





دانشکده علوم زمین

رساله دکتری هیدروژئولوژی

# ارزیابی هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی قنات‌های مهم دشت گناباد، جنوب خراسان رضوی

نگارنده: حجت میرانی مقدم بهابادی

اساتید راهنما:

دکتر غلامحسین کرمی

دکتر رحیم باقری

بهمن 1398



فرم شماره ۱۱: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای حجت میرانی مقدم دانشجوی دکتری رشته زمین شناسی (آب شناسی) به شماره دانشجویی ۹۲۴۶۱۴۵ ورودی بهمن ماه سال ۱۳۹۲ در تاریخ ۱۳۹۸/۱۱/۲۶ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: ارزیابی هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی قنات های مهم دشت گناباد، جنوب خراسان رضوی دفاع و با اخذ نمره ۱۹/۵ به درجه عالی نائل گردید.

<input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input checked="" type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد.
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد.	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱	استاد راهنما	دکتر غلامحسین کرمی	دانشیار	
	استاد راهنما	دکتر رحیم باقری	استادیار	
۲	استاد داور داخلی	دکتر هادی جعفری	دانشیار	
۳	استاد داور داخلی	دکتر صمد امامقلی زاده	دانشیار	
۴	استاد داور خارجی	دکتر حسین محمدزاده	دانشیار	
۵	نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر پرویز امیدی	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای حجت میرانی مقدم بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: پرویز امیدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۸/۱۲/۱۱



تقدیم به:

پدر و مادرم به خاطر زحمات بی دریغشان

و همسرم به خاطر بردباری و همراهی اش

## تشکر و قدردانی

سپاس خدای بزرگ را که مرا یاری رساند تا بتوانم این مقطع تحصیلی را به پایان رسانده و گامی در راستای اعتلای علم بر دارم. از اساتید راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر غلامحسین کرمی و آقای دکتر رحیم باقری که وجودشان همیشه قوتی برای انجام کارهایم بوده است و بدون شک انجام این پایان‌نامه بدون کمک و راهنمایی‌های ارزنده آنها امکان پذیر نبوده است، کمال تشکر را دارم. از تمامی اساتیدی که در دانشکده علوم زمین توفیق دانشجویی در محضرشان را داشتم آقای دکتر عزیزالله طاهری، دکتر غلامعباس کاظمی و دکتر هادی جعفری تقدیر و تشکر می‌نمایم. از رئیس محترم دانشکده علوم زمین آقای دکتر پرویز امیدی و سرکار خانم زهره فارسی مسئول محترم آموزش دانشکده بسیار سپاسگذارم. از همه دوستان و همکلاسی‌های گرامی‌ام که اوقات خوشی را در کنار هم سپری کرده‌ایم، تقدیر و تشکر دارم.

از پدر و مادر مهربانم، برادران، خواهران و همسر عزیزم کمال تشکر و قدردانی را دارم. و در پایان از تمامی عزیزانی که در طول انجام این پایان‌نامه مرا یاری کرده‌اند کمال تشکر و قدردانی را ابراز می‌نمایم.

## تعهدنامه

اینجانب حجت میرانی مقدم دانشجوی دوره دکتری رشته زمین‌شناسی گرایش آب‌شناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه "ارزیابی هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی قنات‌های مهم دشت گناباد، جنوب خراسان رضوی) تحت راهنمایی دکتر غلامحسین کرمی و دکتر رحیم باقری متعهد می‌شوم:

تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است. در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.

مطالب مندرج در پایان‌نامه توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.

کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.

حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تاثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت شده است.

در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ 1398/11/26

امضای دانشجو

### مالکیت نشر و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطالب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

دشت گناباد در منطقه خشک و نیمه بیابانی جنوب خراسان رضوی واقع شده است. مهمترین روش استفاده از آب‌های زیرزمینی در این منطقه قنات یا همان کاریز است. در دشت گناباد سالانه حدود 19/5 میلیون مترمکعب آب زیرزمینی از طریق 26 رشته قنات با دبی‌های بین 10 تا 120 لیتر در ثانیه تخلیه می‌گردد. با توجه به اهمیت قنات‌ها در تامین آب شرب و کشاورزی منطقه، تعیین حدود حوضه آبرگیر، محاسبه بیلان آب در حوضه آبرگیر، مشخص نمودن روند کاهش آبدهی، تاثیر افت سطح آب زیرزمینی بر کاهش آبدهی قنات‌ها، منشأ و مکانیسم تغذیه قنات‌ها ضروری است. بنابراین در این تحقیق به منظور انجام موارد مذکور، مطالعات هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی انجام گرفت. محدوده حوضه آبرگیر کلی قنات‌های دشت تعیین شده و مساحت آن حدود 1032 کیلومتر مربع برآورد شده است. محاسبات بیلان در حوضه آبرگیر قنات‌ها نشان می‌دهد سالانه حدود 3/7 میلیون مترمکعب آب بیش از مقدار تغذیه حوضه برداشت می‌شود که باعث افت سطح آب زیرزمینی به میزان حدود 0/06 متر در سال و کاهش زون آبرگیر قنات‌ها می‌گردد. تغییرات بارش موثر (بارش روزانه بیش از 20 میلیمتر) ارتفاعات محدوده با تغییرات آبدهی قنات‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نرخ کاهش دبی سالانه قنات‌ها بین 0/17 تا 1/17 لیتر در ثانیه در سال به دست آمد. نرخ کاهش آبدهی سالانه در قنات رهن بیشترین مقدار است. دلیل اصلی کاهش آبدهی قنات مذکور تغذیه قنات توسط سازندهای آهکی، ترکیب کربناتی آب قنات، ته‌نشست ترکیبات کربناتی در دیواره‌های کوره قنات و عدم لایروبی قنات مذکور است. کمترین مقدار نرخ کاهش آبدهی در قنات دیزق محاسبه شد. استعداد خوب سفره آب زیرزمینی در محل زون آبرگیر قنات مذکور، عدم حفر چاه در حریم قنات و تغذیه از طریق نفوذ آب در کوره قنات‌های بالادستی باعث شده تغییرات آبدهی قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد. افزایش آبدهی ناشی از افزایش میزان بارش موثر در قنات‌های دشت بین 4 تا 15 درصد برآورد شد. تغییرات آبدهی در قنات‌های مورد مطالعه در اثر افت سطح آب زیرزمینی دشت یکسان نبوده و به ازای یک متر افت سطح آب زیرزمینی دشت بین 3 تا 14 لیتر در ثانیه متغیر است. در صورت ادامه روند کنونی افت سطح آب زیرزمینی در دشت گناباد، قنات‌ها در طی 10 تا 180 سال آینده از بین خواهند رفت. مقدار هدایت الکتریکی آب قنات‌ها از 750 تا 3900 میکروموس بر سانتیمتر متغیر است. تیپ‌های غالب آب در قنات‌ها شامل بی‌کربناته سدیک منیزیک و کلروره سدیک است. به دلیل گسترش

مارن‌های نئوژن در شرق دشت، هدایت الکتریکی آب قنات‌ها از غرب به شرق دشت افزایش یافته و کیفیت آب قنات‌ها بدتر می‌گردد. به دلیل تبادل کاتیونی مستقیم مقدار کمبود کلسیم و منیزیم نمونه‌های آب قنات‌ها با مقدار سدیم اضافه آنها متناسب است. فرایندهای هیدروشیمیایی غالب در سفره آب زیرزمینی قنات‌ها شامل هوازدگی سیلیکات‌ها مانند پلاژیوکلازهای سدیم‌دار و بیوتیت، انحلال کربنات‌ها، انحلال تبخیری‌ها، دولومیت‌زدایی و تبادل کاتیونی عادی است. آب قنات‌ها نسبت به کانی‌های کلسیت و دولومیت اشباع و نسبت به هالیت و ژیپس تحت اشباع است. محتوای ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن 18 و دوتریم قنات‌ها در فصل تر و بارش‌های منطقه، نشان‌دهنده منشأ جوی آب قنات‌ها و مکانیسم جریان شامل نفوذ مستقیم آب بارش قبل از تبخیر از طریق درز و شکاف‌های سازندهای ماسه سنگی و آهکی حوضه و همچنین نفوذ آب‌های سطحی در مخروط‌های آبرفتی دانه درشت حاشیه ارتفاعات حوضه می‌باشد. تغذیه آب زیرزمینی قنات‌ها از بارش‌های ارتفاعات بین 2000 تا 2700 متر حوضه منشأ می‌گیرد. ترکیب ایزوتوپی قنات‌ها در فصل تر به دلیل تغذیه از بارش سبکتر و در فصل خشک به دلیل تغذیه از آب برگشتی کشاورزی قنات‌ها و چشمه‌های ارتفاعات جنوب حوضه سنگین‌تر است. رابطه مستقیمی بین محتوای ایزوتوپی قنات‌ها و طول قنات، عمق مادرچاه قنات و فاصله مادرچاه تا ارتفاعات وجود دارد.

**واژه‌های کلیدی:** هیدروگراف، تبادل کاتیونی، شاخص اشباع، منشأ آب، مکانیسم جریان



## عناوین مقالات مستخرج از رساله دکتری

- 1- میرانی مقدم، ح. کرمی، غ. ح. باقری، ر. (1398)، بررسی مکانیسم جریان و منشأ آب قنات‌های دشت گناباد به وسیله روش‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی، فصلنامه علوم زمین. پذیرفته شده.
- 2- میرانی مقدم، ح. کرمی، غ. ح. باقری، ر. (1398)، ارزیابی هیدروژئولوژیکی قنات‌های دشت گناباد، هیدروژئولوژی. پذیرفته شده.

3- Mirani Moghadam H, Bagheri R, Karami G H, Jafari H. (2019), Groundwater origin in qanats, chemo-isotopic and hydrogeological evidence. Groundwater. <https://doi.org/10.1111/gwt.12975>.

## فهرست مطالب

1	فصل اول: مقدمه.....
1-1	1- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق.....
2-1	2- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.....
3-1	3- هواشناسی محدوده گناباد.....
1-3-1	1- بارندگی.....
2-3-1	2- تبخیر.....
3-3-1	3- درجه حرارت.....
4-3-1	4- اقلیم منطقه.....
4-1	4- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه.....
1-4-1	1- چینه‌شناسی محدوده مطالعاتی گناباد.....
1-1-4-1	1- سازندهای پالئوزوئیک.....
11	- سازند جمال.....
2-1-4-1	2- سازندهای مزوزوئیک.....
13	- سازند شتری.....
14	- سازند نایبند.....
15	- سازند شمشک.....
17	- سازند بادامو.....
16	- واحد آهکی کرتاسه زیرین.....
3-1-4-1	3- سنوزوئیک.....
18	- واحدهای آتشفشانی.....
20	- مارن پلیوسن.....
20	- کنگلومرای پلیوسن.....
4-1-4-1	4- کواترنر.....
2-4-1	2- زمین‌شناسی ساختمانی.....

24.....	5-1- ضخامت رسوبات آبرفتی دشت گناباد.....
24.....	6-1- عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی دشت گناباد.....
27.....	<b>فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین.....</b>
27.....	1-2- معرفی قنات.....
29.....	2-2- هیدروژئولوژی.....
32.....	3-2- هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی.....
45.....	<b>فصل سوم: روش انجام تحقیق.....</b>
45.....	1-3- اندازه گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قنات‌ها در محل.....
45.....	3-1-1- اندازه گیری آبدهی.....
46.....	3-1-2- اندازه گیری خصوصیات شیمیایی در محل.....
46.....	3-2- نمونه برداری هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی از آب قنات‌ها و بارش‌های محدوده.....
49.....	3-3- هیدروژئولوژی.....
49.....	3-4- هیدروژئوشیمی.....
50.....	3-5- مطالعات ایزوتوپی.....
51.....	<b>فصل چهارم: هیدروژئولوژی قنات‌ها.....</b>
51.....	4-1- تخمین عمق مادرچاه قنات‌های دشت.....
54.....	4-2- حوضه آبرگیر قنات‌ها.....
54.....	4-3- ارزیابی بیلان آب زیرزمینی در حوضه آبرگیر قنات‌ها.....
56.....	4-3-1- عوامل ورودی محدوده بیلان.....
57.....	4-3-2- عوامل خروجی محدوده بیلان.....
59.....	4-4- بررسی تغییرات دراز مدت آبدهی قنات‌ها.....
65.....	4-5- محاسبه میزان نرخ کاهش سالانه دبی قنات‌ها.....
66.....	4-6- برآورد سهم آبدهی هر قنات با استفاده از بارش سال آبی هدف.....
68.....	4-7- محاسبه تاثیر افت سطح آب زیرزمینی بر آبدهی قنات‌ها.....
68.....	4-8- محاسبه نقطه مرگ قنات‌ها.....

69	9-4- بررسی عوامل موثر بر کاهش آبدهی قنات‌های دشت گناباد.....
75	10-4- ارزیابی تغییرات دبی در سال آبی 1395-1396.....
79	11-4- نقشه همتراز آب زیرزمینی دشت با استفاده از سطح آب مادرچاه قنات‌ها.....
82	12-4- تغییرات طول تره‌کار قنات‌ها در طول 30 سال گذشته.....
<b>85</b>	<b>فصل پنجم: مشخصات هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی قنات‌ها.....</b>
85	1-5- ارزیابی تغییرات و خصوصیات هیدروژئوشیمیایی قنات‌های مورد مطالعه.....
85	1-1-5- بررسی تغییرات زمانی هدایت الکتریکی قنات‌های منطقه.....
88	2-1-5- مشخصات هیدروژئوشیمیایی آب قنات‌ها.....
89	3-1-5- تکامل شیمیایی و منشأ آب زیرزمینی.....
98	4-1-5- شاخص‌های اشباع.....
99	2-5- مطالعات ایزوتوپی.....
100	1-2-5- خط آب جوی محدوده و ترکیب ایزوتوپی قنات‌ها.....
102	2-2-5- ارتباط بین محتوای ایزوتوپی بارش با مقدار دما و رطوبت هوا و مقدار بارش.....
104	3-2-5- دوتریم اضافه آب قنات‌ها.....
105	4-2-5- خط شیب ایزوتوپی محدوده.....
106	5-2-5- تعیین میزان تغذیه سالانه قنات‌ها با استفاده از داده‌های ایزوتوپی.....
107	6-2-5- بررسی ارتباط ترکیب ایزوتوپی آب قنات‌ها با خصوصیات قنات‌ها.....
<b>111</b>	<b>فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....</b>
111	1-6- نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....
111	1-1-6- نتایج مطالعات هیدروژئولوژیکی.....
112	2-1-6- نتایج مطالعات هیدروژئوشیمی.....
113	3-1-6- نتایج مطالعات ایزوتوپی.....
115	2-6- پیشنهادها.....
117	منابع.....

## فهرست شکل‌ها

- شکل 1-1- موقعیت حوضه آبخیز گناباد و مظهر قنات‌های موجود در حوضه.....5
- شکل 1-2- نمودار امپروترمیک دشت گناباد.....10
- شکل 1-3- نمودار امپروترمیک ارتفاعات محدوده مورد مطالعه.....10
- شکل 1-4- نقشه زمین‌شناسی محدوده گناباد.....12
- شکل 1-5- نقشه هم‌ضخامت رسوبات آبرفتی دشت گناباد.....25
- شکل 1-6- نقشه هم‌عمق آب زیرزمینی دشت گناباد.....26
- شکل 1-2- (a) فرایندهای تاثیرگذار بر مقادیر  $^{18}\text{O}$  و D (b) نمودار  $\text{D}-^{18}\text{O}$  بارش‌های قاره‌ای.....43
- شکل 2-2- نمودار ترکیب ایزوتوپ پایدار در مقابل شوری.....44
- شکل 1-3- اندازه‌گیری آبدهی قنات قصبه با استفاده از میکرومولینه.....46
- شکل 2-3- نمونه‌برداری از آب قنات‌ها جهت اندازه‌گیری یون‌های اصلی در آزمایشگاه.....47
- شکل 3-3- نمونه‌های آب قنات‌ها و بارش‌های منطقه جهت آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار.....48
- شکل 1-4- برش طولی و نیمرخ تپوگرافی رشته کلات قنات قصبه گناباد.....53
- شکل 2-4- حوضه آبخیز قنات‌های دشت گناباد.....55
- شکل 3-4- هیدروگراف معرف آبخوان دشت گناباد.....59
- شکل 4-4- هیدروگراف قنات قصبه.....60
- شکل 5-4- هیدروگراف قنات رهن.....62
- شکل 6-4- هیدروگراف قنات بهاباد.....63
- شکل 7-4- هیدروگراف قنات خشویی.....63
- شکل 8-4- هیدروگراف قنات بیدخت.....64
- شکل 9-4- هیدروگراف قنات دیزق.....64
- شکل 10-4- تغییرات بارش در ایستگاه ارتفاعات حوضه گناباد.....70
- شکل 11-4- تغییرات بارش در ایستگاه ارتفاعات حوضه گناباد.....70
- شکل 12-4- دریاچه سد کاخک در حوضه آبخیز قنات‌ها.....72
- شکل 13-4- موقعیت قنات‌های اصلی دشت، سدها و محل‌های برداشت شن از رودخانه‌ها.....73

- شکل 4-14- تصویر هوایی رودخانه کلات (الف) قبل و (ب) بعد از برداشت شن.....74
- شکل 4-15- رسوبات کربناتی خارج شده حاصل از لایروبی چند چاه از قنات قصبه.....74
- شکل 4-16- هیدروگراف قنات قصبه در طول سال 95-96.....75
- شکل 4-17- هیدروگراف قنات دیزق در طول سال 95-96.....76
- شکل 4-18- هیدروگراف قنات خشویی در طول سال 95-96.....77
- شکل 4-19- هیدروگراف قنات رهن در طول سال 95-96.....78
- شکل 4-20- هیدروگراف قنات بهاباد در طول سال 95-96.....78
- شکل 4-21- هیدروگراف قنات بیدخت در طول سال 95-96.....79
- شکل 4-22- نقشه همتراز آب زیرزمینی دشت گناباد، (شهریورماه 1396).....81
- شکل 4-23- تغییرات طول تره‌کار قنات‌های مهم دشت گناباد در 30 سال گذشته.....82
- شکل 4-24- درصد کاهش آبدهی قنات‌ها در مقابل درصد کاهش زون آبدی قنات‌ها.....83
- شکل 5-1- تغییرات هدایت الکتریکی به همراه تغییرات آبدهی در قنات‌های منطقه.....86
- شکل 5-2- رابطه بین تغییرات هدایت الکتریکی با عمق مادرچاه و طول قنات‌ها.....87
- شکل 5-3- نمودار پایپر نمونه‌های آب قنات‌های مهم دشت گناباد.....88
- شکل 5-4- نمودار کلر در مقابل سدیم نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.....91
- شکل 5-5- نمودار کلسیم در مقابل بی‌کربنات نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.....92
- شکل 5-6- نمودار  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  در مقابل  $HCO_3^-+SO_4^{2-}$  در نمونه‌های آب قنات‌ها.....93
- شکل 5-7- نمودار  $Na^+-Cl^-$  در مقابل  $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(HCO_3^-+SO_4^{2-})$  در نمونه‌های آب قنات‌ها.....94
- شکل 5-8- نمودار ترکیبی  $Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}$  در مقابل  $HCO_3^-$  در نمونه‌های آب قنات‌ها.....94
- شکل 5-9- نمودار سولفات در مقابل کلسیم در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.....95
- شکل 5-10- نمودار بی‌کربنات در مقابل منیزیم در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.....97
- شکل 5-11- نسبت  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد.....97
- شکل 5-12- رابطه شاخص‌های اشباع کلسیت و دولومیت در نمونه‌های آب قنات‌ها.....98
- شکل 5-13- ارتباط بین اکسیژن 18 و دوتریم برای نمونه‌های آب قنات‌ها و بارش‌های منطقه.....102
- شکل 5-14- ارتباط بین اکسیژن 18 و دمای منطقه.....103

- شکل 5-15- ارتباط بین اکسیژن 18 بارش و مقدار بارش‌های منطقه.....103
- شکل 5-16- ارتباط بین اکسیژن 18 بارش و رطوبت منطقه.....104
- شکل 5-17- ارتباط بین اکسیژن 18 و دوتریم اضافه در آب قنات‌ها.....105
- شکل 5-18- خط شیب ایزوتوپی منطقه و تخمین ارتفاع تغذیه قنات‌ها.....106
- شکل 5-19: ارتباط بین محتوای اکسیژن 18 آب قنات‌ها در برابر طول قنات.....108
- شکل 5-20: ارتباط بین محتوای ایزوتوپی آب قنات‌ها و طول تره‌کار قنات‌ها.....108
- شکل 5-21: ارتباط بین محتوای ایزوتوپی آب قنات‌ها و عمق مادرچاه قنات‌ها.....109
- شکل 5-22: ارتباط بین محتوای ایزوتوپی آب قنات‌ها و فاصله مادرچاه قنات‌ها از ارتفاعات .....109
- شکل 5-23: ارتباط بین محتوای ایزوتوپی و هدایت الکتریکی آب قنات‌ها.....110

## فهرست جدول‌ها

- جدول 1-1- مقادیر بارندگی ماهانه در ایستگاه‌های ارتفاعات و دشت محدوده گناباد ..... 6
- جدول 2-1- مقادیر تبخیر از تشت در نواحی دشتی و ارتفاعات منطقه..... 7
- جدول 3-1- شاخص‌های حرارتی پنج‌گانه ایستگاه گناباد..... 8
- جدول 4-1- مقادیر ماهانه دما در نواحی دشتی و ارتفاعات منطقه..... 8
- جدول 5-1- طبقه‌بندی دما در تن..... 9
- جدول 1-4- عمق مادر چاه قنات‌های انتخابی دشت گناباد..... 52
- جدول 2-4- آبدهی قنات‌ها و بارش موثر محدوده ارتفاعات گناباد..... 61
- جدول 3-4- نرخ کاهش سالانه آبدهی قنات‌های دشت گناباد..... 66
- جدول 4-4- درصد افزایش آبدهی قنات‌ها در اثر افزایش بارش موثر سالانه..... 67
- جدول 5-4- درصد کاهش دبی سالانه قنات‌ها در اثر کاهش بارش موثر..... 67
- جدول 6-4- تاثیر افت سطح آب زیرزمینی بر کاهش آبدهی قنات‌ها..... 68
- جدول 7-4- محاسبه نقطه مرگ قنات‌ها..... 69
- جدول 8-4- مشخصات سدهای احداث شده در حوضه آبرگیر قنات‌های گناباد..... 71
- جدول 9-4- برآورد میزان ضریب آگذری و هدایت هیدرولیکی در بخش تره‌کار قنات‌ها..... 80
- جدول 10-4- تغییرات طول تره‌کار و آبدهی قنات‌های دشت گناباد..... 83
- جدول 1-5- نتایج آنالیز شیمیایی آب زیرزمینی قنات‌های مهم دشت گناباد..... 89
- جدول 2-5- شاخص اشباع کانی‌های مختلف در نمونه‌های آب قنات‌ها..... 99
- جدول 3-5- ترکیب ایزوتوپی قنات‌های دشت گناباد..... 102
- جدول 4-5- برآورد سهم بارش‌های سال آبی 95-96 در آبدهی قنات‌های دشت گناباد..... 107



## فصل اول: مقدمه

آب شرب با کیفیت خوب اساسی‌ترین نیاز بشر است ولی در مناطق خشک و نیمه خشک همیشه در دسترس نیست. آب‌های زیرزمینی منابع محدودی هستند و در حال تبدیل شدن به کالایی کمیاب در بسیاری از نقاط جهان است. در دهه‌های اخیر آب‌های زیرزمینی یکی از مهمترین و آسیب‌پذیرترین منابع طبیعی زمین است. یکی از مهمترین برنامه‌های مدیریت منابع آب حفاظت و توسعه پایدار این منابع است. حفاظت از منابع موجود بسیار مهمتر از به دست آوردن منابع جدید آب شیرین است. یکی از شگفت‌انگیزترین تکنولوژی‌های جهانی بهره‌برداری از منابع آب که در مناطق بیابانی و خشک ایران در حدود 3000 سال پیش ابداع شد قنات است. قنات یک روش دوستدار محیط زیست برای استفاده از ذخایر آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک با بارش اندک است. این سیستم آب زیرزمینی را تبدیل به منابع تجدیدپذیر نموده و بیلان طبیعی آب حفظ می‌گردد. کشور ایران در منطقه خشک و نیمه خشک قرار گرفته است. قنات مهمترین روش بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در مناطق کویری، از گذشته تاکنون است. مدیریت بهره‌برداری و نگهداری از قنات‌ها مستلزم تعیین حوضه آبریز قنات‌ها، مشخص نمودن روند تغییرات آبدهی قنات‌ها در طول زمان و عوامل موثر بر آن و تعیین منشأ و مکانیسم تغذیه آنهاست.

### 1-1- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق

حوضه آبریز گناباد در مناطق خشک و کویری شرق ایران قرار گرفته است. وسعت کل حوضه 1872 کیلومترمربع است که 939 کیلومترمربع آن را ارتفاعات و 933 کیلومترمربع را دشت تشکیل می‌دهد. میانگین دراز مدت بارندگی سالانه در دشت و ارتفاعات این محدوده، به ترتیب 145 و 264 میلیمتر است. متوسط درجه حرارت سالیانه دشت 16/2 و ارتفاعات 13/3 درجه سانتیگراد است. محدوده گناباد جزء مناطق خشک و نیمه بیابانی است. میزان بارندگی کم، درجه حرارت بالا و در نتیجه میزان

تبخیر در آن بالاست. در این منطقه جریان آب سطحی وجود ندارد و تنها راه حیات از گذشته‌های دور تاکنون استفاده از آب‌های زیرزمینی به وسیله قنات است. در محدوده گناباد تعداد 300 رشته قنات وجود دارد که سالانه 30 میلیون مترمکعب آب از طریق آنها استحصال می‌گردد. از این تعداد حدود 26 رشته قنات در دشت 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 19/5 میلیون مترمکعب و توسط چاه‌ها برابر 11/8 میلیون مترمکعب است. آبدهی قنات‌های موجود در دشت گناباد از 10 تا 120 لیتر در ثانیه در تغییر 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 350 و 260 متر است (پاپلی یزدی و همکاران 1379). براساس مطالعات باستان‌شناسی قدمت برخی از این قنات‌ها مانند قصبه به 2700 سال قبل برمی‌گردد (پاپلی یزدی و همکاران 1379). طول 26 رشته قنات موجود در دشت برابر 272 کیلومتر است که با احتساب رشته‌های فرعی به حدود 370 کیلومتر می‌رسد. عمق مادر چاه قنات‌های دشت گناباد از 45 تا 350 متر متغیر می‌باشد. میانگین عمق مادر چاه قنات‌های دشت 164 متر است. به دلیل شیب ملایم کوره قنات در بخش اشباع سفره (بخش تره‌کار قنات)، افت سطح آب زیرزمینی تاثیر زیادی در کاهش طول بخش تره‌کار قنات‌ها و در نهایت خشک شدن آنها دارد چنانکه افت سطح آب زیرزمینی به میزان 2 متر، تاثیر زیادی در کاهش بخش تره‌کار قنات و آبدهی آن دارد ولی در کاهش آبدهی چاه‌ها تاثیر چندانی ندارد. از مهمترین عوامل موثر بر افت سطح آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌توان به برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی از طریق حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، کاهش بارندگی و خشکسالی‌های مداوم، احداث سد در ارتفاعات و جلوگیری از تغذیه دشت‌ها اشاره کرد. قنات‌های دشت گناباد اگر چه به لحاظ پارامترهای مختلف (آبدهی، قدمت و ...) از اهمیت بالایی برخوردار هستند، ولی تاکنون هیچگونه مطالعه جامعی در خصوص وضعیت هیدروژئولوژیکی، منشأ و مکانیسم تغذیه در مورد این قنات‌ها انجام نگرفته است. در این رساله سعی شده است تا با بررسی‌های

زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی در حوضه آبرگیر گناباد و تجزیه و تحلیل

داده‌های به دست آمده به سوالات زیر پاسخ داده شود:

- ✓ بیلان آبی در حوضه آبرگیر قنات‌ها چقدر می‌باشد؟
- ✓ روند درازمدت کاهش آبدهی قنات‌ها چگونه و عوامل موثر بر آن چیست؟
- ✓ سهم آبدهی قنات‌ها از بارش سال آبی هدف چقدر است؟
- ✓ نقشه همتراز آب زیرزمینی دشت با وجود قنات‌ها در واقعیت چگونه است؟
- ✓ تاثیر افت سطح آب زیرزمینی دشت بر آبدهی قنات‌ها چقدر و بر این اساس نقطه مرگ قنات‌ها چه زمانی اتفاق می‌افتد؟
- ✓ مشخصات و تکامل هیدروژئوشیمیایی آب قنات‌ها چگونه است؟
- ✓ ارتباط محتوای ایزوتوپ‌های پایدار (اکسیژن 18 و دوتریم) آب قنات‌ها و بارش منطقه چگونه است؟
- ✓ منشأ آب قنات‌ها چیست و مکانیسم جریان و تغذیه آب قنات‌ها چگونه است؟
- ✓ ارتباط بین محتوای ایزوتوپی آب قنات‌ها و خصوصیات ذاتی قنات‌ها (طول، عمق مادرچاه و....) چیست؟

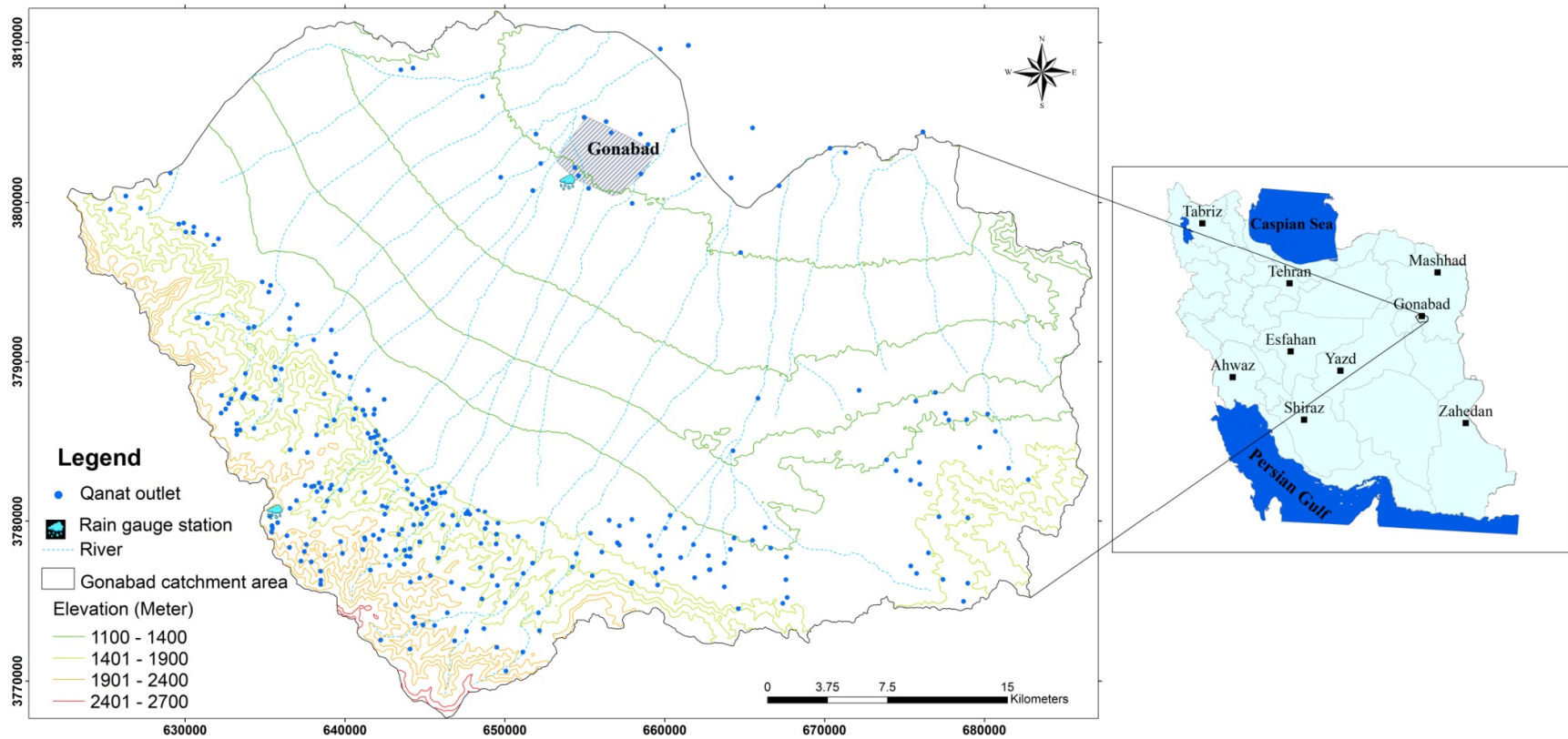
## 1-2- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در شرق ایران در قسمت جنوبی استان خراسان رضوی قرار دارد (شکل 1-1). مهمترین شهر موجود در این محدوده گناباد است که در فاصله 270 کیلومتری جنوب شهر مشهد قرار دارد. این محدوده شامل یک دشت اصلی حاوی آبخوان آبرفتی آزاد می‌باشد. وسعت کل محدوده گناباد 1872 کیلومترمربع است که 939 کیلومترمربع آن را ارتفاعات و 933 کیلومترمربع را دشت تشکیل می‌دهد. آبخوان آبرفتی با مساحت 653 کیلومتر مربع حدود 70 درصد از گستره دشت را می‌پوشاند. بلندترین نقطه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه حدود 2770 متر (ارتفاعات کوه سیاه) و کمترین

آن حدود 990 متر از سطح دریا می‌باشد. ارتفاعات محدوده به صورت نواری از سمت شرق و جنوب و غرب دشت را احاطه کرده است. شاخه‌های جمع‌آوری کننده رواناب محدوده شامل تعدادی مسیل موازی با جهت جنوب به شمال است که از ارتفاعات جنوب شامل کوه‌های سیاه، قلعه، ته‌کورتی، شیرحصار و کوه‌کمر سرچشمه گرفته و بعد از ورود به دشت گناباد با همان امتداد از معابر خروجی محدوده در حد شمالی آن خارج می‌شوند. در بررسی‌های مربوط به بارندگی محدوده ایستگاه‌های گناباد و گردنه کلات به ترتیب به عنوان معرف دشت و ارتفاعات در نظر گرفته شده‌است. مقدار بارندگی سالانه در دشت و ارتفاعات این محدوده، به ترتیب 145 میلیمتر در دشت و 264 میلیمتر در ارتفاعات می‌باشد. مقدار تبخیر از تشت در دشت و ارتفاعات گناباد به ترتیب 2754 و 2339 میلیمتر در سال برآورد شده‌است. متوسط درجه حرارت سالیانه ایستگاه گناباد 16/2 و ایستگاه گردنه کلات 13/3 درجه سانتیگراد برآورد شده است. محدوده گناباد جزء مناطق خشک و نیمه بیابانی است. میزان بارندگی کم، درجه حرارت بالا و در نتیجه میزان تبخیر در آن بالاست. این امر در مناطق دشتی و پست بیشتر مشهود است. در این منطقه جریان آب سطحی وجود ندارد. به دلیل اختلاف ارتفاع و شیب نسبتاً زیاد رواناب‌های حاصل از بارندگی عمدتاً به صورت سیلاب از نواحی مرتفع به نواحی پست‌تر جریان می‌یابد. این سیلاب‌ها عمدتاً در مخروط افکنه‌های جنوب شهر گناباد نفوذ می‌کنند و در تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی منطقه نقش موثری را ایفا می‌نمایند. بنابراین تنها راه حیات از گذشته‌های دور تاکنون در این منطقه استفاده از آب زیرزمینی از طریق حفر قنات یا کاریز است.

### 3-1- هواشناسی محدوده گناباد

عمده پارامترهای اقلیمی یک محدوده عبارت است از بارش، دما و تبخیر. به منظور بررسی وضعیت هواشناسی محدوده مورد مطالعه که نقش اساسی در وضعیت منابع آب دارد، پارامترهای جوی ذکر شده مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



شکل 1-1- موقعیت حوزه آبخیز گناباد و مظهر قنات‌های موجود در حوزه

### 1-3-1- بارندگی

بارندگی از اساسی‌ترین پارامترهای هواشناسی بوده و بیشترین نقش را در شکل‌گیری منابع آب هر منطقه دارد. در بررسی‌های مربوط به بارندگی حوضه آبرگیر گناباد ایستگاه‌های شهر گناباد و گردنه کلات به ترتیب به عنوان معرف دشت و ارتفاعات در نظر گرفته شده‌است. میانگین مقدار بارندگی سالانه در ایستگاه‌های دشت و ارتفاعات این محدوده، به ترتیب 145 و 264 میلیمتر می‌باشد. توزیع بارش ماهانه در جدول (1-1) ارائه گردیده است.

### 1-3-2- تبخیر

عامل تبخیر در محاسبات بیلان آب نقشی تعیین کننده دارد، چرا که میزان آب تبخیر شده از کشتزارها و سطوح آزاد آب بخش اصلی آب‌های خروجی از محدوده را تشکیل می‌دهند. مقادیر تبخیر از سطح آزاد آب در محدوده، براساس آمار تبخیر از تشت ایستگاه تبخیرسنجی گناباد در دشت و ارتفاعات محدوده به ترتیب برابر با 2754/1 و 2339/5 میلیمتر می‌باشد. همچنین حداقل و حداکثر مقدار متوسط تبخیر از تشت سالانه محدوده به ترتیب برابر با 1800 و 3000 میلیمتر می‌باشد. توزیع ماهانه تبخیر در دشت و ارتفاعات محدوده در جدول 2-1 ارائه شده است.

جدول 1-1- مقدار بارندگی ماهانه و سالیانه (بر حسب میلیمتر) در ایستگاه‌های ارتفاعات و دشت محدوده گناباد

ایستگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	سالانه
دشت	0/8	9/3	17/1	21/7	26/9	29/3	26/2	11/9	1/2	0/1	0/2	0/1	145
ارتفاعات	0/8	15/5	34/9	38/5	56/6	55/6	40/6	18	1/8	0/8	0/3	0/6	264

جدول 1-2- مقدار تبخیر ماهانه و سالیانه (بر حسب میلیمتر) از تشت در ایستگاه‌های ارتفاعات و دشت محدوده

ایستگاه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
دشت	225/3	122/7	78/6	44	55/6	97/3	188/7	295/4	413/2	468/9	418/6	345/6	2754/1
ارتفاعات	191/4	104/3	66/8	37/4	47/2	82/7	160/3	250/9	351	398/3	355/6	293/6	2339/5

### 1-3-3- درجه حرارت

به طور کلی در بررسی دمای هوای یک منطقه شاخص‌های حرارتی مختلفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. دما دارای شاخص‌های مختلفی است که هر کدام به‌منظورهای خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- درجه حرارت متوسط ماهانه و سالانه
- درجه حرارت مطلق حداکثر و حداقل ماهانه و سالانه
- درجه حرارت متوسط حداکثر و حداقل ماهانه و سالانه

به‌منظور بررسی شاخص‌های پنج‌گانه دما در منطقه گناباد، از آمار و اطلاعات ایستگاه تبخیرسنجی گناباد به عنوان معرف محدوده استفاده گردیده است. نتیجه این بررسی در جدول شماره 1-3 ارائه شده است. مقادیر متوسط دمای سالانه در ارتفاعات و دشت محدوده گناباد در جدول 1-4 ارائه شده است. این مقادیر برای ارتفاعات و دشت محدوده فوق به ترتیب برابر با  $13/3$  و  $16/2$  درجه سانتیگراد می‌باشد. دی ماه سردترین ماه ( $3/3$  درجه سانتیگراد) و تیر گرمترین ماه ( $28$  درجه سانتیگراد) است.

جدول 1-3- شاخص‌های حرارتی پنج‌گانه ایستگاه گناباد (درجه سانتی‌گراد)

ماه	دمای حداقل مطلق	متوسط دمای حداقل	دمای متوسط	متوسط دمای حداکثر	دمای حداکثر مطلق
مهر	-16	9/7	18/6	27/5	36
آبان	-25	5	12/7	20/4	32
آذر	-17	-0/6	6/2	13	27
دی	-35	-2/9	3/3	9/5	23
بهمن	-30	-2/2	4/17	10/5	28
اسفند	-11	2/2	8/7	15/4	33
فروردین	-4	8/1	15/2	22/3	36/5
اردیبهشت	-4	13/8	21/5	29/1	40
خرداد	5	17/7	25/7	33/7	46
تیر	10	20	28	36/1	45
مرداد	1	18/2	26/8	35/3	44
شهریور	1	14/7	23/6	32/5	41
سالانه	-10/42	8/64	16/21	23/78	35/96

جدول 1-4- توزیع ماهانه دما در ارتفاعات و دشت محدوده گناباد (درجه سانتی‌گراد)

ایستگاه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
دشت	18/6	12/7	6/2	3/3	4/2	8/7	15/2	21/5	25/7	28	26/8	23/6	16/2
ارتفاعات	14/1	8/9	4/5	2/7	4/9	9/1	13/7	18/3	21/6	22/5	21/2	18/2	13/3

### 1-3-4- اقلیم منطقه

اقلیم یک ناحیه ترکیبی از مجموعه عوامل و متغیرهای آب و هوایی، خصوصیات جوی، طبیعی و جغرافیایی است که برای دوره‌های طولانی مدت تعریف می‌شود. برای تعیین اقلیم منطقه از معادله دومارتن (معادله 1-1) استفاده شده است.

$$I = P/(T+10) \quad (1-1)$$



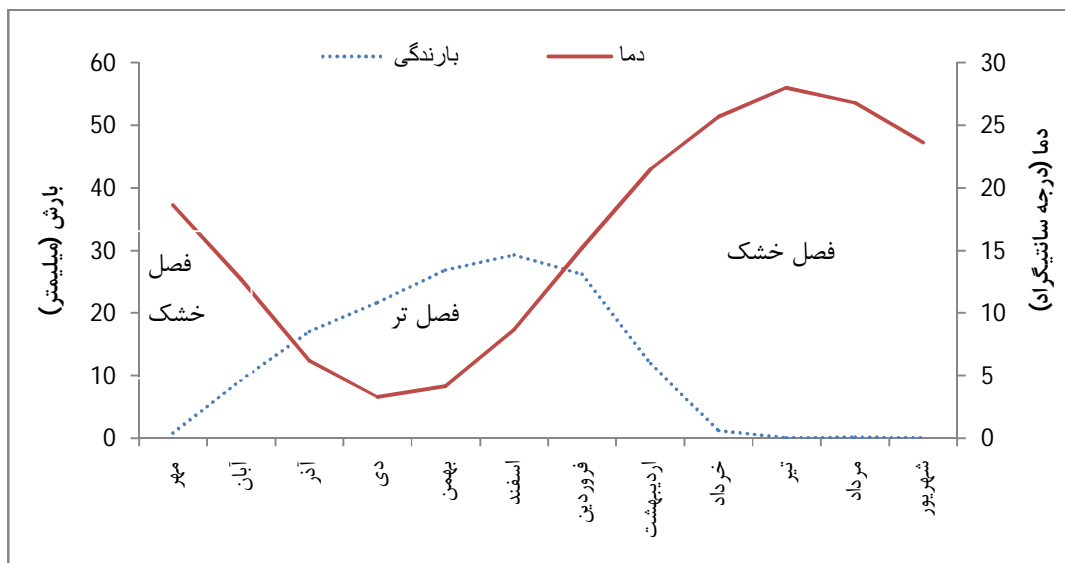
که در این معادله P متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر، T متوسط دمای سالانه بر حسب درجه سانتیگراد و I ضریب خشکی می‌باشد.

