

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده علوم زمین

رساله دکتری هیدروژئولوژی

عنوان:

تأثیر مقیاس در مشخصه‌سازی سیستم جریان در کارست: مطالعه موردی

آهک‌های جهرم-آسماری در جناح راست ساختگاه سد بهشت آباد

دانشجو:

حسین عابدیان

استاد راهنما:

دکتر غلامحسین کرمی

استاد مشاور:

دکتر حاجی کریمی

تیر ماه ۱۳۹۸

تقدیم ہے:

ہمراہ تصویر زندگی ہم سر

سایکوزاری

سپاس خدای بزرگ را که مرا یاری رساند تا بتوانم این مطلع تحصیلی را به پایان رسانده و کامی در راستای اعتلای علم بردارم.  
از استاد راهنمای کراتقدم جناب آقای دکتر خلاصین گرمی که وجودشان همیشه قوتی برای انجام کارهایم بوده است و بدون شک  
انجام این پایان نامه بدون کمک و راهنمایی های ارزنده ایشان امکان پذیر نبوده است، کمال تشکر را دارم.  
از استاد گرامی جناب آقای دکتر حاجی گرمی که مشاوره رساله اینجانب را همواره در بوفند و در سیه توجهات ایشان و راهنمایی های  
سودمندشان توانستم کامی در جهت کسب علم و دانش بردارم کمال تشکر را دارم.  
از سایر اساتید بزرگوار جناب آقایان دکتر حسینی، دکتر باقری و دکتر کاظمی که شاکردی محضرشان از بزرگترین افتخارات زندگی  
علمی ام می باشد کمال تشکر را دارم.

از جناب آقای مهندس آقای مدیر عامل شرکت مهندسین مشاور زانید آب و جناب آقای مهندس خیرالهی مدیر پروژه سد  
بهشت آباد که بستر لازم را برای انجام این مطالعات فراهم کردند صمیمانه تشکر و قدردانی می کنم.  
از همه دوستان و همکلاسی های گرامی که ایام خوشی را در کنار هم سپری کردیم و مراد رسیدن به اهدافم یاری نمودند صمیمانه تقدیر می کنم.  
در پایان از مهمانترین همکاران زندگیم پدر و مادر فدای کارم، همسر عزیزم و دختر و پسر نازنینم به خاطر بخاری ها و دگر می هایشان تشکر می کنم.

حسین حادیان

تیرماه ۱۳۹۸

## برگ اصالت و مالکیت اثر

اینجناب حسین عابدیان دانشجوی دوره دکترا رشته زمین‌شناسی - هیدروژئولوژی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تاثیر مقیاس در مشخصه سازی سیستم جریان در کارست: مطالعه موردی آهکهای جهرم آسماری در جناح راست ساختگاه سد بهشت آباد تحت راهنمایی آقای دکتر غلامحسین کرمی متعهد می‌شوم.

\* تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجناب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.

\* در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.

\* مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.

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

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

دانشجو

تاریخ: ۱۳۹۸/۷/۶

### مالکیت نتایج و حق نشر

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



فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)  
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای حسین عابدیان دانشجوی دکتری رشته آشناسی به شماره دانشجویی ۹۲۴۶۱۲۵ ورودی بهمن ماه سال ۱۳۹۲ در تاریخ ۹۸/۴/۲۶ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: تاثیر مقیاس در مشخصه سازی سیستم جریان در کارست: مطالعه موردی آهک های جهرم- آسماری در جناح راست ساختمان سد بهشت آباد و با اخذ نمره ۱۹/۲۰ به درجه : ..... 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	مرتبه علمی	امضاء
۱	استاد راهنما	دکتر غلامحسین کرمی	دانشیار	
	استاد مشاور	دکتر حاجی کریمی	استاد	
۲	استاد داور داخلی	دکتر هادی جعفری	استادیار	
۳	استاد داور داخلی	دکتر رحیم باقری	استادیار	
۴	استاد داور خارجی	دکتر حمید رضا ناصری	استاد	
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 حسین عابدیان بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: پرویز امیدی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۹۸-۷-۶



