 524 to 2375 mg/l. The dominant water types of these qanats are  $\text{Na}^+\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$  and  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ . The groundwater of these qanats is saturated and supersaturated with regard to carbonate minerals and under-saturated with regard to evaporate minerals. This means that the composition of the groundwater of these qanats is highly controlled by the dissolution of carbonate rocks existing in their catchment area. The deuterium ( $\delta\text{D}$ ) and oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) isotopes signatures demonstrate the meteoric origin of the groundwater of these qanats and the flow mechanism is direct infiltration of precipitation before evaporation through fractures in the limestone and sandstone formations at the south of the basin and infiltration of surface water in the coarse grain alluvial cones at the south border of the plain. The groundwater recharge of these qanats originates from an area between 2000 to 2700 m a.s.l. The groundwater of these qanats has depleted stable isotopes in the wet season due to recharge through the infiltration of precipitation and has enriched stable isotopes in the dry season due to recharge through the return flow of qanats and springs used for agricultural activities in the south of the basin.

**Keywords:** Mother well, Electrical conductance, Cation exchange, Saturation index, Meteoric water line.

For Persian Version see pages 183 to 192

\*Corresponding author: G. H. Karami; E-mail: g.karami@shahroodut.ac.ir