با استفاده از معادله (1-1) مقدار ضریب خشکی برای دشت گناباد حدود 5/5 و برای ارتفاعات 11/3 بدست آمده است. براساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط دمارتن (جدول 1-5)، اقلیم دشت و ارتفاعات محدوده مورد مطالعه به ترتیب از نوع خشک و نیمه خشک می‌باشد.

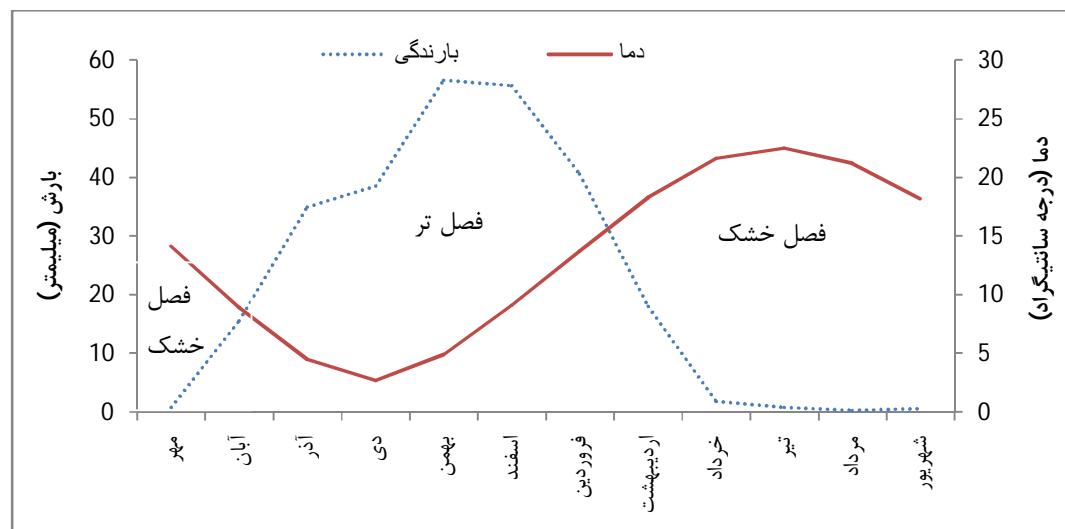
به منظور تعیین دوره‌های تر و خشک در منطقه مورد مطالعه از نمودار امپروترمیک که براساس متوسط دما و بارش ماهانه ترسیم می‌گردد، استفاده شده است. در نمودار ترسیم شده ماههایی که در آنها محورهای بارش و دما یکدیگر را قطع می‌کنند و منحنی دما بالاتر از منحنی بارش قرار دارد ماه‌های خشک محسوب می‌شوند. شکل‌های 1-2 و 1-3 نمودارهای امپروترمیک دشت و ارتفاعات محدوده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های 1-2 و 1-3 ملاحظه می‌شود، در منطقه مورد مطالعه در نواحی ارتفاعات طول دوره فصل تر بیشتر از نواحی دشتی محدوده و از اواسط آبان ماه شروع و تا اواخر فروردین ماه ادامه دارد در حالی که در نواحی دشت فصل تر از اوایل آذرماه شروع و تا اوایل فروردین ماه ادامه دارد.

جدول 1-5- طبقه بندی دمارتن (علیزاده، 1381)

نوع اقلیم	محدوده ضریب خشکی دمارتن (I)
خشک	کمتر از 10
نیمه خشک	10 تا 19/9
مدیترانه‌ای	20 تا 23/9
نیمه مرطوب	24 تا 27/9
مرطوب	28 تا 34/9
بسیار مرطوب	بیشتر از 35



شکل 1-2- نمودار امبروترمیک دشت محدوده مورد مطالعه (براساس داده‌های ایستگاه تبخیرسنجی شهر گناباد)



شکل 1-3- نمودار امبروترمیک ارتفاعات محدوده مورد مطالعه (براساس داده‌های ایستگاه باران‌سنجی گردنه کلات)

#### 1-4- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه به لحاظ تقسیمات زمین‌شناسی ایران در زون ایران مرکزی قرار دارد. ایران مرکزی یکی از واحدهای اصلی و عمده‌ای است که به شکل مثلث در مرکز ایران قرار دارد و جزء بزرگ‌ترین و پیچیده‌ترین واحد زمین‌شناسی به شمار می‌رود. در این واحد، قدیمی‌ترین سنگ‌های دگرگون شده (پروکامبرین) تا آتشفشان‌های فعال و نیمه‌فعال امروزی وجود دارد. در واقع این منطقه را می‌توان محل قدیم‌ترین قاره در ایران محسوب داشت که حوادث زمین‌شناسی فراوانی به خود دیده است.

#### 1-4-1- چینه‌شناسی محدوده مطالعاتی گناباد

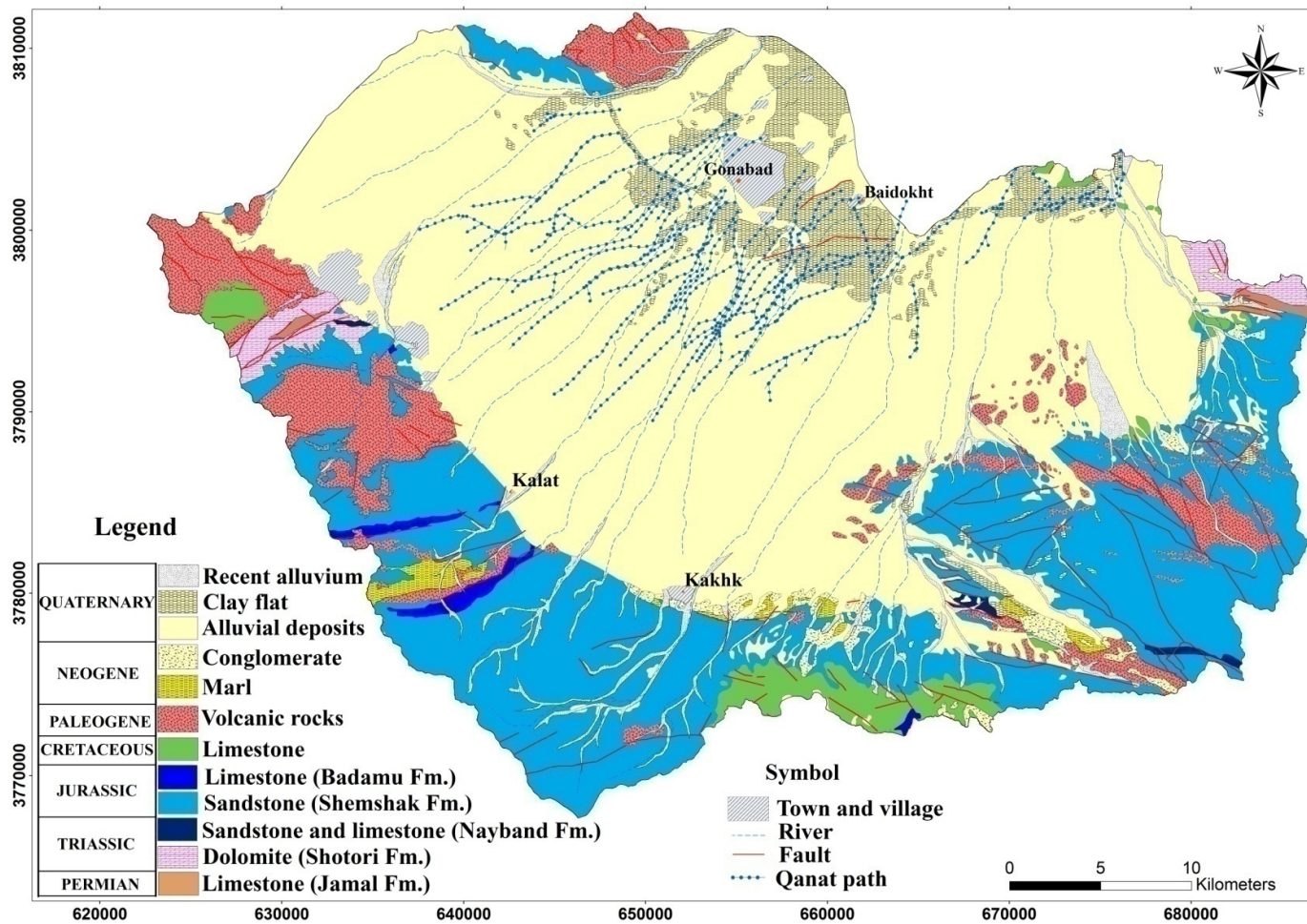
واحدهای زمین‌شناسی محدوده گناباد بسیار متنوع بوده و از سازندهای دوره پالئوزوئیک تا رسوبات عهد حاضر را شامل می‌شود (شکل 1-4). قدیمی‌ترین تشکیلات موجود در سطح منطقه مورد مطالعه رسوبات پالئوزوئیک است که در قسمتی از بخش شرقی حوضه رخنمون دارد.

رسوبات مزوزوئیک شامل سازندهای شتری، شمشک و بادامو و آهک‌های کرتاسه است که در بخش‌های مختلف حوضه (به‌ویژه ارتفاعات جنوبی) گسترش قابل توجهی دارد. تشکیلات آذرین پالئوژن در غرب و شمال‌غرب دشت رخنمون داشته و رسوبات نئوژن نیز در بخش‌های مختلف حوضه گسترش یافته است. در این بخش ابتدا چینه‌شناسی تشکیلات موجود در محدوده گناباد بررسی شده و سپس وضعیت تکتونیکی منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد (نقشه زمین‌شناسی 1:100000 گناباد).

#### 1-1-4-1- سازندهای پالئوزوئیک

##### - سازند جمال

این سازند شامل آهک ضخیم لایه توده‌ای به رنگ خاکستری روشن تا تیره و دولومیت متوسط لایه به رنگ قهوه‌ای روشن است که زیر تاثیر دگرگونی ناحیه‌ای ضعیفی قرار گرفته و تبلور دوباره در آنها پدیدار شده است و بخش اعظم ارتفاعات کوه شتران در شرق دشت گناباد را تشکیل می‌دهند.



شکل 1-4- نقشه زمین‌شناسی محدوده گناباد و موقعیت مسیر قنات‌ها (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی 1:100000 گناباد)

همبری سازند جمال با واحدهای سنگی جوانتر، تقریباً در بیشتر منطقه، گسله است. در پاره‌ای نقاط نیز رسوبات سنوزوئیک و کواترنر با همبری ناپیوستگی زاویه‌ای بر روی آنها نهاده می‌شود. درزه‌ها از ساختمان‌های زمین‌شناختی هستند که به فراوانی در آنها دیده می‌شوند که دلیل وجودی آنها را شاید بتوان وجود همبری گسله این سازند با واحدهای جوان‌تر و خواص فیزیکی سنگ آهک و دولومیت دانست، که سبب می‌شود مجموعه یاد شده رفتاری شکننده از خود به نمایش بگذارد. شکستگی‌ها از نوع کششی و با بازشدگی همراهند و در امتداد آنها کلسیت به شکل ثانویه جایگزین شده است. مطالعه میکروفسیل‌های به دست آمده از این مجموعه سنگی، سن پرمین بالایی را برای آنها مشخص می‌سازد.

#### 1-4-1-2- مزوزئیک

##### - سازند شتری

برونزد این سازند در کوه شتران واقع در شرق گناباد و نیز در غرب محدوده دیده می‌شود. سازند یاد شده به گونه هم شیب بر روی سازند جمال جای می‌گیرد. آغاز این سازند با آهک خاکستری تیره رنگ و بسیار لایه نازک به ضخامت 50 متر است. بر روی آن واحدی به نسبتاً ضخیم از دولومیت زرد تا قهوه‌ای رنگ متوسط لایه می‌نشیند. ضخامت این بخش نزدیک به 250 متر است. پس از آن مجموعه‌ای شامل آهک و دولومیت متوسط تا ضخیم لایه به رنگ خاکستری تیره جای دارد که ضخامت آن به دلیل به هم ریختگی مجموعه، قابل اندازه‌گیری نیست. مجموعه یاد شده در محدوده گناباد هیچگونه ارتباط عادی با واحدهای جوانتر از خود نشان نمی‌دهد. هیچگونه فسیل شاخصی از این مجموعه بدست نیامده است. ولی برپایه رابطه آن با سازند جمال و همسانی رخساره‌ای می‌توان آن را هم ارز سازند شتری در منطقه معرفی نمود. به دلیل نداشتن رابطه عادی میان این واحد و سازند نایبند و همچنین به هم ریختگی آن، اندازه‌گیری ضخامت این مجموعه دشوار است.

## - سازند نایبند

این سازند با ضخامتی در حدود 300 متر از دو عضو تشکیل شده که به شرح زیرند:

### عضو آهکی نایبند

این واحد در یک توالی از پایین به بالا شامل آهک شیلی با رنگ روشن، آهک ضخیم لایه به رنگ تیره، تناوب آهک نازک لایه، آهک شیلی، ماسه سنگ نازک لایه تا متوسط لایه، آهک اینتراکلاستی و آهک اونکولیت دار نازک لایه با رنگ کلی خاکستری تیره تا روشن است.

کاملترین رخنمون مجموعه یاد شده در کنج جنوب شرق محدوده در کبوترکوه دیده می شود. در این منطقه سازند نایبند در هسته یک تاقدیس که یال جنوبی آن برگشتگی دارد، جای می گیرد. محور تاقدیس راستایی تقریباً شرقی - غربی دارد و در اثر حرکت گسل راندگی که در یال جنوبی آن عمل کرده است، پدیدار شده است. رخنمون دیگر این واحد در دیگر قسمت های شرق محدوده در کوه چنگور و کوه پوزه بادام قرار دارد. در این ناحیه، تنها، بخش آهکی ضخیم لایه سازند نایبند دیده می شود که به شکل یک سفره رورانده بر روی سنگ های آتشفشانی با سن ژوراسیک قرار گرفته است. حرکت گسل سبب پیدایش درزه های سامانه ای فراوانی در مجموعه سنگ آهک شده است. درزه ها، به طور عمده از نوع کششی هستند که با بازشدگی و تشکیل رگه های کلیستی در امتداد آنها همراه بوده است. بر پایه فسیل های مطالعه شده سن این واحد تریاس پیشنهاد شده است. همبری زیرین این واحد با سنگ های کهن تر در منطقه دیده نمی شود ولی همبری زبرین آن با عضو ماسه سنگی سازند نایبند در شمال کبوتر کوه رخنمون دارد. ضخامت این واحد در حدود 210 متر برآورد شده است.

### عضو ماسه سنگی نایبند

این عضو، شامل ماسه سنگ کوارتزیتی متوسط تا ضخیم لایه به رنگ تیره است. برونزد اصلی آن در جنوب شرق محدوده در شمال کبوتر کوه و در یال شمالی تاقدیس برگشته عباس آباد جای دارد. این واحد به گونه هم شیب بر روی عضو آهکی سازند نایبند نهشته شده و مجموعه آتشفشانی ژوراسیک

بر روی آن جای گرفته است. از این رو، از دیدگاه موقعیت چینه نگاشتی، می توان آن را بخش زیرین سازند نایبند در نظر گرفت. ضخامت این عضو نزدیک به 90 متر است.

### - سازند شمشک

سازند شمشک بیشترین گسترش را در سطح منطقه دارد. فراوانی ساختمان های زمین شناختی مانند چین های برگشته، چین های خوابیده، گسل های راستالغز و راندگی سبب شده است تا این سازند گسترش سطحی زیادی پیدا کند و ضخامت حقیقی آن نامشخص بماند. سازند شمشک در منطقه از سه عضو رسوبی شامل عضو ماسه سنگی و اسلیتی، عضو اسلیتی و ماسه سنگی و عضو ماسه سنگی و یک عضو آتشفشانی تشکیل شده است.

شواهد موجود نشان می دهند که واحدهای رسوبی سازند شمشک در محیط کم ژرفای دریایی نهشته شده اند. در شمال شرق محدوده در کبوترکوه همبری مجموعه یاد شده با سازند نایبند، با واسطه سری سنگ های آتشفشانی همراه است.

عدسی هایی از سنگ جوش، با گسترش به نسبت ناچیز، به گونه ای محدود، در میان لایه های ماسه سنگی وجود دارد. در داخل مجموعه رسوبی شمشک، سیل و توده های نفوذی کوچکی با جنس میکروگابرو جایگیری کرده اند که به علت پراکندگی در سطح منطقه و کوچک بودن از نظر اندازه مشخص نمودن آنها در سطح نقشه مقذور نبوده است. سازند شمشک، در محدوده گناباد، زیر تاثیر دگرگونی ناحیه ای قرار گرفته و برگوارگی در مجموعه های سنگی آن پدیدار شده است. برگواره ها به طور عمده به موازات سطوح لایه بندی گسترش یافته است. این سازند در جنوب شرق شهر گناباد، زیر تاثیر نفوذ گرانیتهای قرار گرفته و در حاشیه این همبری کوارتزیت هورنفلس ایجاد شده است.

### عضو آتشفشانی

این عضو شامل توف، آگلومرا، سنگ های آتشفشانی با بافت های بادامی، کوارتز آندزیت، کوارتز تراکی آندزیت با رنگ کلی سبز تیره تا بنفش تیره است. مجموعه سنگی تشکیل دهنده این عضو نشان از

فعالیتی آتشفشانی با ترکیب حداوسط را دارند. این واحد به بهترین شکل در جنوب شرق محدوده رخنمون دارد که بر روی عضو ماسه سنگی نایبند جای گرفته است. در همین نقطه عضو اسلیتی، ماسه سنگی شمشک بر روی این واحد جای می‌گیرد. در نقاط دیگر همبری واحد یاد شده با واحدهای مجاور آن گسله است. بر پایه اطلاعات موجود در محدوده گناباد، عضو آتشفشانی سازند شمشک را می‌توان قاعده این سازند در منطقه معرفی نمود. ضخامت این واحد در جنوب شرق محدوده در کبوتر کوه در حدود 230 متر تخمین زده می‌شود.

### **عضو ماسه سنگی و اسلیتی**

این رخساره شامل تناوبی از ماسه سنگ دگرگونه به رنگ خاکستری تیره تا سبز تیره با فیلیت و اسلیت تیره تا سیاه رنگ است. ماسه سنگ‌های این مجموعه، به طور عمده، کوارتزیتی، یا فلدسپاتیک و نازک لایه تا متوسط لایه هستند. ساختمان‌های رسوبی همچون ریپل مارک و ساخت‌های وزنی به فراوانی در آنها دیده می‌شود. رخ مزرر از ساختمان‌های ثانویه ای است که زیر تاثیر دگرگونی ناحیه‌ای در این مجموعه‌ها ایجاد شده است. کانی‌های تشکیل دهنده ماسه سنگ‌ها به طور عمده شامل پلاژیوکلاز، کوارتز و بیوتیت است که با سیمان کربناته یا اکسید آهن در کنار هم قرار گرفته‌اند. شیل‌های دگرگونه نیز، به طور عمده، شیل سیلتی با رنگ تیره است که به صورت میان لایه‌ای در کنار ماسه سنگ‌های دگرگونه جای گرفته‌اند. عضو یاد شده قله‌هایی به نسبت بلند با شیب دامنه تند را در جنوب محدوده پدید آورده است.

### **عضو اسلیتی و ماسه سنگی**

این عضو شامل تناوبی از اسلیت به رنگ خاکستری تیره و ماسه سنگ دگرگونه تیره رنگ نازک لایه تا متوسط لایه است. رخنمون این عضو در ارتفاعات جنوبی و شمال غربی گناباد قابل مشاهده است. در ارتفاعات جنوبی این مجموعه بلندی‌های صعب العبوری را ایجاد نموده است. شیل‌های دگرگونه، به



طور عمده، رس سیلتی دارند که واجد میکا و سریسیت فراوانی هستند. ماسه سنگ‌های دگرگونه نیز به طور عمده کوارتز فلدسپاتیک هستند.

### عضو ماسه سنگی

این عضو شامل کوارتز آرنیت دگرگونه با رنگ تیره و متوسط لایه با میان لایه‌هایی محدود از فیلیت تیره رنگ است. ماسه سنگ دگرگونه این عضو، به طور عمده، دانه ریز و دارای میکا، فلدسپار، کوارتز و سریسیت است. کانی‌های تورمالین زیرکن و آپاتیت به عنوان کانی‌های همراه نیز در آنها یافت می‌شود. در جنوب شرق محدوده، بهترین رخنمون این واحد سنگی دیده می‌شود. در محل مذکور، عضو ماسه سنگی شمشک زیر نفوذ توده گرانیتی قرار گرفته که سبب گردیده تا ماسه سنگ در مجاورت توده تحت تاثیر دگرگونی همبری قرار بگیرد. در اثر این دگرگونی در حاشیه گرانیت، کوارتز هورنفلس پدیدار شده است. دایک‌های گرانیتی نیز این مجموعه را زیر تاثیر قرار داده و آنها را بریده‌اند. مطالعات پالینولوژی بر روی نمونه‌های برداشته شده از واحدهای شیلی دگرگونه سازند شمشک سن رتین تا لیاسیک را برای آن مشخص می‌کند.

### - سازند بادامو

این سازند شامل تناوب آهک نازک لایه تا متوسط لایه با رنگ خاکستری تا قهوه‌ای روشن و آهک اینتراکلاستی و آهک ماسه‌ای است. این سازند زیر تاثیر دگرگونی ناحیه‌ای ضعیفی قرار گرفته و به میزان کمی تبلور دوباره در آن ایجاد شده است. رخنمون این مجموعه در جنوب غرب محدوده مشاهده می‌گردد که در این محل امتداد لایه‌های سنگی سازند بادامو و سازند شمشک در همبری آنها بریده و قطع شده و خردشدگی نیز در محل ارتباط آنها با یکدیگر دیده می‌شود. به همین دلیل ارتباط سازند بادامو و سازند شمشک در این ناحیه گسله است. سازند بادامو به شکل بی ریشه، که بر جا مانده‌هایی از یک سفره رورانده است، بر روی سازند شمشک جای گرفته است. فسیل‌های یافت شده

از این سازند، سن ژوراسیک میانی تا بالایی را برای آن مشخص می‌کنند. به دلیل نداشتن رابطه عادی میان این سازند و واحدهای سنگی کرتاسه در منطقه، اندازه‌گیری ضخامت آن ممکن نیست.

### - واحد آهکی کرتاسه زیرین

این مجموعه شامل آهک ضخیم لایه تا توده‌ای است که واجد فسیل‌های دو کفه‌ای رودیست و پکتن است. در جنوب محدوده در کوه سیاه، این مجموعه با ارتباطی گسله از نوع راندگی در همبری سازند شمشک قرار می‌گیرد. بیرون‌زدگی عمده این مجموعه در کوه کمرخید است. در اینجا، مجموعه کرتاسه به صورت سفره راندگی بر روی مجموعه ژوراسیک قرار گرفته است. وجود خردشدگی شدید و برش گسله و همچنین بریدگی امتداد لایه‌های کرتاسه در همبری آنها با سازند شمشک دلیلی بر وجود این ارتباط گسله است. رخنمون دیگر این واحد در شمال شرق محدوده قرار دارد. در اینجا، آهک کرتاسه در همبری نهشته‌های سنوزوئیک جای دارد. بر پایه فسیل‌های یافت شده در این واحد، سن کرتاسه زیرین را می‌توان برای آن پیشنهاد نمود.

### 1-4-1-3-سنوزوئیک

### - واحدهای آتشفشانی

واحدهای سنگی با سن سنوزوئیک در محدوده گناباد شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی نیمه عمیق و نفوذی و سنگ‌های رسوبی آواری است. سن یا محدوده سنی دقیقی برای سنگ‌های آذرین نمی‌توان مشخص کرد ولی چون این مجموعه، واحد سنگی با سن کرتاسه بالایی را زیر تاثیر داشته است و واحد سنگی با سن میوسن زیر تاثیر این فازهای ماگمایی نبوده‌اند، محدوده سنی پالتوسن تا ائوسن را برای آنها در نظر گرفته‌اند. واحدهای آتشفشانی در قسمت‌های مختلف محدوده گناباد متفاوت است که در زیر به تفکیک آمده است. در غرب محدوده سنگ‌های آذر آواری آگلومرا با رنگ سبز تیره تا قرمز به همراه توف (قطعات تشکیل دهنده آگلومرا شامل تراکی آندزیت و کوارتز تراکی

آندزیت) که فراورده فوران آتشفشانی با ترکیب حدواسط هستند رخنمون دارند. ضخامت این سنگ‌ها از 90 تا 200 متر متغیر می‌باشد.

در جنوب شرق محدوده بازالت، آندزیت، تراکی آندزیت، بازالت‌های منشوری، توف و آگلومرا که رنگ کلی آن سبز تیره تا بنفش تیره است و در بعضی نقاط بر روی ژوراسیک جای می‌گیرد رخنمون آن دیده می‌شود. این واحد توسط گرانیت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در حاشیه نفوذ گرانیت، آلتراسیون کائولن ایجاد شده است. ضخامت این مجموعه از 80 تا 180 متر متغیر است. همچنین در این قسمت محدوده ریولیت، داسیت و تراکیت رخنمون دارد که توسط رسوبات کواترنر پوشیده می‌شود. این مجموعه نشان دهنده فوران ماگمایی با ترکیب اسیدی تا حدواسط است که قسمت‌هایی از منطقه را زیر تاثیر قرار داده است.

در شمال غرب و جنوب غرب محدوده بازالت، بمب‌های آتشفشانی، شیشه آتشفشانی، توف و آگلومرا به رنگ سبز تیره دیده می‌شود. ضخامت این مجموعه از 80 تا 100 متر تغییر است. علاوه بر مجموعه بالا در شمال غرب محدوده برش اسیدی تا بازیگ با رنگ کرم به گونه‌ای محدود رخنمون دارد. این مجموعه آذر آواری در رابطه با فعالیت آتشفشانی با ترکیب اسیدی است. ضخامت این واحد از 50 تا 90 متر در تغییر است.

در شمال غرب محدوده واحد آذر آواری شامل برش و توف اسیدی به رنگ سفید تا شیری رنگ که قطعات برش شامل سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب بازیگ تا حدواسط و سنگ ماسه و فیلیت است که توسط سیمانی آتشفشانی با ترکیب اسیدی به یکدیگر جوش خورده اند. واحد سنگی یاد شده بر روی مجموعه اسلیت و ماسه سنگ ژوراسیک جای گرفته قابل مشاهده است. ضخامت این واحد حدود 50 تا 70 متر است.

## - مارن پلیوسن

این واحد شامل مارن نازک لایه است. رخنمون آن در جنوب و جنوب شرق محدوده گناباد و در مجاورت شهر کاخک دیده می‌شود. مجموعه سنگی نامبرده با ناپیوستگی زاویه‌ای بر روی سنگ‌های کهن تر قرار می‌گیرد. ضخامت این واحد در شرق شهر کاخک نزدیک به 180 متر است.

## - کنگلومرای پلیوسن

این واحد شامل تناوب کنگلومرا و ماسه سنگ به رنگ قرمز روشن است. قطعات تشکیل دهنده کنگلومرا شامل سنگ‌هایی با سن پالئوزوئیک، مزوزوئیک و آتشفشانی سنوزوئیک است که توسط سیمانی، به نسبت سست در کنار هم جای گرفته اند. رخنمون این واحد نیز در جنوب و جنوب شرق محدوده جای دارد. این مجموعه به گونه دگرشیب بر روی واحدهای کهن تر جای می‌گیرد. ارتباط واحد نامبرده با واحد مارن پلیوسن به گونه ناپیوستگی زاویه‌ای است. کنگلومرای یاد شده در بیشتر رخنمون‌ها، تقریباً افقی است و در پاره‌ای نقاط نیز از حالت افقی خارج شده ولی شیبی بسیار کم را بخود گرفته است. از این رو، بر پایه موقعیت چینه‌نگاری و وضعیت ساختمانی، این واحد را می‌توان در محدوده سنی پلیوسن تا کواترنر قرار داد. این مجموعه در سطح منطقه به شکل تپه‌های منفرد و کم شیب دیده می‌شود. ضخامت این واحد از 200 تا 250 متر متغیر است. تشکیلات پلیوسن نقش سنگ کف آبخوان آبرفتی محدوده گناباد را ایفا می‌نمایند.

## 1-4-1-4- کواترنر

تراس‌ها و مخروط‌افکنه‌های آبرفتی کواترنری در سطح وسیعی رخنمون داشته و 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 دانه‌درشت تر بوده و به واسطه نفوذ سیلاب‌ها نقش تغذیه‌ای اصلی آبخوان آبرفتی دشت را ایفا می‌نمایند. به تدریج با نزدیک شدن به نقاط خروجی دشت، این تشکیلات ریزدانه تر شده

و نفوذپذیری آنها کاهش می‌یابد، تا آنجایی که در حوالی شهر گناباد و خروجی این دشت پهناهای رسی می‌باشد. انباشته‌های آواری کنونی توسط سیلاب‌های رودخانه‌های فصلی حمل شده، در طول مسیر کانالها و مجاری عبور آب بر جای گذاشته می‌شوند و اندازه آنها از حد ماسه تا حد قلوه سنگ متفاوت است. اندازه دانه‌های این انباشته‌ها بستگی به فاصله آنها از منشأ تشکیل آنها و همچنین شدت آب در نواحی مختلف مسیر آب دارد.

#### 1-4-2- زمین شناسی ساختمانی

همانطور که قبلاً اشاره شد محدوده گناباد بخشی از بلوک لوت است، بلوک لوت خود بخشی از خرد قاره شرق ایران به شمار می‌آید. بلوک یاد شده از غرب به گسل نایبند و کوه‌های چین خورده شتری و ایران مرکزی و از شرق به ارتفاعات شرق ایران و ملانژ و فلیش محدود می‌شود. مرز شمالی بلوک لوت، گسل درونه و حد جنوبی آن گودال جازموریان و مجموعه آتشفشانی شاهسواران است. ساختمان‌های تکتونیکی اصلی در منطقه، گسل‌های راستا لغز عمیق با حرکت خمیده است. خرد قاره ایران به بلوک‌های کوچکتر تقسیم شده است که هر یک از آنها حالت خمیده پیدا کرده و نسبت به یکدیگر نیز از خود حرکت انجام می‌دهند.

با بررسی گسل‌های اصلی موجود در محدوده گناباد نیز مشخص می‌شود که ساختارهای اصلی تکتونیکی، گسل‌های راستالغزند که با حرکت خود ریخت ساختاری منطقه را شکل می‌دهند.

بررسی ساختمان‌های چین خورده در منطقه، روند همگانی آنها را مشخص می‌سازند. راستای محور چین خوردگی‌ها به طور غالب، شرقی - غربی است. چین خوردگی‌های موجود در واحدهای کرتاسه تا عهد حاضر، به طور عمده، از نوع چین‌های باز با زاویه بین یالی 70 تا 120 درجه است. سطح محوری این چین‌ها مایل است و به طور عمده، دارای گرایش به سمت شمال هستند. چین‌های موجود در واحدهای سنگی تریاس و ژوراسیک، به طور عمده، از نوع چین‌های بسته با زاویه بین یالی 30-70 درجه است. چین‌ها در این محدوده، بیشترشان، از نوع چین‌های برگشته یا چین‌های خوابیده است.

گرایش سطح محوری در این چین‌ها، به طور عمده، به سوی شمال است. این نوع چین خوردگی سبب پیدایش ضخامت غیرواقعی در رسوبات ژوراسیک تریاس شده است. بررسی درزه‌ها در منطقه که در راستای تهیه نقشه زمین شناسی صورت گرفته است، دو سیستم متفاوت شکستگی را مشخص می‌سازد. یک سری از شکستگی‌ها، درزه‌های کششی هستند. این درزه‌ها دارای دو روند ناهمسانند، یک سری از آنها دارای راستای شمال غرب - جنوب شرق و سری دیگر دارای راستای شمال شرق جنوب غربند. در امتداد این درزه‌ها، بازشدگی در واحدهای سنگی ایجاد شده است که در پاره‌ای نقاط این بازشدگی‌ها توسط کلسیت، سیلیس و باریت پر شده است. سری دوم درزه‌ها، درزه‌های برشی است. یک دسته یا مجموعه از این نوع درزه‌ها دارای راستای شرقی-غربی هستند و سری دیگر دارای روند شمال شرقی جنوب غربی می‌باشند. در سطح این درزه‌ها آثار لغزش، به طور کامل، آشکار است. مطالعه سامانه‌ای ساز و کار این درزه‌ها جهت نیروی تشکیل دهنده آنها را مشخص کرد. براین پایه، راستای بیشترین تنش ایجاد کننده این درزه‌ها، جنوب شرقی است.

#### - گسل کاخک

از گسل‌های عمده در منطقه می‌توان به گسل راستالغز کاخک با مولفه چپ بر اشاره کرد. این گسل دارای راستای جنوب شرق - شمال غرب است و از رده گسل‌های جنبا و کواترنری محسوب می‌گردد که در مسیر حرکت خود سبب بریدگی در واحدهای سنگی و کج شدگی در مسیر آبراهه‌ها شده است.

#### - گسل پارچ

گسل پارچ، اریب لغز است و مولفه غالب در آن راستا لغز و از نوع چپ بر می‌باشد. این گسل دارای روندی غربی - شرقی است.

## - گسل ترنج

این گسل از گسل‌های عمده دیگر ناحیه است که راستای شرقی - غربی دارد و مولفه اصلی آن راستالغز چپ بر است.

در حد فاصل گسل‌های کاخک، پارچ، ترنج تا جنوب شرق محدوده شمار بالایی گسل به موازات آنها قرار دارند که دارای ساز و کار مشابه آنها هستند. در کوه هنگام، مجموعه‌ای از گسل‌های راستالغز موازی که دارای راستای شمال غرب - جنوب شرق هستند دیده می‌شوند. از این مجموعه می‌توان به گسل راستالغز میان با ساز و کار راست بر اشاره کرد. گسل دیگر در این مجموعه، گسل اریب لغز هنگام است. گسل مورب لغز کبوتر کوه نیز در جنوب کوه هنگام واقع شده است. این گسل دارای راستای شمال غربی - جنوب شرقی است که در شرق منطقه روند آن شرقی - غربی می‌شود. شماری گسل نیز به موازات گسل کبوتر کوه، در جنوب کوه هنگام، واحدهای سنگی را تحت تاثیر قرار داده‌اند. در شمال غرب گناباد و در کوه شکسته چاه سد، مجموعه‌ای از گسل‌های راستالغز وجود دارند. این گسل‌ها، به طور عمده، اریب لغزند که مولفه امتدادی حرکت، در آنها چیره و غالب است. حرکت در بیشتر این گسل‌ها از نوع چپ بر است. گسل‌های راستالغز در بخش پایانی خود که حالت منحنی به خود می‌گیرند می‌توانند مناطق تحت فشار را به شکل گسل‌های راستالغز همگرا ایجاد نمایند. در این صورت مولفه شیبی حرکت گسل، بر مولفه امتدادی آن چیره می‌شود. به همین دلیل گسل‌های راستالغز در انتهای خود می‌توانند به گسل‌های راندگی تبدیل شوند. در این مناطق فشارشی، حتی سفره‌های راندگی نیز ایجاد می‌شوند. مجموعه آهکی کرتاسه و مجموعه آهک نایبند در جنوب شرق محدوده، سفره‌های راندگی هستند که تحت چین ساز و کاری ایجاد شده‌اند. این منطقه از دیدگاه فعالیت‌های ساختاری فعال بوده و از توان لرزه خیزی به نسبت بالایی نیز برخوردار است.

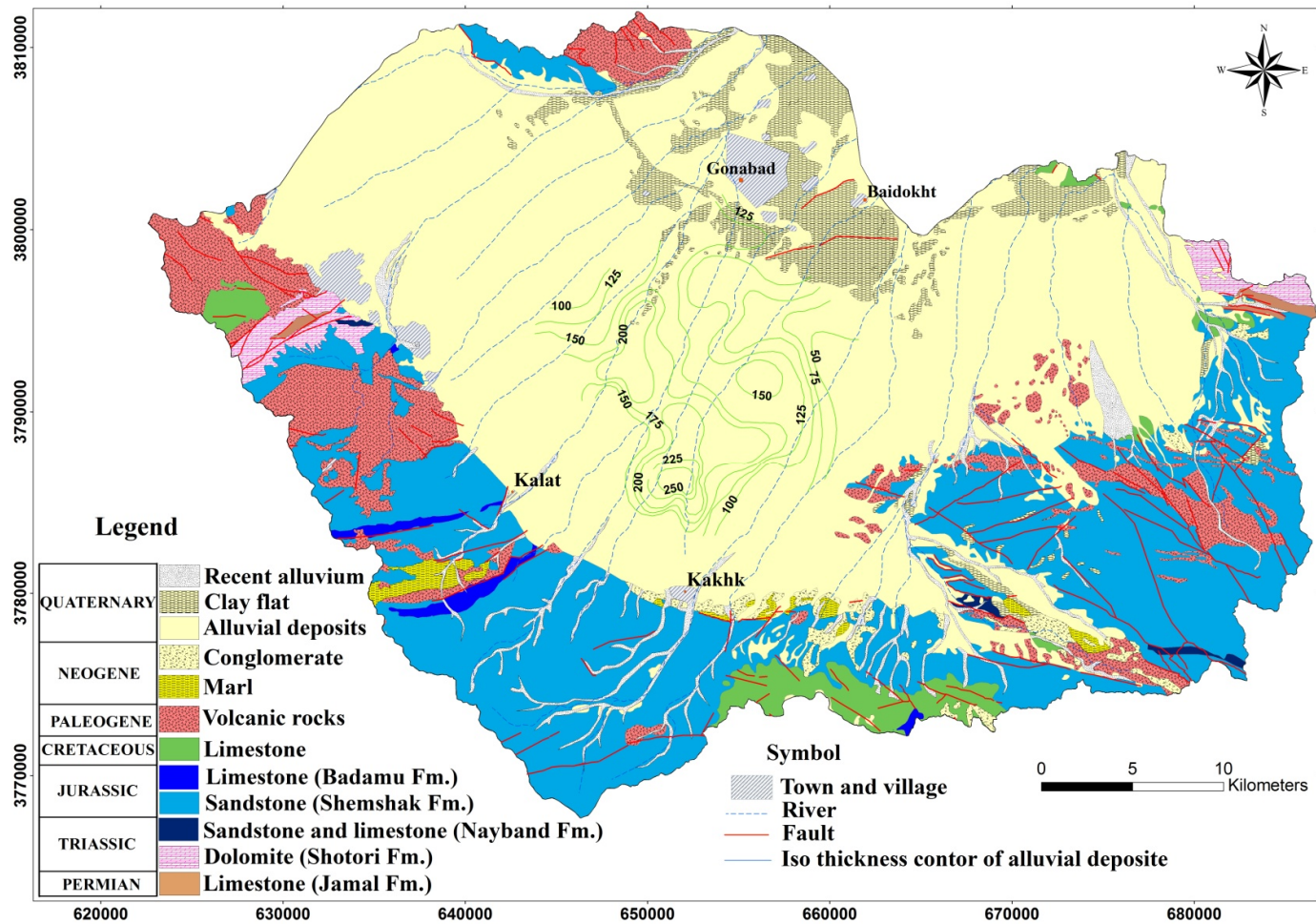
## 5-1- ضخامت رسوبات آبرفتی دشت گناباد

بررسی‌های ژئوفیزیک با استفاده از روش ژئوالکتریک در آبخوان آبرفتی دشت گناباد در سال 1348 توسط کمپانی ژنرال ژئوفیزیک صورت گرفته است. در این مطالعات 85 سونداژ بر روی 13 پروفیل در دشت برداشت شده و براساس آن نقشه هم‌ضخامت آبخوان آبرفتی ترسیم شده است (شکل 1-5). بررسی این نقشه نشان می‌دهد که ضخامت آبرفت در دشت گناباد یکسان نبوده و از حداقل 50 متر در بخش شرقی تا بیش از 250 متر در شمال شهر کاخک در نوسان است. ضخامت آبرفت در محدوده شهر گناباد حدود 125 متر برآورد شده است. فروافتادگی سنگ کف در بخش جنوبی دشت گناباد سبب افزایش ضخامت آبرفت به بیش از 250 متر شده است.

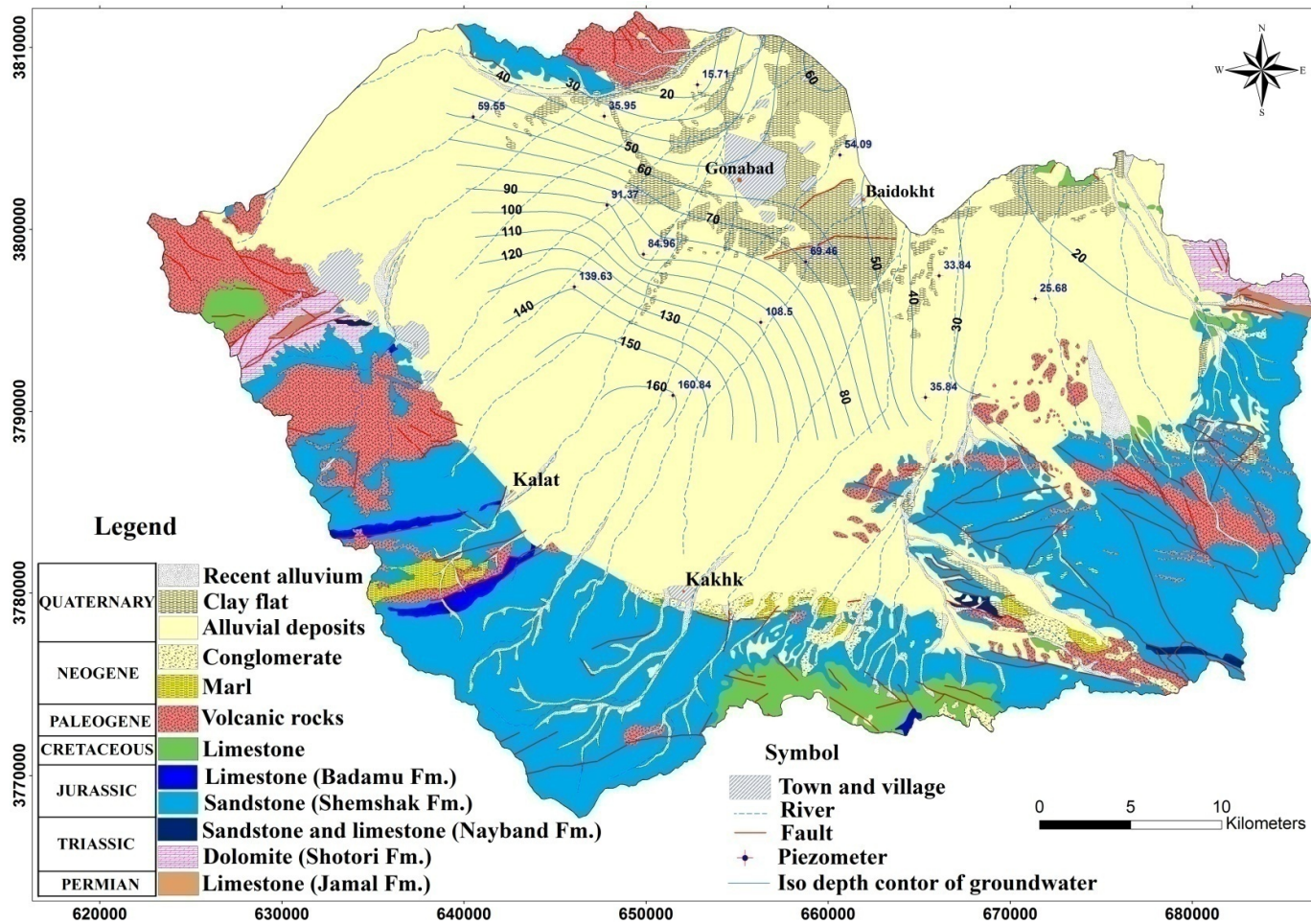
## 6-1- عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی دشت گناباد

تغییرات عمق سطح آب زیرزمینی در آبخوان آبرفتی گناباد متأثر از شیب هیدرولیکی سطح آب و مورفولوژی سطح زمین می‌باشد. حداکثر عمق سطح آب زیرزمینی در حاشیه جنوب‌غربی آبخوان در چاه مشاهده‌ای جاده کاخک (مجاورت ارتفاعات جنوبی) 160/8 متر اندازه‌گیری شده است. با فاصله گرفتن از ارتفاعات جنوب‌غربی به سمت شرق، شمال‌شرقی و شمال، عمق سطح آب به سرعت کاهش می‌یابد، به طوری که از بیش از 160 متر در جنوب آبخوان (چاه مشاهده‌ای جاده کاخک) به کمتر از 60 متر در شمال‌غرب آبخوان (منطقه چاهک) و کمتر از 20 متر در شمال آبخوان (چاه مشاهده‌ای جاده تربت) می‌رسد (شکل 1-6). بررسی عمق سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد که در این محدوده عمق سطح آب کمتر از 5 متر وجود نداشته و مقدار تبخیر از سطح آب زیرزمینی صفر است.