## چکیده

سازندهای آهکی از لحاظ مورفولوژی معمولاً دره‌هایی با شکل مناسب برای احداث سدها ایجاد می‌کند. ولی معمولاً احداث سد بر روی این سازندها باعث نشت از مخزن سد به سمت پایین دست و یا حوضه‌های مجاور می‌شود. مقدار نشت از مخزن و تکیه‌گاه‌های سدها در بسیاری از موارد به طور نسبی زیاد می‌باشد به همین دلیل بررسی دقیق مقدار نشت بسیار ضروری است. سد بهشت‌آباد در مرحله مطالعات قرار دارد و تقریباً در انتهای محور تاقدیسی به نام سنگویل از جنس دولومیت - آهکی با ضخامت حدود ۷۰۰ متر واقع شده است. جناح راست مخزن عمدتاً به طور مستقیم با این واحد کارستی در تماس می‌باشد. برای تعیین اثر مقیاس بر میزان هدایت هیدرولیکی و نشت از مخزن سد ابتدا مطالعات هیدروژئولوژی کارست انجام شد که شامل اندازه‌گیری سطح آب و هیدروشیمی گمانه‌ها، اندازه‌گیری دبی و هیدروشیمی چشمه‌ها و مطالعات ایزوتوپهای محیطی می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان داد که سطح آب زیرزمینی در جناح راست مخزن دارای نوسانات بسیار مشابه با اختلاف حداقل و حداکثر ۲/۵ تا ۳ متر است. سطح آب از یال شمالی تاقدیس با تراز حدود ۱۶۲۵ به سمت چشمه‌ها در یال جنوبی با تراز حدود ۱۵۹۵ و با شیب حدود ۷ در هزار کاهش می‌یابد. تخلیه از چشمه‌ها در یال جنوبی نیز با نوسانات مشابه دارای سه ضریب فرود است ضریب فرود  $\alpha_1$  در مرتبه  $10^{-2}$  نشان دهنده جریان حدواسط (افشان - مجرای) با سهم ۱۵ در صد از جریان و ضرائب  $\alpha_2$  و  $\alpha_3$  در مرتبه  $10^{-3}$  نمایانگر جریان افشان با سهم حدود ۸۵ درصد جریان آبخوان می‌باشند. پارامترهای هیدروشیمی و ایزوتوپی چشمه‌ها و گمانه‌ها نیز دارای نوسانات کم است. این تغییرات برای آنیونها و کاتیونها کمتر از ۲۰ درصد و برای هدایت الکتریکی و اسیدیته کمتر از ۵ درصد است. میزان ایزوتوپهای محیطی در چشمه‌ها و گمانه‌ها نیز تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهد به طوری که انحراف معیار کمتر از ۱/۲ پرمیل برای  $\delta D$  و کمتر از ۰/۲ پرمیل برای  $\delta^{18}O$  از اطلاعات برداشت ماهیانه حاصل گردید. همچنین میزان ایزوتوپهای محیطی ارتفاع تغذیه چشمه‌ها در یال جنوبی در پایین دست محور را حدود ۲۳۰۰ متر و از بارشهای پر حجم و برف دو یال نشان می‌دهد. در نهایت، تلفیق بررسی‌های انجام شده بیانگر وجود کارست با نوع جریان حدواسط (افشان - مجرای) تا افشان می‌باشد که با این نوع جریان در زمان آبگیری، نشت از مخزن به یال شمالی و از آنجا به یال جنوبی انتقال و از چشمه‌های پایین دست محور در یال جنوبی تاقدیس تخلیه می‌گردد. پس از انجام مطالعات هیدروژئولوژی سازند جهرم - آسماری و مشخص شدن ارتباط هیدرولیکی مخزن با پایین دست محور سد و چشمه‌ها، تاثیر مقیاس بر میزان هدایت هیدرولیکی و نشت از مخزن سد بررسی گردید. در این

راستا روش‌های مختلفی برای برآورد تاثیر مقیاس بر مقدار هدایت هیدرولیکی و بر میزان نشت مورد استفاده قرار گرفت. این روش‌ها شامل آزمایش‌های لوژن، اسلاگ، قانون دارسی، منحنی فرود چشمه، ردیابی رنگی و استفاده از دبی چشمه و سطح آب گمانه مجاور با فرضیات چاه پمپاژ می‌باشد. بررسی‌های انجام شده بر اساس روش‌های مختلف نشان دهنده طیفی از مقادیر هدایت هیدرولیکی معادل توده کربناته بین  $10^{-6} \times 1/1$  متر بر ثانیه در مقیاس کوچک (Sub-local scale) تا  $10^{-4} \times 1/7$  متر بر ثانیه در مقیاس ناحیه‌ای (Regional scale) است. به این ترتیب مقدار نشت در هر متر از مخزن از حدود  $0/04$  لیتر بر ثانیه در شرایط مقیاس کوچک تا  $2/7$  لیتر بر ثانیه در مقیاس ناحیه‌ای محاسبه شده است. بر اساس نتایج مطالعات توصیه می‌گردد از روش‌های مقیاس ناحیه‌ای برای بررسی نشت این سد بهره گرفته شود که با در نظر گرفتن سطح مقطع تماس آهک با مخزن در حالت بدون ایجاد پرده تزریق، مقدار نشت حدود  $5/4$  تا  $7/8$  متر مکعب بر ثانیه پیش‌بینی می‌شود. در نهایت، می‌توان این چنین اظهار نظر نمود که اثر مقیاس یکی از مهمترین فاکتورها در محیط‌های کارستی برای آب‌بندی مخزن می‌باشد که در مرحله انتخاب محور سد باید در نظر گرفته شود. این اثر باعث می‌گردد در یک گستره کربناته کارستی در موقعیت‌های مختلف نشت‌های متفاوت رخ دهد. به همین خاطر باید تا حد امکان محورهایی انتخاب گردد که مخزن سد به صورت ناحیه‌ای در تماس با شبکه کارستی نباشد.

**کلمات کلیدی:** کارست، اثر مقیاس، نشت، سد، هدایت هیدرولیکی



## مقالات استخراج شده از پایان نامه:

1. Abedian H. Karami G. Karimi H. 2019 The effect of scale on the water leakage from the reservoir and abutment of Beheshtabad dam, Bulletin of engineering geology and environment, pp 1-13, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-019-01487-1>
۲. عابدیان ح. کرمی غ. کریمی ح. ۱۳۹۷ بررسی اثر مقیاس در برآورد نشت آب از مخزن و تکیه گاه سد بهشت آباد، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، دانشگاه اهواز
۳. عابدیان ح. کرمی غ. کریمی ح. ۱۳۹۷ ارزیابی پتانسیل نشت از جناح راست سد بهشت آباد با استفاده از مطالعات هیدروژئولوژی، مجله پژوهش آب ایران، دانشگاه شهرکرد
۴. عابدیان ح. کرمی غ. کریمی ح. ۱۳۹۷ بررسی عدم قطعیت ناشی از اثر مقیاس در تعیین میزان هدایت هیدرولیکی گستره های کارستی، اولین همایش بین المللی زیست شناسی و علوم زمین
۵. عابدیان ح. کرمی غ. کریمی ح. ۱۳۹۷ تعیین پارامترهای مدل نشت از مخزن سدها در مناطق کارستی با استفاده از تحلیل هیدروگراف چشمه، نخستین کنفرانس ملی علوم زمین، آب و هوا و تغییرات اقلیم
۶. عابدیان ح. کرمی غ. کریمی ح. ۱۳۹۷ بهینه یابی جهت، عمق و طول پرده آببند در سدها با استفاده از مدل تفاضل محدود، پنجمین همایش سد و تونل ایران

## فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- بیان مساله.....	۱
۲-۱- اهداف تحقیق.....	۲
۳-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.....	۲
۴-۱- مشخصات کلی سد بهشت آباد.....	۴
۵-۱- زمین شناسی محدوده مورد مطالعه.....	۴
۱-۵-۱- ژئومورفولوژی منطقه.....	۵
۲-۵-۱- چینه‌شناسی.....	۷
۱-۲-۵-۱- سازند جهرم-آسماری.....	۷
۲-۲-۵-۱- سازند رازک.....	۱۰
۳-۲-۵-۱- سازند بختیاری.....	۱۱
۴-۲-۵-۱- نهشته‌های کواترنر.....	۱۱
۳-۵-۱- زمین شناسی ساختمانی.....	۱۲
۱-۳-۵-۱- گسل‌ها.....	۱۲
۲-۳-۵-۱- چین‌ها.....	۱۳
۳-۳-۵-۱- درزه و شکستگی‌ها.....	۱۳
۶-۱- هواشناسی.....	۱۴
۷-۱- هیدرولوژی.....	۱۸
۱-۷-۱- مساحت و محیط حوضه.....	۱۹
۲-۷-۱- آبدهی درساختگاه سد.....	۲۰

۲۲ ..... ۳-۷-۱- برآورد سیل در ساختگاه سد

۲۲ ..... ۸-۱- ساختار پایان نامه

## فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین..... ۲۵

۲۵ ..... ۱-۲- جریان در کارست

۲۶ ..... ۲-۲- نوع جریان در سیستم‌های کارستی

۳۰ ..... ۳-۲- نشت از سدهای کارستی

۳۲ ..... ۴-۲- اثر مقیاس در محیط‌های کارستی و غیرکارستی

## فصل سوم: روش انجام کار..... ۳۷

۳۷ ..... ۱-۳- جمع آوری آمار و اطلاعات و مطالعات انجام شده در ساختگاه سد بهشت‌آباد

۳۹ ..... ۲-۳- تحلیل نوسانات سطح آب گمانه‌ها

۳۹ ..... ۳-۳- تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌ها و نوع جریان آبخوان

۴۲ ..... ۴-۳- بررسی هیدروشیمی گمانه‌ها، چشمه‌ها و رودخانه

۴۳ ..... ۵-۳- مطالعات ایزوتوپی منابع آب محدوده

۴۸ ..... ۶-۳- تحلیل شرایط هیدروژئولوژی کارست محدوده

۴۸ ..... ۷-۳- بررسی اثر مقیاس در آهکهای جهرم-آسماری

۴۹ ..... ۸-۳- بررسی اثر مقیاس در برآورد میزان نشت

## فصل چهارم: هیدروژئولوژی محدوده سد..... ۵۱

۵۱ ..... ۱-۴- هیدروژئولوژی کارست سازند جهرم-آسماری

۵۴ ..... ۱-۱-۴- دبی چشمه‌های خدرزننده و SPL

۵۵ ..... ۲-۱-۴- بررسی هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های پایین دست محور سد