شکل 1-5- نقشه هم ضخامت رسوبات آبرفتی دشت گناباد



شکل 1-6- نقشه هم عمق آب زیرزمینی دشت گناباد (شهریور 1396)

## فصل دوم: مروری بر تحقیقات پیشین

قنات یکی از روش‌های مهم بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی است. خصوصیات هیدروژئولوژیکی سفره‌ای که قنات‌ها در آن حفر شده‌اند تاثیر زیادی در رفتار هیدروژئولوژیکی قنات‌ها دارد. تحلیل‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی برای تهیه یک مدل مفهومی هیدروژئولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### 2-1- معرفی قنات

قنات عبارت است از تونل با شیب ملایم و تعدادی میله چاه که درون مواد آبرفتی حفر شده و آب زیرزمینی را از مناطق مرتفع توسط نیروی گرانش به سمت مناطق پست در پایین دست هدایت می‌کند (Todd and Mays 2005).

قنات‌ها را می‌توان براساس معیارهای مختلفی از جمله طول، آبدهی، عمق، موقعیت جغرافیایی و ساختمان قنات تقسیم بندی کرد. طبق نظر مالکی و خورسندی (1384) قنات‌های با طول کمتر از 5000 متر را قنات‌های کوتاه، طول بین 5000 تا 10000 متر را قنات‌های متوسط و طول بیشتر از 10000 متر را قنات‌های طویل می‌نامند.

قنات‌ها بر اساس موقعیت جغرافیایی نیز به سه دسته دشتی (جلگه‌ای)، کوهستانی و رودخانه‌ای تقسیم می‌شوند (بهنیا 1379).

طبق نظرات بهنیا (1379) و ولایتی و همکاران (1388)، دو عامل اصلی خشکسالی و پیامدهای آن و افت سطح آب ناشی از برداشت بیش از حد از منابع آب باعث کاهش آبدهی قنات‌ها می‌شود. عامل افت سطح آب در 75 سال اخیر باعث بایر شدن 4000 رشته قنات در ایران شده است (خورسندی آقایی و عبدالی 1386).

آبدهی قنات بستگی زیادی به طول قنات به ویژه قسمت تره‌کار قنات دارد که طول قنات نیز به شیب زمین، عمق و شیب سفره آب زیرزمینی بستگی دارد (هاتفی اردکانی و ملکیان 1388). عوامل کلی که

بر روی آبدهی قنات‌ها تاثیرگذارند شامل موارد زیر است (منزوی 1360، بهنیا 1379 و هاتفی اردکانی و ملکیان 1388):

- وسعت و ظرفیت لایه آبدار
- نفوذپذیری رسوباتی که قنات در آنها حفر می شود: تراوایی یا نفوذپذیری زمین در بخش‌های مختلف قنات، تاثیرات متفاوتی دارد، به طوری که افزایش تراوایی در قسمت تره کار باعث افزایش آبدهی قنات و در قسمت خشکه کار باعث هدر رفتن آب و کاهش آبدهی می شود (منزوی 1360).

- ابعاد هندسی قنات: شامل طول تره کار و خشکه کار، سطح مقطع و شیب کوره اصلی است.
- وضعیت حوضه آبرگیر، شامل نوع و میزان بارش، نوع بارش تاثیر زیادی در آبدهی دارد، اگر بارش به صورت برف باشد به علت ذوب تدریجی آن اثر خوبی در آبدهی قنات‌ها دارد (بهنیا 1379).

- تراکم برداشت آب در منطقه
- وضعیت توپوگرافی دشت
- میزان تبخیر از آب قنات

با حفر چاه‌های عمیق در حریم قنات و بروز خشکسالی مداوم میزان آبدهی قنات‌ها به طور مداوم کاهش یافته و قنات‌ها دیگر کارایی گذشته را نداشته و به مرور کنار گذاشته می‌شوند (هاتفی اردکانی و ملکیان 1388). به منظور حفظ این ارزش ماندگار استفاده از اقدامات مناسب در جهت افزایش آبدهی قنات‌ها لازم است، از جمله این اقدامات مطالعه و شناسایی خصوصیات کمی و کیفی این قنات‌هاست.

## 2-2- هیدروژئولوژی

هیدروژئولوژی قنات شامل بررسی تغییرات آبدهی قنات با زمان (هیدروگراف)، منحنی فرود و تعیین حوضه آبگیر قنات می‌باشد. تعداد معدودی از محققین روی هیدروژئولوژی قنات کار کرده‌اند که در زیر نتایج کارهایی که در این زمینه انجام شده است آمده است.

هنری و کرمی (1393) آبدهی قنات‌های منطقه خور را در طی یکسال آبی ماهیانه اندازه‌گیری کردند، آبدهی قنات‌های منطقه مورد مطالعه به دلایلی مانند طول قنات، محل قرارگیری مادرچاه قنات، ویژگی‌های حوضه آبگیر و تاثیر فاضلاب شهر و آب برگشتی کشاورزی بر آب قنات از 4 تا 47 لیتر در ثانیه متفاوت بود. بررسی بارش روزانه و تغییرات آبدهی قنات‌ها نشان داد که علاوه بر مقدار بارش، شدت و تداوم بارش تاثیر مهمی در میزان تغذیه به قنات دارد. با ترسیم هیدروگراف قنات‌ها، تمام قنات‌های منطقه در اردیبهشت ماه بیشترین مقدار دبی را در سال آبی داشتند که متاثر از بارش در ماه‌های قبل بوده است. شیب افزایش دبی در اردیبهشت ماه در دو قنات دهنر و کلاته نهرود بیشتر از سایر قنات‌ها بود. مقدار ضریب تغییرات آبدهی در قنات‌های با طول کمتر بیشتر از قنات‌های با طول زیاد بود که به این دلیل بود که در قنات‌های با طول کمتر، بارش سریعتر دبی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و نوسانات دبی بیشتر است.

کیانی و کرمی (1388) با اندازه‌گیری آبدهی قنات‌های منطقه بیارجمند، هیدروگراف و منحنی فرود قنات‌ها را ترسیم کردند. شیب منحنی فروکش در قنات‌های کوهستانی بیشتر از قنات‌های دشتی بود. آبدهی قنات‌های دشتی بیشتر از قنات‌های کوهستانی بود که این به دلیل بزرگتر بودن حوضه آبگیر قنات‌های دشتی و طولانی بودن مسیر تره‌کار در این قنات‌ها بود. حوضه آبگیر قنات‌های کوهستانی معمولا دره‌های پر شیب و کم وسعتی هستند که آب این قنات‌ها را تامین می‌کنند که این مسئله دلیل دیگری بر کمتر بودن آبدهی این گونه قنات‌ها نسبت به قنات‌های دشتی بود. با بررسی که بر روی نسبت دبی بر واحد طول قنات‌های منطقه صورت گرفت مشخص شد که رابطه مستقیمی بین

طول یک رشته قنات و میزان آبدهی آن وجود داشت، به طوری که هر چه طول قنات بیشتر بود آبدهی آن نیز بیشتر بود.

عباسی و کرمی (1388) با اندازه‌گیری ماهیانه آبدهی قنات‌های میامی متوجه شدند که تغییرات دبی در قنات‌های مختلف به طور قابل توجهی متفاوت است، دلیل این امر تاثیر عوامل بسیاری در تغییرات آبدهی از آن جمله تراوایی، شکل حوضه آبگیر قنات، ساختمان قنات، مقدار نفوذ از خشکه کار و مقدار بارش است. حوضه آبگیر قنات‌های جودانه و محمدآباد از سازندهایی با تراوایی نسبتاً پایین تشکیل شده است و آب آنها به صورت تدریجی و با زمان تاخیر نسبتاً بالایی به قنات می‌رسد. به همین دلیل آبدهی آنها از اردیبهشت ماه به بعد شروع به افزایش کرده بود. اما در قنات نرم پشته اثرات بارندگی خیلی سریعتر خود را نشان می‌داد به طوری که به علت عدم بارندگی در ماه‌های مهر و آبان، دبی در آذرماه کاهش یافته اما با ریزش‌های قابل ملاحظه‌ای که در ماه‌های بهمن، اسفند و فروردین ماه رخ می‌دهد دبی یک روند افزایشی را نشان می‌دهد، بنابراین بیشترین ضریب تغییرات را این قنات به خود اختصاص داده است. ضریب تغییرات دبی در قنات‌های مورد بررسی از  $8/1$  تا  $74/5$  متغیر بوده است. به منظور بررسی کمی تخلیه آب قنات و همچنین برآورد ضریب یا ضرایب دبی، منحنی فرود قنات-های منطقه میامی را با استفاده از داده‌های مربوط به هیدروگراف ترسیم کردند. مقادیر شیب بدست آمده از منحنی فرود در قنات‌های مختلف نشان داد که در برخی از قنات‌ها تخلیه آب زیرزمینی در دو رژیم مختلف صورت می‌گیرد به عبارتی منحنی فرود دارای دو شیب می‌باشد. این مسئله مربوط به پاسخ بخش‌های مختلف حوضه آبگیر بود ولی برخی دیگر از قنات‌ها دارای یک شیب بودند.

تفضلی و کرمی (1394) به منظور تعیین خصوصیات هیدروژئولوژیکی قنات‌های منطقه جنوب دامغان، مقدار آبدهی هر قنات طی هفت مرحله در سال آبی 1393-1394 اندازه‌گیری کردند. همچنین، بررسی تغییرات زمانی آبدهی قنات‌های مورد مطالعه نشان می‌داد که تغییرات دبی در قنات‌های مختلف به طور قابل توجهی متفاوت بود. در چشمه قنات فیخار به دلیل قرار گرفتن مادر چاه در واریزه‌های بسیار درشت دامنه آهک‌های سازند لار و به دلیل تغییرات قابل توجهی که در تغذیه

این واریزه‌های سازند آهکی وجود دارد، تغییرات دبی این چشمه قنات بسیار زیاد بود. در حالیکه مادر چاه قنات‌های حاجی‌آباد و کلاته داوود در آبرفت‌های درشت دانه قرار گرفته‌اند، دبی در مقایسه با قنات‌های رومنان و شوکت‌آباد بیشتر بود. هم‌چنین، روند تغییرات دبی در آن‌ها یکسان بود. قنات‌های رومنان و شوکت‌آباد در انتهای دشت واقع شده‌اند و دبی آنها در مقایسه با بقیه قنات‌ها بسیار کمتر و حدود 6 لیتر بر ثانیه بود. هم‌چنین، در صورتی که دبی در قنات‌های دیگر در ماه‌های اردیبهشت و خرداد به اوج خود می‌رسید، دبی در قنات‌های رومنان و شوکت‌آباد دیرتر و در تیر ماه به اوج خود می‌رسید. منحنی‌های فرود، که به منظور بررسی نحوه تخلیه قنات‌ها و هم‌چنین برآورد ضریب یا ضرایب دبی رسم شدند، نشان می‌دادند که چشمه قنات فیخار به دلیل آهکی بودن منشأ آب خروجی، دارای دو ضریب بده بود. به عبارت دیگر تخلیه آب در این چشمه قنات در مقایسه با بقیه قنات‌ها، از دو رژیم مختلف پیروی می‌کرد. اما بقیه قنات‌ها به دلیل آبرفتی بودن مادر چاه تغییرات زیادی را شامل نمی‌شدند و همگی دارای یک شیب (یک ضریب بده) بودند. هیدروگراف بیشتر در مورد رودخانه‌ها و چشمه‌ها استفاده شده و در قنات‌ها کمتر استفاده شده‌است ولی در مورد قنات‌ها هم کاربرد و نتایج مطلوبی داشته است.

کریمی و هنری (1393) حوضه آبخیز قنات‌های منطقه خور را محاسبه نمودند. آنها از فرمول زیر جهت محاسبه حوضه آبخیز قنات‌ها استفاده کردند:

$$A=V/1000PI \quad (1-2)$$

که در آن  $V$ ، حجم تخلیه سالانه قنات بر حسب مترمکعب،  $I$ ، درصد نفوذ بارندگی (از صفر تا یک متغیر است)،  $P$ ، متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلیمتر بر سال و  $A$ ، مساحت حوضه آبخیز قنات بر حسب کیلومتر مربع می باشد.

آنها با توجه به این معادله، مساحت حوضه آبخیز قنات‌های کلاغو، دهنزیر، مهین دشت، فرخی، کلاته نهرود و عرب آباد را به ترتیب  $26/4$ ،  $21/7$ ،  $10/1$ ،  $1/2$ ،  $1/71$  و  $19/2$  کیلومتر مربع برآورد نمودند.

## 2-3- هیدروژنوشیمی و ترکیب ایزوتوپی

تحلیل‌های هیدروژنوشیمیایی و ایزوتوپی برای ساخت یک مدل مفهومی هیدروژنولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ترکیب هیدروشیمی 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, Kandu *et al.* 2012, Wu *et al.* 2009, Kohfahl *et al.* 2008). درجه تکامل هیدروشیمیایی آب زیرزمینی اساساً توسط زمان ماندگاری آب درون سفره آب زیرزمینی تعیین می‌گردد (Mora *et al.* 2008).

دولومیتیزاسیون 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.* 2011). 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 2-2 و 3-2 اتفاق می‌افتد (X نمایانگر مواد مبادله کننده مانند کانی‌های رسی است):



ایزوتوپ‌های پایدار محیطی به ویژه دوتریم و اکسیژن 18 به عنوان ردیاب‌های با ارزش در فرایندهای هیدروژنولوژیکی در مقیاس ناحیه‌ای به کار می‌روند

(Clark and Fritz 1997, Herczeg *et al.* 1997, Liotta *et al.* 2013, Mazor 1991).

تغییرات ترکیب ایزوتوپی در طول مسیرهای جریان آب نشان دهنده منشأ و رخداد فرایندهای مختلف ژنوشیمیایی و اختلاط است.

با توجه به مقدار و 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).



هیدروژنوشیمی واکنش‌هایی را که بین فاز آب و فاز سنگ در زیر زمین رخ می‌دهد را مورد بررسی و مطالعه قرار می‌دهد. با شناخت فرایندهای ژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان یک منطقه، می‌توان بینشی در مورد تغییرات غلظت اجزاء محلول در آب‌های زیرزمینی در طی مسیر جریان به دست آورد و روند تغییرات زمانی و مکانی آن‌ها را بهتر توصیف نمود. کیفیت آب‌ها در حین حرکت در چرخه هیدرولوژیکی تحت تاثیر عملکرد فرایندهای گوناگونی همچون تبخیر و تعرق، جذب انتخابی گیاهان، واکنش‌های اکسایش و احیاء، انحلال و هوازگی کانی‌ها، جذب سطحی، تبادل کاتیونی، ته‌نشست کانی‌های ثانویه، اختلاط آب‌ها، فروشویی کودها و حاصلخیزکننده‌ها، آلودگی و فرایندهای بیولوژیکی تغییر می‌نماید (Appelo and Postma 2005).

بر طبق نظر آندرسون و همکاران (Anderson *et al.* 1988) خواص شیمیایی آب‌های زیرزمینی در یک حوضه متأثر از ترکیب رسوبات نهشته شده، تبخیر و تعرق، توپوگرافی منطقه، ترکیب آب تغذیه کننده و وضعیت خشکسالی و ترسالی است. علاوه بر لیتولوژی آبخوان که کنترل کننده شیمی آب زیرزمینی است، پارامترهای هیدروژئولوژیکی نظیر قابلیت انتقال و سرعت جریان نیز از جمله عواملی هستند که می‌توانند با تاثیرگذاری بر روی زمان ماندگاری، روند واکنش آب و سنگ را کنترل نمایند. به طوری که کاهش سرعت حرکت آب باعث افزایش مدت زمان تماس و در نتیجه غنی شدن آب از املاح می‌گردد. یکی از فاکتورهای کنترل کننده کیفیت آب زیرزمینی، جنس سنگ‌هایی است که آب ضمن عبور از آن، کانی‌های قابل حل موجود در آن را حل می‌کند. میزان شوری نیز بسته به جنس مواد سفره، قابلیت انحلال کانی‌ها و همچنین، زمان ماندگاری تغییر می‌کند.

غلظت کل جامدات محلول در آب زیرزمینی (TDS) می‌تواند کمتر از 100mg/l تا بیش از 50000mg/l باشد (Hem 1989). میزان حلالیت مواد مختلف در آب، بستگی به جنس مواد، مدت زمان تماس آب با محیط پیرامون خویش و عوامل دیگری از قبیل وجود گاز کربنیک و اکسیژن دارد. همچنین عوامل دیگری همانند پارامترهای اقلیمی، توزیع زمانی و مکانی ریزش‌های جوی، تاثیر آب و

هوا بر روی پدیده هوازدگی و نیز فرایند هوازدگی سنگ‌ها نیز می‌توانند ترکیب شیمیایی آب‌ها را تحت تاثیر قرار دهند (Feth 1981).

با بررسی تغییرات مقادیر و نوع مواد محلول در آب‌های زیرزمینی در طی مسیر جریان می‌توان به بسیاری از خصوصیات آبخوان و تاثیرات عواملی که به نوعی با آب زیرزمینی در ارتباط هستند، پی برد. این موارد که در مطالعات هیدروژئولوژی اهمیت بسیاری دارند شامل شناسایی جنس سازندهای منطقه، مسیر حرکت آب زیرزمینی، چگونگی ارتباط هیدروژئولوژیکی آب‌های سطحی و زیرزمینی و تعیین نواحی تخلیه و تغذیه آبخوان می‌باشند. بنابراین مطالعات هیدروژئوشیمی به عنوان ابزاری مناسب، تعیین‌کننده تاثیر این فرآیندها بر ترکیب آب زیرزمینی است و اطلاعات مفیدی را در رابطه با تاثیر مواد متشکله آبخوان و منطقه، مسیر جریان آب، تاثیر سنگ کف، نواحی تغذیه و تخلیه، نواحی تبخیر از آب زیرزمینی و تاثیرات آب‌های سطحی بر آب‌های زیرزمینی در اختیار قرار می‌دهد.

آب زیرزمینی به مقدار کم یا زیاد حاوی نمک‌های محلول می‌باشد. نوع و غلظت این املاح به سنگ‌ها که آب با آنها در تماس است، سرعت حرکت آب، مسافتی که آب طی کرده و منشأ آب وابسته است. بیشتر مواد محلول در آب ناشی از انحلال سنگ‌ها می‌باشد. با توجه به مدت ماندگاری آب در لایه‌های زمین و طول مسیری که آب طی می‌کند، ترکیب شیمیایی آن، از نظر مقدار و نوع تغییر می‌کند. کیفیت و کمیت مواد محلول در آب نتیجه تمام فرایندها و واکنش‌هایی است که تحت تاثیر عوامل بیرونی و درونی قرار دارند. فاکتورهای درونی شامل شکل، اندازه و ضخامت لایه آبدار، درصد و توزیع و نوع تخلخل، لیتولوژی و خصوصیات ناحیه اشباع می‌باشد.

فاکتورهای خارجی نیز شامل فرم بارش، توزیع زمانی و مکانی نزولات جوی، نحوه تغذیه سیستم و درصد و عمق پوشش خاک، لیتولوژی سازندهای مجاور و کمیت آب ورودی به سیستم، پوشش گیاهی و مورفولوژی منطقه می‌باشد (Raeisi and Karami 1996 و کریمی وردنجانی 1389). تعداد افرادی که در زمینه هیدروژئوشیمی قنات کار کرده‌اند نیز اندک است که در ادامه نتایج کار برخی آمده است.

در یک بررسی که در بافق یزد بر روی دو قنات عنایت آباد و فاضلیه توسط صالحی و همکاران (1383) انجام شد، بررسی‌ها نشان داد که بستر این قنات از تشکیلات نئوژن (شن، ماسه، سیلت و رس و به طور چشمگیری گچ و نمک) بوده و در مسافت‌های بیش از 5 تا 6 کیلومتر، آب فرصت لازم برای انحلال این املاح و در نتیجه کاهش کیفیت آب را دارد.

عباسی و کرمی (1388) به بررسی کیفی آب قنات‌های میامی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مقادیر هدایت الکتریکی و غلظت یون‌ها به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر لیتولوژی سازندها و رسوبات موجود در منطقه است. به این ترتیب که حداقل مقدار هدایت الکتریکی برابر با 304 میکروموس بر سانتی‌متر در قنات ابراهیم آباد است، که منشأ آب آن عمدتاً به سازندهای آهکی کرتاسه مربوط می‌شود. حداکثر هدایت الکتریکی برابر با 1537 میکروموس بر سانتی‌متر مربوط به قنات زیدر است که حوضه آبرگیر آن عمدتاً شامل شیل، مارن و ماسه‌سنگ می‌شود. تیپ آب‌های قنات‌های مطالعه شده در لیتولوژی‌های مختلف متفاوت بوده است. تغییرات دبی قنات‌های مختلف تفاوت قابل توجهی را شامل می‌شود که تابعی از خصوصیات حوضه آبرگیر و ساختمان قنات است.

هنری و همکاران (1392) تغییرات زمانی دبی و کیفیت آب‌های منطقه خور را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که آب قنات‌های منطقه علی‌رغم قرارگیری مادرچاه آنها در دامنه ارتفاعات آهکی، دارای تیپ بی‌کربناته نیستند و به دلیل وجود رسوبات تبخیری، مارنی و رسی در طول مسیر قنات، غلظت یون‌های سدیم و کلر در آب تمام قنات‌ها افزایش یافته و این افزایش شوری باعث رسوب کلسیم در آب شده و غلظت آن در آب کم شده است.

کیانی و کرمی (1388) با مطالعه بر روی قنات دشتی منطقه بیارجمند متوجه شدند که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب قنات در طول یک سال تغییر چندانی نداشته است. دلایل عمده یکنواختی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این قنات دشتی بودن آن، چند شاخه بودن و یکنواختی نسبی نهشته‌های آبرفتی آبخوان تأمین کننده آب قنات می‌باشد.

لامبان و همکاران (Lamban *et al.* 2015) با آنالیز هیدروشیمیایی از 29 چشمه در فاصله زمانی 2007 تا 2013 در پنومپ در اسپانیا رخساره‌های شیمیایی منطقه را کلسیم بیکربنات و کلسیم، منیزیم بیکربنات معرفی نمودند و نتیجه گرفتند که اختلاف بین منطقه تغذیه و تخلیه نقش مهمی در تغییر رخساره دارد.

لوپز و همکاران (Lopez *et al.* 2001) با نمونه‌برداری 19 ماهه از شش چشمه و اندازه‌گیری خواص فیزیکوشیمیایی آن در آبخوان کربرا-الکید در اسپانیا، به تعیین نسبت یونی و آنالیز چند متغیره نمونه‌ها پرداختند. نتایج به دست آمده نشان دهنده جریان افشان با یک جریان پیستونی می‌باشد که با بارش همبستگی نزدیکی داشت. کاتیون غالب در طول مسیر جریان از کلسیم به منیزیم تغییر نموده و آب از کانی‌های تبخیری غنی می‌شد.

از ضریب تغییرات سختی آب در تفسیر رفتار هیدرودینامیکی آبخوان‌های کارستی در دره نیتانی استفاده شده است (Shuster and White 1971, 1972 as cited by Lopez 2001).

مطالعات مختلف دیگری نیز نشان‌دهنده این امر هستند که، برای شناخت فرایندهای ژئوشیمیایی موثر در میزان شوری آب‌های زیرزمینی، تعیین منشأ یون‌ها و فعل و انفعالات بین آب و سنگ از نمودارهای ترکیبی و نسبت‌های یونی استفاده می‌شود. علاوه بر عوامل طبیعی، عوامل دیگر آلودگی آب‌های زیرزمینی شامل نشت از سیستم فاضلاب، زباله‌های بهداشتی و صنعتی می‌باشد. تغییر کیفیت آب زیرزمینی در محیط‌های غیر شهری باعث تغییر کیفیت آب قنات، افزایش رسوب و کور شدن چشمه قنات می‌شود (خرسندی آقایی 1368). معمولاً، مقادیر اکسیژن شیمیایی و بیوشیمیایی، کلراید، نترات و سختی آب‌های زیرزمینی آلوده از منابع شهری زیاد می‌باشد. کودهای شیمیایی، حشره‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها، آبیاری با فاضلاب و فضولات حیوانی از عمده‌ترین منابع آلودگی آب‌های زیرزمینی به واسطه فعالیت‌های کشاورزی می‌باشند.

نیترات و فسفات دو آلاینده عمده آب‌های زیرزمینی هستند که منشأ اصلی آن‌ها فاضلاب شهری و فعالیت‌های کشاورزی هستند. به علت قابلیت تحرک کمتر فسفات، آلودگی وسیع آب‌های زیرزمینی نسبت به فسفات کمتر گزارش شده است. در حالیکه نیترات به عنوان شاخص آلودگی آب‌های زیرزمینی همواره مورد توجه بوده است (Lerner and Papatolios 1993). به منظور بالا بردن کیفیت آب قنات باید از ورود فاضلاب‌ها به تونل جلوگیری کرد و دهانه میله‌های قنات‌هایی را که از میان روستاها و شهرها عبور می‌کنند مسدود کرد (بهنیا 1379).

کاربرد ایزوتوپ‌های محیطی در شناخت و مطالعات آب‌های زیرزمینی دارای کاربرد وسیعی بوده به طوریکه امروز کمتر مطالعاتی بدون کاربرد ایزوتوپ انجام می‌گیرد و در بسیاری از مناطق جهت حل مسائل و ابهامات هیدروژئولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تکنیک‌های ایزوتوپی می‌تواند ایده‌های اولیه از مسیرهای جریان و منشأ آب ارائه دهد. اطلاعات بدست آمده از ایزوتوپ‌های پایدار به همراه سایر اطلاعات قابل دسترس یک دید کلی از هیدرولوژی جامع سیستم آب زیرزمینی ارائه می‌دهد. تغذیه آب‌های زیرزمینی یکی از مسائل مهم در مدیریت منابع آب بوده و ایزوتوپ‌ها می‌توانند در تعیین منطقه و میزان تغذیه کمک کنند. با اندازه گیری غلظت‌های اکسیژن 18 و دوتریم و تطبیق آنها با ارتفاعی که نزولات به داخل زمین نفوذ کرده‌اند می‌توان منطقه تغذیه را مشخص کرد. تغییرات ترکیب ایزوتوپی به تاریخچه آب از زمان تبخیر از اقیانوس‌ها و تشکیل ابر و زمان بارش و چگونگی نفوذ به داخل زمین بستگی دارد این تغییرات می‌تواند جهت تعیین زمان تغذیه، سرعت جریان و مشخص نمودن اثر جریان‌های سریع استفاده گردد (Mazor 2004). ایزوتوپ‌های اکسیژن 18 و دوتریم ردیاب‌های عالی برای تعیین منشأ آب زیرزمینی هستند و به طور وسیعی برای مطالعه تغذیه آب زیرزمینی، مسیر جریان و اختلاط آب‌های با منشأهای مختلف کاربرد دارند (Hamed 2013) به نقل از (Faure 1986, Sacks and Tihansky 1996, Subyani 2004).

علاوه بر تاثیر دما، رطوبت، ارتفاع، نوع بارش و ... در تغییرات ایزوتوپی نوع تغذیه بر ترکیب ایزوتوپی تاثیرگذار می‌باشد در تغذیه افشان با توجه به اینکه تبخیر بیشتری در زون غیر اشباع انجام می‌گردد

تفکیک بیشتر انجام شده و در نتیجه این نوع تغذیه نسبت به تغذیه نقطه‌ای دارای ایزوتوپ‌های سنگین بیشتری می‌باشد (Alsaaran 2006).

تنوع در ترکیب ایزوتوپی باران یک منطقه توسط پارامترهای آب و هوایی محلی کنترل می‌شود که شامل منشأ توده بخار، تبخیر مجدد در طول بارش و فصل و ماه بارش می‌باشد (Hamed 2013) به نقل از (Jouzel *et al.* 1987, 1991, Clark and Fritz 1997, Hamed 2004, 2012). تبخیر در حین عبور قطرات باران در یک اتمسفر گرم خشک که مخصوص مناطق نیمه خشک است باعث غنی‌شدگی بیشتری در ایزوتوپ‌های سنگین بارش در بارش‌های کوچک نسبت به باران‌های بزرگ می‌شود (Hamed 2013) به نقل از (Dansgaard 1964, Conrad and Fontes 1970, Gasse 2002).

لی و همکاران (Li *et al.* 2013) بر اساس ایزوتوپ‌های پایدار آب‌های زیرزمینی حوضه رودخانه چوبای را به دو گروه تقسیم کردند: آب‌های قدیمی و آب‌های جدید. آب‌های جدید مقدار اکسیژن 18 بین 9/9- تا 6/6- پرمیل را دارد و در امتداد یک خط با شیب 4 در دیاگرام دوتریم براساس اکسیژن 18 قرار می‌گیرند که منعکس کننده تبخیر در حین تغذیه می‌باشد و آب‌های قدیمی که ترکیب ایزوتوپی متفاوتی دارند (11- پرمیل برای اکسیژن 18 و 68/2- پرمیل برای دوتریم) که بیان کننده آب و هوای سرد و خشک در دوره‌های یخچالی گذشته می‌باشد.

مشخصات ایزوتوپی آب زیرزمینی دشت چین شمالی توسط کینگ و همکاران (Xing *et al.* 2013) مورد بررسی قرار گرفت، وی تهی‌شدگی میزان ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن 18 و دوتریم در آب زیرزمینی عمیق منطقه را مربوط به تغذیه از بارش در شرایط آب و هوای قدیمه در دوره‌های یخچالی و بین یخچالی می‌داند که نشان دهنده تجدیدپذیری بسیار محدود آب زیرزمینی در منطقه می‌باشد. دشت چین شمالی از دو آبخوان کم عمق (50-10 متر) و آبخوان عمیق (400-50 متر) تشکیل شده است. براساس نتایج آنالیز ایزوتوپی تفاوت زیادی بین ترکیب ایزوتوپی آب‌های کم عمق و عمیق وجود دارد. آب‌های زیرزمینی عمیق تهی‌شدگی در میزان اکسیژن 18 و دوتریم دارند (مقدار میانگین 73-

پرمیل برای دوتریم و  $9/2$ - پرمیل برای اکسیژن 18) در مقایسه با آب‌های کم عمق (مقدار میانگین 59- پرمیل برای دوتریم و  $7/7$ - پرمیل برای اکسیژن 18). آب‌های عمیق منفی تر هستند و در سمت راست خط آب جوی جهانی قرار می‌گیرند که نشان دهنده تاثیر تغذیه قدیم می‌باشد (Xing 2013) به نقل از (Clark and Fritz 1977).

بارش در آخرین عصر یخبندان مقدار پایین تری از اکسیژن 18 و دوتریم به خاطر دمای پایین تر داشت (Xing 2013) به نقل از (Varsanyi and Kovacs 2009, Chen *et al.* 2002).

چن و کروزر (Chen *et al.* 2003) و (Kreuzer *et al.* 2009) پیشنهاد کردند نمونه‌های آب زیرزمینی پلیستوسن که احتمالاً در آخرین دوره یخبندان تغذیه شده‌اند مقادیر اکسیژن 18،  $9/4$ - تا  $11/7$ - پرمیل و دوتریم  $76$ - تا  $85$ - پرمیل در دشت چین شمالی داشته‌اند (Xing 2013). به نظر می‌رسد تغذیه این آب‌ها در اواخر پلیستوسن اتفاق افتاده است و به ندرت تحت تاثیر تبخیر قرار گرفته است (Xing 2013) به نقل از (Kreuzer *et al.* 2009).

بن موسی و همکاران (Ben Mussa *et al.* 2014) ترکیب ایزوتوپی آبخوان کواترنری کم عمق در منطقه تازقران شمال شرقی تونس را مورد ارزیابی قرار دادند و بر این اساس در آبخوان مذکور دو نوع آب تفکیک کردند. آب‌های تبخیر نشده که با محتوای پایین ایزوتوپ‌های پایدار قابل تشخیص‌اند و نشان دهنده تغذیه از بارش‌های کنونی از توده‌های مدیترانه‌ای می‌باشند. آب‌های تبخیر شده که با غنی‌شدگی نسبی در مقادیر ایزوتوپ‌ها مشخص می‌شوند و نشان دهنده تغذیه برگشتی آب‌های کشاورزی به آبخوان می‌باشد.

آکو آکو و همکاران (Ako Ako *et al.* 2012) با تعیین مشخصات ایزوتوپی آب زیرزمینی دشت موز در کامرون و ترسیم نمودار اکسیژن 18 در مقابل دوتریم مشاهده کردند که نمونه‌های آب زیرزمینی و سطحی در مجاورت یا روی خط آب جوی محلی و خط آب جوی جهانی قرار می‌گیرند که نشان دهنده منشأ جوی آنهاست و نیز بیانگر این موضوع است که بارش‌های جدید عامل اصلی این آب‌ها

می‌باشد. این به خاطر نفوذ سریع آب بارش قبل از وقوع تبخیر می‌باشد که تغذیه از طریق درزه‌ها در سنگ‌های ولکانیکی و ماسه سنگی جنوب منطقه و اطراف آن بوده است. آب‌های زیرزمینی در این منطقه در یک رنج باریک و نزدیک یا روی خط آب جوی محلی قرار دارند که نشانه ترکیب ایزوتوپی نسبتاً ثابت و احتمالاً یک سیستم با اختلاط نسبتاً خوب می‌باشد که میانگین ترکیب ایزوتوپی آب باران در منطقه را نشان می‌دهد.

تبخیر از آب باز و تبادل با کانی‌های سنگ از فرایندهای معمول تفکیک ایزوتوپی هستند که بر رابطه بین اکسیژن 18 و دوتریم تاثیر می‌گذارند (Ako Ako *et al.* 2012 به نقل از Fontes 1980).

دوتریم معمولاً در دماهای پایین تحت تاثیر واکنش با مواد اکیفر قرار نمی‌گیرد. اکسیژن 18 نیز در دماهای پایین و برای دوره‌های زمانی کوتاه (کمتر از یک میلیون سال) تحت تاثیر واکنش با کانی‌های سیلیکاته قرار نمی‌گیرد ولی تبادل با کلسیت در آبخوان‌های کربناته ممکن است سبب شیفت اکسیژن 18 به سمت مقادیر سنگین‌تر شود (Ako Ako *et al.* 2012 به نقل از Clayton *et al.* 1996). مواقعی که واکنش بین آب و سنگ منجر به دگرسانی فلدسپارها به کانی‌های رسی گردد، کانی‌های رسی وارد تعادل ایزوتوپی با آب شده و سبب تغییر مقدار اکسیژن 18 آب می‌گردد (Ako Ako *et al.* 2012). اثر تبخیر و انحلال تبخیری‌ها در نمودار اکسیژن 18 بر اساس کلر دیده می‌شود (Ako Ako 2012) به نقل از Clark and Fritz 1977). در این دیاگرام چنانچه مقادیر غلظت بالای کلر همبستگی با اکسیژن 18 نداشته باشد به خاطر انحلال نهشته‌های تبخیری است و برعکس چنانچه همبستگی خوبی بین کلراید و اکسیژن 18 وجود داشته باشد، تبخیر فرایند غالب می‌باشد. در دیاگرام اکسیژن 18 در برابر کلر در نمونه‌های دشت موز، نمونه‌های آب زیرزمینی در امتداد محور اکسیژن 18 پخش شده‌اند و همبستگی ضعیفی بین اکسیژن 18 و کلر وجود دارد که نشان دهنده این است که اگر تبخیری وجود داشته است تاثیرش روی شوری آب زیرزمینی خیلی محدود بوده است و قابل استدلال است که فرض شود که انحراف مشاهده شده از خط آب جوی محلی در نتیجه غنی‌شدگی تبخیری محتوای ایزوتوپ‌های پایدار آب زیرزمینی در سطح قبل از تغذیه زیاد نیست.



مقدار دوتریم اضافی شاخصی است که نشان دهنده تاثیر تبخیر روی خصوصیات فیزیکوشیمیایی آب است که اگر آب تبخیر شود این مقدار کاهش می‌یابد (Tsujiura *et al.* 2006). تسوجیمورا و همکاران (Tsujiura *et al.* 2006) ترکیب ایزوتوپی آب زیرزمینی در حوضه رودخانه خرلن در منطقه نیمه خشک در شرق مغولستان را مورد مطالعه قرار داد و متوجه گردید در پایین دست حوضه که میزان بارندگی کم و شاخص خشکی بالاست و طبیعتاً باید نسبت به بقیه مناطق بیشتر تحت تاثیر تبخیر باشد مقدار ایزوتوپ اکسیژن 18 کمتر و مقدار دوتریم اضافه بالاتری نسبت به بقیه مناطق دارد. بارش‌های کمتر از 15 میلیمتر در یک منطقه نیمه خشک در تانزانیا (آفریقای مرکزی) در تغذیه آب زیرزمینی شرکت نمی‌کند و آب نفوذ کرده در خاک، سریعاً بعد از بارش تبخیر می‌گردد. همچنین نشان داد که بارش‌های با حجم بیش از 20 میلیمتر و با ترکیب ایزوتوپی نسبتاً سبکتر در تغذیه آب زیرزمینی نقش دارد (Tsujiura *et al.* 2006 به نقل از Onodera 1996). بنابراین احتمال دارد که فقط بارش‌های بزرگ با محتوای ایزوتوپی سبک تغذیه کننده آب زیرزمینی در پایین دست حوضه رودخانه خرلن باشد (Tsujiura *et al.* 2006). ایزوتوپ‌های پایدار سنگین، اگر آب نفوذ کرده کاملاً بعد از بارش تبخیر شود در خاک حفظ نمی‌گردد. وقتی آب زیرسطحی نفوذ کرده بعد از بارش به کلی تبخیر می‌گردد، سیگنال‌های تبخیری ایزوتوپی در خاک باقی نمی‌ماند زیرا دوتریم و اکسیژن 18 اجزای ملکول آب هستند بنابراین در شرایط خیلی خشک ایزوتوپ‌های پایدار در آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر در مناطق بالادست حوضه آب زیرسطحی نفوذ کرده در طول واقعه بارش، بعد از بارش به طور بخشی تبخیر می‌گردد و تاثیر تبخیر در ترکیب ایزوتوپی آب خاک باقی می‌ماند و بنابراین ترکیب متوسط ایزوتوپی آب زیرزمینی از ترکیب ایزوتوپی میانگین وزنی حجمی سالانه بارش بزرگتر است (Tsujiura *et al.* 2006).

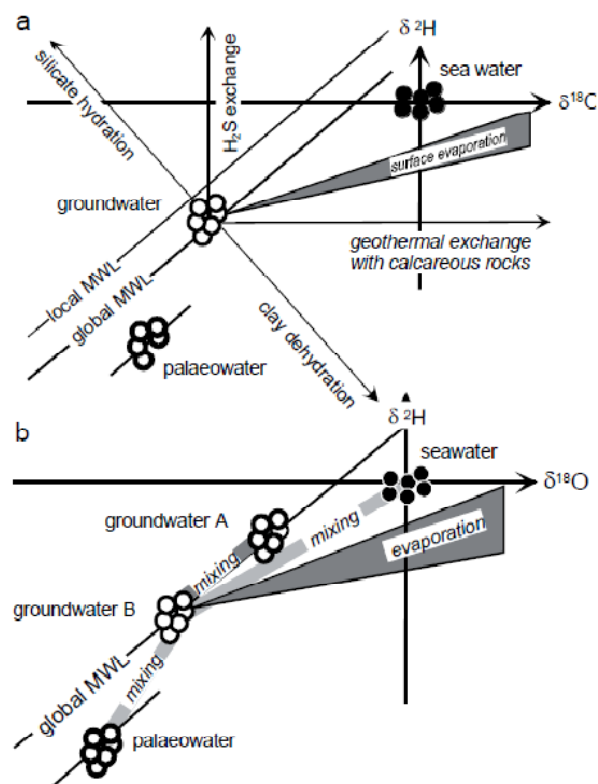
زبالا و همکاران (Zebala *et al.* 2014) منشأ آب‌های زیرزمینی سفره آب زیرزمینی پامپانو در آرژانتین را مورد بررسی قرار داد. وی با ترسیم خط آب جوی محلی و پلات کردن نتایج آنالیز ایزوتوپی نمونه‌های آب زیرزمینی متوجه شد که برخی از نمونه‌های آب زیرزمینی بالای خط آب جوی

قرار می‌گیرند. وی علت این امر را دو دلیل عنوان کرد: یا تغذیه بعد از بارش‌های خاص که شاخص شرایط معمول حوضه نیستند اتفاق افتاده است و یا اینکه تغذیه از خارج حوضه اتفاق می‌افتد که دلیل دوم امکان‌پذیرتر بود.

والژس و همکاران (Vallejos *et al.* 2014) ترکیب ایزوتوپی بارش و آب زیرزمینی در جنوب شرق اسپانیا را مشخص نمود. مقادیر ایزوتوپی برای بارش‌ها در رنج وسیعی قرار می‌گرفتند که این به خاطر تنوع فصلی بالاست که از شاخصه‌های آب و هوایی مدیترانه‌ای است (Vallejos *et al.* 2014) به نقل از (Grassa *et al.* 2006, Liotta *et al.* 2006, 2013). بر عکس آب زیرزمینی رنج باریکی از مشخصات ایزوتوپی داشتند که دلیل مشخصات هیدرولوژیکی سفره آب زیرزمینی است که اختلاط آب‌های جوی با زمان‌های تغذیه ای مختلف را تسهیل نموده است.

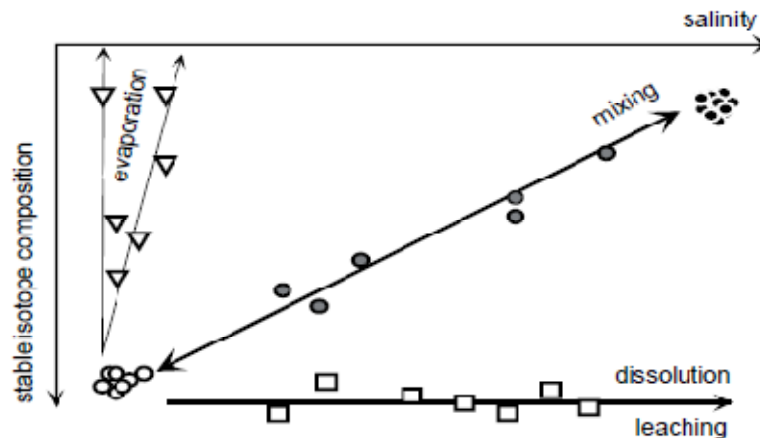
گیه (Geyh 2000) در نشریه شماره 4 آژانس بین‌المللی انرژی اتمی که در رابطه با کاربرد ایزوتوپ‌ها در هیدرولوژی آب‌های زیرزمینی است عوامل موثر بر انحراف ترکیب ایزوتوپی آب زیرزمینی از خطوط آب جوی را به شرح شکل 2-1 آورده است.

منشأ شوری آب‌های لب شور تا خیلی شور و آب‌های گرم به طور مشخصی از پلات اکسیژن 18 در برابر کلر تعیین می‌گردد. فرایندهایی مانند انحلال و شستشوی نمک‌ها، غنی‌شدگی بوسیله تبخیر یا اختلاط آب شیرین با آب شور یا آب دریا می‌تواند به وضوح و کمی تعیین گردد (شکل 2-2).



شکل 2-1- (a) فرایندهای مختلف که باعث انحراف مقادیر اکسیژن 18 و دوتریم از خط آب جوی می‌شود: تبخیر باعث انحراف هر دو می‌گردد، اکسیژن 18 در نتیجه تبادل ایزوتوپی با  $CO_2$  و ولکانیکی و آهک جابجا می‌شود و دوتریم در اثر تبادل ایزوتوپی با  $H_2S$  و هیدراسیون سیلیکات‌ها جابجا می‌گردد. (b) پلات اکسیژن 18 در برابر دوتریم برای بارش‌های قاره ای (LMW=خط آب جوی محلی مربوط به بارش‌های مدیترانه‌ای است) با مثال‌هایی از خطوط اختلاط مختلف. خط آب جوی آب‌های قدیمی پلیستوسن ممکن است از خط آب جوی جدا شود (Geyh 2000).

کنداکت و همکاران (Conduct *et al.* 2013) مشخصات ایزوتوپی چشمه‌های آلیپی شمال اسلونی را بررسی کردند. با فرض اینکه بارش منبع مهم تغذیه چشمه‌هاست، ارتفاع منطقه تغذیه هر چشمه با استفاده از یک مدل رگرسیونی چندتایی ساده اکسیژن 18 که توسط (Ogrinc *et al.* 2010) توصیف شده، محاسبه شد. در این مدل وابستگی عرض جغرافیایی و ارتفاع در توزیع فضایی اکسیژن 18 در بارش اسلونی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل 2-2- ترکیب ایزوتوپ پایدار در مقابل شوری برای تشخیص فرایندهای مختلف شوری: اختلاط (دایره‌های خاکستری) آب شیرین (دایره‌های توخالی) و آب مینرالی (دایره‌های سیاه)، انحلال و شستشوی نمک (مربع‌های توخالی) و تبخیر (مثلث‌های توخالی) (Geyh 2000).

با پذیرش این مدل و بر پایه میانگین اندازه‌گیری شده اکسیژن 18 چشمه‌ها، ارتفاع تغذیه بر طبق فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

$$H = (0.011 \text{ LAT} - 1.1579 \text{ LAT} + 22.054 - \delta^{18}\text{O}) / (0.002) \quad (4-2)$$

که LAT عرض جغرافیایی محل چشمه است و  $^{18}\text{O}$  ترکیب ایزوتوپی چشمه است. مدل رگرسیونی توسط داده‌های موجود محدود شده است و پیچیدگی سیگنال‌های اکسیژن 18 بارش بسیار ساده‌انگاری شده است. به‌رحال این مدل به وسیله مقادیر میانگین اکسیژن 18 اندازه‌گیری شده چشمه آزمایش شده است و شباهت زیادی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده اکسیژن 18 وجود دارد که نشان دهنده این است که مقادیر میانگین اکسیژن 18 چشمه اساساً بستگی به مقادیر اکسیژن 18 بارش دارد.

شمسی و کرمی (1398) با مشخص نمودن محتوای ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن 18 و دوتریم بارش و آب چشمه‌ها در منطقه البرز مرکزی به این نتیجه رسیدند که بارش‌های با حجم بیش از 20 میلیمتر در تغذیه چشمه‌های موجود در سازندهای کربناته منطقه نقش دارند.

## فصل سوم: روش انجام تحقیق

در دشت گناباد 26 رشته قنات قرار دارد که از آبدهی 10 تا 120 لیتر در ثانیه برخوردار می باشند و سالانه 19/5 میلیون مترمکعب آب از طریق آنها استحصال می گردد. عمیق ترین و کهن ترین قنات های دنیا در این دشت قرار دارند، چنانکه عمق مادر چاه بعضی از قنات ها همچون قصبه و رهن به 350 و 260 متر می رسد. بر اساس مطالعات باستان شناسی قدمت قنات قصبه به 2700 سال پیش می رسد. در این مطالعه به منظور تعیین حوضه آبگیر قنات ها، منشأ آب و مکانیسم تغذیه آنها مطالعات هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی انجام گرفت که مراحل انجام کار به شرح زیر است:

### 3-1- اندازه گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قنات ها در محل

برای شناخت سیستم هیدروژئولوژی قنات ها و تاثیر بارش ها در تغذیه آنها بررسی وضعیت و تغییرات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی قنات ها دارای اهمیت فراوان است. در این راستا تعداد 6 رشته از قنات های مهم دشت که دارای بیشترین آبدهی بوده و پراکندگی مناسبی در دشت داشتند، انتخاب گردیده و در سال آبی 1395-1396 اندازه گیری آبدهی، هدایت الکتریکی و دما به صورت ماهانه در محل انجام گرفت. در ادامه نحوه اندازه گیری ها و روش های مورد استفاده ارائه خواهند شد.

### 3-1-1- اندازه گیری آبدهی

یکی از پارامترهای مهم و اساسی مطالعات آب های سطحی و زیرزمینی اندازه گیری آبدهی می باشد. جهت اندازه گیری آبدهی قنات ها در ابتدا مقطع مناسب و منظم (بتنی) جهت اندازه گیری در کانال خروجی قنات شناسایی و آبدهی با استفاده از روش سرعت-سطح مقطع محاسبه گردید که در این روش سرعت آب به کمک دستگاه سرعت سنج (میکرومولینه) اندازه گیری شد.

### 3-1-2- اندازه‌گیری خصوصیات شیمیایی در محل

هدایت الکتریکی آب (EC)، pH و دما در محل اندازه‌گیری گردید. برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی از دستگاه هدایت‌سنج (HANNA HI 8000) با دقت یک میکروزیمنس بر سانتیمتر، دما با استفاده از دماسنج با دقت 0/01 درجه سانتیگراد و pH با استفاده از pH متر مدل EUTECH pH- 310 با دقت 0/01 استفاده شده است.



شکل 3-1- اندازه‌گیری آبدهی قنات قصبه با استفاده از میکرومولینه

### 3-2- نمونه‌برداری هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی از آب قنات‌ها و بارش‌های محدوده

نمونه‌برداری از آب فرایندی بسیار اساسی بوده و به منظور دستیابی به نتایج بایستی به شکل صحیح انجام شود. در نمونه‌برداری مواردی مانند نحوه برداشت، ظرف نمونه، محل نمونه‌برداری، بازه زمانی بین برداشت نمونه‌ها و آنالیز آنها در آزمایشگاه و ثبت اطلاعات دقیق مربوط به هر یک از نمونه‌ها در دستیابی نتایج نقش اساسی دارد. جهت بررسی غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی قنات‌های انتخابی به منظور مطالعه مشخصات شیمیایی و تکامل آب زیرزمینی قنات‌ها در فاصله زمانی مهرماه 1395 تا آذر ماه 1396 تعداد 30 نمونه طی 5 نوبت (فصلی) برداشت شد. در هر نمونه‌برداری از بطری‌های پلاستیکی مخصوص با حجم 1000 میلی لیتر استفاده شد. هنگام نمونه‌برداری، ظرف پلاستیکی و

درپوش آن با آب قنات شستشو داده شده و ظرف به آرامی در عمق 20 سانتیمتری از آب پر شده است، به طوریکه فاقد حباب هوا بوده و درب آن کاملاً بسته و پلمپ شد. نمونه‌ها بلافاصله جهت آنالیز به آزمایشگاه هیدروشیمی دانشگاه صنعتی شاهرود ارسال شدند.



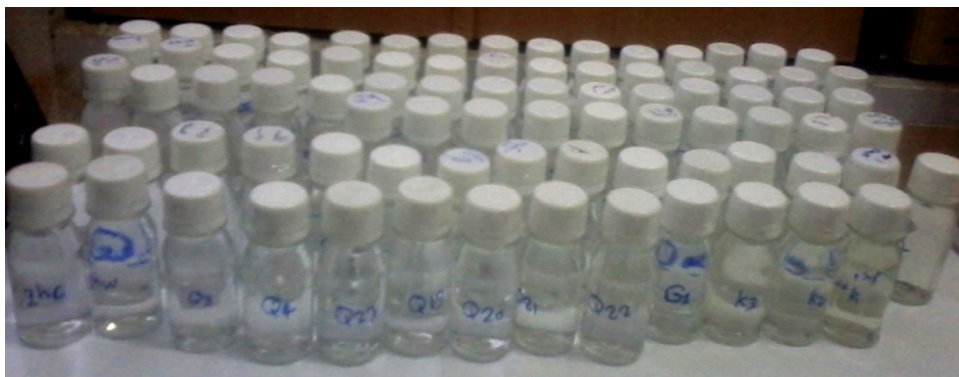
شکل 3-2- نمونه‌برداری جهت آنالیز یون‌های اصلی و اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و pH آب قنات‌ها

در آنالیز شیمیایی آب اگر مقادیر عناصر بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر باشند، باید مقادیر آنیون‌ها و کاتیون‌ها با هم برابر باشند. برای محاسبه درصد خطای آزمایش از معادله زیر استفاده شده است:

$$\%E = \frac{(\sum Cations - \sum Anions)}{(\sum Cations + \sum Anions)} \times 100 \quad (1-3)$$

در رابطه بالا %E درصد خطا و مجموع کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر می‌باشند. اگر درصد خطا کمتر از 5 درصد باشد، آزمایش به درستی انجام شده است. اگر درصد خطا کمتر از 10 درصد باشد، نتایج قابل قبول و اگر درصد خطا بیشتر از 10 درصد باشد، آزمایش به درستی انجام نشده است. همچنین برای مطالعه ترکیب ایزوتوپی آب زیرزمینی قنات‌ها نیز تعداد 12 نمونه از قنات‌های انتخابی در دو نوبت آبان 95 به عنوان دوره خشک و مردادماه 96 به عنوان دوره تر برداشت شد. برای نمونه‌برداری ایزوتوپی از بطری‌های پلاستیکی سخت 100 میلی لیتری استفاده شد. برای

تعیین رفتار ایزوتوپی بارش در منطقه گناباد از 4 ایستگاه باران‌سنجی در ارتفاعات مختلف از 1100 متر تا 2400 متر 16 نمونه بارش طی چهار ماه دی 1395 تا فروردین ماه 1396 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 ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن 18 و دوتریم به آزمایشگاه شرکت مصباح انرژی (سازمان انرژی اتمی) ارسال و با دستگاه استروسکوپ لیزری با دقت بالا (LGR) آنالیز شدند.



شکل 3-3- نمونه‌های آب قنات‌ها و بارش‌های منطقه جهت آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار

نسبت‌های ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن به صورت اختلاف نسبی (مقادیر  $\delta$ ) از استاندارد متوسط آب اقیانوس‌ها به قسمت در هزار بیان می‌گردد (Fontes 1976).

$$\delta(\%) = \frac{R_{\text{Sample}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} \times 1000 \quad (2-3)$$

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 18 و دوتریم بارش در هر ایستگاه بر اساس رابطه زیر محاسبه شد (Paternoster et al. 2008).

$$R_{\text{mw}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \delta X_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (3-3)$$

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



### 3-3- هیدروژئولوژی

برای ارزیابی هیدروژئولوژی قنات‌های دشت گناباد، داده‌های منابع آب، بارش، تبخیر و سدهای احداث شده در محدوده گناباد جمع‌آوری گردید. محدوده حوضه آبرگیر کلی برای قنات‌های دشت گناباد تعیین و بیلان آب در محدوده حوضه آبرگیر قنات‌ها محاسبه شد. تغییرات میزان بارندگی ارتفاعات و دشت حوضه به همراه تغییرات میانگین بارش بررسی شد. شش رشته از قنات‌های اصلی دشت گناباد انتخاب شدند. داده‌های آبدهی آنها در طول سال‌های گذشته گردآوری شد. هیدروگراف درازمدت قنات‌ها به همراه تغییرات بارش موثر ترسیم و عوامل موثر بر روند هیدروگراف قنات‌ها بررسی شد. نرخ کاهش سالانه دبی قنات‌ها مشخص و سهم عوامل اقلیمی و انسانی در کاهش دبی آنها تعیین گردید. تاثیر افت سطح آب زیرزمینی در دشت بر کاهش آبدهی قنات‌ها مشخص و با فرض ادامه روند افت کنونی سطح آب زیرزمینی زمان خشک شدن قنات‌ها محاسبه گردید.

### 3-4- هیدروژئوشیمی

در راستای انجام مطالعات هیدروژئوشیمی برای پی بردن به شرایط مستقیم هیدروژئوشیمیایی آب از نظر تعادل‌های شیمیایی نمایه‌های اشباع کانی‌های مختلف محاسبه شد. با استفاده از این نمایه‌ها می‌توان پی برد که کانی خاصی در حال رسوب‌گذاری است یا این که آب توانایی انحلال کانی خاصی را دارد. جهت تفسیر داده‌های شیمیایی قنات‌ها، تعیین تیپ و رخساره و تکامل شیمیایی آب در قنات‌های مختلف منطقه از روش‌های مختلفی نظیر نمودارهای پایپر، نسبت های یونی، نمودارهای ترکیبی، توزیع زمانی و مکانی پارامترهای شیمیایی و توزیع مکانی رخساره‌ها استفاده شده‌است.

### 3-5- مطالعات ایزوتوپی

براساس نتایج آنالیز نمونه‌های بارش و آب قنات‌ها برای ایزوتوپ‌های پایدار، محدوده تغییرات اکسیژن 18 و دوتریم در بارش و آب قنات‌ها مشخص شد. با استفاده از داده‌های ایزوتوپی بارش محدوده طی سال آبی 1395-1396 خط بارش جوی (LMWL) منطقه گناباد ترسیم شد. داده‌های ایزوتوپی مربوط به قنات‌ها در فصل تر و خشک نسبت به خط بارش جوی محلی و جهانی (GMWL) مقایسه شد و به وسیله آن منشأ و مکانیسم تغذیه و جریان آب قنات‌ها مشخص گردید. رابطه بین محتوای ایزوتوپی اکسیژن 18 و ارتفاع برای ایستگاه‌های بارش محدوده گناباد ترسیم و ارتفاع تغذیه قنات‌ها تعیین شد. همچنین با استفاده از ترکیب ایزوتوپی بارش‌های منطقه و آب قنات‌ها در فصل تر و خشک، سهم بارش‌های سال 95-96 در آبدهی قنات‌ها در سال مذکور تعیین گردید. رابطه محتوای ایزوتوپی قنات‌ها با طول، طول تره‌کار، عمق مادرچاه، فاصله مادرچاه تا ارتفاعات و هدایت الکتریکی آب قنات‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

## فصل چهارم: هیدروژئولوژی قنات‌ها

برای بررسی هیدروژئولوژی قنات‌ها، ابتدا عمق مادر چاه آنها با استفاده از رقوم ارتفاع مظهر، مادرچاه و شیب کوره قنات برآورد گردید. در ادامه حوضه آبرگیر عمومی قنات‌های دشت تعیین و بیلان آب در حوضه آبرگیر محاسبه شد. هیدروگراف دراز مدت قنات‌ها به همراه تغییرات بارش موثر ترسیم و عوامل موثر بر روند هیدروگراف قنات‌ها بررسی شد. نرخ کاهش سالانه دبی قنات‌ها مشخص و سهم عوامل اقلیمی و انسانی در کاهش دبی آنها تعیین گردید. با استفاده از افزایش یا کاهش بارندگی موثر سهم بارش سالانه در آبدهی قنات‌ها به دست آمد. نقشه همتراز آب زیرزمینی دشت براساس اطلاعات پیزومتری و تراز کف مادرچاه قنات‌ها و این نکته که در محدوده تره‌کار، قنات همانند زهکش عمل می‌کند و منحنی‌های هم پتانسیل کوره قنات را قطع نمی‌کنند، ترسیم شد. تاثیر افت سطح آب زیرزمینی دشت بر کاهش آبدهی قنات‌ها تعیین و بر این اساس و با فرض ادامه روند افت کنونی سطح آب زیرزمینی در دشت، نقطه مرگ قنات‌ها محاسبه گردید. تغییرات زون تره‌کار قنات در طول 30 سال اخیر محاسبه و رابطه آن با درصد کاهش آبدهی قنات‌ها بررسی شد.

### 4-1- تخمین عمق مادرچاه قنات‌های دشت

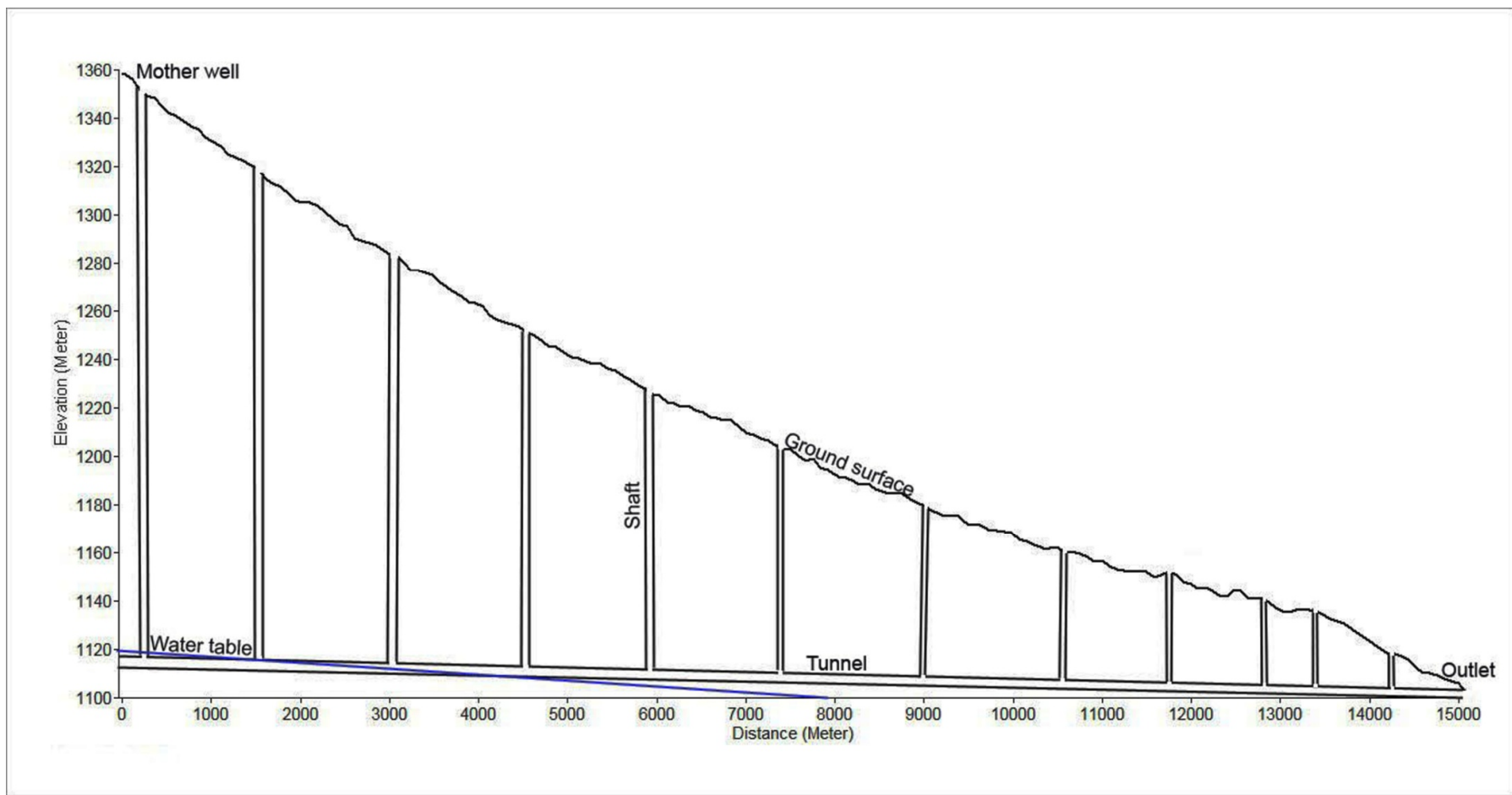
با توجه به قدمت بسیار زیاد قنات‌های دشت گناباد، درب مادر چاه قنات‌ها بسته بوده و امکان اندازه‌گیری عمق دقیق آنها وجود ندارد. با توجه به اختلاف ارتفاع محل مادرچاه و مظهر قنات همچنین شیب کف و طول کوره قنات می‌توان عمق مادر چاه قنات‌ها را برآورد نمود. شیب کف کانال افقی یا کوره قنات ملایم و به طور متوسط در چند قنات که مورد اندازه‌گیری قرار گرفته حدود 1/1000 است. بر این اساس عمق مادرچاه قنات‌های انتخابی محاسبه و در جدول (4-1) آمده است. برای مثال ارتفاع دهانه مادرچاه رشته کلات قنات قصبه 1358 متر از سطح دریاست. با احتساب طول 15 کیلومتری کوره قنات بین مظهر و مادرچاه و شیب 1 در هزار کف کوره، بنابراین ارتفاع کف

مادرچاه رشته کلات باید 15 متر از ارتفاع مظهر قنات بالاتر و حدود 1117 متر باشد، اختلاف این دو ارتفاع (دهانه و کف مادرچاه) عمق مادرچاه رشته مذکور برابر 241 متر می باشد. البته در حال حاضر چاه مذکور آخرین چاه قابل مشاهده در روی زمین است، ولی به گفته مقنن قدیمی این رشته تا مجاورت روستای کلات ادامه داشته است و مادرچاه اصلی آن در حاشیه روستای کلات است که خاکریز چاه‌های بالاتر از مادرچاه کنونی در اثر سیلاب‌های رودخانه کلات از بین رفته و آثاری از آنها در سطح زمین باقی نمانده است. در صورتیکه محل مادرچاه قدیمی رشته کلات در نظر گرفته شود ارتفاع دهانه مادرچاه قدیمی از سطح دریا برابر 1478 متر و با توجه به فاصله 19 کیلومتری تا مظهر، کف مادرچاه دارای ارتفاع 1121 متری خواهد بود و در نتیجه عمق مادرچاه برابر 357 متر خواهد بود.

جدول 4-1- عمق مادر چاه قنات‌های انتخابی دشت گناباد

نام قنات	ارتفاع مظهر (متر)	ارتفاع دهانه مادرچاه (متر)	ارتفاع کف مادرچاه (متر)	طول قنات (کیلومتر)	عمق مادرچاه (متر)
بیدخت	1079	1236	1093/7	14/7	143/3
بهباد	1105	1287	1117	12	170
قصبه (کاخک)	1102	1313	1115	13	198
قصبه (کلات)	1102	1358	1117	15	241
رهن (شرقی)	1128	1394	1142	14	252
رهن (غربی)	1128	1406	1143	15	263
دیزق	1091	1245	1101	10	144
خشویی	1117	1298	1127/5	10/5	17/5

به منظور ارزیابی رفتار هیدروژئولوژیکی قنات‌های مورد مطالعه، علاوه بر اطلاعات گردآوری شده آبدهی قنات‌ها در طول 20 سال اخیر، دبی قنات‌ها در سال آبی 95-96 ماهانه اندازه‌گیری شده است. در این بخش محدوده حوضه آبگیر کلی برای قنات‌های دشت گناباد تعیین و بیلان آب در محدوده حوضه آبگیر قنات‌ها محاسبه شد. سپس تغییرات درازمدت قنات‌ها و تغییرات سالانه دبی کلیه قنات‌ها، مورد بحث و بررسی قرار داده می‌شود.



شکل 4-1- برش طولی و نیمرخ تپوگرافی رشته کلات قنات قصبه گناباد

#### 4-2- حوضه آبخیز قنات‌ها

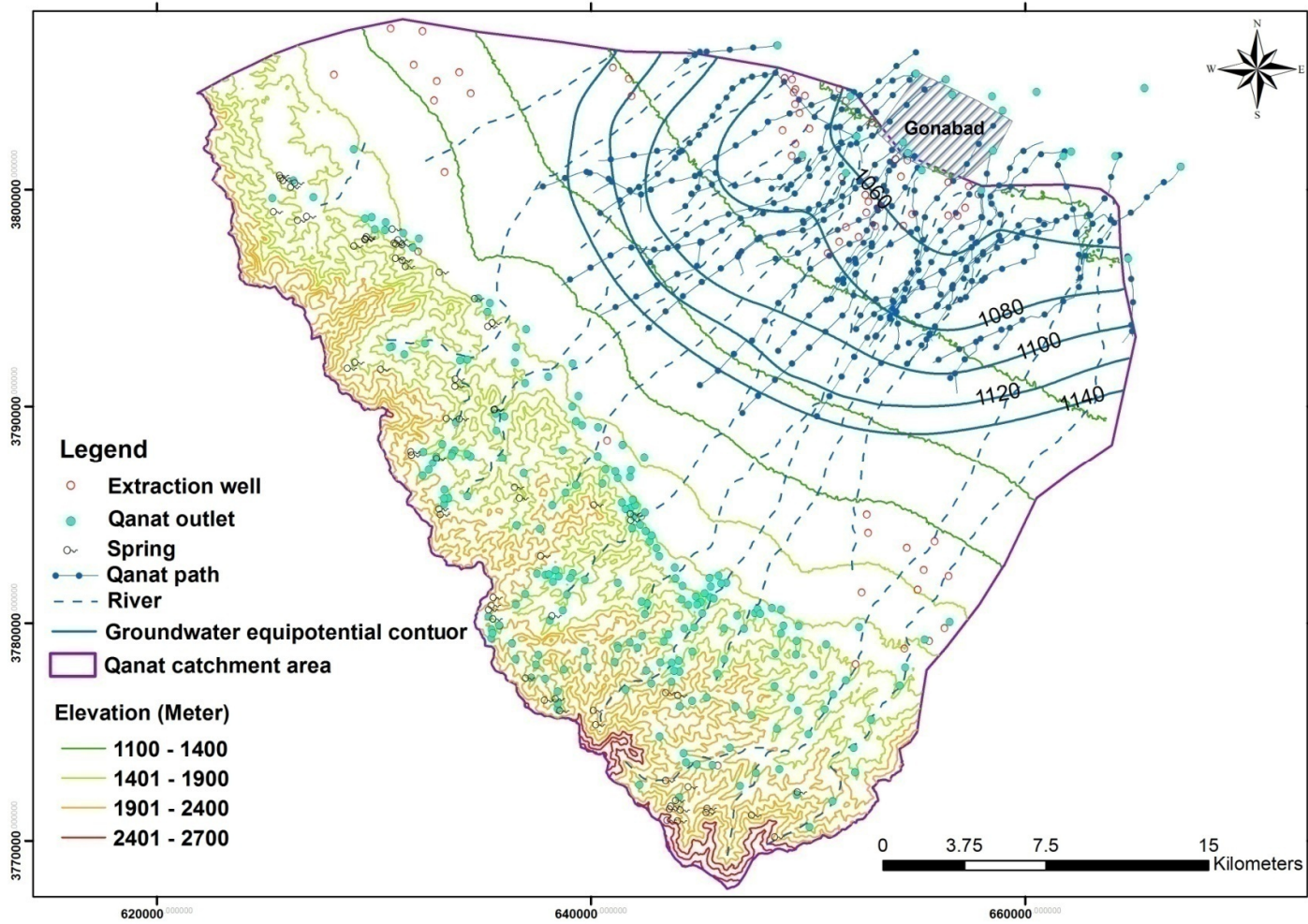
همانطور که در قسمت‌های قبل اشاره شد در دشت گناباد تعداد 26 رشته قنات وجود دارد. حوضه آبخیز این قنات‌ها در شکل 4-2 ترسیم شده است. به دلیل نزدیکی مسیر قنات‌ها به یکدیگر و تداخل زیادی که با همدیگر دارند، یک حوضه آبخیز کلی و مشترک برای آنها ترسیم شده است. مساحت حوضه آبخیز قنات‌ها برابر 1032 کیلومتر مربع است که 390 کیلومتر مربع آن ارتفاعات و 642 کیلومتر مربع آن دشت است.

#### 4-3- ارزیابی بیلان آب زیرزمینی در حوضه آبخیز قنات‌ها

ارزیابی بیلان چیزی جز موازنه ماده نیست که در آن تمام ورودی‌ها، خروجی‌ها و تغییر در ذخیره در محدوده‌ای با مرزهای مشخص ارزیابی می‌شود. با برقراری بیلان وضعیت پتانسیل آب در یک محدوده مطالعاتی یا آبخوان معلوم شده و براساس نتایج آن می‌توان امکان توسعه بهره‌برداری از منابع آب را برآورد نمود و همچنین در محدوده‌های دارای بیلان منفی چگونگی کنترل اضافه برداشت را بررسی کرد. بیلان آب زیرزمینی یک آبخوان طبق معادله کلی زیر محاسبه می‌شود.

$$\pm \Delta V = [Q_{in} + Q_p + Q_R + Q_I] - [Q_{out} + Q_{ex} + Q_{et} + Q_D] \quad (1-4)$$

طبق معادله بالا ورودی‌ها شامل میزان نفوذ موثر حاصل از ریزش‌های جوی ( $Q_p$ )، میزان جریانات زیرزمینی ورودی به محدوده بیلان ( $Q_{in}$ )، حجم آب برگشتی از کشاورزی، شرب و صنعت ( $Q_I$ )، حجم آب ناشی از نفوذ رواناب‌ها ( $Q_R$ ) و خروجی‌ها شامل میزان جریان‌های خروجی از محدوده بیلان ( $Q_{out}$ )، حجم آب زیرزمینی بهره‌برداری شده ( $Q_{ex}$ )، حجم آب تبخیر شده از سفره آب زیرزمینی ( $Q_{et}$ )، حجم آب زهکشی شده از آبخوان ( $Q_D$ ) و  $\Delta V$  تغییر در میزان ذخیره آبخوان است.



شکل 2-4- حوضه آبخیز قنات‌های دشت گناباد

#### 4-3-1- عوامل ورودی محدوده بیلان

میزان جریان زیرزمینی ورودی به حوضه آبخیز قنات‌ها: به دلیل اینکه محدوده ارتفاعات نیز جزء محدوده بیلان است همچنین با توجه به لیتولوژی و شیب سازندهای ارتفاعات مجاور تقریباً جریان زیرزمینی به محدوده صورت نمی‌گیرد و بنابراین برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

**حجم آب نفوذ یافته از نزولات جوی:** بارندگی مفید به مجموع رواناب و نفوذ حاصل از بارندگی در ارتفاعات یا دشت یک محدوده مطالعاتی اطلاق می‌شود. علاوه بر تبخیر و تعرق حقیقی بخشی از بارش نیز صرف تامین رطوبت خاک می‌شود که میزان سالانه آن با توجه به شرایط اقلیمی، دانه‌بندی خاک سطحی و وضعیت پوشش گیاهی منطقه، از کمتر از 50 میلیمتر برای نواحی خشک و بدون پوشش گیاهی تا 200 میلیمتر برای نواحی مرطوب با پوشش گیاهی، متغیر می‌باشد. بارندگی مفید از تفاضل بارش با تبخیر و تعرق حقیقی و نیاز رطوبت خاک حاصل می‌شود. متوسط بارندگی 5 ساله منتهی به سال آبی 95-96 در ارتفاعات و دشت حوضه آبخیز به ترتیب برابر 210/1 و 107/5 میلیمتر است. ضریب تغذیه ناشی از بارندگی در ارتفاعات و دشت حوضه آبخیز به ترتیب حدود 27 درصد و 10 درصد در نظر گرفته شد. بنابراین با توجه به جنس و ذرات خاک، لیتولوژی و درز و شکستگی سنگ‌ها، شیب توپوگرافی، پوشش گیاهی و میزان بالای تبخیر در منطقه سالانه حدود 29/02 میلیون مترمکعب نفوذ عمقی ناشی از بارش‌های حوضه و رواناب حاصل از آن خواهد بود.

**حجم آب برگشتی از کشاورزی، شرب و صنعت (QI):** نفوذ از مصرف کشاورزی یا تغذیه از مزارع به نوع آبیاری، دانه بندی خاک، وضعیت کرت‌بندی مزرعه و حتی کیفیت آب مصرفی بستگی دارد. نفوذ از مصارف شرب و صنعت بر حسب نوع دفع پساب شرب و صنعت بسیار متفاوت می‌باشد. طبق بررسی‌های تجربی چنانچه دفع پساب توسط چاه‌های جذبی صورت بگیرد، میزان تغذیه آبخوان بین 60 تا بیش از 75 درصد آب مصرفی شرب و صنعت را شامل می‌شود.

19/5 میلیون مترمکعب از سفره آب زیرزمینی حوضه آبخیز توسط قنات‌های دشت تخلیه می‌گردد و 4/9 میلیون مترمکعب نیز توسط چاه‌های موجود در دشت حوضه آبخیز تخلیه می‌گردد. تخلیه قنات‌ها



و چشمه‌های موجود در ارتفاعات حوضه آبخیز به ترتیب برابر 10/1 و 3/1 میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. آب زیرزمینی تخلیه شده توسط قنات‌های دشت در خارج از محدوده بیلان و حوضه آبخیز مصرف می‌گردد ولی قنات‌ها و چشمه‌های موجود در ارتفاعات حوضه آبخیز عمدتاً مصرف کشاورزی دارند و حدود 30 درصد آب تخلیه شده از آنها دوباره در ارتفاعات و قسمت‌های بالادست دشت نفوذ کرده و به ذخایر زیرزمینی بر می‌گردد که در تغذیه قنات‌های دشت موثر است. همچنین چاه‌های حوضه آبخیز مصرف شرب و کشاورزی دارند و به طور متوسط 40 درصد آب برداشتی دوباره به سفره حوضه برمی‌گردد. با محاسبات انجام گرفته میزان آب برگشتی کشاورزی و شرب محدوده بیلان برابر 5/92 میلیون مترمکعب خواهد بود.

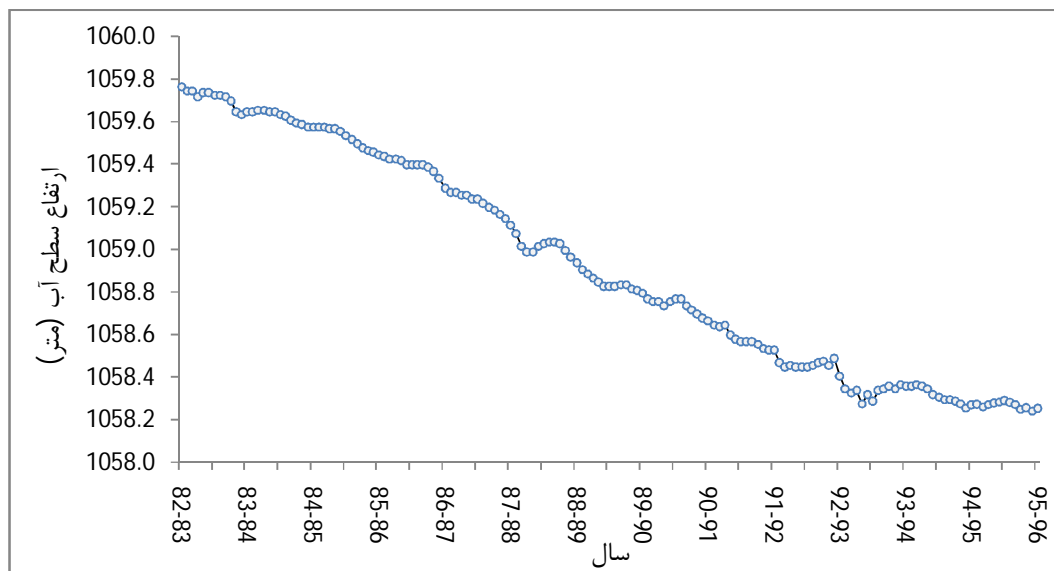
#### 4-3-2- عوامل خروجی محدوده بیلان

**میزان تبخیر و تعرق از آبخوان:** تبخیر و تعرق از آب زیرزمینی به عمق سطح آب زیرزمینی، نوع و بافت خاک، درجه حرارت خاک، درجه حرارت محیط، شدت باد، پوشش گیاهی، رطوبت نسبی هوا و غلظت املاح بستگی دارد. عمق آب زیرزمینی در محدوده حوضه آبخیز قنات‌ها بیش از 5 متر است و از آنجا که تبخیر و تعرق در عمق کمتر از 5 متر صورت می‌گیرد، میزان تبخیر و تعرق از حوضه صفر در نظر گرفته می‌شود.

**حجم آب زهکشی شده از حوضه:** در محدوده حوضه آبخیز تعیین شده امکان زهکشی آب زیرزمینی توسط مسیل‌ها وجود ندارد. لذا حجم زهکشی از حوضه صفر در نظر گرفته شد.

**میزان جریان زیرزمینی خروجی از حوضه:** براساس نقشه‌های خطوط تراز آب زیرزمینی تنها خروجی زیرزمینی حوضه آبخیز در قسمت شمال شرق دشت وجود دارد با توجه به دانه ریز بودن آبرفت‌های دشت در قسمت‌های انتهایی آن (کفه‌های رسی) میزان قابلیت انتقال سفره بسیار کم بوده و حجم آب خروجی از حوضه با توجه به طول مقطع خروجی به میزان 12 کیلومتر، قابلیت انتقال 60 مترمربع بر روز و شیب هیدرولیکی برابر 0/004 سالانه برابر 1/05 میلیون مترمکعب برآورد می‌شود.

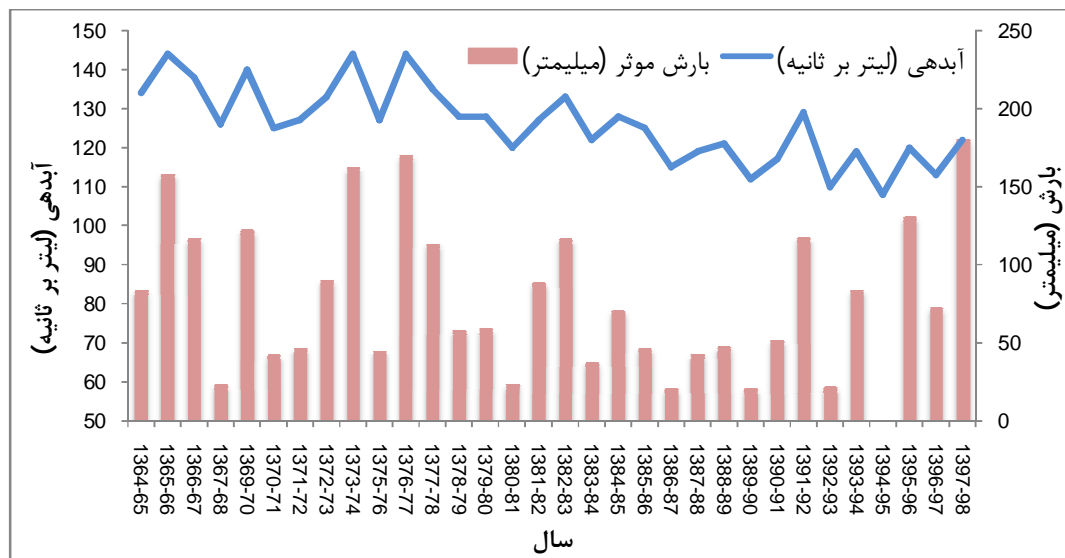
تخلیه و برداشت از آب زیرزمینی ( $Q_{ex}$ ): تخلیه و برداشت از آب زیرزمینی مهمترین عامل خروجی آب بوده که شامل برداشت (پمپاژ) توسط چاه و تخلیه بوسیله قنات و چشمه می‌باشد. در محدوده بیلان 234 رشته قنات وجود دارد که سالانه حدود  $29/6$  میلیون مترمکعب از سفره آب زیرزمینی حوضه آبرگیر توسط قنات‌ها تخلیه می‌گردد. همچنین از 66 حلقه چاه موجود در محدوده بیلان سالانه حدود  $4/9$  میلیون مترمکعب آب استخراج می‌گردد. میزان تخلیه آب زیرزمینی از حوضه آبرگیر توسط چشمه‌های موجود در ارتفاعات حوضه نیز  $3/1$  میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. میزان تخلیه از حوضه آبرگیر قنات‌ها سالانه برابر  $38/65$  میلیون مترمکعب و میزان تغذیه حوضه آبرگیر سالانه برابر  $34/94$  میلیون مترمکعب است. در نتیجه سالانه حدود  $3/7$  میلیون مترمکعب بیش از مقدار تغذیه حوضه آبرگیر و از ذخیره سفره آب زیرزمینی برداشت می‌شود که باعث افت سطح آب زیرزمینی در سفره می‌گردد. افت سطح آب زیرزمینی یکی از دلایل اصلی کاهش زون آبرگیر قنات و در نتیجه از بین رفتن قنات است. با توجه به هیدروگراف معرف آبخوان دشت گناباد، میزان متوسط افت سطح آب زیرزمینی در 5 سال منتهی به سال آبی 95-96 به میزان  $0/06$  متر بوده است. مساحت سفره آب زیرزمینی در محدوده بیلان (حوضه آبرگیر قنات‌ها) برابر  $642$  کیلومترمربع و میزان متوسط ضریب ذخیره دشت برابر  $8/5$  درصد در نظر گرفته شده است. در نتیجه میزان کسری متوسط سالانه مخزن برابر  $3/3$  میلیون مترمکعب برآورد شده است.



شکل 4-3- هیدروگراف معرف آبخوان دشت گناباد

#### 4-4- بررسی تغییرات دراز مدت آبدهی قنات‌ها

جهت مطالعه تغییرات آبدهی قنات‌های مهم دشت گناباد، داده‌های آبدهی اندازه‌گیری شده آنها از سال 1364 تا سال 1398 جمع‌آوری و اندازه‌گیری شد (جدول 4-2). به منظور بررسی تاثیر تغییرات بارش‌ها بر آبدهی قنات‌ها، مجموع بارش روزانه بیش از 20 میلیمتر (بارش موثر) در هر سال در ارتفاعات محدوده محاسبه شد. هیدروگراف هر یک از قنات‌ها به همراه تغییرات بارش موثر ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت. کاهش بارندگی در کاهش آبدهی همه قنات‌ها تاثیرگذار بوده است ولی تاثیر آن در همه قنات‌ها یکسان نیست. هیدروگراف قنات قصبه در شکل 4-4 آمده است. آبدهی قنات مذکور از سال 1364 تا سال 1398 از 134 لیتر در ثانیه به 122 لیتر در ثانیه کاهش یافته است. کاهش بارندگی تاثیر زیادی در کاهش آبدهی قنات قصبه داشته است. از جمله عوامل موثر دیگر در کاهش آبدهی قنات مذکور می‌توان به احداث سد کلات و نیز تخریب بستر رودخانه‌های تغذیه کننده قنات توسط واحدهای برداشت شن و ماسه در حوضه آبرگیر این قنات اشاره کرد. همچنین ته‌نشست رسوبات کربناتی در دیواره قنات در قسمت تره‌کار و عدم لایروبی قنات و در نتیجه کاهش تراوایی زون آبده قنات از دیگر عوامل کاهش آبدهی قنات قصبه است.