- ۴-۱-۳- حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی پایین دست محور..... ۵۸
- ۴-۱-۴- سطح آب زیرزمینی و جهت جریان عمومی آبخوان..... ۶۰
- ۴-۲- تغییرات هیدروشیمی گمانه‌ها، چشمه‌ها و رودخانه محدوده ..... ۶۴
- ۴-۳- مطالعات ایزوتوپی منابع آب محدوده ..... ۷۰
- ۴-۳-۱- تعیین خط بارش محلی محدوده مورد مطالعه..... ۷۰
- ۴-۳-۲- ترکیب ایزوتوپی رودخانه، گمانه‌ها و چشمه..... ۷۴
- ۴-۳-۳- موازنه جرمی ترکیب ایزوتوپی منابع آب محدوده..... ۷۹
- ۴-۳-۴- تحلیل مطالعات ایزوتوپی..... ۸۰
- ۴-۴- تحلیل شرایط هیدروژئولوژی کارست جناح راست ..... ۸۲
- فصل پنجم: تاثیر مقیاس بر آهکهای جهرم-آسماری در جناح راست مخزن سد..... ۸۵**
- ۵-۱-۱- اثر مقیاس بر میزان هدایت هیدرولیکی سازند جهرم-آسماری..... ۸۵
- ۵-۱-۱-۱- انجام و تحلیل آزمایش‌ها در مقیاس کوچک..... ۸۷
- ۵-۱-۱-۱-۱- آزمایش های لوژن..... ۸۷
- ۵-۱-۱-۲- آزمایش اسلاگ..... ۹۰
- ۵-۱-۲- انجام و تحلیل آزمایش‌ها در مقیاس محلی..... ۹۳
- ۵-۱-۳- انجام و تحلیل آزمایش‌ها در مقیاس ناحیه‌ای..... ۹۶
- ۵-۱-۳-۱- استفاده از تخمین گرادیان یا روش داریسی..... ۹۷
- ۵-۱-۳-۲- استفاده از آنالیز منحنی فرود چشمه..... ۹۸
- ۵-۱-۳-۳- استفاده از آزمون ردیابی..... ۱۰۱
- ۵-۲- تحلیل اثر مقیاس در گستره آهکهای جهرم-آسماری..... ۱۱۵
- ۵-۳- برآورد میزان نشت از مخزن در مقیاس‌های مختلف..... ۱۱۶
- ۵-۳-۱- برآورد نشت از مخزن در مقیاس کوچک..... ۱۱۷

۱۱۷.....۵-۳-۲- برآورد نشت از مخزن در مقیاس محلی.....

۱۱۸.....۵-۳-۳- برآورد نشت از مخزن در مقیاس ناحیه‌ای.....

۱۱۸.....۵-۳-۴- تحلیل اثر مقیاس بر میزان نشت.....

## فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات..... ۱۲۳

۱۲۳.....۶-۱- نتایج حاصل از مطالعات هیدروژئولوژی آهکهای کارستی محدوده سد.....

۱۲۵.....۶-۲- نتایج حاصل از اثر مقیاس در کارست آهکهای چهارم-آسماری.....

۱۲۷.....۶-۳- تاثیر مقیاس در میزان نشت از مخزن سدها.....

۱۳۰.....۶-۴- پیشنهادات.....

۱۳۱..... منابع مورد استفاده.....

## فهرست شکل‌ها

### فصل اول:

- شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه ..... ۳
- شکل ۱-۲- وضعیت قرارگیری محور و مخزن سد نسبت به آهک‌های تاقدیس سنگویل ..... ۶
- شکل ۱-۳- زمین شناسی محدوده ساختگاه و مخزن سد بهشت‌آباد ..... ۸
- شکل ۱-۴- پروفیل زمین شناسی محدوده مخزن به سمت پایین دست در جناح راست ..... ۹
- شکل ۱-۵- رخنمون سازند جهرم-آسماری در محدوده ساختگاه سد بهشت‌آباد ..... ۱۰
- شکل ۱-۶- رخنمون سازند رازک و سازند بختیاری در یال جنوبی تاقدیس ..... ۱۱
- شکل ۱-۷- نمودار گلسرخی درز و شکستگی‌های غالب تاقدیس سنگویل ..... ۱۴
- شکل ۱-۸- میزان بارندگی، تبخیر و دما بر اساس ایستگاه سینوپتیک اردل ..... ۱۶
- شکل ۱-۹- نمودار آمبروترمیک محدوده بر اساس میانگین بلند مدت دمای هوا و بارندگی ..... ۱۷
- شکل ۱-۱۰- نقشه هیدروگرافی حوضه آبرگیر سد بهشت‌آباد ..... ۲۱