شکل 4-4- هیدروگراف قنات قصبه

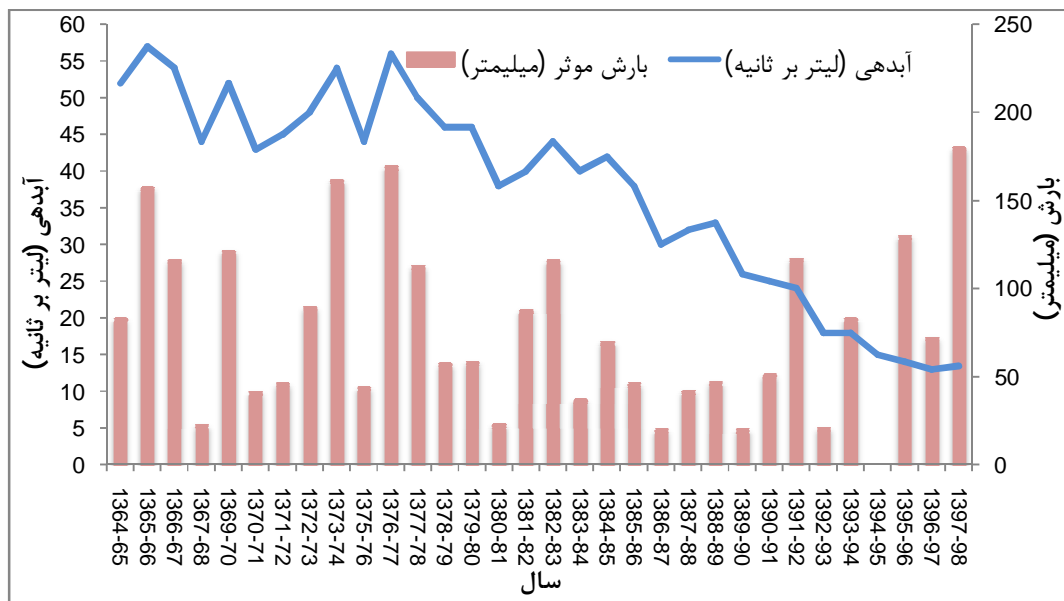
در شکل 5-4 هیدروگراف قنات رهن آمده است. قنات مذکور بعد از قنات قصبه عمیق‌ترین قنات دشت گناباد است. با توجه به هیدروگراف قنات مشاهده می‌شود هیدروگراف قنات در طول دوره آماری از سال 1377 به بعد روند نزولی داشته و آبدهی قنات کاهش شدیدی داشته است، چنانچه بیشترین کاهش آبدهی در بین قنات‌های دشت گناباد مربوط به این قنات است. کاهش بارندگی یکی از عوامل موثر بر کاهش آبدهی این قنات است ولی دلیل اصلی کاهش آبدهی قنات مذکور تغذیه قنات توسط سازندهای آهکی جمال و شتری، ترکیب کربناتی آب قنات و ته نشست ترکیبات کربناتی در دیواره‌های کوره قنات و عدم لایروبی قنات مذکور است. از دیگر عوامل کاهش آبدهی قنات، احداث دو سد بر روی رودخانه‌های زبید و روچی و در نتیجه کاهش تغذیه آبرفت دشت در محل رشته‌های اصلی قنات است (شکل 4-13).

در شکل 6-4 هیدروگراف قنات بهاباد آمده است. آبدهی قنات مذکور در طول دوره آماری از 35 به 26 لیتر در ثانیه کاهش یافته است. علاوه بر کاهش بارش، حفر چاه‌های عمیق در جنوب شرق حوضه آبخیز و نیز احداث سد کاخک بر روی رودخانه‌های تغذیه کننده دشت، همچنین عدم لایروبی قنات از

دلایل کاهش آبدهی قنات می‌باشد. چاه‌های آب شرب شهر کاخک و روستاهای اطراف در جنوب شرق حوضه آبیگیر از سال 1370 به بعد با عمق 300 تا 330 متر حفر شده‌اند و با دبی بین 8 تا 19 لیتر بر ثانیه در حال بهره‌برداری و سالانه 1/5 میلیون مترمکعب آب توسط این چاه‌ها استخراج می‌گردد.

جدول 4-2- آبدهی قنات‌ها و بارش موثر محدوده ارتفاعات گناباد

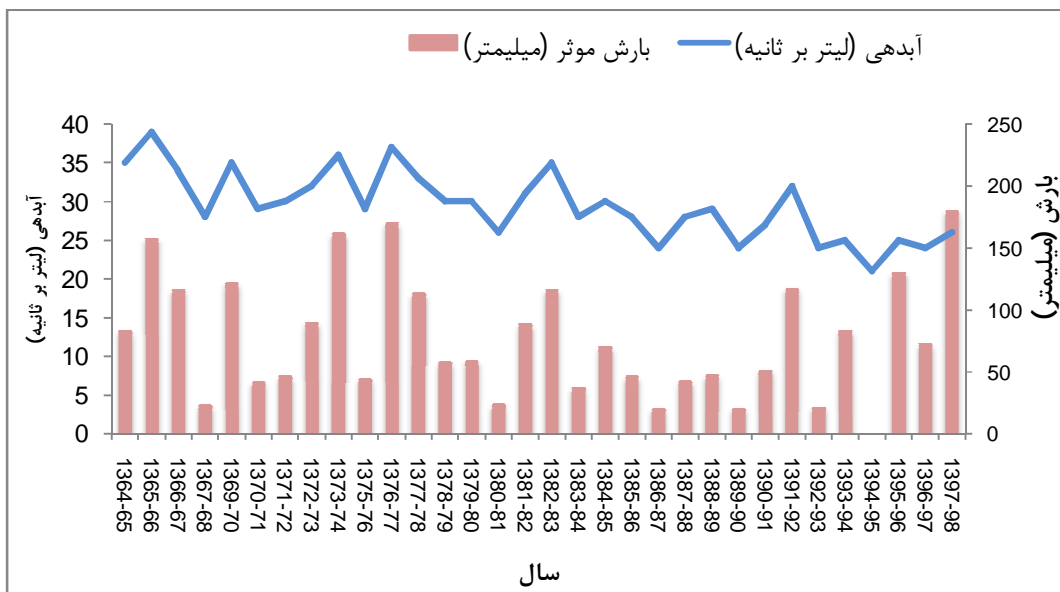
آبدهی (لیتر بر ثانیه)					بارش موثر	سال	
قصبه	بهباد	رهن	دیزق	خشویی			
134	35	52	62	54	36	83	1364-65
144	39	57	65	60	39	157/5	1365-66
138	34	54	63	56	35	116	1366-67
126	28	44	58	48	32	22/5	1367-68
140	35	52	64	58	36	121/5	1369-70
125	29	43	59	50	32	41/5	1370-71
127	30	45	60	51	32	46	1371-72
133	32	48	61	54	33	89/5	1372-73
144	36	54	64	57	38	161/5	1373-74
127	29	44	58	48	32	44	1375-76
144	37	56	66	60	38	169/5	1376-77
135	33	50	62	55	34	113	1377-78
128	30	46	58	47	32	57/5	1378-79
128	30	46	59	46	33	58/5	1379-80
120	26	38	55	44	28	23	1380-81
127	31	40	57	47	31	88	1381-82
133	35	44	61	50	36	116	1382-83
122	28	40	57	42	31	37	1383-84
128	30	42	59	46	34	70	1384-85
125	28	38	57	44	31	46	1385-86
115	24	30	54	38	26	20	1386-87
119	28	32	56	40	28	42	1387-88
121	29	33	57	42	29	47	1388-89
112	24	26	54	37	25	20	1389-90
117	27	25	57	41	27	51	1390-91
129	32	24	60	43	31	117	1391-92
110	24	18	54	36	26	21	1392-93
119	25	18	57	37	28	83	1393-94
108	21	15	50	30	22	0	1394-95
120	25	14	56	36	26	130	1395-96
113	24	13	55	34	24	72	1396-97
122	26	13/5	57	36	27	180	1397-98



شکل 4-5- هیدروگراف قنات رهن

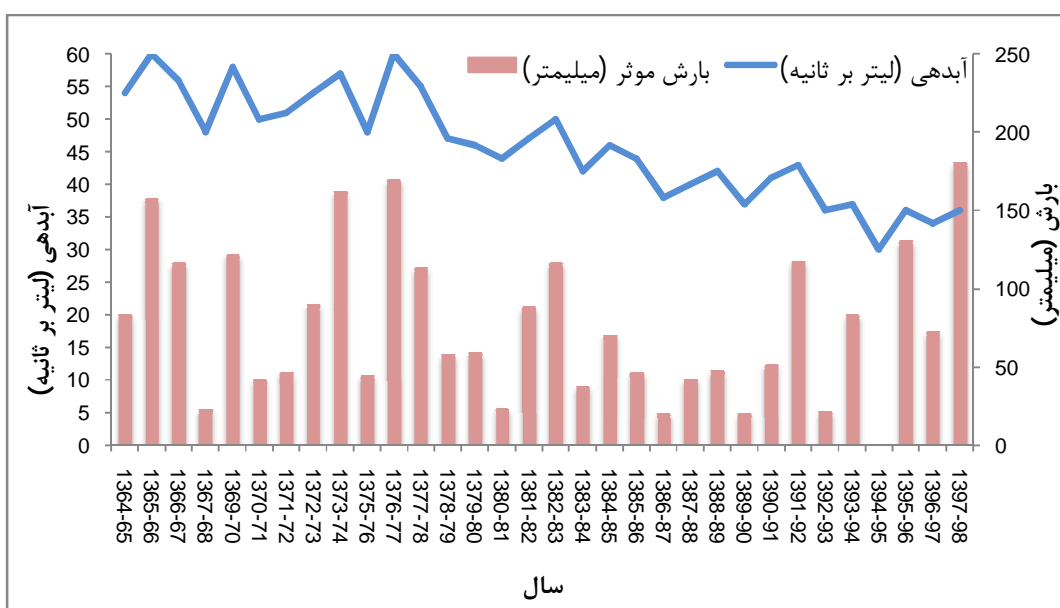
آبدهی قنات خشویی مطابق شکل 4-6 از سال 1364 تا سال 1397 از 54 به 36 لیتر در ثانیه کاهش یافته است. علاوه بر کاهش بارش از مهمترین دلایل کاهش آبدهی این قنات می‌توان به حفر 10 حلقه چاه‌های آب شرب و کشاورزی در غرب دشت گناباد اشاره کرد. در جنوب غرب حوضه آبخیز قنات‌ها 7 حلقه چاه آب شرب با دبی بهره‌برداری بین 4 تا 7/5 لیتر در ثانیه و مجموع دبی بهره‌برداری 24/5 لیتر بر ثانیه، همچنین 3 حلقه چاه کشاورزی با دبی بین 7 تا 15/5 لیتر در ثانیه و مجموع برداشت 30 لیتر بر ثانیه وجود دارد. برداشت آب در این قسمت دشت توسط چاه‌ها سالانه حدود یک میلیون مترمکعب است. همچنین واحد برداشت شن نیز در بالادست این قنات وجود دارد که از دلایل کاهش نفوذ آب در بستر رودخانه‌های حوضه آبخیز قنات و تغذیه قنات است.

در شکل 4-8 هیدروگراف قنات بیدخت آمده است. آبدهی قنات در طول دوره حدود 9 لیتر در ثانیه کاهش داشته است. علاوه بر کاهش بارندگی، حفر چاه‌های آب شرب کاخک در جنوب شرق حوضه آبخیز و نیز احداث سد کاخک بر روی رودخانه تغذیه کننده آبرفت دشت در بالادست قنات مذکور از دلایل کاهش آبدهی قنات بیدخت است (شکل 4-13).

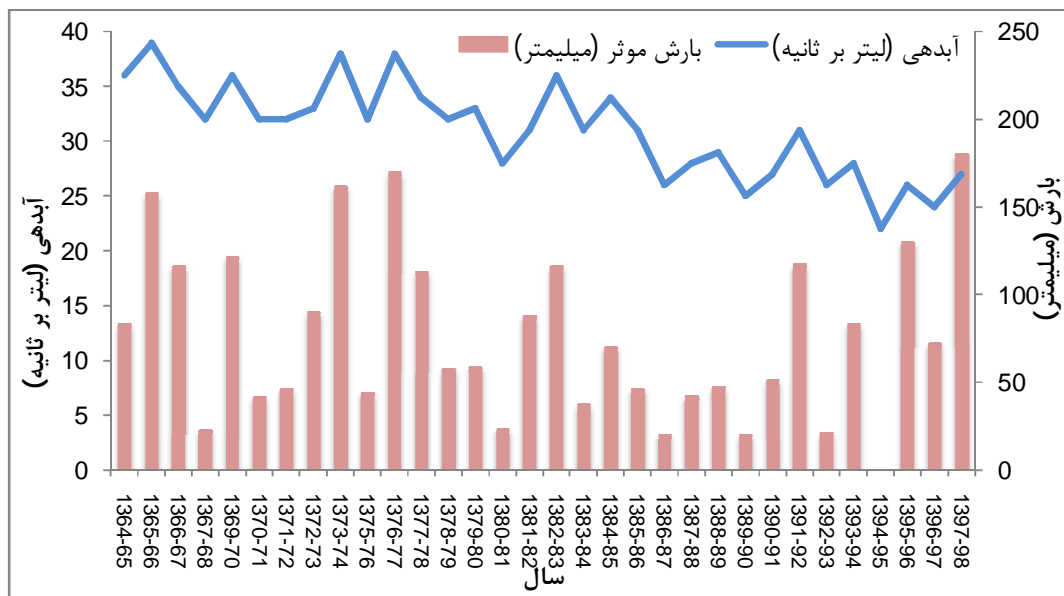


شکل 4-6- هیدروگراف قنات بهاباد

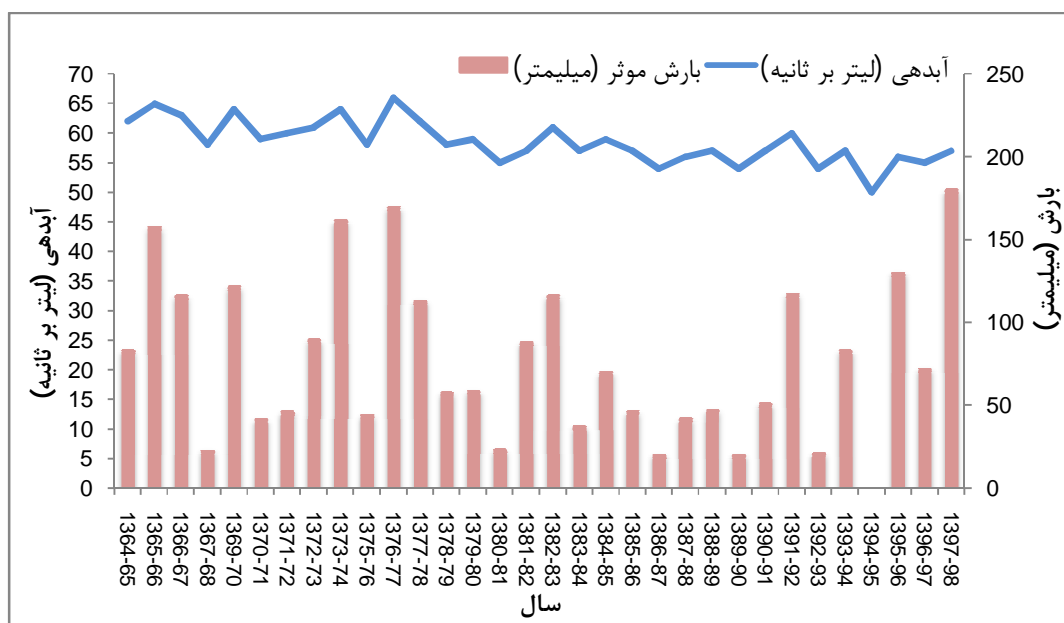
در شکل 4-9 هیدروگراف قنات دیزق آمده است. آبدهی قنات مذکور در طول دوره آماری تقریباً ثابت بوده و تغییرات محسوسی نداشته است، چنانکه آبدهی قنات در سال‌های 1364 و 1397 به ترتیب برابر 62 و 57 لیتر در ثانیه بوده است. این قنات کمترین کاهش آبدهی در دشت گناباد داشته است.



شکل 4-7- هیدروگراف قنات خشویی



شکل 8-4- هیدروگراف قنات بیدخت



شکل 9-4- هیدروگراف قنات دیزق

از دلایل عدم کاهش آبدهی قنات دیزق، استعداد خوب سفره آب زیرزمینی در محل قنات مذکور (آبدهی ویژه بالای آبرفت)، عدم حفر چاه در حریم قنات و ترکیب شیمیایی آب قنات است. مادر چاه قنات مذکور در اواسط دشت گناباد قرار دارد. آب باران ارتفاعات حوضه آبخیز نفوذ کرده و پس از طی



مسافت حدود 10 کیلومتر در آبرفت دشت به مادرچاه و قسمت تره کار قنات مذکور می‌رسد، در این فاصله ترکیب شیمیایی آن تغییر کرده و قسمت اعظم مواد کربناتی خود را از دست می‌دهد. بنابراین دارای ترکیبات کربناتی کمتری است و در نتیجه ته‌نشست رسوبات کربناتی در تره‌کار این قنات به طور قابل ملاحظه‌ای اتفاق نمی‌افتد. علاوه بر این قسمت تره‌کار (زون آبگیر) قنات دیزق در پایین دست قنات‌های اطراف آن قرار دارد و نفوذ قسمتی از آب قنات‌های بالادست در کوره آنها سبب تغذیه قنات مذکور می‌گردد.

#### 4-5- محاسبه میزان نرخ کاهش سالانه دبی قنات‌ها

از اختلاف دبی قنات‌ها در دو سال که دارای بارش موثر تقریباً یکسان و فاصله زمانی زیادی دارند (سال‌های 64-65 و 93-94) میزان نرخ کاهش سالانه دبی مطابق رابطه 4-2 محاسبه شد.

$$(2-4) \quad \text{نرخ کاهش سالانه دبی (لیتر در ثانیه در سال)} = \frac{\text{اختلاف دبی سال‌های 64 و 94}}{\text{فاصله زمانی}}$$

سال آبی 64-65 و 93-94 دارای بارش موثر یکسانی بودند. بنابراین دبی این دو سال برای محاسبه نرخ کاهش سالانه دبی قنات‌ها استفاده شد. در جدول 3-4 نرخ کاهش دبی سالانه قنات‌ها آمده است. قنات دیزق کمترین تغییرات آبدهی را در مقایسه با دیگر قنات‌ها داشته است که کاهش آبدهی قنات مذکور در نتیجه تغییرات اقلیمی (کاهش بارش سالانه، تغییر نوع بارش و تغییر توزیع زمانی بارش) بوده است. بنابراین با کم کردن سهم تغییر اقلیم از نرخ کاهش سالانه دبی قنات‌ها، سهمی که توسط دخالت‌های بشری ایجاد شده است به دست می‌آید. در جدول 3-4 نرخ کاهش دبی سالانه قنات‌ها و سهم عوامل انسانی در کاهش سالانه دبی مشخص شده است. دخالت‌های بشری شامل حفر چاه، احداث سد و تخریب شرایط طبیعی رودخانه‌ها در حوضه آبگیر و عدم مرمت و لایروبی قنات‌هاست. بیشترین میزان سهم دخالت‌های بشری در کاهش آبدهی قنات‌ها در قنات رهن دیده می‌شود. پس از قنات رهن، دخالت‌های بشری بیشترین سهم در کاهش آبدهی قنات خشویی دارد. دو قنات مذکور در

غرب دشت قرار دارند. عدم لایروبی قنات رهن، ساخت سدهای زبید و روچی در حوضه آبخیز این دو قنات، همچنین حفر چاه‌های آب شرب در غرب دشت از دلایلی اصلی کاهش دبی قنات‌های مذکور است. سهم عوامل انسانی در کاهش آبدهی قنات قصبه برابر 0/35 لیتر در ثانیه در سال است که به دلیل احداث سد کلات و تخریب بستر رودخانه‌های تغذیه کننده قنات است. سهم کاهش نرخ دبی ناشی از فعالیت‌های بشری در دو قنات بهاباد و بیدخت تقریباً یکسان و در اثر احداث سد کاخک و حفر چاه‌های آب شرب کاخک در شمال شرق حوضه آبخیز این قنات‌ها اتفاق افتاده است.

جدول 4-3- نرخ کاهش سالانه آبدهی قنات‌های دشت گناباد

نام قنات	میزان کاهش آبدهی (لیتر در ثانیه)	نرخ کاهش دبی سالانه (لیتر در ثانیه در سال)	سهم عوامل انسانی در کاهش دبی قنات‌ها (لیتر در ثانیه در سال)
قصبه	15	0/52	0/35
بهاباد	10	0/34	0/17
رهن	34	1/17	1
دیزق	5	0/17	0
خشویی	17	0/59	0/42
بیدخت	8	0/28	0/11

#### 4-6- برآورد سهم آبدهی هر قنات با استفاده از بارش سال آبی هدف

با استفاده از افزایش یا کاهش بارندگی موثر می‌توان سهم بارش سالانه در آبدهی قنات‌ها را به دست آورد. به این منظور از رابطه 4-3 استفاده شد.

$$(3-4) \quad 100 \times \frac{\text{دبی مهرماه سال بعد} - \text{دبی مهرماه سال مورد نظر}}{\text{دبی مهرماه سال مورد نظر}} = \text{درصد افزایش یا کاهش دبی}$$

#### در حالت افزایش بارندگی موثر:

در این حالت در دو سال متوالی که دارای افزایش میزان بارش موثر یکسانی بودند با استفاده از رابطه بالا درصد افزایش آبدهی در اثر افزایش بارش موثر سالانه محاسبه شد (جدول 4-4). در طی دوره اول شهریورماه 73 تا شهریورماه 74، افزایش دبی قنات‌ها در حدود 5 تا 15 درصد و در دوره دوم

(شهریورماه 97 تا شهریورماه 98) در حدود 4 تا 12/5 درصد به دست آمد. در دوره دوم میزان افزایش آبدهی با وجود بارندگی موثر بیشتر نسبت به دوره اول کمتر است که به دلیل همان روند کلی کاهش آبدهی قنات در اثر دخالت‌های بشری است.

جدول 4-4- درصد افزایش آبدهی قنات‌ها در اثر افزایش بارش موثر سالانه

درصد افزایش دبی سالانه		نام قنات
سال		
96-97 تا 97-98	72-73 تا 73-74	
8	8/3	قصبه
8/3	12/5	بهباد
3/8	12/5	رهن
3/6	4/9	دیزق
5/9	5/6	خشویی
12/5	15/2	بیدخت

#### در حالت کاهش بارندگی موثر:

در این حالت در دو سال متوالی که دارای کاهش بارش موثر یکسانی بودند با استفاده از رابطه 3-4 درصد کاهش آبدهی ناشی از کاهش بارش موثر سالانه محاسبه شد (جدول 4-5). درصد کاهش آبدهی قنات‌ها در دوره اول بین 8 تا 18/5 درصد و در دوره دوم بین 10 تا 25 درصد است. درصد کاهش آبدهی از درصد افزایش آبدهی بیشتر و به دلیل همان روند کلی کاهش آبدهی قنات‌هاست.

جدول 4-5- درصد کاهش دبی سالانه قنات‌ها در اثر کاهش بارش موثر

درصد کاهش دبی سالانه		نام قنات
سال		
91-92 تا 92-93	66-67 تا 67-68	
-14/7	-8/7	قصبه
-25	-17/6	بهباد
-25	-18/5	رهن
-10	-7/9	دیزق
-16/3	-14/3	خشویی
-16/1	-8/6	بیدخت

#### 4-7- محاسبه تاثیر افت سطح آب زیرزمینی بر آبدهی قنات‌ها

برای این منظور از آمار آبدهی قنات‌ها و ارقام هیدروگراف دشت در طی دو سال آبی 69-70 و 96-95 با بارش موثر تقریباً یکسان استفاده شد. براساس هیدروگراف دشت گناباد سطح آب زیرزمینی در طی دوره مذکور حدود  $2/72$  متر افت داشته است. بنابراین متوسط افت سالانه دشت در دوره 26 ساله مذکور نیز حدود  $0/104$  متر است. در جدول 4-6 کاهش آبدهی قنات‌ها در دوره مذکور به همراه میزان کاهش آبدهی قنات‌ها به ازای یک متر افت سطح آب زیرزمینی دشت آمده است.

جدول 4-6- تاثیر افت سطح آب زیرزمینی بر کاهش آبدهی قنات‌ها

نام قنات	تغییرات آبدهی در دوره 26 ساله (لیتر بر ثانیه)	تغییرات آبدهی به ازای یک متر افت سطح آب زیرزمینی دشت
قصبه	-20	-7/4
بهباد	-10	-3/6
رهن	-38	-14
دیزق	-8	-2/9
خشویی	-22	-8/1
بیدخت	-10	-3/7

#### 4-8- محاسبه نقطه مرگ قنات‌ها

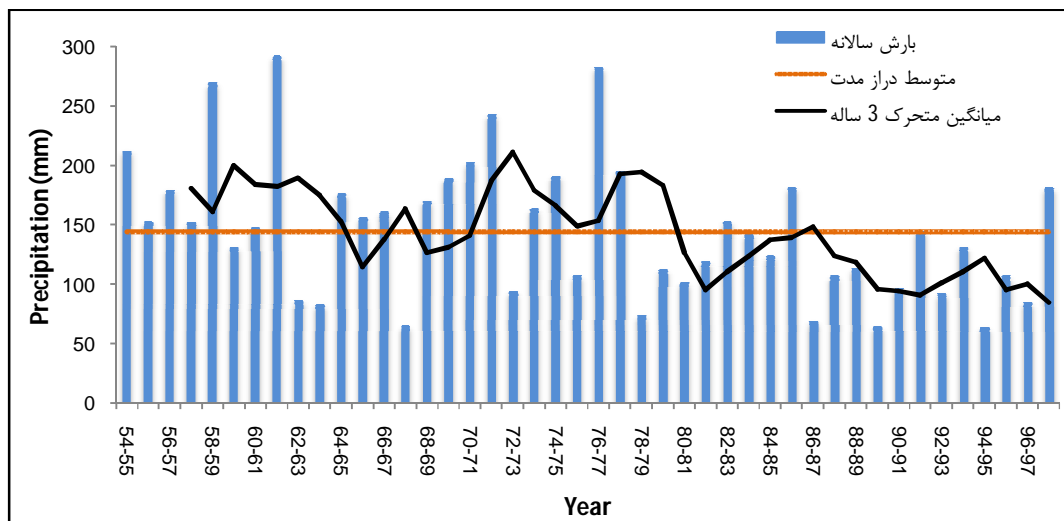
با فرض ادامه روند کنونی افت سطح آب زیرزمینی دشت گناباد ( $0/104$  متر در سال) و میزان آبدهی کنونی قنات‌ها، نقطه مرگ قنات‌ها محاسبه و در جدول 4-7 ارائه شد. بر اساس نتایج به دست آمده، قنات‌های دشت گناباد که قدمت برخی همچون قصبه به 2500 سال قبل برمی گردد در طی 10 تا 180 سال آینده از بین خواهند رفت. البته نتایج به دست آمده با فرض ادامه روند کنونی افت سطح آب زیرزمینی است و چنانچه افت سطح آب زیرزمینی دشت در اثر عواملی همچون کاهش بارندگی و وقوع خشکسالی‌ها یا افزایش برداشت از منابع آب افزایش یابد رسیدن به نقطه مرگ قنات‌ها خیلی زودتر اتفاق خواهد افتاد.

جدول 4-7- محاسبه نقطه مرگ قنات‌ها

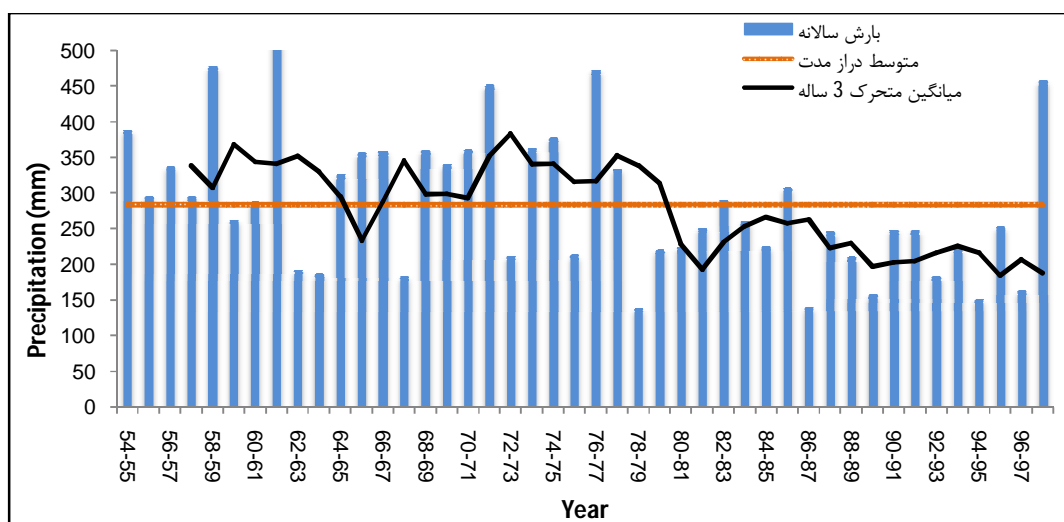
نام قنات	آبدهی (لیتر بر ثانیه)	مقدار افت سطح آب زیرزمینی دشت جهت رسیدن به نقطه مرگ قنات‌ها (میزان آبدهی کنونی تقسیم بر تغییرات آبدهی به ازای یک متر افت)	نقطه مرگ به سال (مقدار افت جهت رسیدن به نقطه مرگ تقسیم بر 0/104)
قصبه	122	16/48	158
بهباد	26	7/2	69
رهن	13/5	0/96	9
دیزق	57	19/65	188
خشویی	36	4/44	42
بیدخت	27	7/29	70

#### 4-9- بررسی عوامل موثر بر کاهش آبدهی قنات‌های دشت گناباد

کاهش بارش، احداث سد، حفر چاه‌های عمیق، از بین بردن شرایط طبیعی رودخانه‌های تغذیه‌کننده آبخوان در حوضه آبخیز قنات‌ها و عدم لایروبی قنات‌ها از مهمترین عوامل کاهش آبدهی قنات‌های دشت گناباد است. کاهش بارش که قبلاً اشاره شد از مهمترین عوامل کاهش آبدهی قنات‌هاست. کاهش بارش از سال 85 به بعد قابل توجه بوده و باعث کاهش آبدهی قنات‌ها شده است. در این مدت نوع بارش‌ها نیز تغییر کرده است، میزان بارش برف بسیار کمتر شده است و باران‌ها نیز اکثراً رگباری و سیلابی بوده و مدت بارش‌ها تداوم ندارد در نتیجه میزان نفوذ از بارش‌ها کاسته شده است. در شکل‌های 4-10 و 4-11 تغییرات میزان بارش در ایستگاه دشت و ارتفاعات محدوده گناباد به همراه میانگین دراز مدت و میانگین متحرک 3 ساله بارش در هر ایستگاه آمده است.



شکل 4-10- تغییرات بارش در دشت حوضه گناباد (ایستگاه باران سنجی شهر گناباد)



شکل 4-11- تغییرات بارش در ارتفاعات حوضه گناباد (ایستگاه باران سنجی گردنه کلات)

احداث سد در حوضه آبخیز قنات‌ها از دیگر عوامل موثر در کاهش آبدهی قنات‌ها است. در ارتفاعات حوضه آبخیز قنات‌های گناباد 4 سد احداث گردیده است که مشخصات آنها به شرح جدول 4-8 می‌باشد. موقعیت سدها نیز در شکل 4-13 نشان داده شده است.

جدول 4-8- مشخصات سدهای احداث شده در حوضه آبرگیر قنات‌های گناباد

نام سد	نوع سد	حجم کل مخزن (میلیون مترمکعب)	طول تاج	ارتفاع از پی	سال ساخت	سطح دریاچه در رقوم نرمال (هکتار)
کاخک	خاکی با هسته رسی	1/7	250	8	1378	100
کلات	خاکی با هسته رسی	0/8	125	21	1369	2/6
روچی	خاکی با هسته رسی	0/35	100	23	1366	2/6
زبید	خاکی با هسته رسی	0/75	150	22	1365	45

سدهای احداث شده در ارتفاعات حوضه آبرگیر قنات‌های دشت گناباد مانع ورود و نفوذ سالانه 3/6 میلیون مترمکعب آب به رودخانه‌های دشت شده و از آب ذخیره شده در مخزن سدها نیز استفاده مفیدی نمی‌شود. میزان تبخیر سالانه از سطح آب در ارتفاعات محدوده گناباد برابر 2339 میلیمتر است. مقدار آب تبخیر شده از سدهای احداث شده سالانه برابر 3/5 میلیون مترمکعب خواهد بود. پس از احداث سدها در کف دریاچه آنها لایه‌ای از رس ته‌نشین می‌گردد که در صورت عدم لایروبی کف مخزن میزان نفوذ آب در زمین بسیار کاهش می‌یابد و حدود 90 درصد آب ذخیره شده تبخیر می‌گردد. در صورت عدم احداث سدها در ارتفاعات حوضه، رواناب‌ها در رودخانه‌های موجود در دشت جریان یافته و به دلیل نفوذپذیری زیاد بستر رودخانه‌ها میزان زیادی از این رواناب در بستر رودخانه‌ها نفوذ کرده و باعث تغذیه سفره آب زیرزمینی تامین‌کننده آب قنات‌ها می‌شود. رودخانه‌های دشت گناباد از ارتفاعات جنوب، جنوب غرب و جنوب شرق سرچشمه گرفته و بعد از طی مسافتی حدود 25 کیلومتر از شمال دشت خارج می‌شوند در طول مسیر رودخانه‌ها منشعب شده و سیلاب‌ها در دشت پخش می‌گردیده و باعث افزایش نفوذ آب در زمین و تغذیه سفره آب زیرزمینی می‌شود.

در حوضه آبرگیر قنات‌های دشت گناباد همانطور که در شکل 4-13 مشاهده می‌گردد 3 واحد برداشت شن از بستر رودخانه‌ها قرار دارند که همگی در ابتدای مخروط افکنه و منطقه تغذیه سفره آب زیرزمینی دشت قرار دارند. برداشت بیش از حد مصالح رودخانه‌ای از بستر رودخانه‌ها باعث از بین رفتن شرایط طبیعی رودخانه، کاهش نفوذپذیری بستر رودخانه، ایجاد گودال‌های بزرگ، تجمع رواناب‌ها درون آنها و ته‌نشست لایه‌های رسی ناشی از سیلاب‌ها در کف گودال‌ها، در نتیجه باعث

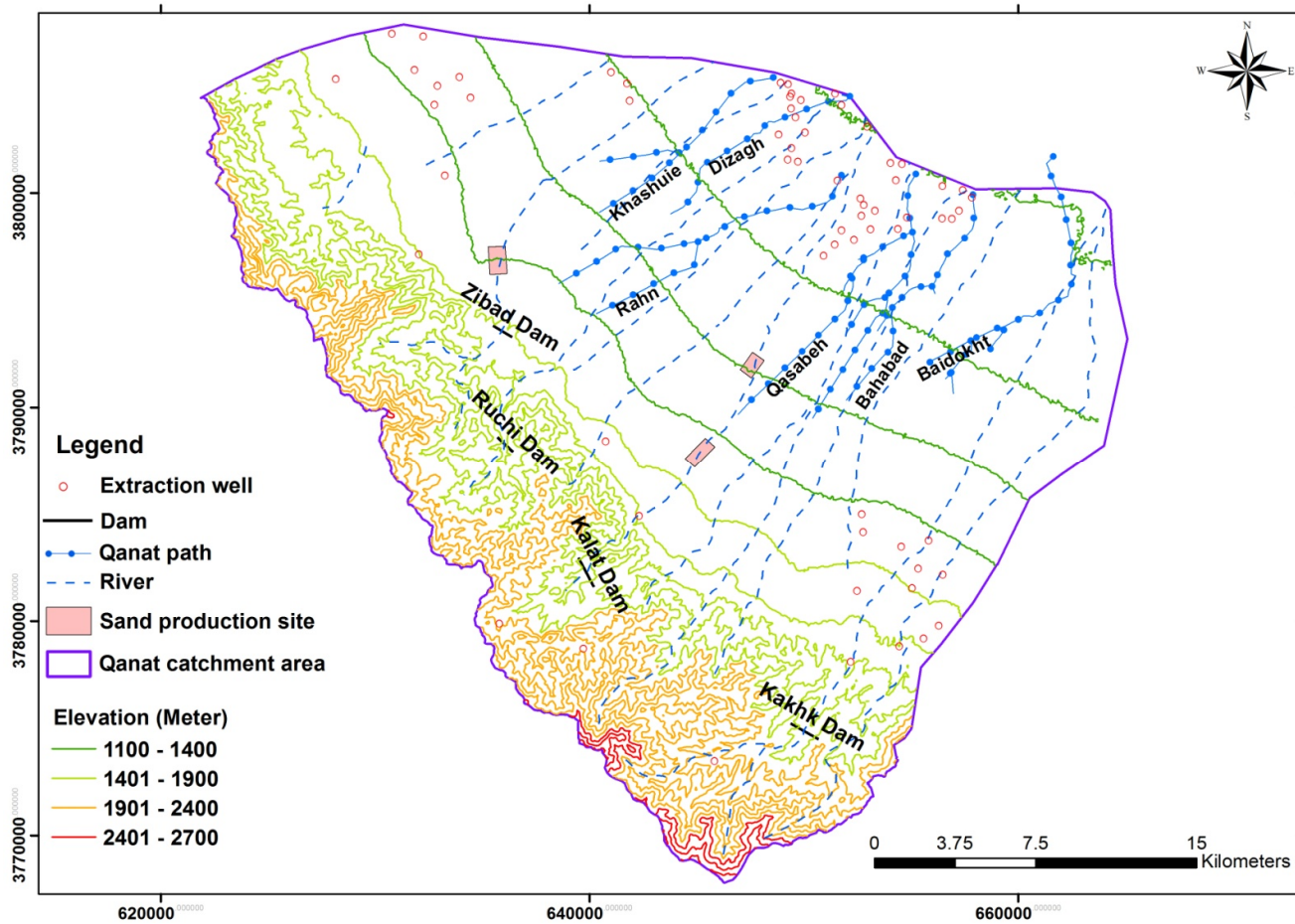
کاهش نفوذ آب، افزایش تبخیر و کاهش تغذیه سفره آب زیرزمینی و نهایتاً کاهش آبدهی قنات‌ها می‌گردد.



شکل 4-12- دریاچه سد کاخک در حوضه آبرگیر قنات‌ها

در حوضه آبرگیر قنات‌های دشت گناباد تعداد 66 حلقه چاه عمیق حفر گردیده است که سالانه 4/9 میلیون مترمکعب آب جهت مصارف کشاورزی و شرب و بهداشت از طریق آنها استخراج می‌گردد. عمق چاه‌ها بین 50 تا 330 متر متغیر است و با آبدهی 1 تا 19 لیتر در ثانیه در حال بهره‌برداری می‌باشند. حفر چاه‌ها در حوضه آبرگیر و مخصوصاً در حریم قنات‌ها تاثیر زیادی بر کاهش آبدهی قنات‌ها دارد. چاه‌های آب شرب شهر کاخک و روستاهای اطراف که در جنوب شرق حوضه آبرگیر قرار دارند عمقی بین 300 تا 330 متر دارند و با دبی بین 8 تا 19 لیتر بر ثانیه در حال پمپاژ هستند و سالانه 1/5 میلیون مترمکعب آب را از این منطقه حوضه آبرگیر استخراج می‌کنند. در جنوب غرب محدوده نیز چاه‌های آب شرب روستایی و کشاورزی وجود دارد که سالانه حدود یک میلیون مترمکعب آب از این قسمت حوضه آبرگیر توسط این چاه‌ها برداشت می‌شود.





شکل 4-13- موقعیت قنات‌های اصلی دشت گناباد در حوضه آبرگیر کل قنات‌ها به همراه موقعیت سدهای احداث شده و محل‌های برداشت شن از رودخانه‌ها



شکل 4-14- تصویر هوایی رودخانه کلات در امتداد رشته کلات قنات قصبه (الف) قبل و (ب) بعد از برداشت شن

نگهداری از قنات‌ها نیازمند لایروبی دوره‌ای و مرمت و استحکام بخشی نقاط پر خطر و ریزشی قنات است. وجود دی اکسید کربن در آب‌های زیرزمینی باعث افزایش خاصیت اسیدی آب و افزایش انحلال کربنات کلسیم می‌شود. با تراوش آب به داخل کوره قنات در بخش تره‌کار و کاهش فشار، حرکت آب در کوره قنات با سرعت بسیار بیشتر از محیط متخلخل آبخوان و تلاطم آب، همچنین افزایش دمای آب در کوره، دی اکسید کربن موجود در آب خارج شده در نتیجه آب قلیائی شده و کربنات کلسیم در کف و دیواره‌های قنات ته‌نشین می‌شود. ته‌نشست‌های کربناتی لایه‌ای سخت و نفوذناپذیر در کف و دیواره‌های قنات بوجود می‌آورد و مانع جریان آب زیرزمینی به داخل کوره می‌گردد. همچنین اگر رسوبات کربناتی در طول کوره در قسمت‌های مختلف یکنواخت نباشد، شیب منظم کف کوره از بین رفته، آب در برخی نقاط کوره بالا آمده و سبب ریزش کوره می‌گردد. برای جلوگیری از موارد مذکور لازم است قنات‌ها در دوره‌های زمانی منظم لایروبی گردند. با از بین رفتن مقنیان قدیمی، عملیات لایروبی انجام نمی‌گیرد یا به درستی و طبق اصول مهندسی قنات انجام نمی‌گیرد.



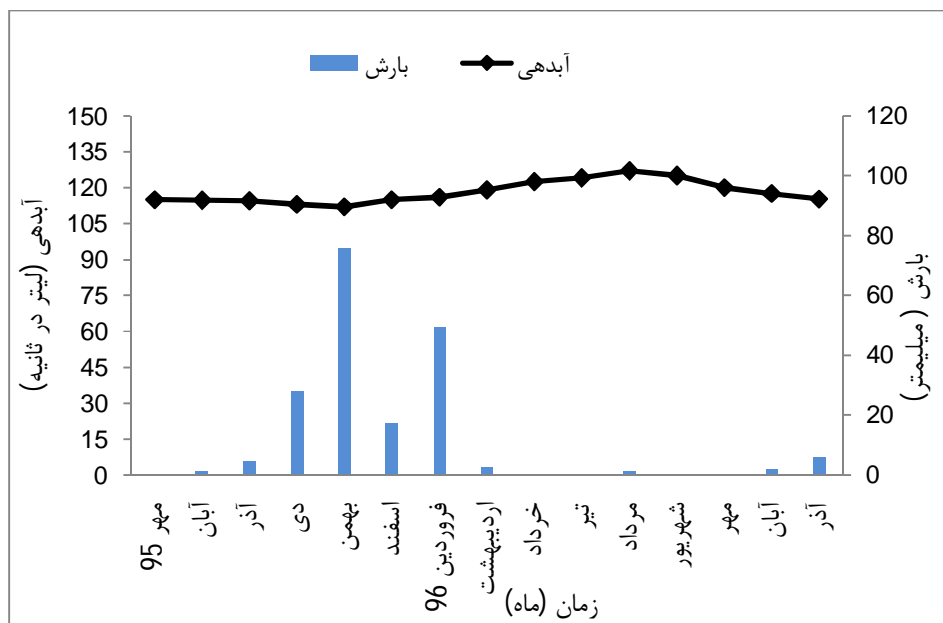
شکل 4-15- رسوبات کربناتی خارج شده حاصل از لایروبی چند چاه از قنات قصبه

#### 4-10- ارزیابی تغییرات دبی قنات‌ها در سال آبی 1395-1396

در این قسمت به منظور ارزیابی تغییرات دبی قنات‌های مورد مطالعه در سال آبی 1395-1396، مقدار دبی در طی یک سال آبی اندازه‌گیری گردید. در ادامه هیدروگراف قنات‌ها به همراه تغییرات بارش (متوسط ایستگاه‌های ارتفاعات و دشت) در فاصله زمانی مهرماه 95 تا آذر ماه 96 آمده است.

#### قنات قصبه

قنات قصبه در طول سال آبی 1395-1396 دارای متوسط آبدهی 119 لیتر در ثانیه، حداقل آبدهی در بهمن ماه برابر 112 لیتر در ثانیه و حداکثر آبدهی در مرداد ماه برابر 127 لیتر در ثانیه بوده است. ضریب تغییرات آبدهی در این قنات برابر 3/9 درصد بوده است.



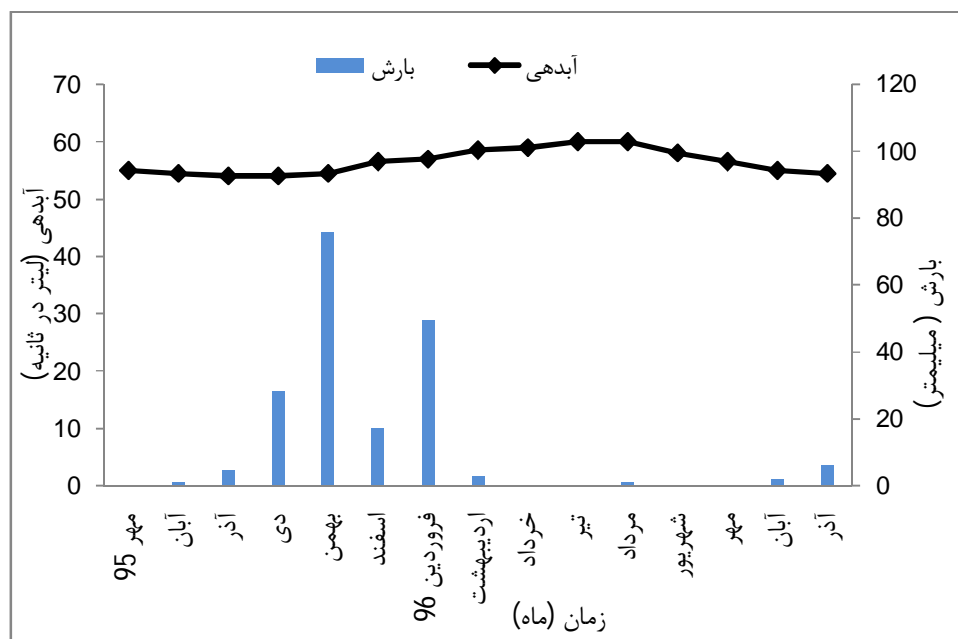
شکل 4-16- هیدروگراف قنات قصبه در طول سال 95-96

#### قنات دیزق

متوسط آبدهی این قنات براساس هیدروگراف سال 1395-1396 برابر 56 لیتر در ثانیه، حداکثر آبدهی قنات در مرداد ماه به میزان 60 لیتر در ثانیه و حداقل آبدهی قنات در آبان تا بهمن ماه برابر 54 لیتر در ثانیه است. ضریب تغییرات آبدهی قنات در دوره اندازه‌گیری برابر 3/8 درصد است.

## قنات خشویی

قنات خشویی در غرب دشت قرار دارد. میانگین آبدهی قنات در سال 95-96 برابر 36 لیتر در ثانیه، حداکثر آبدهی قنات در خرداد تا مردادماه برابر 38 لیتر در ثانیه و حداقل آبدهی در دی و بهمن ماه برابر 34 لیتر در ثانیه است. ضریب تغییرات آبدهی قنات خشویی در طول دوره اندازه‌گیری برابر 3/9 درصد بوده است.



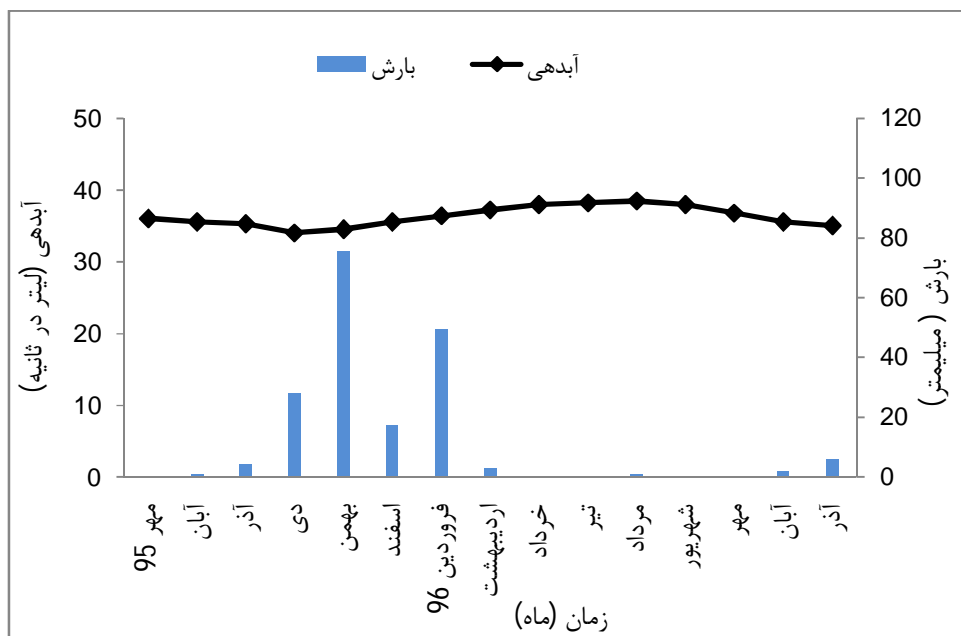
شکل 4-17- هیدروگراف قنات دیزق در طول سال 95-96

## قنات رهن

متوسط آبدهی این قنات براساس هیدروگراف سال 1395-1396 برابر 14 لیتر در ثانیه، حداکثر آبدهی در خرداد تا مرداد ماه به میزان 14 لیتر در ثانیه و حداقل آبدهی قنات در دی تا اسفند ماه برابر 13/5 لیتر در ثانیه است. ضریب تغییرات آبدهی قنات رهن در دوره اندازه‌گیری برابر 4/3 درصد است.

## قنات بهاباد

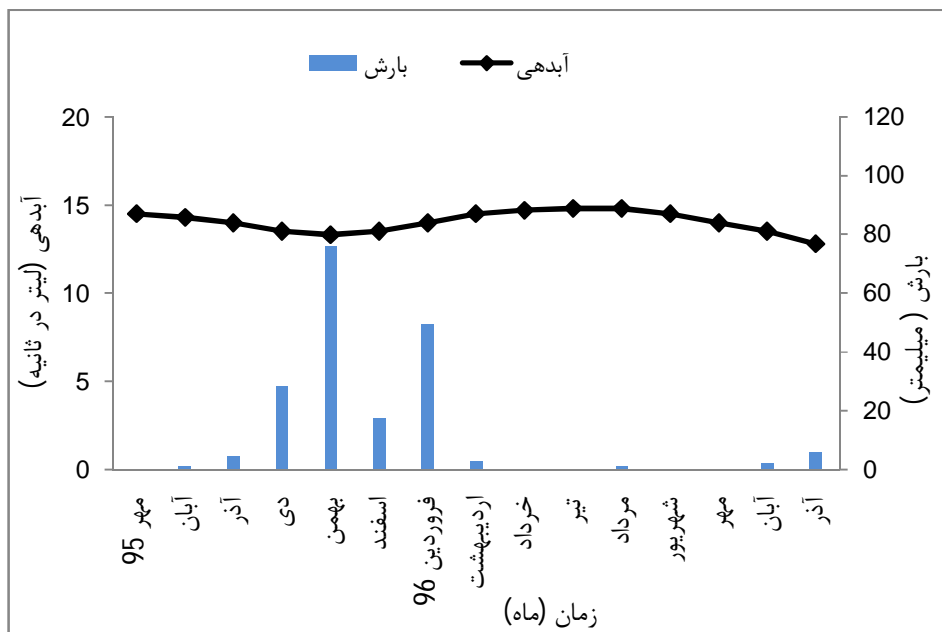
قنات بهاباد در طول سال آبی 1395-1396 دارای متوسط آبدهی 25 لیتر در ثانیه، حداقل آبدهی در آذر تا بهمن ماه برابر 23 لیتر در ثانیه و حداکثر آبدهی در خرداد تا شهریور ماه برابر 27 لیتر در ثانیه بوده است. ضریب تغییرات آبدهی در این قنات برابر 7/1 درصد بوده است.



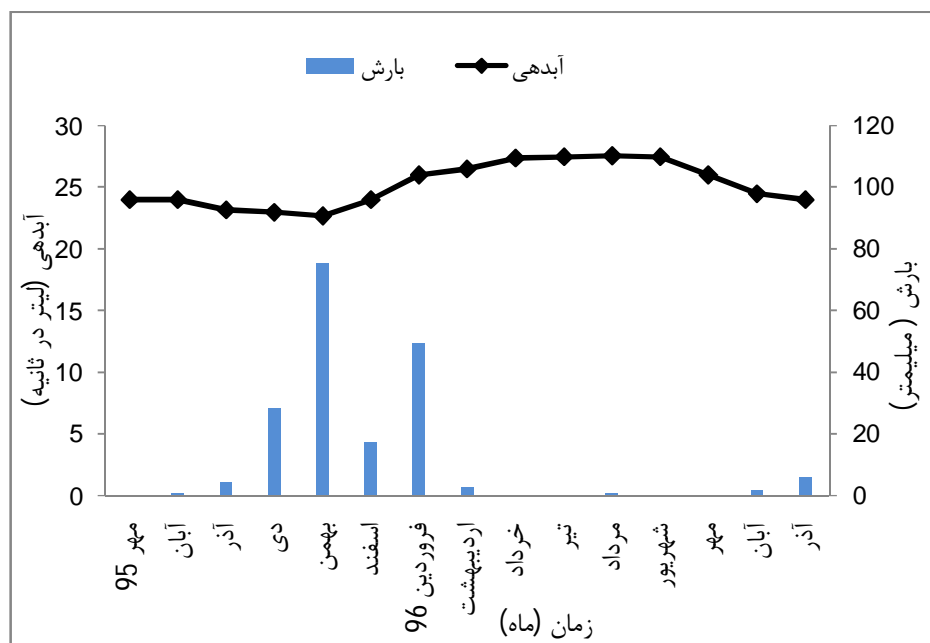
شکل 4-18- هیدروگراف قنات خشویی در طول سال 95-96

## قنات بیدخت

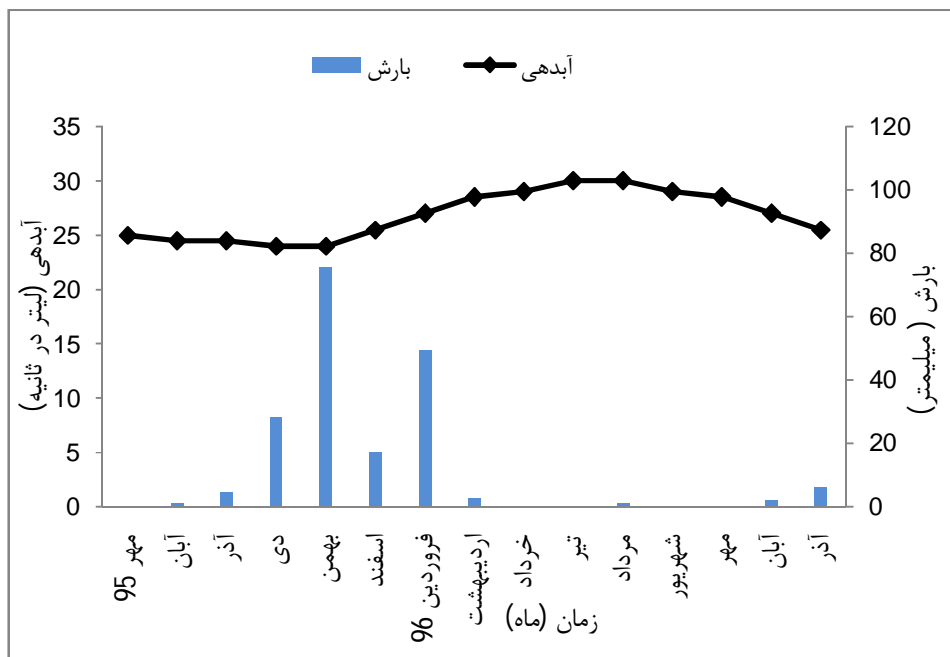
قنات بیدخت در شرق دشت قرار دارد. متوسط آبدهی قنات مذکور در طول سال 95-96 برابر 26 لیتر در ثانیه، حداکثر آبدهی قنات در خرداد تا مردادماه برابر 30 لیتر در ثانیه و حداقل آبدهی در آبان تا بهمن ماه برابر 24 لیتر در ثانیه است. ضریب تغییرات آبدهی قنات بیدخت در طول دوره اندازه‌گیری برابر 8/2 درصد بوده است.



شکل 4-19- هیدروگراف قنات رهن در طول سال 95-96



شکل 4-20- هیدروگراف قنات بهاباد در طول سال 95-96



شکل 4-21- هیدروگراف قنات بیدخت در طول سال 95-96

#### 11-4- نقشه همتراز آب زیرزمینی دشت با استفاده از سطح آب مادرچاه قنات‌ها

نقشه‌های تراز آب زیرزمینی در دشت گناباد با استفاده از عمق مادرچاه قنات‌ها و داده‌های پیزومتری دشت ترسیم گردید. قنات همانند یک زهکش عمل می‌کند و عمق سطح آب زیرزمینی در مادر چاه قنات تقریباً هم سطح تراز کف مادرچاه یا حداکثر نیم متر بالاتر از کف مادرچاه قرار دارد. بنابراین با بدست آوردن ارتفاع کف مادرچاه قنات‌ها می‌توان برای ترسیم نقشه‌های تراز آب زیرزمینی دشت از آنها استفاده کرد. در محدوده تره‌کار قنات، خطوط هم‌پتانسیل به موازات تره‌کار است ولی در محدوده خشکه‌کار مسیر قنات را قطع می‌کند. در دشت گناباد با استفاده از عمق مادر چاه قنات‌های فعال و داده‌های پیزومتری نقشه‌های تراز آب زیرزمینی ترسیم شده است که در شکل 4-22 آمده است.

مقدار ضریب آبگذری در محدوده تره‌کار قنات‌ها با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$Q = T \frac{W1+W2}{2} \times \frac{H}{(L1+L2)/2} \quad (4-4)$$

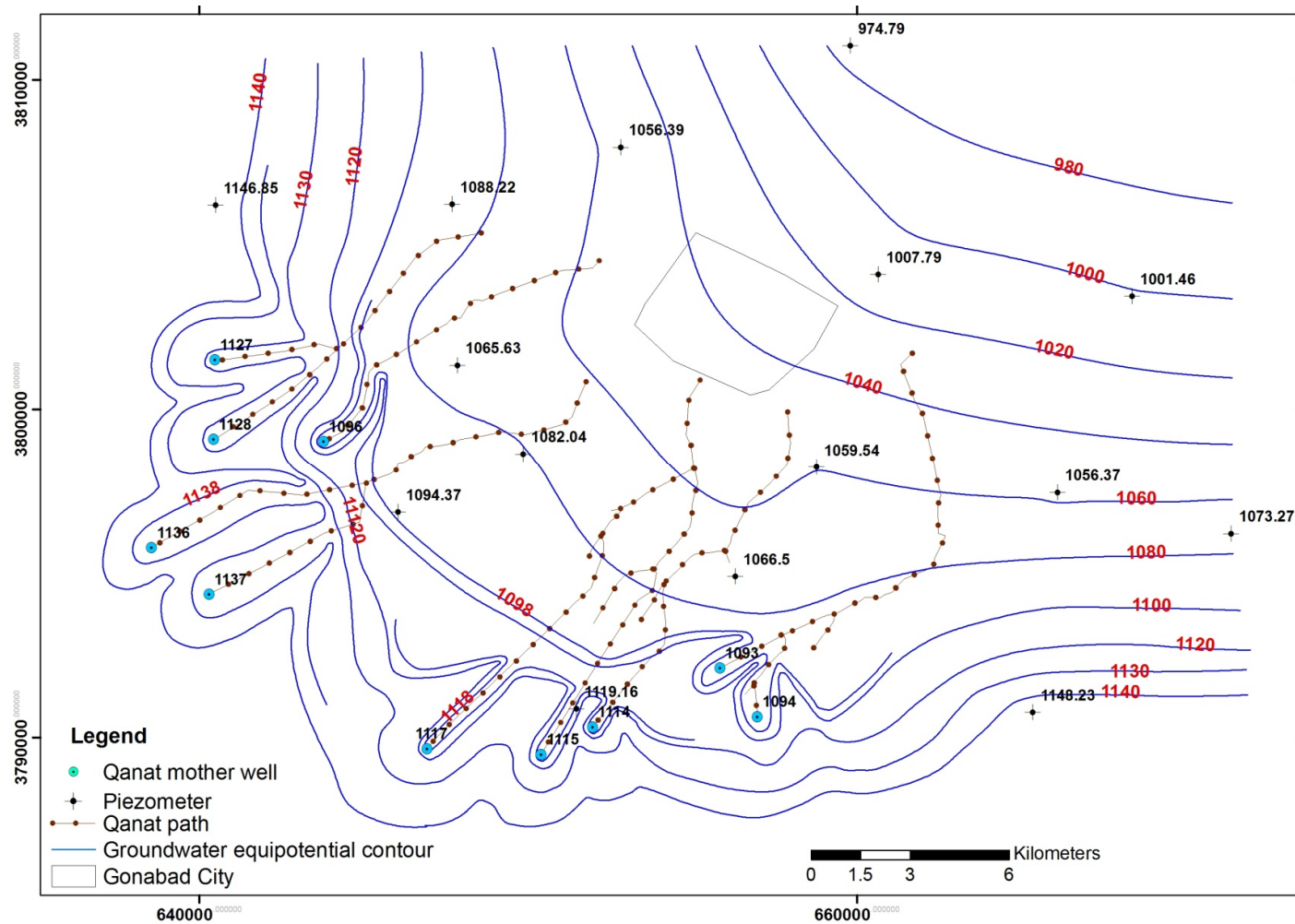
که در آن Q، برابر دبی قنات، W، عرض کانال جریان، H، افت هد در طول کانال جریان و L، طول کانال جریان است. براین اساس T یا ضریب آبدگری در منطقه آبد قنات‌ها تعیین و در جدول 4-9 ارائه گردید.

جدول 4-9- برآورد میزان قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی در بخش تره‌کار قنات‌ها

قنات	آبدهی (لیتر بر ثانیه)	عرض متوسط کانال جریان (متر)	گرادیان هیدرولیکی متوسط	ضریب آبدگری (متر مربع بر روز)	ضخامت متوسط لایه اشباع (متر)	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)
قصبه	120	13200	0/015	52	25	2/1
بهباد	26	2700	0/025	33	10	3/3
رهن	14	19900	0/002	30	22	1/4
دیزق	56	6200	0/016	49	14	3/5
خشویی	36	13900	0/007	32	16	2
بیدخت	27	7900	0/008	37	14	2/6

ضریب آبدگری قنات‌ها از حداقل 30 مترمربع بر روز در قنات رهن تا حداکثر 52 مترمربع بر روز در قنات قصبه به دست آمد. با محاسبه عمق مادرچاه قنات‌ها و عمق سطح آب زیرزمینی در محل مادرچاه و بخش تره‌کار، ضخامت متوسط لایه اشباع محاسبه و با استفاده از آن میزان هدایت هیدرولیکی در محل تره‌کار قنات‌ها برآورد شد. هدایت هیدرولیکی لایه اشباع در محل تره‌کار قنات‌ها از 2 تا 3/5 متر بر روز متغیر است که بر این اساس اندازه ذرات مواد آبرفتی لایه اشباع در محل تره‌کار قنات‌ها در حد ماسه دانهریز است.

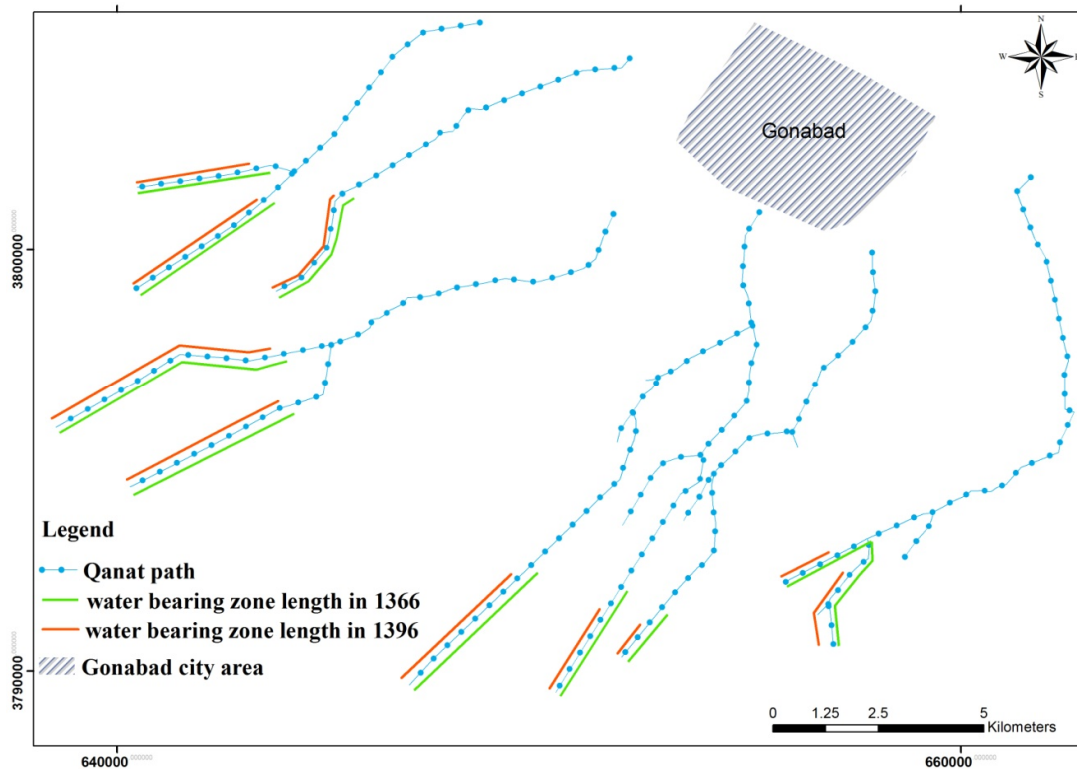




شکل 4-22- نقشه همتراز آب زیرزمینی دشت گناباد (شهریورماه 1396)

#### 4-12- تغییرات طول تره‌کار قنات‌ها در طول 30 سال گذشته

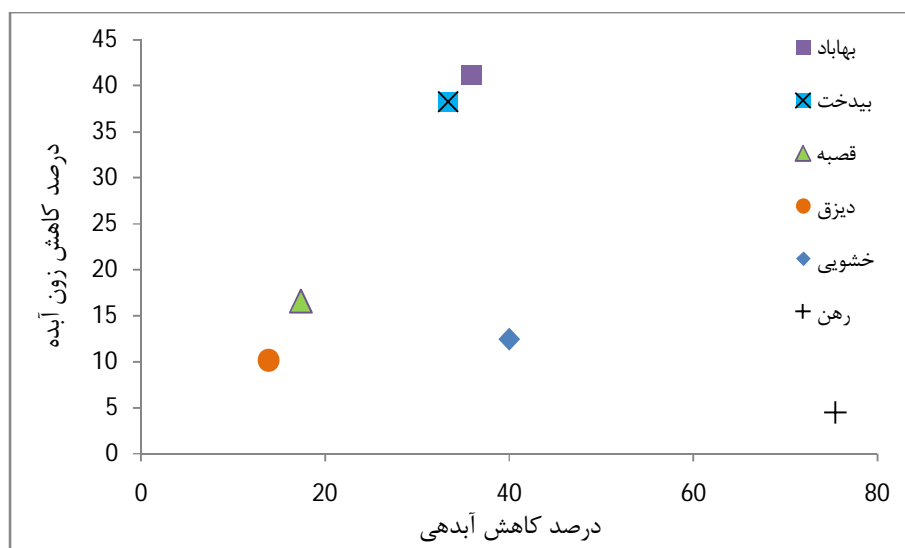
با استفاده از نقشه‌های هم‌عمق آب زیرزمینی در طی سال‌های 1366 تا 1396 و عمق کوره قنات‌ها در طول قنات براساس شیب 0/001 کف کوره از مظهر تا مادرچاه، نقطه تقاطع کوره قنات با سطح آب زیرزمینی مشخص و طول تره‌کار قنات‌های انتخابی در سال‌های 1366 و 1396 محاسبه و تغییرات آن بررسی شد. در شکل 4-25 نقشه میزان طول تره‌کار قنات‌ها در سال‌های مذکور آمده است. همچنین تغییرات طول تره‌کار قنات‌ها در جدول 4-10 آمده است. کاهش طول تره‌کار در قنات‌های شرق دشت بیشتر از قنات‌های غرب دشت بوده است که احتمالاً به دلیل افت بیشتر سطح آب زیرزمینی در اثر برداشت آب از چاه‌های آب شرب شهر کاکخک در جنوب شرق دشت است.



شکل 4-23- تغییرات طول تره‌کار در قنات‌های مهم دشت گناباد در طول 30 سال گذشته

جدول 10-4- تغییرات طول تره کار و آبدهی قنات‌های دشت گناباد در طول 30 سال گذشته

نام قنات	طول تره کار (متر) سال 1366	طول تره کار (متر) سال 1396	درصد کاهش طول	آبدهی در سال 66	آبدهی در سال 96	درصد کاهش آبدهی
بهباد	1496	880	41	39	25	36
بیدخت	5490	3390	38	39	26	33
قصبه	6980	5820	16	144	119	17
دیزق	3150	2830	10	65	56	14
خشویی	7140	6250	12	60	36	40
رهن	10100	9646	4	57	14	75



شکل 24-4- درصد کاهش آبدهی قنات‌ها در مقابل درصد کاهش زون آبده قنات‌ها

با توجه به جدول 10-4 و شکل 24-4 ملاحظه می‌شود ارتباط مستقیم بین درصد کاهش زون آبده و درصد کاهش آبدهی قنات‌ها وجود دارد. همچنین درصد کاهش زون آبده در قنات‌های شرق دشت بیشتر و در قنات‌های غرب دشت کمتر است. در قنات رهن بیشترین مقدار کاهش آبدهی اتفاق افتاده است در صورتیکه کمترین میزان کاهش زون آبده در این قنات اتفاق افتاده است در نتیجه عوامل دیگری به جز افت سطح آب زیرزمینی و کاهش زون آبده در کاهش آبدهی قنات رهن موثر است. قنات‌های دیزق و قصبه کمترین میزان کاهش آبدهی داشته است.



## فصل پنجم: مشخصات هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی قنات‌ها

کیفیت آب زیرزمینی به عواملی از قبیل بارش، جنس و تراوایی لایه‌های زمین و فاصله بین منطقه تغذیه و تخلیه وابسته است. با استفاده از خواص هیدروشیمیایی آب اطلاعات با ارزشی از محل تغذیه، نوع مخزن، زمان ماندگاری و نوع سیستم جریان غالب به دست آورد (Lopez et al. 2001). امروزه کمتر مطالعه هیدروژئولوژیکی بدون استفاده از مطالعات ایزوتوپی صورت می‌گیرد. با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار می‌توان مسیرهای جریان، زمان تغذیه، منشأ تغذیه و مکانسیم جریان را برآورد نمود. برای شناخت منشأ تغذیه و مکانسیم جریان قنات‌های دشت گناباد بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی قنات‌ها صورت گرفت که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

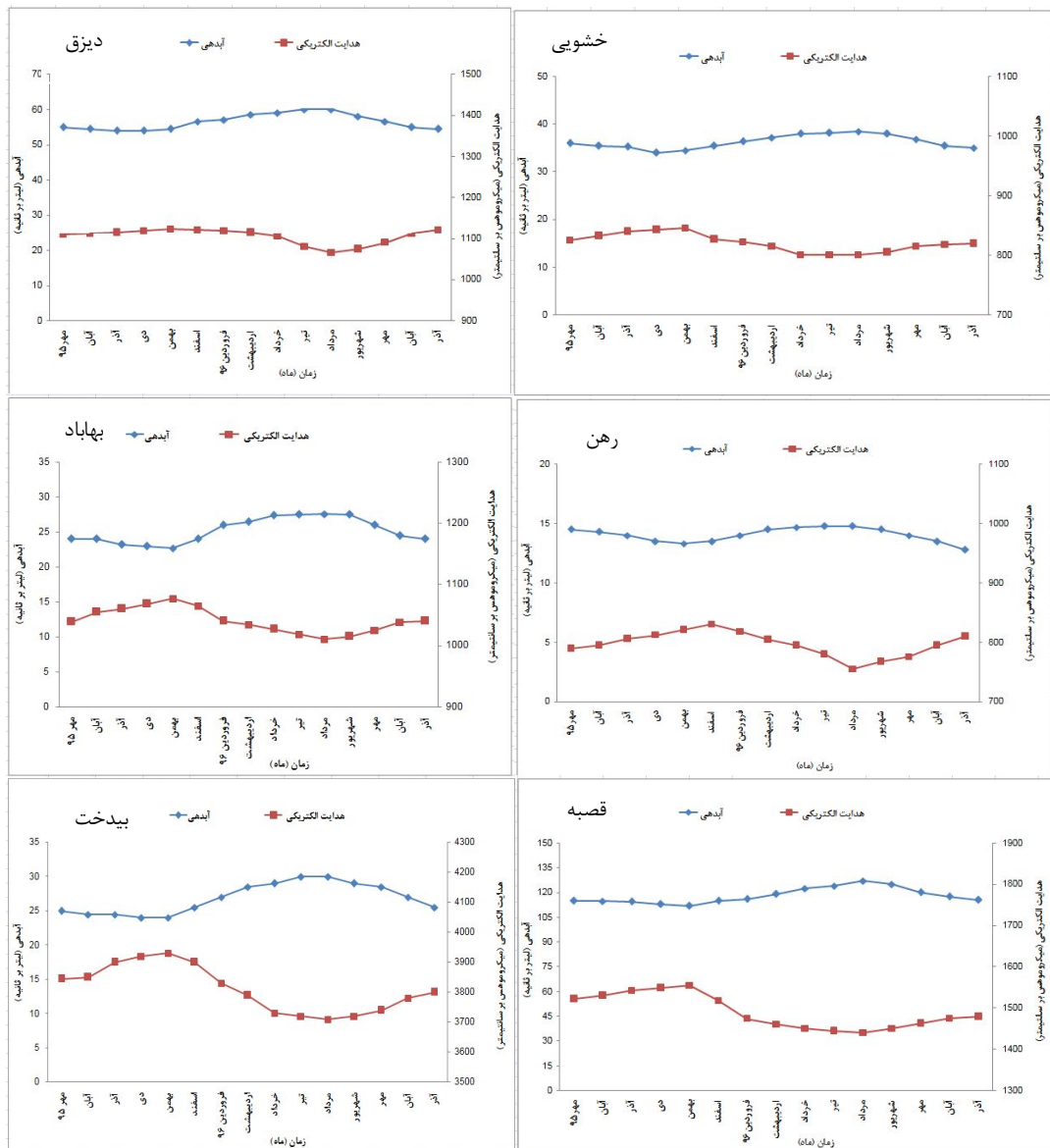
### 5-1- ارزیابی تغییرات و خصوصیات هیدروژئوشیمیایی قنات‌های مورد مطالعه

در این بخش، به بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی قنات‌های منطقه مانند تغییرات هدایت الکتریکی و تغییرات غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی پرداخته می‌شود. سپس تکامل شیمیایی آب قنات‌های منطقه با رسم نمودارهای ترکیبی مورد بررسی قرار خواهد گرفت و در نهایت شاخص اشباع کانی‌های مختلف در نمونه‌های آب قنات‌ها محاسبه خواهد شد.

### 5-1-1- بررسی تغییرات زمانی هدایت الکتریکی قنات‌های منطقه

همان‌طور که قبلاً بیان شد هدایت الکتریکی به دلیل ارتباط مستقیمی که با کل املاح موجود در آب دارد، یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدروژئوشیمیایی است. در طی یک سال آبی، این پارامتر در قنات‌های منطقه اندازه‌گیری و تغییرات آن مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج بدست آمده، مقادیر هدایت الکتریکی در قنات‌های منطقه متفاوت است. هدایت الکتریکی قنات‌های غرب دشت به دلیل تغذیه دشت از سازندهای آهکی و ولکانیکی کمتر و به سمت شرق به دلیل گسترش مارن‌های نئوژن، هدایت الکتریکی قنات‌ها افزایش می‌یابد، چنانکه هدایت الکتریکی قنات بیدخت که در شرق

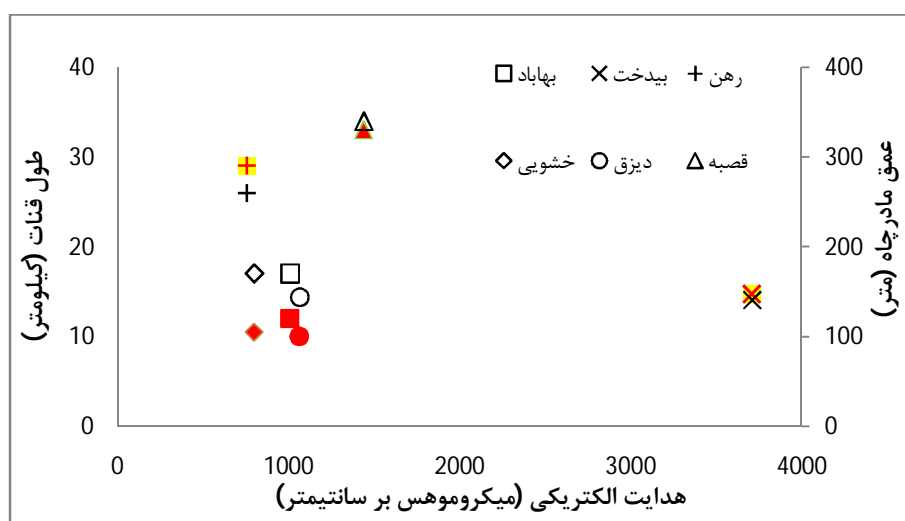
دشت قرار دارد اختلاف بارزی با دیگر قنات‌ها دارد. این موضوع باعث شده که مقنیان قدیمی مسیر قنات‌ها را به سمت غرب دشت منحرف نمایند. هدایت الکتریکی قنات قصبه نیز نسبت به بقیه قنات‌ها بالاتر بوده که به دلیل گسترش مارن‌های نئوژن در حوضه آبخیز رشته کلات قنات مذکور است. مقدار هدایت الکتریکی در بقیه قنات‌های منطقه تقریباً پایین بوده و کم و بیش به یکدیگر نزدیک هستند.



شکل 5-1- تغییرات هدایت الکتریکی به همراه تغییرات آبدهی قنات‌ها در طول سال 95-96

در شکل 5-1 تغییرات هدایت الکتریکی قنات‌های انتخابی در طول سال آبی 1395-1396 به همراه تغییرات آبدهی قنات‌ها آمده است. میزان تغییر هدایت الکتریکی در قنات خشویی از 800 تا 845، در قنات دیزق از 1065 تا 1112، در قنات رهن از 755 تا 830، در قنات بهاباد از 1010 تا 1077، در قنات قصبه از 1440 تا 1554، و در قنات بیدخت از 3710 تا 3930 میکروموهس در سانتیمتر در طول دوره اندازه‌گیری در نوسان است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات میزان هدایت الکتریکی نیز از غرب به شرق دشت افزایش می‌یابد. همچنین کمترین میزان هدایت الکتریکی در قنات‌ها منطبق بر بیشترین آبدهی آن‌هاست.

رابطه بین هدایت الکتریکی با عمق و طول قنات‌ها نیز در شکل 5-2 آمده است. رابطه مشخصی بین هدایت الکتریکی با طول و عمق مادرچاه قنات‌ها مشاهده نمی‌گردد و بیشتر جنس سازندها بر هدایت الکتریکی آب قنات‌ها تاثیرگذار است، چنانکه قنات بیدخت با طول و عمقی متوسط، به دلیل گسترش مارن‌های نئوژن در حوضه این قنات دارای بیشترین مقدار هدایت الکتریکی و قنات رهن با طول و عمق زیاد به دلیل تغذیه از سازندهای ولکانیکی و آهکی دارای کمترین مقدار هدایت الکتریکی است.

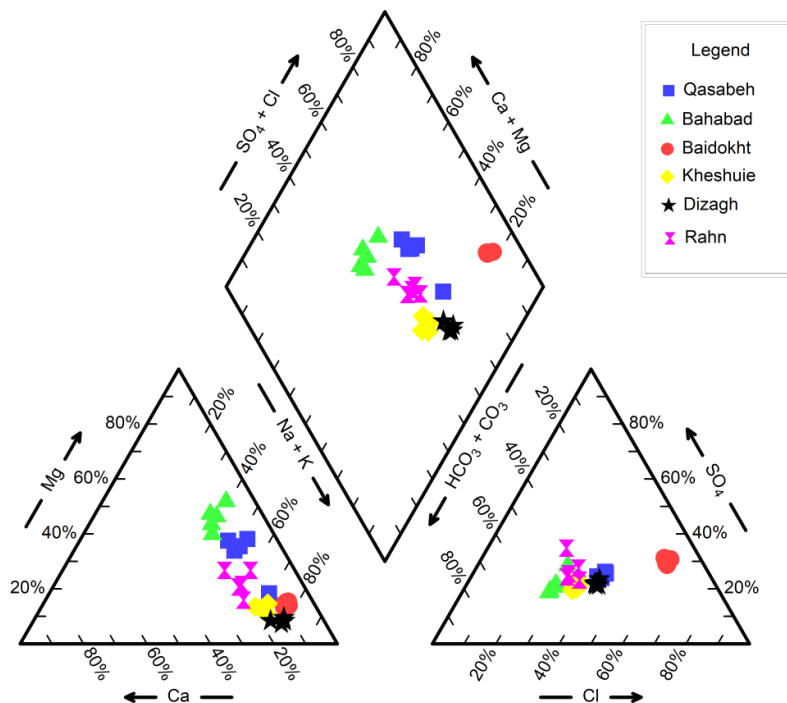


شکل 5-2- رابطه بین تغییرات هدایت الکتریکی با عمق مادرچاه و طول قنات‌ها (توپر، طول قنات و توخالی، عمق

مادرچاه)

## 5-1-2- مشخصات هیدروژوشیمیایی آب قنات‌ها

نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب قنات‌ها در جدول 5-1 ارائه شده است. در بین کاتیون‌ها سدیم و منیزیم و در بین آنیون‌ها کلر و بی‌کربنات غالب است. با استفاده از نمودار پایپر شکل 5-3، تیپ و رخساره آب در قنات‌ها تعیین گردید. تیپ و رخساره آب در قنات‌های خشویی و رهن بیکربناته سدیک، در قنات‌های دیزق و قصبه کلروه - بیکربناته سدیک، در قنات بهاباد بی‌کربناته منیزیک و در قنات بیدخت کلروه 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. نمونه‌های 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.



شکل 5-3- نمودار پایپر نمونه‌های آب قنات‌های مهم دشت گناباد



جدول 5-1- نتایج آنالیز شیمیایی آب زیرزمینی قنات‌های مهم دشت گناباد (غلظت کلیه یون‌ها بر حسب Meq/l)

Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	pH	TDS (Mg/l)	EC (μS/cm)	تاریخ نمونه‌برداری	محل نمونه‌برداری
2	3	11.3	0	5	6.4	3.9	8.07	992	1531	آبان 95	قصبه
1.8	5.2	4	0	5.3	3	2.3	8.42	683	1055		بهباد
3.2	5.8	29	0.15	4.1	21	10.4	8.38	2306	3850		بیدخت
1.3	1.3	6.3	0	3.5	3	1.9	8.62	541	833		خشویی
2	1	8.9	0	4.2	4.6	2.4	8.5	726	1112		دیزق
1.2	2.3	5.1	0	3.2	2	2.8	8.52	524	795		رهن
2.6	5.7	8.5	0	5.7	6.3	3.9	8.14	1030	1554	بهمن 95	قصبه
2.2	4.5	4.6	0	5.7	3	2.1	8.59	696	1077		بهباد
4	5.2	29.9	0.2	4	21	11.4	8.54	2375	3930		بیدخت
1.5	1.2	6.4	0	3.7	2.9	2	8.63	556	845		خشویی
1.7	0.9	9.6	0	4	4.7	2.7	8.6	737	1122		دیزق
1.8	1.8	5.1	0	3.6	2.5	2.1	8.55	532	821		رهن
1.5	6.2	8.5	0.05	5	6.3	4	8.02	995	1460	اردیبهشت 96	قصبه
1	5.7	4.3	0	5.3	3.1	2.2	8.36	681	1034		بهباد
3	6	29.8	0.15	3.9	21.2	11.1	8.35	2356	3790		بیدخت
1.5	1	6.4	0	3.7	3	1.7	8.57	541	815		خشویی
1.5	1	9.4	0	4.1	4.7	2.4	8.48	722	1115		دیزق
1.7	1.9	5.2	0	3.6	3	2	8.38	539	805		رهن
2.44	5.86	7.25	0.05	5.58	6.21	3.58	8.06	954	1440	مرداد 96	قصبه
1.9	4.6	4.1	0	5.5	2.8	1.9	8.3	654	1010		بهباد
3.6	5.3	28	0.1	4	20.6	9.9	8.25	2243	3710		بیدخت
1.5	1.1	6	0	3.7	2.8	1.6	8.63	525	800		خشویی
1.4	1.1	9.1	0	4.1	4.4	2.4	8.41	701	1065		دیزق
1.9	2.3	4.4	0	3.7	2.5	2	8.43	529	755		رهن
2.2	6	8.2	0.5	5.4	6.4	3.7	8.12	1000	1480	آذر 96	قصبه
1.6	5	4.2	0	4.5	3	3	8.4	684	1040		بهباد
3.2	5.4	30	0.13	3.4	21.5	11.1	8.32	2343	3800		بیدخت
1.7	1.2	6	0	3.6	3	1.8	8.65	543	820		خشویی
1.5	1	9.5	0	4.1	4.6	2.5	8.55	726	1120		دیزق
1.9	1.4	5.5	0	3.3	2.7	2.3	8.56	538	810		رهن

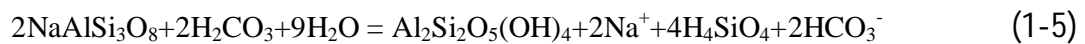
### 5-1-3- تکامل شیمیایی و منشأ آب زیرزمینی

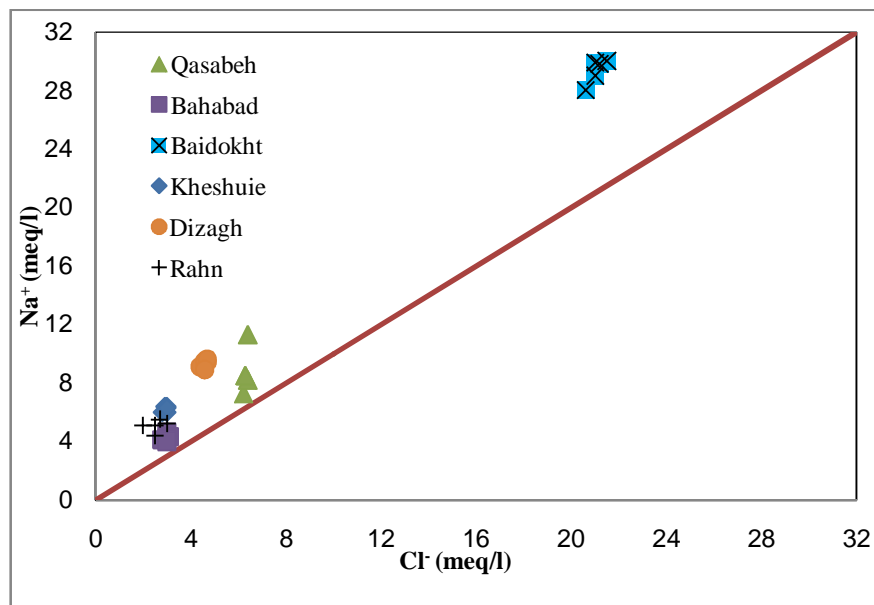
در مطالعات هیدروژئوشیمیایی از نمودارهای ترکیبی یا دو متغیره بین اجزاء محلول جهت تعیین فرآیندهای ژئوشیمیایی موثر بر ترکیب آب زیرزمینی و شناسایی منشأ اجزای محلول آن استفاده می‌شود. با آگاهی از ترکیب آب‌های زیرزمینی و آشنایی از منشأ احتمالی متشکله‌های شیمیایی آن‌ها،

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 آب های 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 1:1 در نمودار ترکیبی سدیم در مقابل کلر، نشان دهنده ارتباط یون سدیم با آنیون‌های دیگر به غیر از کلر می‌باشد. علاوه بر انحلال هالیت، سدیم از دو طریق یکی انحلال پلاژیوکلازهای سدیم‌دار 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 تاثیر تبادل کاتیونی، نسبت مولی  $Na^+/Cl^-$  می‌تواند تغییر کند (Wayland *et al.* 2003).