### فصل دوم:

- شکل ۲-۱- مدل مفهومی از یک سیستم کارستی ..... ۲۶
- شکل ۲-۲- شماتیک آبخوان‌های کارستی با جریان افشان و مجرای ..... ۲۷
- شکل ۲-۳- تقسیم‌بندی نوع جریان و ارتباط آن با رژیم جریان ..... ۲۸
- شکل ۲-۴- تقسیم‌بندی آبخوان‌های کارستی بر اساس تغذیه، ذخیره و نوع جریان ..... ۲۹

- شکل ۲-۵- تاثیر دو گانه تغذیه و ذخیره در نوع جریان ..... ۳۰
- شکل ۲-۶- اثر مقیاس در میزان هدایت هیدرولیکی آبخوان کارستی ..... ۳۳
- شکل ۲-۷- ارتباط بین روش آزمایش، مقیاس آزمایش و هدایت هیدرولیکی آبخوان کارست ..... ۳۳
- شکل ۲-۸- اثر مقیاس بر میزان هدایت هیدرولیکی در آهکهای کارستی منطقه لوکایان ..... ۳۵

### فصل سوم:

- شکل ۳-۱- موقعیت گمانه های یال شمالی و جنوبی تاقدیس سنگویل ..... ۴۰
- شکل ۳-۲- اندازه گیری سطح آب گمانه ها در آهکهای جهرم - آسماری ..... ۴۱
- شکل ۳-۳- بستر سازی چشمه های پایین دست جهت اندازه گیری ..... ۴۱
- شکل ۳-۴- نحوه نمونه برداری هیدروشیمیایی از گمانه ها ..... ۴۲
- شکل ۳-۵- نحوه اندازه گیری پارامترهای صحرایی در گمانه های تاقدیس ..... ۴۳
- شکل ۳-۶- نحوه استتار نمونه گیر بارش در ارتفاعات ..... ۴۵
- شکل ۳-۷- نحوه برداشت نمونه های ایزوتوپی بارش ..... ۴۵
- شکل ۳-۸- نمونه گیری و برداشت پارامترهای صحرایی نمونه های بارش ..... ۴۶
- شکل ۳-۹- بسته بندی و ارسال نمونه ها به آزمایشگاه ..... ۴۶
- شکل ۳-۱۰- موقعیت محدوده های نمونه برداری ایزوتوپی ..... ۴۷