همانطور که در شکل 4-5 مشاهده می‌شود تمام نمونه‌های آب قنات‌ها دارای سدیم اضافه نسبت به کلر است که احتمالاً در اثر هوازدگی پلاژیوکلازهای سدیم‌دار مطابق معادله شماره (5-1)، انحلال دیگر ترکیبات سدیم مانند سولفات سدیم (میرابیلیت) یا تبادل کاتیونی عادی کلسیم آب با سدیم در کانی‌های رسی مطابق معادله شماره (5-2) اتفاق افتاده است. اگر هوازدگی سیلیکات‌ها به عنوان منشأ احتمالی یون سدیم در نظر گرفته شود، در این صورت، بیکربنات می‌بایستی آنیون غالب در نمونه‌ها باشد (Rogers 1989).





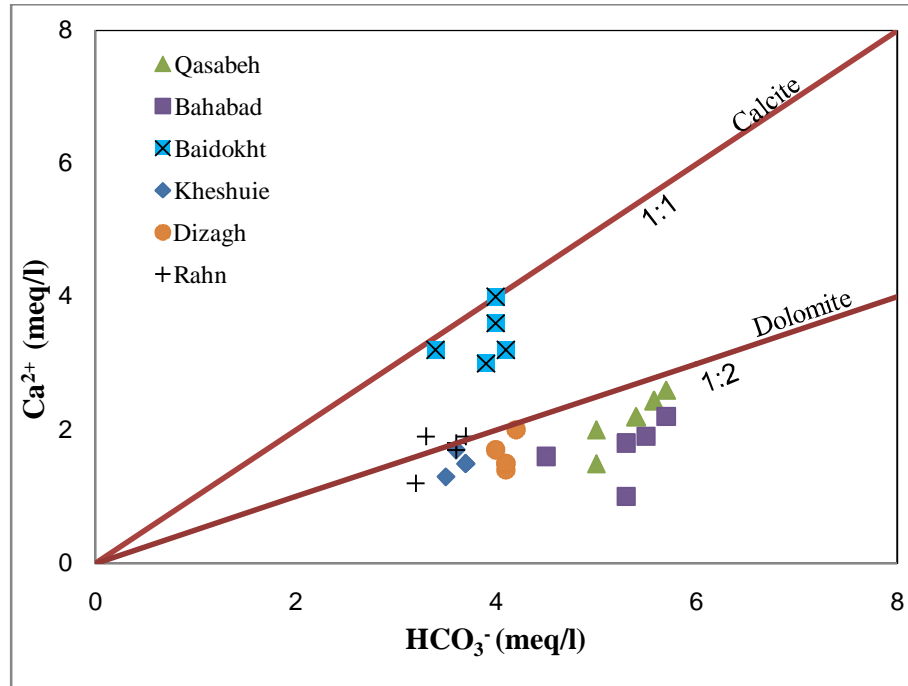
شکل 5-4- نمودار کلر در مقابل سدیم نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد

انحلال کانی‌های کربناته سبب ورود یون‌های منیزیم و کلسیم به آب زیرزمینی می‌شود. برخی از واکنش‌های هوازدهی معمولی کربنات‌ها انحلال کلسیت و دولومیت مطابق زیر است:



واکنش انحلال معمولی کلسیت نسبت مولی  $1/2\text{Ca}^{2+}:\text{HCO}_3^-$  با نسبت اکی والانی 1:1 ایجاد می‌نماید. در حالی که انحلال دولومیت نسبت مولی  $1/4\text{Ca}^{2+}:\text{HCO}_3^-$  با نسبت اکی والانی 1:2 ایجاد می‌کند. انحراف از خط 1:1 در نمودار ترکیبی کلسیم در مقابل بی‌کربنات، نشان دهنده تبادل کاتیونی یا انحلال دولومیت می‌باشد. در نمودار کلسیم در مقابل بی‌کربنات (شکل 5-5) نمونه‌های آب قنات‌ها به جز قنات بیدخت زیر خط 1:1 قرار گرفته‌اند و نشان دهنده مقدار بیکربنات اضافه نسبت به مقدار کلسیم نمونه‌هاست که احتمالاً در اثر هوازدهی سیلیکات‌ها که در بالا اشاره شد و یا کاهش کلسیم در اثر خروج آن از آب به دلیل تبادل کاتیونی مستقیم با سدیم و یا اثر یون مشترک اتفاق افتاده است. غلظت بیشتر کلسیم در قنات بیدخت نسبت به دیگر قنات‌ها احتمالاً به خاطر انحلال ژپس در

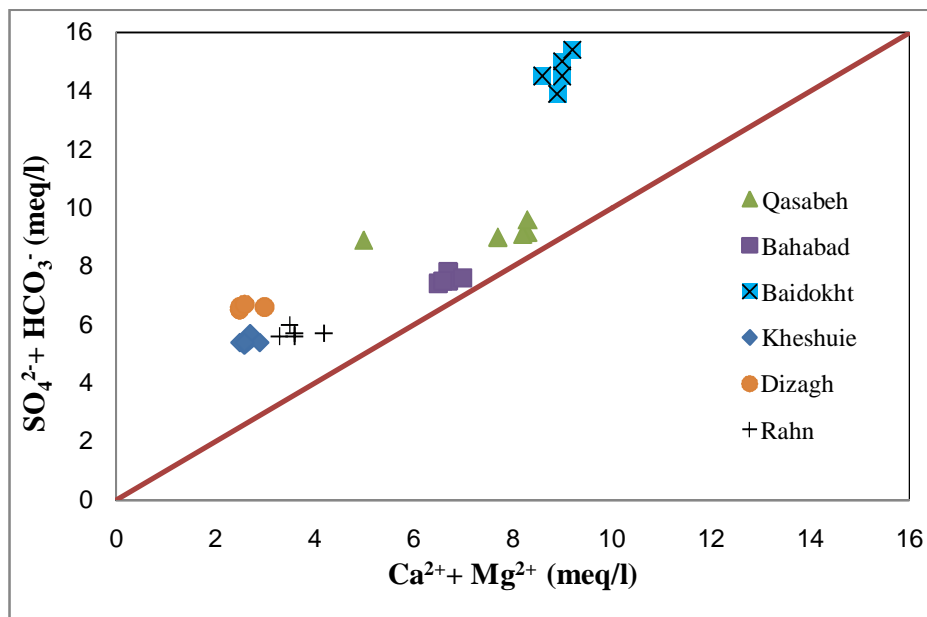
قسمت‌های شرق محدوده است. در نمونه‌های قنات‌های رهن و خشویی انحلال دولومیت اتفاق افتاده است.



شکل 5-5- نمودار کلسیم در مقابل بی‌کربنات نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد

همچنین با توجه رابطه بین  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  نمونه‌ها در مقابل  $HCO_3^-+SO_4^{2-}$  در شکل 5-6 مقدار سولفات و بی‌کربنات نمونه‌ها نسبت به مقدار کلسیم و منیزیم آنها افزایش نشان می‌دهد که نشان می‌دهد علاوه بر انحلال ژیپس و کربنات‌ها، هوازدگی سیلیکات‌ها و تبادل کاتیونی عادی در آب زیرزمینی حوضه آبرگیر قنات‌ها اتفاق می‌افتد.

در شکل شماره 5-7 نمودار  $Na^+-Cl^-$  در مقابل  $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(HCO_3^-+SO_4^{2-})$  برای نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد آمده است. مقدار کمبود کلسیم و منیزیم نمونه‌ها متناسب با سدیم اضافی نمونه‌ها می‌باشد.

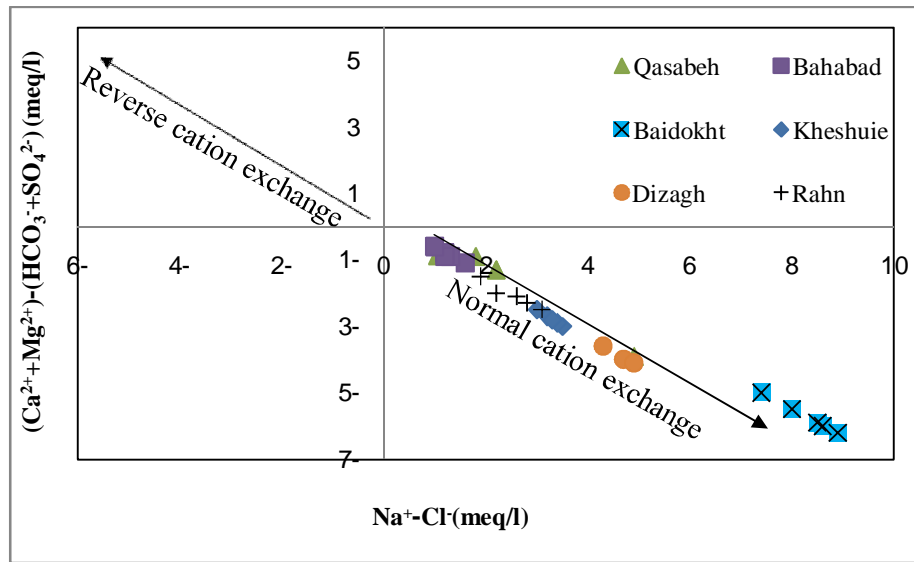


شکل 5-6- نمودار  $Ca^{2+}+Mg^{2+}$  در مقابل  $HCO_3^-+SO_4^{2-}$  در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد

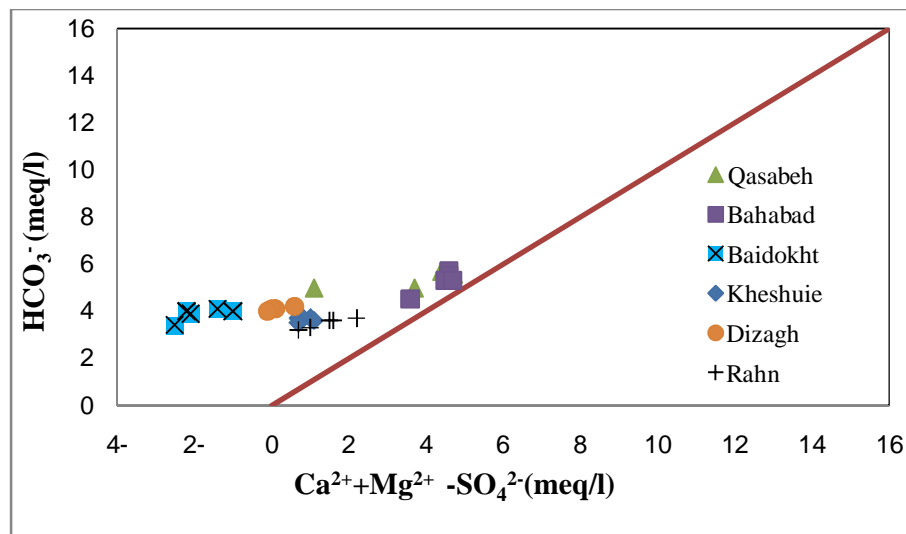
نمودار ترکیبی  $Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}$  در مقابل  $HCO_3^-$  در شکل 5-8 آمده است. هدف از این نمودار مشاهده فرایندهای انحلال کربنات‌ها بدون تداخل انحلال ژنپس است. نمونه‌هایی که روی خط 1:1 قرار گیرند نشان دهنده انحلال دولومیت است. نمونه‌های آب قنات‌های قصبه و بهاباد تقریباً نزدیک خط قرار می‌گیرند که 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.

انحلال سولفات در نمونه‌های آب قنات‌ها به مقدار کمی وجود دارد (شکل 5-9) که به دلیل وجود مارن‌های ژنپس‌دار نئوزن در حوضه آبریز 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 ژپیس (اثر یون مشترک) 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.



شکل 5-7- نمودار  $Na^+-Cl^-$  در مقابل  $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(HCO_3^-+SO_4^{2-})$  در قنات‌های دشت گناباد

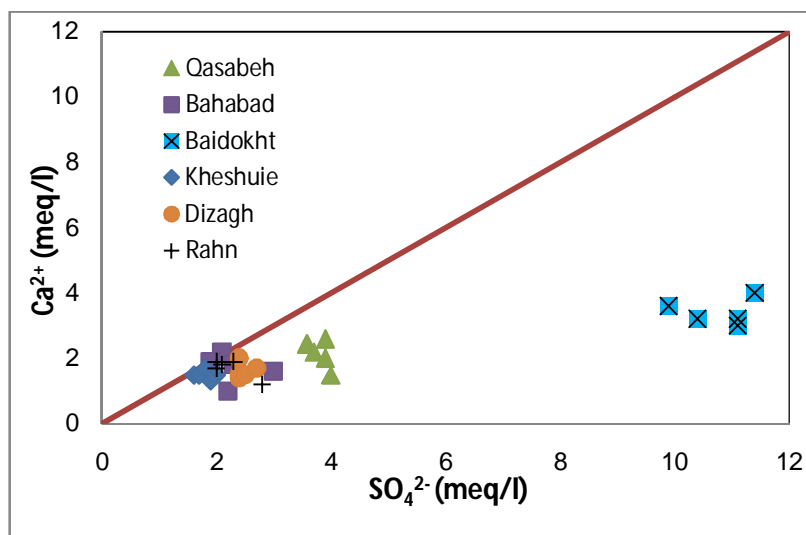


شکل 5-8- نمودار ترکیبی  $Ca^{2+}+Mg^{2+}-SO_4^{2-}$  در مقابل  $HCO_3^-$  در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد

وجود دی اکسیدکربن در آب‌های زیرزمینی باعث افزایش خاصیت اسیدی آب و افزایش انحلال کربنات کلسیم می‌شود. با تراوش آب به داخل کوره قنات در بخش تره‌کار و کاهش فشار، همچنین حرکت آب در کوره قنات با سرعت بسیار بیشتر از محیط متخلخل آبخوان و تلاطم آب و افزایش دمای آن، دی اکسیدکربن موجود در آب خارج، آب قلیائی شده و کربنات کلسیم در کف و دیواره‌های قنات ته‌نشین می‌شود در نتیجه کلسیم از محیط آب خارج می‌شود.

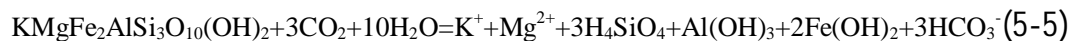
نمودار بی‌کربنات در مقابل منیزیم (شکل 5-10) به تعیین فرایندهای توزیع یون در نمونه‌ها کمک می‌کند. در این نمودار نسبت 1:2 نشان دهنده انحلال متجانس دولومیت است. نسبت کمتر از 0/5 نشان دهنده انحلال همزمان کلسیت و دولومیت است.

انحلال کربنات‌های منیزیم به طور شاخصی در زون اشباع و در شرایط سیستم بسته اتفاق می‌افتد (Vallejos *et al.* 2015 به نقل از Appelo and Postma 2005, Clark and Fritz 1997). انحلال کربنات‌ها در دو سیستم باز و بسته اتفاق می‌افتد. در سیستم باز (زون غیر اشباع) انحلال کربنات‌ها همزمان با تولید دی اکسیدکربن توسعه می‌یابد، ولی در سیستم بسته (زون اشباع) انحلال کربنات و تولید دی اکسیدکربن جدا از یکدیگر است. نمونه‌های قنات‌های قصبه، بهاباد و بیدخت مقادیر منیزیم اضافه دارند که به دلیل دولومیت‌زدایی، دگرسانی کانی‌های فرومنیزین یا تبادل کاتیونی مستقیم است.



شکل 5-9- نمودار سولفات در مقابل کلسیم در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد

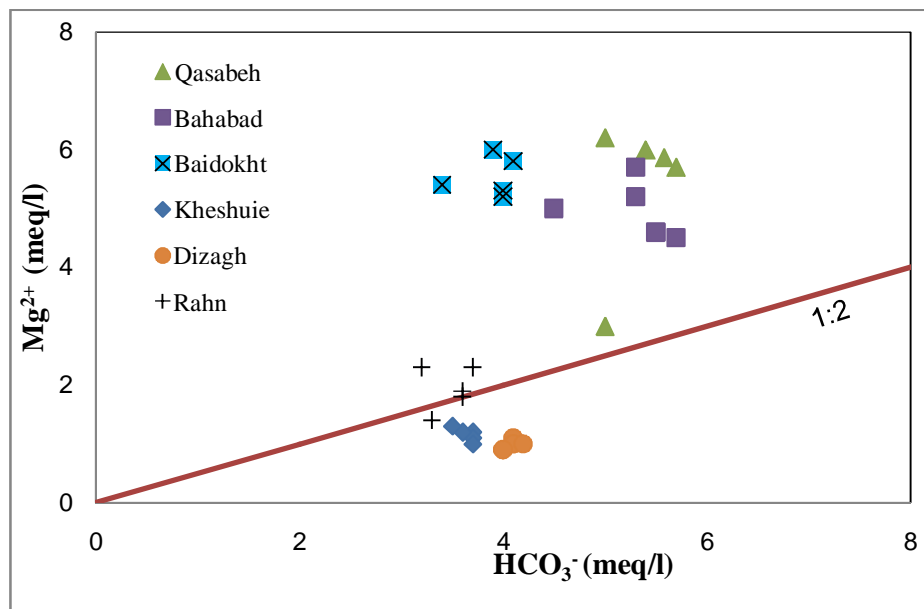
در نتیجه انحلال ژئوپس، مقدار کلسیم محلول اضافه تولید می‌شود که موجب رسوب کلسیت می‌شود و بنابراین مقدار منیزیم محلول افزایش می‌یابد. (Vallejos *et al.* 2015) به نقل از (Back *et al.* 1983, Deike 1990, Ma *et al.* 2011, Saunders and Toran 1994). نتایج اصلی اینکه انحلال ژئوپس سبب تبدیل دولومیت به کلسیت 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 دی‌اکسیدکربن 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 دی‌اکسیدکربن خارج شده، آب قلیائی 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 (5-5) هوازده می‌شود.



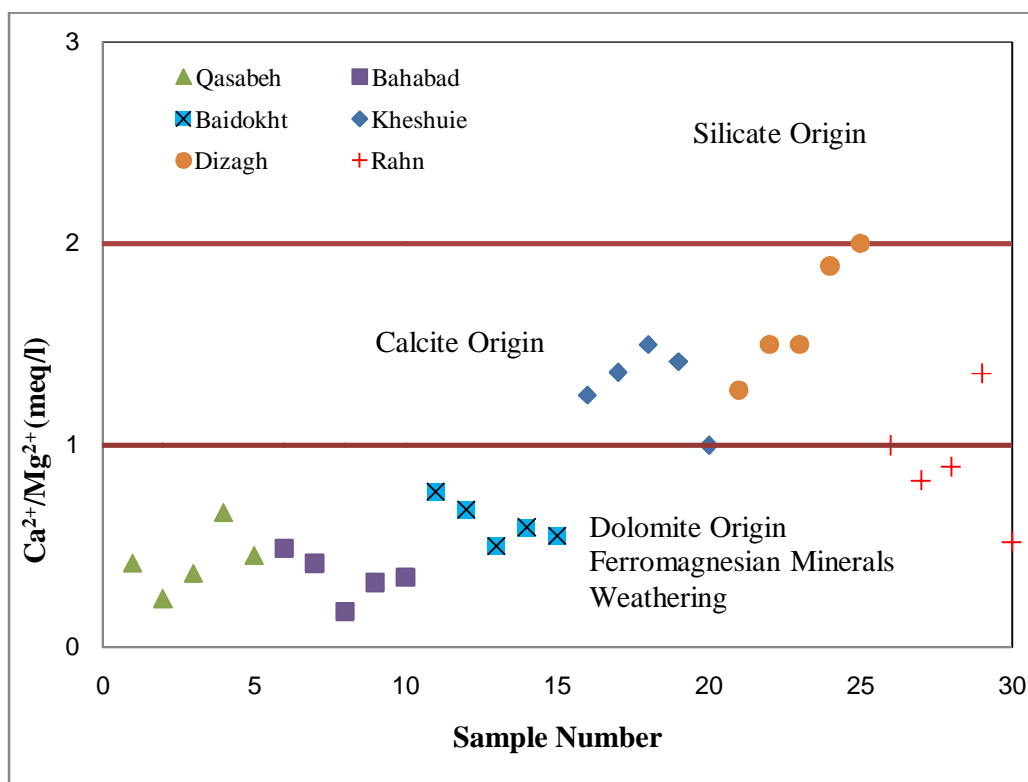
نمونه‌های قنات رهن تقریباً روی خط 1:2 قرار دارد و انحلال دولومیت را نشان می‌دهد. نمونه‌های قنات‌های خشویی و دیزق در زیر خط قرار دارند در این قنات‌ها انحلال همزمان دولومیت و کلسیت اتفاق می‌افتد.

نسبت  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  کمتر از 1 نشان‌دهنده هوازدهی کانی‌های فرومنیزین یا پدیده دولومیت‌زدایی است. نسبت برابر 1 بیانگر انحلال دولومیت است هنگامی که این نسبت از 1 بیشتر گردد نشان‌دهنده انحلال کلسیت است. نمونه‌های قنات‌های قصبه، بهاباد و بیدخت نسبت  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  کمتر از 1 دارند که به دلیل هوازدهی کانی‌های فرومنیزین، ته نشینی کلسیت و حذف کلسیم از آب به دلیل انحلال ژئوپس (اثر یون مشترک) و تبادل کاتیونی مستقیم است. در حوضه آبرگیر قنات‌های خشویی و دیزق انحلال کلسیت و در قنات رهن انحلال کلسیت و دولومیت اتفاق می‌افتد (شکل 5-11).





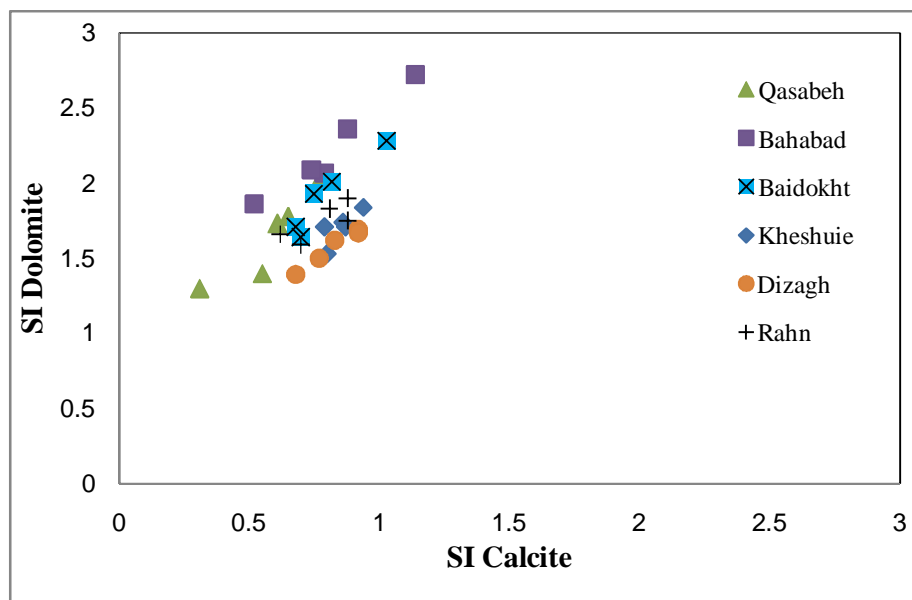
شکل 10-5- نمودار بی کربنات در مقابل منیزیم در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد



شکل 11-5- نسبت  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  در نمونه‌های آب قنات‌های دشت گناباد

#### 5-1-4- شاخص‌های اشباع

شاخص اشباع یک توصیف کمی از تعادل آب با کانی‌های محلول ارائه می‌دهد. تغییرات در شاخص اشباع برای تشخیص مراحل مختلف تکامل هیدروژئوشیمیایی همچنین شناسایی واکنش‌های شیمیایی که تعیین کننده شیمی آب هستند مورد استفاده قرار می‌گیرد. تمامی نمونه‌های آب قنات‌ها نسبت به کلسیت و دولومیت فوق اشباع و نسبت به هالیت و ژیپس تحت اشباع می‌باشند. (جدول 5-2) شکل 5-12 نسبت شاخص اشباع کلسیت بر اساس شاخص اشباع دولومیت را نشان می‌دهد که روند خطی نشان می‌دهد فرایندهای غالب در نمونه‌ها انحلال کربنات‌هاست. همچنین به دلیل خروج دی اکسیدکربن از آب به دلیل کاهش فشار و افزایش سرعت آن در کوره قنات، آب نسبت به کانی‌های کربناته به حالت اشباع و فوق اشباع است. در شرق دشت به دلیل وجود مارن و تبخیری‌های نئوزن و آهک‌های کرتاسه، قنات‌ها دارای شاخص اشباع بالاتری نسبت به قنات‌های غرب دشت می‌باشند. همچنین تغییرات شاخص اشباع قنات‌های مذکور در طول سال بیشتر از قنات‌های غرب دشت است.



شکل 5-12- نمودار شاخص اشباع کلسیت در مقابل شاخص اشباع دولومیت در نمونه‌های آب قنات‌های

دشت گناباد

جدول 5-2- شاخص اشباع کانی‌های مختلف در نمونه‌های آب قنات‌ها

نام قنات	فصل نمونه برداری	هالیت	ژیپس	دولومیت	کلسیت	آراگونیت	انیدریت
قصبه	آبان 95	-5.98	-1.73	1.4	0.55	0.4	-1.95
		-6.61	-1.98	2.36	0.88	0.74	-2.2
		-4.96	-1.32	2.01	0.82	0.67	-1.54
		-6.4	-2.1	1.71	0.79	0.65	-2.32
		-6.07	-1.86	1.67	0.92	0.78	-2.08
		-6.67	-1.99	1.66	0.62	0.48	-2.21
قصبه	بهمن 95	-5.98	-1.66	2.02	0.77	0.63	-1.88
		-6.54	-1.93	2.72	1.14	1	-2.16
		-4.95	-1.19	2.28	1.03	0.88	-1.41
		-6.4	-2.02	1.74	0.86	0.72	-2.25
		-6.03	-1.88	1.69	0.92	0.77	-2.1
		-6.57	-1.93	1.9	0.88	0.74	-2.15
قصبه	اردیبهشت 966	-5.96	-1.87	1.3	0.31	0.16	-2.1
		-6.55	-2.23	1.86	0.52	0.37	-2.47
		-4.95	-1.33	1.93	0.75	0.6	-1.54
		-6.38	-2.07	1.53	0.8	0.66	-2.31
		-6.04	-1.98	1.5	0.77	0.63	-2.2
		-6.48	-1.97	1.59	0.7	0.56	-2.19
قصبه	مرداد 96	-6.05	-1.71	1.78	0.65	0.5	-1.94
		-6.62	-2.01	2.07	0.79	0.65	-2.24
		-4.98	-1.27	1.64	0.7	0.55	-1.5
		-6.44	-2.1	1.71	0.87	0.72	-2.33
		-6.08	-2	1.39	0.68	0.54	-2.22
		-6.63	-1.93	1.83	0.81	0.66	-2.15
قصبه	آذر 96	-5.97	-1.74	1.73	0.61	0.46	-1.98
		-5.58	-1.91	2.09	0.74	0.59	-2.13
		-4.94	-1.29	1.71	0.68	0.54	-1.51
		-6.42	-2.01	1.84	0.94	0.79	-2.24
		-6.04	-1.96	1.62	0.83	0.69	-2.18
		-6.5	-1.87	1.75	0.88	0.73	-2.09

## 2-5- مطالعات ایزوتوپی

ایزوتوپ‌های محیطی اکسیژن 18 و دوتریم ردیاب‌های عالی برای ارزیابی مشخصات هیدروژنولوژی و هیدروژنوشیمی مانند منشأ آب زیرزمینی، جریان و چرخش آب زیرزمینی و فرایندهای اختلاط و شوری هستند. در این بخش خط آب جوی محلی گناباد ترسیم شد. با استفاده از ترکیب ایزوتوپی

قنات‌ها در فصل تر و خشک و خط آب جوی محلی، منشأ و مکانسیم تغذیه آب قنات‌ها مشخص گردید. با ترسیم خط شیب ایزوتوپی محدوده، منطقه تغذیه مشخص شد. ارتباط بین محتوای ایزوتوپی بارش‌های منطقه با دما، رطوبت و مقدار بارش بررسی گردید. مقدار دوتریم اضافه آب قنات‌ها در فصل تر و خشک مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت ارتباط بین محتوای ایزوتوپی آب قنات‌ها با خصوصیات ذاتی قنات‌ها بررسی شد.

### 5-2-1- خط آب جوی محدوده و ترکیب ایزوتوپی قنات‌ها

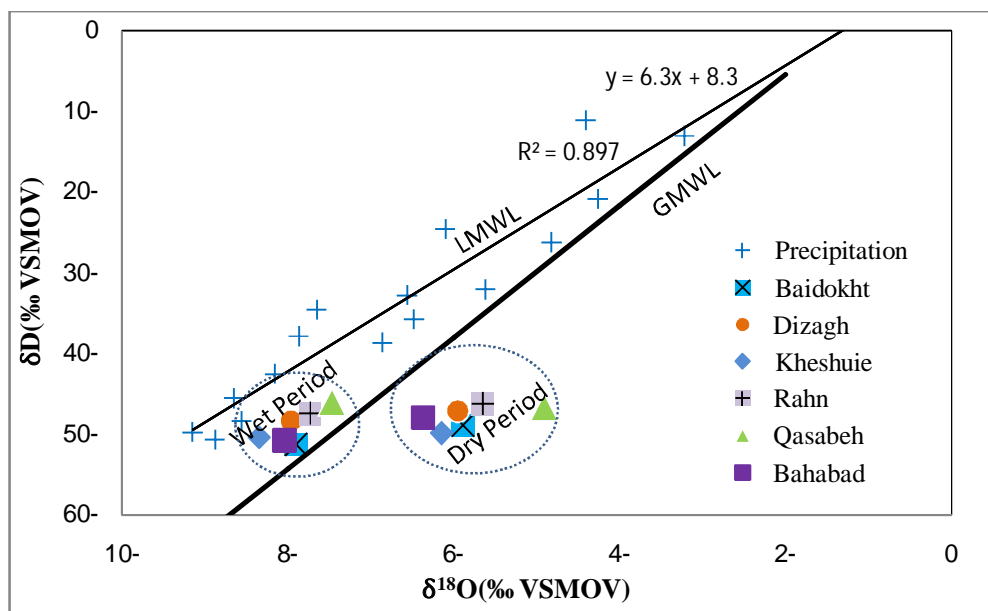
خط آب جوی محلی نسبت خطی بین دوتریم و اکسیژن 18 بارش در یک محل خاص است. شرایط محیطی مخصوصاً دما و رطوبت ترکیب ایزوتوپی را در قسمت‌های مختلف یک منطقه تغییر می‌دهند. شیب و عرض از مبدا خط آب جوی محلی منعکس کننده شرایط آب و هوایی آن منطقه است. محدوده تغییرات مقادیر اکسیژن 18 و دوتریم در نمونه‌های بارش ماهانه محدوده گناباد که از دی ماه 1395 تا اردیبهشت ماه 1396 از 4 محل با ارتفاع مختلف درون این محدوده برداشت شدند، به ترتیب از حداقل 9/15- تا 3/22- پرمیل و از 50/63- تا 11/08- پرمیل می‌باشد. خط آب جوی محلی با معادله  $\delta^2\text{H}=6.3\times\delta^{18}\text{O}+8.3$  با  $R^2=0.9$  ترسیم گردید. شیب خط همانطور که در شکل شماره 5-13 مشخص است برابر 6 و عرض از مبدا آن برابر 8 است و با خط جوی جهانی تفاوت دارد که به دلیل تغییرات فصلی، منشأ رطوبت بارش‌های منطقه و اثر تفریق جنبشی ایزوتوپی طی بارش در شرایط رطوبتی پایین‌تر در منطقه نیمه خشک می‌باشد. تبخیر و مقدار بارش عوامل مهم تاثیرگذار در مشخصات ایزوتوپی بارش هستند (Schotterer *et al.* 1997, Wang 2014).

تفاوت آشکاری در مقادیر اکسیژن 18 و دوتریم نمونه‌های آب قنات‌ها در فصل تر و خشک وجود دارد. قنات‌ها در فصل تر ترکیب ایزوتوپی تهی‌تر دارند، چنانکه مقادیر اکسیژن 18 و دوتریم در آب زیرزمینی قنات‌های منطقه در فصل تر به ترتیب از 8/35- تا 7/47- پرمیل و از 51/26- تا 46/02- پرمیل در تغییر است و در فصل خشک محدوده تغییرات مقادیر مذکور در نمونه‌های آب قنات‌ها از

6/37- تا 4/91- پرمیل و از 49/87- تا 46/22- پرمیل می‌باشد جدول (3-5). ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن 18 و دوتریم بارش و نمونه‌های آب زیرزمینی نشان می‌دهند که آب زیرزمینی این قنات‌ها عمدتاً از بارش‌های محلی حوضه گناباد منشأ می‌گیرد. در دوره خشک آب زیرزمینی قنات‌ها از نظر ایزوتوپی، غنی‌شدگی نسبت به دوره تر نشان می‌دهند. به طوریکه بر روی خط تبخیر با شیب کمتر نسبت به دوره تر قرار گرفته‌اند. بنابراین ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار آب زیرزمینی در دوره خشک تحت تاثیر تبخیر بیشتر نسبت به دوره تر قرار گرفته است. 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 غنی‌شدگی اکسیژن 18 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 آبگیر و میزان بارش و تبخیر می‌تواند تغییر کند. مقادیر دوتریم و اکسیژن 18 آب زیرزمینی قنات‌ها در دوره تر عمدتاً نزدیک خط جوی محلی قرار می‌گیرند که بیانگر تغذیه مستقیم آب زیرزمینی با اثر تبخیر ضعیف است. ترکیب ایزوتوپی آب قنات‌ها در فصل تر نشان‌دهنده عدم تاثیر تبخیر و مکانسیم تغذیه آب زیرزمینی و جریان شامل نفوذ سریع بارش از طریق سنگ‌های درزو شکافدار ارتفاعات و نیز نفوذ آب سطحی در رسوبات دانه درشت مخروط افکنه‌ها و بستر رودخانه‌های موجود در حاشیه دشت است. همچنین به دلیل حجم بارش بیشتر و دبی زیاد سیلاب‌ها در فصل تر، امکان تبخیر از آنها در شرایط دمای کمتر و رطوبت بیشتر نسبت به فصل خشک وجود ندارد. شیفت نمونه‌های آب قنات‌ها از خط آب جوی محلی در فصل خشک احتمالاً به دلیل تبخیر در طول نفوذ و تبخیر از آب در داخل کوره قنات است. در دوره خشک تغذیه قنات‌ها از آب برگشتی کشاورزی قنات‌ها و چشمه‌های ارتفاعات جنوب دشت است که به دلیل تبخیر از آنها در طول جریان سطحی قبل از نفوذ در آبرفت‌ها، مقدار ایزوتوپی آنها می‌تواند تا حدودی غنی‌تر گردد.

جدول 5-3- ترکیب ایزوتوپی بارش و آب قنات‌های محدوده گناباد (بر حسب ‰ VSMOW)

بارش						مرداد 96		آبان 95		نام قنات
$\delta D$	$\delta^{18}O$	$\delta D$	$\delta^{18}O$	$\delta D$	$\delta^{18}O$	$\delta D$	$\delta^{18}O$	$\delta D$	$\delta^{18}O$	
-48.33	-8.56	-24.58	-6.1	-13.08	-3.22	-50.75	-8.04	-47.93	-6.37	بهاباد
-32.78	-6.56	-38.66	-6.86	-26.26	-4.82	-51.26	-7.9	-48.9	-5.89	بیدخت
-49.76	-9.15	-35.78	-6.48	-32.07	-5.62	-48.35	-7.96	-47.1	-5.95	دیزق
-37.87	-7.87	-45.54	-8.65	-20.87	-4.26	-50.35	-8.35	-49.87	-6.15	خشویی
		-50.63	-8.88	-11.08	-4.41	-47.41	-7.73	-46.22	-5.65	رهن
		-34.58	-7.65	-42.53	-8.16	-46.02	-7.47	-46.62	-4.91	قصبه



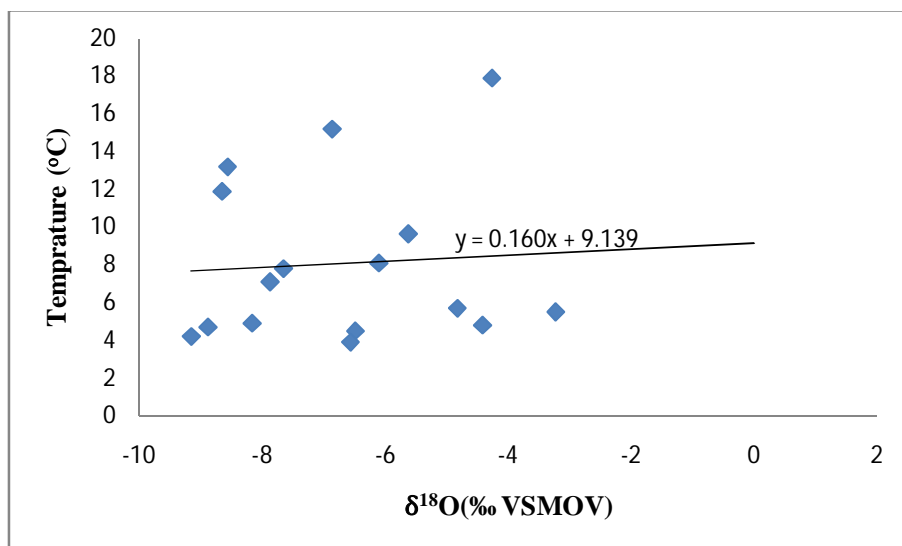
شکل 5-13- ارتباط بین اکسیژن 18 و دوتریم برای نمونه‌های آب قنات‌ها و بارش‌های منطقه

### 5-2-2-2- ارتباط بین محتوای ایزوتوپی بارش با مقدار دما و رطوبت هوا و مقدار بارش

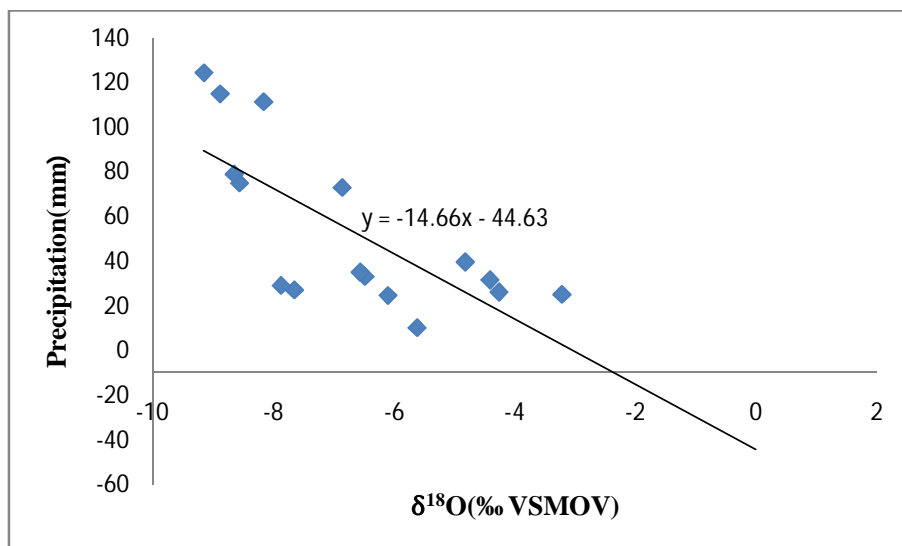
ارتباط مستقیم بین مقدار اکسیژن 18 بارش و دمای هوا (شکل 5-14) نشان دهنده تاثیر دمای هوا روی مقادیر ایزوتوپی نمونه‌هاست. ارتباط معکوس بین مقدار بارش و مقادیر ایزوتوپی (شکل 5-15) تاثیر مقدار بارش در مقادیر ایزوتوپی نمونه‌های بارش را آشکار می‌سازد که ممکن است در نتیجه دمای

بالتر و تبخیر ثانویه از بارش در فصل خشک باشد. همچنین ارتباط معکوس بین مقدار اکسیژن 18

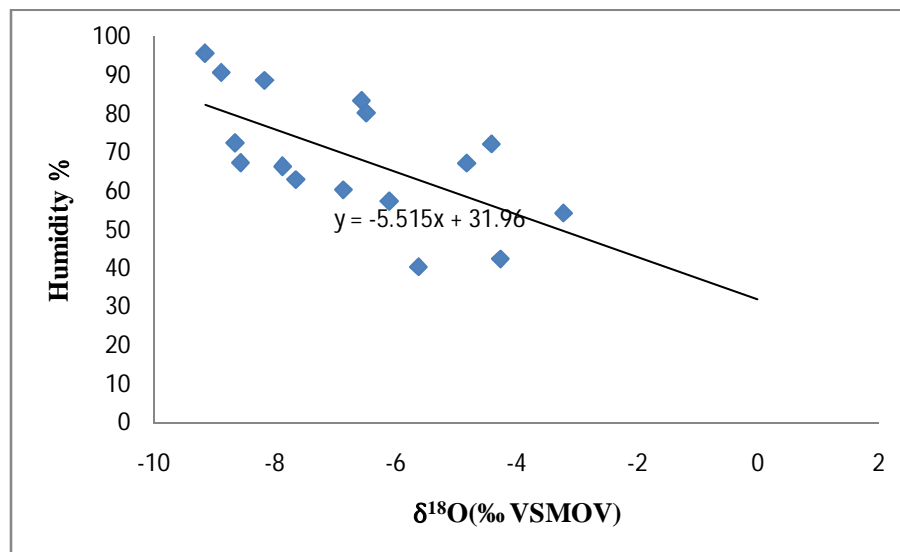
بارش و رطوبت منطقه (شکل 5-16) بیانگر تاثیر رطوبت هوا در محتوای ایزوتوپی بارش است.



شکل 5-14- ارتباط بین اکسیژن 18 و دمای منطقه



شکل 5-15- ارتباط بین اکسیژن 18 بارش و مقدار بارش‌های منطقه

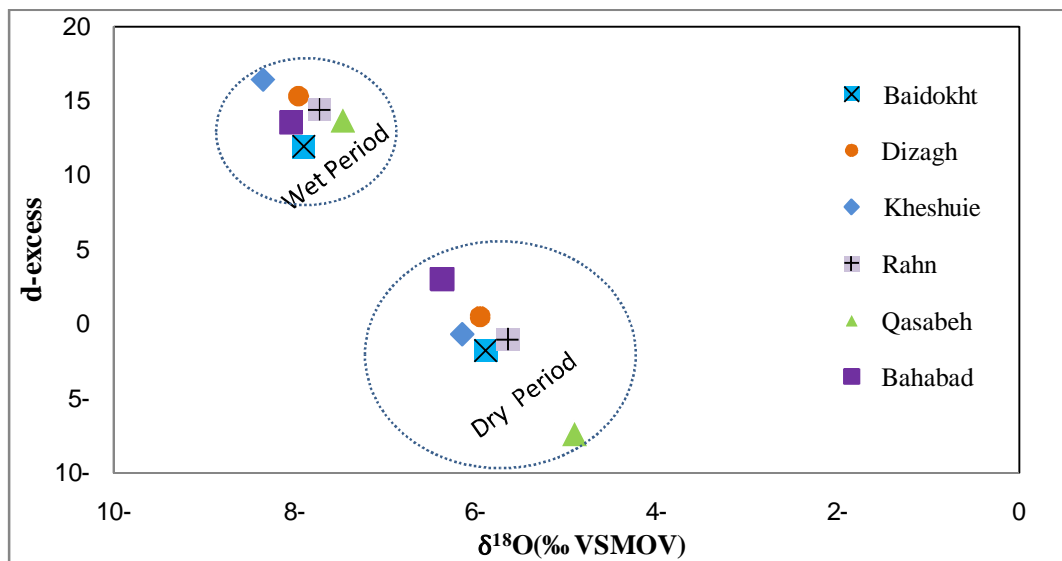


شکل 5-16- ارتباط بین اکسیژن 18 بارش و رطوبت منطقه

### 5-2-3- دوتریم اضافه آب قنات‌ها

دوتریم اضافه از رابطه  $d\text{-excess} = \delta^2\text{H} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$  بدست می‌آید و تحت تاثیر دما و رطوبت نسبی منشأ بخار آب است (Longinelli *et al.* 2006, Yu *et al.* 2008, Zhaho *et al.* 2011, Wang 2014). به منظور مشخص نمودن منشأ بخار آب در محدوده مورد مطالعه، تنوع ترکیب ایزوتوپی بارش مورد بررسی قرار گرفت. دوتریم اضافه نمونه‌های آب از -10 تا +15 در تغییر است که با دوتریم اضافه جهانی که برابر +10 است متفاوت می‌باشد (شکل 5-17). مقادیر اکسیژن 18 بیشتر و دوتریم اضافه کمتر در فصل خشک نسبت به فصل تر نشان دهنده منشأهای مختلف بخار آب، تاثیر مقدار بارش و دما در تنوع ترکیب ایزوتوپی و تاثیر تبخیر بیشتر در فصل خشک نسبت به فصل تر است.

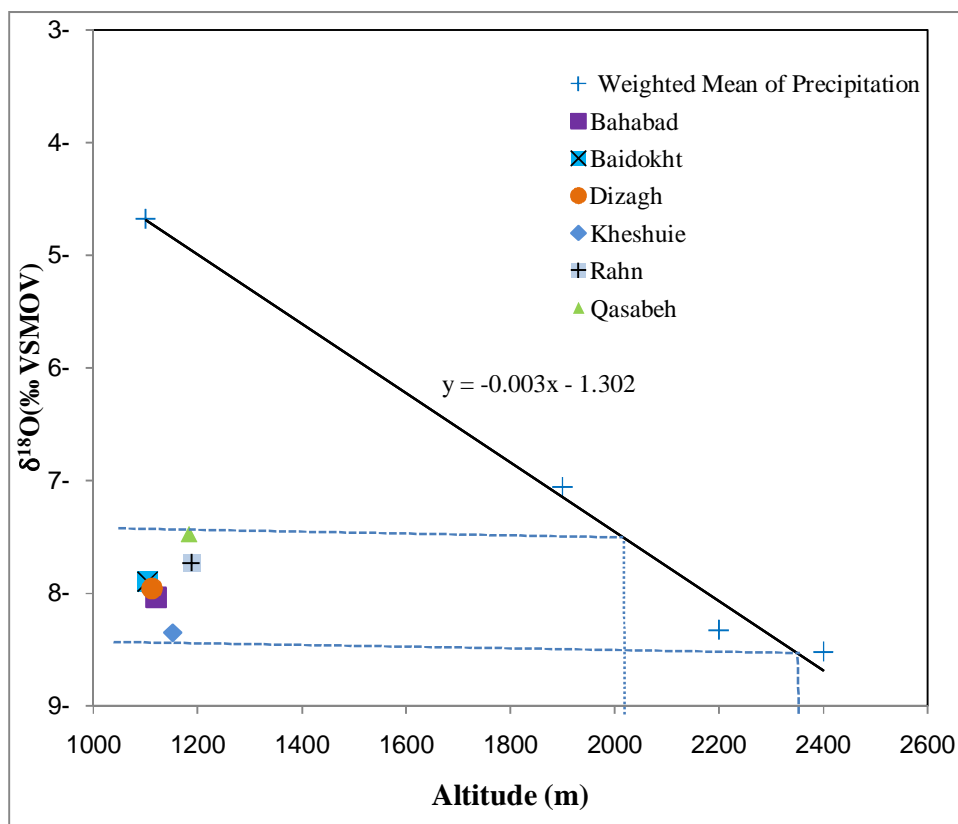




شکل 5-17- ارتباط بین اکسیژن 18 و دوتریم اضافه در آب قنات‌ها

#### 5-2-4- خط شیب ایزوتوپی محدوده

جهت تعیین ارتفاع منطقه تغذیه، رابطه بین مقدار ایزوتوپی اکسیژن 18 و ارتفاع برای ایستگاه‌های بارش محدوده گناباد ترسیم شد (شکل 5-18). رابطه  $\delta^{18}\text{O} = (-0.0031 \times \text{altitude} - 1.3)$  در منطقه مورد مطالعه بدست آمده است، به طوریکه مقدار تهی‌شدگی اکسیژن 18 در بارش‌های منطقه حدود 0/3 پرمیل در 100 متر افزایش ارتفاع می‌باشد. تغذیه آب زیرزمینی قنات‌ها در محدوده مورد مطالعه از حوضه‌ای در ارتفاعات بین 2000 تا 2400 متر منشأ می‌گیرد. تغذیه آب زیرزمینی در قنات قصبه از ارتفاع 2000 متر منشأ می‌گیرد و در قنات خشویی تغذیه از ارتفاع 2400 متر است. سه قنات بهاباد، دیزق و بیدخت دارای ارتفاع تغذیه تقریباً یکسان و در حدود 2200 متر است. در حوضه آبگیر گناباد حداکثر ارتفاع در ارتفاعات غربی محدوده برابر 2600 متر و در ارتفاعات جنوبی محدوده برابر 2770 متر است.



شکل 5-18- محتوای ایزوتوپی آب باران در مقابل ارتفاع ایستگاه باران‌سنجی و تخمین ارتفاع تغذیه آب قنات‌ها با استفاده از مقادیر اکسیژن 18 آنها

### 5-2-5- تعیین میزان تغذیه سالانه قنات‌ها با استفاده از داده‌های ایزوتوپی

برای محاسبه میزان تغذیه قنات‌ها از رابطه 5-1 استفاده شد. که  $\delta w$ ،  $\delta d$  و  $\delta p$  به ترتیب ترکیب ایزوتوپی قنات‌ها در فصل تر، خشک و آب باران است.  $Qw$ ،  $Qd$  و  $Qp$  به ترتیب دبی قنات‌ها در فصل تر، خشک و میزان تغذیه از بارش است.

$$Qw\delta w = Qd\delta d + Qp\delta p \quad (1-5)$$

برای ترکیب ایزوتوپی از مقادیر اکسیژن 18 آب قنات‌ها و بارش منطقه استفاده شد. ترکیب ایزوتوپی بارش برابر میانگین وزنی اکسیژن 18 بارش ایستگاه‌های با ارتفاع بیش از 1900 متر منطقه به میزان 7/99- پرمیل محاسبه و در معادله لحاظ شد. آبدهی قنات‌ها در طول سال آبی 96-95 اندازه‌گیری شده و آبدهی آبان ماه قنات‌ها برای فصل خشک و آبدهی مرداد ماه (بیشترین آبدهی قنات‌ها) به

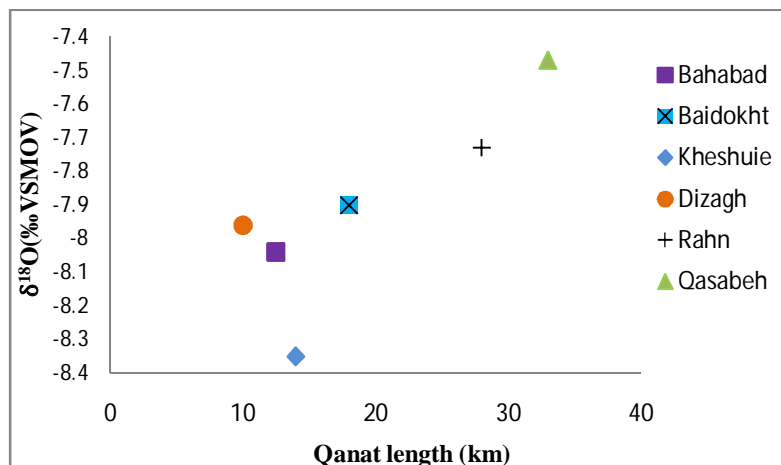
عنوان دوره تر در معادله لحاظ گردید. با توجه به ترکیب ایزوتوپی قنات‌ها در فصل تر و خشک تنها مجهول معادله یعنی Qp (مقدار آب قنات حاصل از بارش‌های سال 95-96) برای هر قنات محاسبه و در جدول زیر ارائه شد. بر این اساس سهم افزایش آب قنات‌ها ناشی از بارش سال 95-96 بین 28 تا 38 درصد آبدهی قنات‌هاست.

جدول 4-5- برآورد سهم بارش‌های سال آبی 95-96 در آبدهی قنات‌های دشت گناباد

نام قنات	دبی فصل خشک (لیتر بر ثانیه)	محتوای اکسیژن 18 فصل خشک	دبی فصل تر (لیتر بر ثانیه)	محتوای اکسیژن 18 فصل تر	میزان تغذیه ناشی از بارش‌های سال 95-96 (لیتر در ثانیه)	درصد تغذیه
قصبه	114.7	-4.91	127	-7.47	48	38
دیزق	54.5	-5.95	60	-7.96	19	32
خشویی	35.5	-6.15	38.5	-8.35	13	34
رهن	14.3	-5.65	14.8	-7.73	4	28
بیدخت	24.5	-5.89	30	-7.9	12	39
بهباد	24	-6.37	27.6	-8.04	9	31

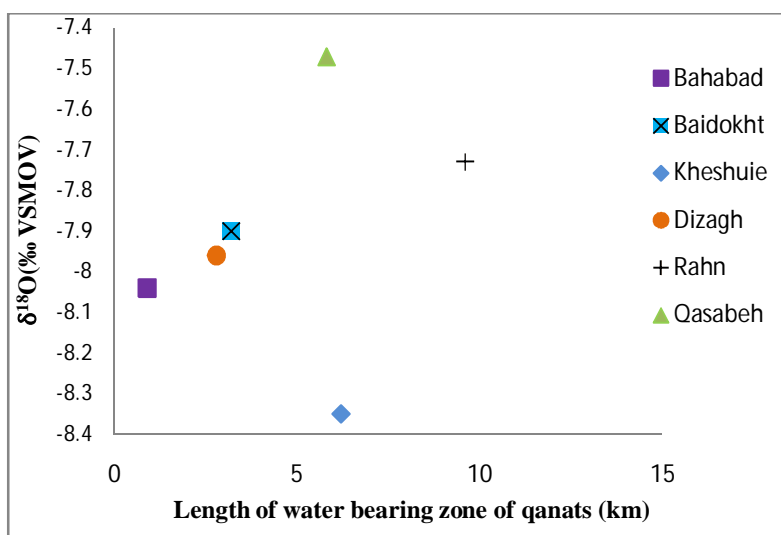
#### 5-2-6- بررسی ارتباط ترکیب ایزوتوپی آب قنات‌ها با خصوصیات قنات‌ها

در این بخش ترکیب ایزوتوپی آب قنات‌ها (محتوای اکسیژن 18) با خصوصیات همچون طول قنات، طول تره‌کار قنات، فاصله مادرچاه قنات تا ارتفاعات، عمق مادرچاه قنات و هدایت الکتریکی آب قنات‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل 5-19 به جز در قنات خشویی در بقیه قنات‌ها با افزایش طول قنات، مقدار اکسیژن 18 قنات افزایش می‌یابد که به دلیل تاثیر تبخیر در حین حرکت آب در کوره قنات است.

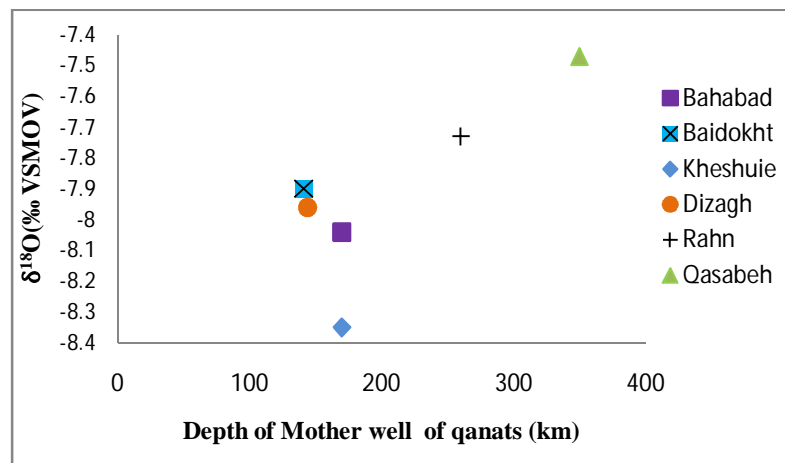


شکل 5-19: ارتباط بین محتوای اکسیژن 18 آب قنات‌ها در برابر طول قنات

تغذیه قنات خشویی با جریانی سریع‌تر نسبت به بقیه قنات‌ها از طریق سازندهای آهکی نفوذپذیر غرب دشت باعث شده قنات مذکور محتوای ایزوتوپی تهی‌تری داشته باشد. با افزایش طول تره‌کار قنات نیز محتوای ایزوتوپی قنات‌ها افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق مادرچاه قنات‌ها نیز محتوای ایزوتوپی آب غنی‌تر می‌گردد. عمق بیشتر مادرچاه سبب طولانی‌تر شدن مسیر چرخش آب در زمین و افزایش محتوای ایزوتوپ‌های پایدار آن می‌گردد.

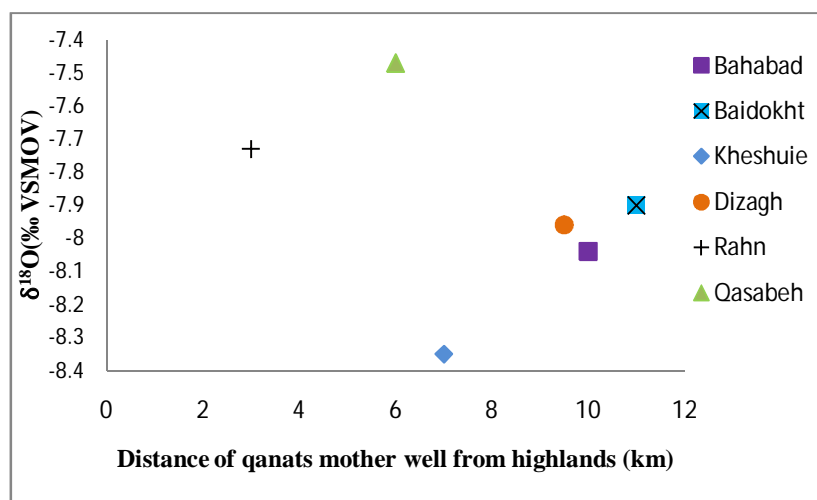


شکل 5-20: ارتباط بین محتوای ایزوتوپی آب قنات‌ها و طول تره‌کار قنات‌ها



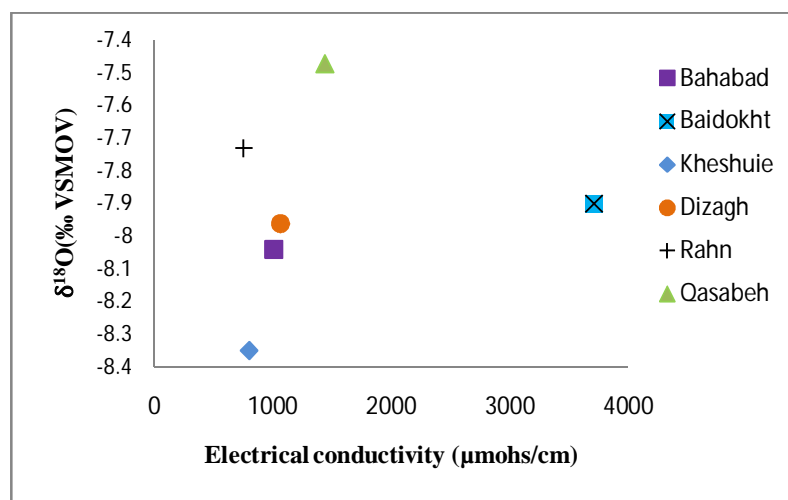
شکل 5-21: ارتباط بین محتوای ایزوتوپی آب قنات‌ها و عمق مادرچاه قنات‌ها

در شکل 5-22 ارتباط بین محتوای ایزوتوپی قنات‌ها با فاصله مادرچاه قنات‌ها تا ارتفاعات محدوده آمده است. چنانچه نفوذپذیری سازندهای ارتفاعات حوضه آبگیر قنات‌ها و همچنین قابلیت انتقال آبرفت‌های بالادست مادرچاه قنات‌ها یکسان باشد انتظار می‌رود با کاهش فاصله مادرچاه قنات‌ها با ارتفاعات حوضه، محتوای ایزوتوپی آب قنات‌ها سبک‌تر باشد که به جز در قنات‌های قصبه و رهن در بقیه قنات‌ها مشاهده می‌گردد. به نظر می‌رسد محتوای ایزوتوپی سنگین‌تر دو قنات مذکور به دلیل طول بیشتر کوره قنات‌ها و تبخیر از آب در حین حرکت در کوره باشد.



شکل 5-22: ارتباط بین محتوای ایزوتوپی آب قنات‌ها و فاصله مادرچاه قنات‌ها از ارتفاعات محدوده

منشأ شوری آب‌های لب شور تا خیلی شور به طور مشخصی از پلات اکسیژن 18 در برابر هدایت الکتریکی یا کلر تعیین می‌گردد. در این دیاگرام چنانچه مقادیر زیاد هدایت الکتریکی همبستگی با اکسیژن 18 نداشته باشد، به خاطر انحلال نهشته‌های تبخیری است و برعکس چنانچه همبستگی خوبی بین کلراید و اکسیژن 18 وجود داشته باشد، تبخیر فرایند غالب می‌باشد. با توجه به شکل 5-23، در قنات بیدخت افزایش مقدار هدایت الکتریکی در نتیجه انحلال نهشته‌های تبخیری است. در بقیه قنات‌ها همبستگی ضعیفی بین محتوای ایزوتوپی و هدایت الکتریکی آب قنات‌ها وجود دارد که نشان دهنده تاثیر کم تبخیر است.



شکل 5-23: ارتباط بین محتوای ایزوتوپی و هدایت الکتریکی آب قنات‌ها

## فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این فصل نتایج حاصله از کلیه مراحل تحقیق انجام شده در ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژی، هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی قنات‌های دشت گناباد به طور خلاصه ارائه خواهد گردید و پیشنهادهایی برای مطالعات بیشتر در آینده جهت حفاظت و نگهداری این قنات‌ها ارائه خواهد گردید.

### 6-1- نتیجه‌گیری

مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق شامل خصوصیات هیدروژئولوژیکی، هیدروژئوشیمیایی و ایزوتوپی قنات‌هاست که در ادامه ارائه می‌گردند.

### 6-1-1- نتایج مطالعات هیدروژئولوژیکی

با توجه به اختلاف ارتفاع محل مادرچاه و مظهر قنات همچنین شیب کف و طول کوره قنات، عمق مادرچاه قنات‌ها تعیین گردید که از 141 متر در قنات بیدخت تا 340 متر در قنات قصبه متغیر است. یک حوضه آبرگیر کلی و مشترک برای قنات‌های دشت گناباد تعیین گردید. مساحت حوضه آبرگیر قنات‌ها برابر 1032 کیلومتر مربع است.

محاسبات بیلان نشان می‌دهد تخلیه و تغذیه سالانه آب زیرزمینی در حوضه آبرگیر قنات‌های دشت به ترتیب برابر با 38/7 و 34/9 میلیون مترمکعب است. در نتیجه سالانه 3/7 میلیون مترمکعب کسری مخزن در سفره آب زیرزمینی حوضه آبرگیر قنات‌ها وجود دارد. برداشت از سفره آب زیرزمینی در حوضه آبرگیر قنات‌ها توسط چاه‌ها سالانه برابر با 4/9 میلیون مترمکعب است. چنانچه این چاه‌ها حفر نمی‌شدند با برداشت آب توسط قنات‌ها در دشت مدیریت پایدار و تعادل سفره آب زیرزمینی برقرار بود، آن چنانکه حدود 3000 سال با وجود بیش از 30 رشته قنات و برداشت بیش از 20 میلیون مترمکعب آب در دشت این شرایط برقرار بوده است.

هیدروگراف دراز مدت به همراه تغییرات بارش موثر حوضه آبرگیر قنات‌ها ترسیم شد. بر این اساس نرخ کاهش سالانه آبدهی قنات‌های مورد مطالعه بین 0/17 تا 1/17 لیتر در ثانیه در سال برآورد شد. سهم افزایش آبدهی قنات از بارش سال آبی هدف با استفاده از افزایش بارش موثر، در قنات‌های دشت بین 4 تا 12 درصد محاسبه گردید.

تغییرات آبدهی در قنات‌های مورد مطالعه در اثر افت سطح آب زیرزمینی دشت یکسان نبوده و به ازای یک متر افت سطح آب زیرزمینی دشت بین 3 تا 14 لیتر در ثانیه متغیر است. در صورت ادامه روند کنونی افت سطح آب زیرزمینی در دشت گناباد، قنات‌ها در طی 10 تا 180 سال آینده از بین خواهند رفت.

درصد کاهش طول تره‌کار از 4 تا 41 درصد در قنات‌های مورد مطالعه متغیر است. کاهش طول تره‌کار در قنات‌های شرق دشت بیشتر از قنات‌های غرب دشت بوده است که احتمالاً به دلیل افت بیشتر سطح آب زیرزمینی در اثر برداشت آب از چاه‌های آب شرب در جنوب شرق دشت است. ارتباط مستقیم بین درصد کاهش زون آبده و درصد کاهش آبدهی قنات‌ها وجود دارد.

از جمله عواملی که باعث کاهش آبدهی قنات‌ها در دشت گناباد شده است می‌توان به کاهش میزان بارندگی، حفر چاه، احداث سد، از بین بردن شرایط طبیعی رودخانه‌های تغذیه کننده سفره آب زیرزمینی در حوضه آبرگیر قنات‌ها و از بین رفتن مقنیان و عدم لایروبی قنات‌ها اشاره کرد.

### **6-1-2- نتایج مطالعات هیدروژئوشیمی**

میزان هدایت الکتریکی آب زیرزمینی قنات‌های دشت از 750 تا 3900 میکروموس بر سانتیمتر به ترتیب در قنات‌های رهن و بیدخت در تغییر است. آب زیرزمینی قنات‌های غرب دشت به دلیل تغذیه از سازندهای آهکی و ولکانیکی دارای هدایت الکتریکی کمتر و کیفیت بهتر و از غرب به سمت شرق دشت با افزایش گسترش مارن‌های نئوژن میزان هدایت الکتریکی آب قنات‌ها افزایش می‌یابد چنانچه در قنات بیدخت به بیشترین مقدار می‌رسد.



روند تغییرات هدایت الکتریکی با تغییرات آبدهی از مهرماه 1395 تا آذرماه 1396 نشان می‌دهد که در تمامی قنات‌ها با افزایش آبدهی، میزان هدایت الکتریکی آب کاهش یافته که نشان دهنده مشارکت آب بارش در آبدهی قنات می‌باشد. تغییرات هدایت الکتریکی همانند آبدهی تدریجی و اندک است. رابطه مستقیم بین هدایت الکتریکی با طول قنات و عمق مادرچاه در قنات‌ها به جز قنات بیدخت مشاهده می‌گردد که به دلیل گسترش مارن‌های نئوژن در حوضه قنات مذکور است که باعث افزایش زیاد هدایت الکتریکی آب قنات شده است.

تیپ‌های غالب آب زیرزمینی در قنات‌های مورد مطالعه شامل بی‌کربناته سدیک منیزیک و کلروره سدیک است.

آب زیرزمینی قنات‌ها نسبت به کلسیت اشباع، نسبت به دولومیت فوق اشباع و نسبت به کانی‌های تبخیری تحت اشباع است.

فرایندهای هیدروشمیایی غالب در آب قنات‌های دشت گناباد شامل انحلال کربنات‌ها، انحلال تبخیری‌ها، دگرسانی کانی‌های فرومنیزین، دولومیت‌زدایی 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.

### 3-1-6- نتایج مطالعات ایزوتوپی

خط آب جوی حوضه گناباد با معادله  $\delta^2\text{H}=6.3\times\delta^{18}\text{O}+8.3$  ترسیم گردید. شیب خط برابر 6 و عرض از مبدا آن برابر 8 است و با خط جوی جهانی تفاوت دارد که به دلیل تغییرات فصلی، منشأ رطوبت بارش‌های منطقه و اثر تفریق ایزوتوپی طی بارش در اثر تبخیر در شرایط رطوبتی پایین‌تر در منطقه نیمه خشک می‌باشد.

ترکیب ایزوتوپی قنات‌ها در فصل خشک به دلیل بارش و رطوبت کمتر و در نتیجه تبخیر بیشتر از بارش و از آب قنات در داخل کوره قنات همچنین تغذیه قنات‌ها از آب برگشتی منابع آبی ارتفاعات و تبخیر آب در طول جریان سطحی قبل از نفوذ در آبرفت‌ها سنگین‌تر است.

با مقایسه محتوای ایزوتوپی قنات‌ها در فصل تر و بارش‌های منطقه مشخص گردید که منشأ تغذیه قنات‌ها بارش‌های محلی محدوده گناباد (ارتفاعات 2000 تا 2700 متری با تاثیر تبخیر ضعیف) بوده و مکانیسم 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 3 تا 11 کیلومتر (در قنات‌های مختلف متفاوت است) درون مواد آبرفتی به تره‌کار (زون آبرگیر قنات) می‌رسد. مقادیر اکسیژن 18 بیشتر و دوتریم اضافه کمتر در فصل خشک نسبت به فصل تر نشان دهنده تاثیر تبخیر بیشتر در فصل خشک نسبت به فصل تر است. 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.

سهم بارش‌های سال آبی 95-96 در آبدهی قنات‌ها براساس محتوای ایزوتوپی آب قنات‌ها و بارش در حدود 28 تا 38 درصد آبدهی قنات‌ها در فصل تر به دست آمد.

ارتباط مستقیمی بین محتوای ایزوتوپی قنات‌ها و طول قنات، طول بخش تره‌کار قنات، عمق مادرچاه و فاصله مادرچاه قنات تا ارتفاعات وجود دارد.

## 6-2- پیشنهادها

با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده و مطالعات انجام شده در این تحقیق، پیشنهادهایی جهت مطالعات بیشتر در منطقه مورد مطالعه به شرح زیر ارائه می‌شود:

- پیشنهاد می‌گردد مطالعات ایزوتوپ‌های ناپایدار جهت تعیین سن و دوره تغذیه آب زیرزمینی قنات‌ها انجام گیرد.

- نمونه‌برداری ایزوتوپ‌های پایدار از بارش‌های چند سال جهت تدقیق خط بارش محلی انجام گیرد.

- نصب سرریز بر روی قنات‌ها و اندازه‌گیری دبی آنها به شکل مستمر

- عدم حفر چاه جدید، احداث سد یا بند، توسعه کشاورزی، برداشت مصالح از رودخانه‌ها و برداشت

مصالح کوهی در حوضه آبرگیر قنات‌ها

- لایروبی منظم و استحکام‌سازی قنات‌ها



## منابع

- اکرامی، م.، ملکی نژاد، ح.، اختصاصی، م. 1390. بررسی تأثیر خشکسالی اقلیمی بر آبدی برخی از قنوات دشت یزد- اردکان، همایش بین المللی دانش سنتی مدیریت منابع آب، یزد، مرکز بین المللی قنات و سازه های تاریخی آبی.
- آقنابتی، ع. 1383. زمین شناسی ایران، چاپ دوم، وزارت صنایع و معادن، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- پاپلی یزدی، م.، لباف خانیکی، ر.، لباف خانیکی، م.، جلالی، ع.، وثوقی، ف. 1379. قنات قصبه گناباد یک اسطوره، شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان رضوی، مشهد، 292 صفحه.
- سازمان زمین شناسی کشور، نقشه زمین شناسی 1:100000 گناباد.
- سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، شرح نقشه زمین شناسی 1:100000 گناباد، 14 صفحه.
- عباسی، ف.، کرمی غ. 1388. ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی قنات های منطقه میامی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کرباسی راوری، م.، سنایی راد، ع. 1383. نقش پایین افتادن سطح آب زیرزمینی در منطقه فراهان روی قنوات و کشاورزی منطقه، همایش ملی قنات، گناباد.
- کرمی، غ. 1383. قنات ها کوچک موجود در آبراهه های کوهستانی: ویژگی ها و نحوه جلوگیری از هدر رفتن آب در ماه های سرد، چکیده مقالات همایش ملی قنات گناباد، ص 135.
- کرمی، غ. 1390. بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی قنات بزرگ بیارجمند، طرح پژوهشی با کد 21024، دانشگاه صنعتی شاهرود، 45 صفحه.
- کیانی، م.، کرمی، غ. 1392. بررسی خصوصیات کمی و کیفی آب قنات بزرگ بیارجمند، هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- کیانی، م.، کرمی، غ. م. 1388. بررسی کیفی آب در قنات های بیارجمند شاهرود، اولین کنفرانس بین المللی مدیریت منابع آب، شاهرود.
- گوبلو، ه. 1371. قنات فنی برای دستیابی به آب، چاپ اول، مشهد، انتشارات آستان قدس رضوی.
- هنری، ف.، کرمی، غ. کاظمی، غ. 1393. ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی قنات های منطقه خور، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شاهرود.

- Appelo, C.A.J., 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., 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.
- Behnia, A. **Qanat Construction and Maintenance**. University Press Center, Tehran, Iran, 2000, p. 244. (In Persian)
- Boustani, F. Sustainable water utilization in arid region of Iran by Qanat. In: **Proceeding of Int. Symposium on Efficient groundwater, 2000, Bangkok, Thailand, pp.2132-216**.
- Capaccioni, B., Didero, M., Paletta, C., Salvadori, P., 2001. Hydrogeochemistry of groundwaters from carbonate formations with basal gypsiferous layers: an example from the Mt Catria–Mt Nerone ridge (Northern Apennines, Italy). **J. Hydrol.** **253**, 14–26.
- Cardenal, J., Benavente, J., 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.
- Clark, I., Fritz, P., 1997. **Environmental Isotopes in Hydrogeology**. Lewis Publishers, New York (328 pp.).
- Cressey, G.B. Qanats, Karez, and Foggaras. **Geographical Review.** **1958**, 27-44, (Available from C.S.U. Fort Collins).
- 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.
- Dindan, K., Bouchaou, Y., Hsissou, Y., Krimissa, M., 2003. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Souss Upstream Basin, southwestern Morocco. **Journal of African Earth Sciences** **36**, 315-327.
- Feth, J.H., 1981, Chloride in natural continental water: a review, U.S Geological Survey Water-Supply, Paper 2176, 30 p.
- Fontes, J.C., 1976. Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles: quelques aspects. Ph.D. Thesis, University of Paris VI, 208 p.
- Fu, H.; Yang, X. Effects of south-north diversion project on the water dispatching pattern and ecological environment in the water receiving area: a case study of the Fuyang River Basin in Handan, **China. Water** **2019**, **11**, 845.
- Gat, J.R., 1996. Oxygen and hydrogen stable isotopes in the hydrological cycle. Annu. **Rev. Earth Planet. Sci.** **24**, 225–262.
- Gat, J.R., Airey, P.L., 2006. Stable water isotopes in the atmosphere/biosphere/lithosphere interface: scaling-up from the local to continental scale, under humid and dry conditions. **Global Planet. Chang.** **51**, 25–33.
- Goblot, H. Les qanats une technique d'acquisition de l'eau [**Qanats: a technique for acquiring water**]. Paris. Mouton. ISBN 2-7193-0459-X, 1979, pp. 231.
- Gonfiantini, R., 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. **Nature** **271**, 534–536.

- Hofman, A. Traditional water management by qanat in Iran is compatible with the concept of IWRM. Technical synthesis Engref center of Montpellier. 2007, 17 p.
- Hanor, J.S., 1987. Origin and migration of subsurface sedimentary brines. Soc. of Economic Pal. and Min (SEPM), USA. Short course No. 21, 247 p.
- Herczeg, A.L., Leaney, F.W.J., Stadler, M.F., Allan, G.L., Fifield, L.K., 1997. Chemical and isotopic indicators of point-source recharge to a karst aquifer, South Australia. **J. Hydrol.** **192**, 271–299.
- Iwatsuki, T., 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.
- Jakada, H.; Chen, Z.; Luo, M.; Zhou, H.; Wang, Z.; Habib, M. Water characterization and hydrograph recession analysis: a comparative look at a karst vs. non-karst watershed and implications for groundwater resources in Gaolan River basin, sothern China. **Water** **2019**, **11**, 743.
- Jomehpour, M. Qanat irrigation systems as important and ingenious agricultural heritage: case study of the qanats of Kashan, Iran. **International Journal of Environmental Studies**. **2009**, **66**(3), 297 - 315.
- Kandu, T., Mori, N., Kocman, D., Stibilj, V., Grassa, F., 2012. Hydrogeochemistry of Alpinesprings from North Slovenia: insights from stable isotopes. **Chem. Geol.** **300–301**, 40–54.
- Karami, G.H. Increase the efficiency of Qanats in the mountain valleys of arid regions. In: Proceeding of Int. Symposium on Efficient groundwater. 2008, Bangkok, Thailand, pp. 191-195.
- Kendall, C., McDonnell, J.J., 1998. Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier, Amsterdam.
- Kohfahl, C., Sprenger, C., Benavente, J.B.H., Meyer, H., Fernández Chacón, F., Pekdeger, A., 2008. Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in semiarid and karstic environments: a field study in the Granada Basin (Southern Spain). **Appl. Geochem.** **23**, 846–862.
- Ladouche, B., Luc, A., Dörfliker, 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.
- Lee, E.S., Krothe, N.C., 2001. A four-component mixing model for water in karst terrain in south-central Indiana, USA, using solute concentration and stable isotopes as tracers. **Chem. Geol.** **179**, 129–143.
- Lee, J.; Jung, C.; Kim, S.; Kim, S. Assessment of climate change impact on future groundwater-level behavior using SWAT, groundwater-consumption function in Geum River basin of South korea. **Water** **2019**, **11**, 949.
- Lightfoot, D. Syrian Qanat Romani: history, ecology, abandonment **J. of Arid Environment**. **1995**, Volume 321- 336.
- Lightfoot, D. Traditional irrigation and progressive desiccation. **Geoforum**. **1996**, Volume 27, No. 2, pp 261- 273.
- Liotta, M., Grassa, F., D'Alessandro, W., Favara, R., Gagliano Candela, E., Pisciotta, A., Scaletta, C., 2013. Isotopic composition of precipitation and groundwater in Sicily, Italy. **Appl. Geochem.** **34**, 199–206.
- Ma, R., Wang, Y., Sun, Z., Zheng, C., Ma, T., Prommer, H., 2011. Geochemical evolution of groundwater in carbonate aquifers in Taiyuan, Northern China. **Appl. Geochem.** **26**(5), 884–897.

- Meyback, M., 1987, Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved load, **American Journal of Science**, Vol. 287, pp. 401-428.
- Mazor, E., 1991. Applied Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology. Halsted Press, New York (274 pp.).
- Moral, F., Cruz-Sanjulián, J.J., Olias, M., 2008. Geochemical evolution of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera, southern Spain). **J. Hydrol.** 360, 281–296.
- Paternoster, M., Liotta, M., Favara, R., 2008. Stable isotope ratios in meteoric recharge and groundwater at Mt. Vulture volcano, southern Italy. **J. Hydrol.** 348, 87–97.
- Plummer, L.N., Busby, J.F., Lee, R.W., Hanshaw, B.B., 1990. Geochemical modeling of the Madison aquifer in parts of Montana, Wyoming and South Dakota. **Water Resour. Res.** 26 (9), 1981–2014.
- Pu, T., He, Y., Zhang, T., Wu, J., Zhu, G., 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.
- Remini, B.; Kechad, R.; Achour, B. The Collecting of Groundwater by the Qanats: a Millennium Technique Decaying. **Larhyss journal**, 2014, 259-277.
- Rogers, R.J., 1989, Geochemical comparison of groundwater in areas of New England, New York and Pennsylvania, **Groundwater**, Vol. 27, pp. 690-712.
- Salih, A. Qanats a Unique Groundwater Management Tool in Arid Regions: The Case of Bam Region in Iran. International Symposium on Groundwater Sustainability (ISGWAS). 2006, Alicante, Spain
- 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.
- Saunders, J.A., Toran, L.E., 1994. Evidence for dedolomitization and mixing in Paleozoic carbonates near Oak Ridge, Tennessee. **Ground Water** 32 (2), 207–214.
- Sikdar, P., Sarkar, S., and Palchoudhary, S., 2001. Geochemical evolution of groundwater in the Quaternary aquifer of Calcutta and Howrah, India. **Journal of Asian Earth Sciences**, 19, 579-594.
- Taghavi Jeloudar, M.; Han, M.; Davoudi, M.; Kim, M. Review of Ancient Wisdom of Qanat and Suggestions for Future Water Management. **Environmental Engineering Research**. 2013, 18.2:57-63.
- Todd, D.K.; Mays, L.W. Groundwater Hydrology. Third Edition, John Wiley and Sons, New York. 2005, 625p.
- 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.
- 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.
- Wu, P., Tang, C., Zhu, L., Lui, C., Cha, X., Tao, X., 2009. Hydrogeochemical characteristics of surface water and groundwater in the karst basin, southwest China. **Hydrol. Process.** 23, 2012–2022.



## **Abstract**

Gonabad area is an arid and semi-arid region is situated in the south of Razavi Khorasan province. Qanats or Karizs are the most important method for the exploitation of groundwater in this area. In Gonabad Plain, 19.5 million cubic meters of groundwater is annually extracted from 26 branches of qanat whose discharge rates vary from 10 to 120 lit/s. Qanats supplies irrigation and drinking water in the area, therefore it is necessary to determine the catchment area, water budget calculation in catchment area, discharge decrease trend, effect of groundwater drawdown on discharge decrease and recharge origin and mechanism of the qanats. In order to determine these parameters, in this research hydrogeological, hydrogeochemical and isotopic characteristics of the groundwater of qanats were done. The total catchment area of Gonabad Plain Qanats was determined which its surface area is 1032 km<sup>2</sup>. Water budget calculation in the catchment area shows that 3.7 MCM of groundwater more than catchment recharge and from aquifer storage was extracted annually which led to 0.06 meter per year groundwater level drawdown in catchment aquifer and decrease in qanats water bearing zone. Variations in effective precipitation (dialy precipitation more than 20 mm) of catchment altitudes along changes in discharge of qanats were perused. Annual discharge decrease rate of qanats was calculated 0.17 to 1.17 liter per second per year. The annual discharge decrease rate of Rahn Qanat is the most. The recharge of this qanat takes place through carbonate formations (Jamal and Shotori Formations). Thus, the groundwater type of this qanat is carbonate leading to the intensive precipitation of carbonate compounds in the qanat's tunnel. Hence, due to the lack of dredging for several years the discharge of the qanat has dropped sharply. The least annual discharge decrease rate calculated in Dizagh Qanat. High specific yield of aquifer in the qanat water bearing zone, chemical composition of qanat water, absence of well in the qanat catchment and qanat recharge through groundwater infiltration in tunnels of upstream qanats have caused this qanat not to have high discharge decrease. Discharge increase of qanats due to the increase in effective precipitation amount was estimated 4 to 15 percent. Discharge changes among studied qanats due to groundwater drawdown in the Gonabad Plain, is not the same, and due to one meter groundwater level drawdown in Gonabad Plain, discharge decrease of qanats estimated 3 to 14 liter per second. With the current groundwater drawdown in Gonabad Plain, qanats will perish during 10 to 180 next years.

The electrical conductivity of the groundwater of these qanats varies from 750 to 3900  $\mu\text{moh/cm}$ . The dominant water types of these qanats are  $\text{Na}^+\text{-Mg}^{+2}\text{-HCO}_3^-$  and  $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ . Neogene deposits (evaporates and marl) are deteriorating the water quality in the east and the electrical conductivity of groundwater of these qanats increased from west to the east in Gonabad Plain. Due to the direct cation exchange, the amount of calcium and magnesium deficit in the samples is proportional to their excess sodium. The dominant hydrochemical processes in the groundwater of the aquifer of qanats are silicate weathering such as sodium plagioclases and biotite, carbonate and evaporate dissolution, dedolomitization and normal cation exchange. The groundwater of qanats is saturated with respect to calcite and dolomite and undersaturated with respect to halite and gypsum. The  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  isotopes signatures of qanats in wet season and catchment precipitation 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 the precipitation of the altitudes 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. There are direct relationship between isotopic content of the groundwater of qanats and their length, mother well depth, and distance between mother well and altitudes.

**Keywords:** hydrograph, cation exchange, saturation index, water origin, flow mechanism



Shahrood University of  
Technology

Faculty of Earth Sciences

Ph.D. Thesis in Hydrogeology

**Assessment of Hydrogeology,  
Hydrogeochemistry and Isotopic  
characteristics of major Qanats of  
Gonabad plain, South of Khorasan  
Razavi Province**

By: Hojat Mirani Moghadam Bahabadi

Supervisors:

Dr Gholamhossein Karami

Dr Rahim Bagheri

February 2020