### فصل چهارم:

- شکل ۴-۱- کارنهای ایجاد شده در آهکهای سازند جهرم-آسماری ..... ۵۲

- شکل ۲-۴- چشمه خدرزنده در پایین دست محور و جناح راست ..... ۵۳
- شکل ۳-۴- چشمه  $SP_L$  مهمترین چشمه در جناح چپ و پایین دست محور ..... ۵۳
- شکل ۴-۴- هیدروگراف چشمه خدرزنده نسبت به تغییرات بارندگی ..... ۵۴
- شکل ۵-۴- هیدروگراف چشمه  $SP_L$  نسبت به تغییرات بارندگی ..... ۵۵
- شکل ۶-۴- ضرایب فرود چشمه خدرزنده در سال آبی (۹۶-۱۳۹۵) ..... ۵۷
- شکل ۷-۴- ضرایب فرود چشمه  $SP_L$  در سال آبی (۹۶-۱۳۹۵) ..... ۵۷
- شکل ۸-۴- میزان بارش در رخنمون تاقدیس آهکی در سال بیلان ..... ۵۹
- شکل ۹-۴- حوضه آبرگیر چشمه‌های پایین دست محور و یال جنوبی ..... ۵۹
- شکل ۱۰-۴- نوسانات سطح آب گمانه‌ها از آبان ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۶ ..... ۶۲
- شکل ۱۱-۴- همبستگی سطح آب گمانه‌ها در جناح راست مخزن نسبت به سطح آب گمانه ( $PR_2$ ) ..... ۶۲
- شکل ۱۲-۴- جهت جریان آب زیرزمینی به سمت چشمه‌های یال جنوبی تاقدیس ..... ۶۴
- شکل ۱۳-۴- هیدروگراف تغییرات دبی چشمه خدرزنده ( $SP_5$ ) نسبت به تغییرات هدایت الکتریکی ..... ۶۸
- شکل ۱۴-۴- هیدروگراف تغییرات دبی چشمه  $SP_L$  نسبت به تغییرات هدایت الکتریکی ..... ۶۸
- شکل ۱۵-۴- هیدروگراف تغییرات دبی چشمه خدرزنده ( $SP_5$ ) نسبت به تغییرات دما ..... ۶۹
- شکل ۱۶-۴- هیدروگراف تغییرات دبی چشمه  $SPL$  نسبت به تغییرات دما ..... ۶۹
- شکل ۱۷-۴- نمودار خط آب جوی محلی در محدوده مورد مطالعه ..... ۷۲
- شکل ۱۸-۴- نمودار تغییرات ایزوتوپی  $\delta^{18}O$  نسبت به ارتفاع در یک تک بارش ..... ۷۳
- شکل ۱۹-۴- نمودار تغییرات ایزوتوپی  $\delta D$  نسبت به ارتفاع در یک تک بارش ..... ۷۳



شکل ۴-۲۰- نمودار مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta\text{D}$  منابع آب زیرزمینی محدوده نسبت به خط آب جوی محلی..... ۷۸

شکل ۴-۲۱- مدل مفهومی تغییرات ایزوتوپ‌های طبیعی در طول تاقدیس ..... ۷۹

### فصل پنجم:

شکل ۵-۱- مقطع نماینده جریان (A-A') به سمت پایین دست مخزن ..... ۸۶

شکل ۵-۲- رفتارهای مختلف آزمایش لوژن در آهکهای جهرم-آسماری ..... ۸۸

شکل ۵-۳- فراوانی اعداد لوژن در آهکهای جهرم-آسماری ..... ۸۸

شکل ۵-۴- تغییر مقدار اعداد لوژن آهکهای جهرم-آسماری نسبت به عمق گمانه ..... ۸۹

شکل ۵-۵- مقدار هدایت هیدرولیکی در آزمایش اسلاگ الف: مقطع P1 ب:مقطع P2 ..... ۹۱

شکل ۵-۶- میزان هدایت هیدرولیکی در آزمایش اسلاگ الف: مقطع P3 ب: مقطع P4 ..... ۹۲

شکل ۵-۷- تغییرات دبی چشمه و سطح آب گمانه نزدیک چشمه ..... ۹۵

شکل ۵-۸- نمودار همبستگی بالای سطح آب گمانه و دبی چشمه ..... ۹۵

شکل ۵-۹- تغییرات سطح آب زیرزمینی و دبی چشمه خدرزنده از آبان ۱۳۹۵ تا آبان ۱۳۹۶ ..... ۹۷

شکل ۵-۱۰- خطوط ایزوپیز در آهکهای مشرف به چشمه خدرزنده ..... ۹۸

شکل ۵-۱۱- حوضه آبرگیر محاسبه شده برای چشمه‌های پایین دست محور ..... ۱۰۰

شکل ۵-۱۲- تزریق ردیاب در گمانه PR<sub>1</sub> در یال شمالی تاقدیس ..... ۱۰۴

شکل ۵-۱۳- نحوه نمونه‌برداری از گمانه‌ها ..... ۱۰۶

شکل ۵-۱۴- نحوه نمونه‌برداری از چشمه خدرزنده ..... ۱۰۶

شکل ۵-۱۵- آنالیز نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفلوریمتر مدل RF-1501 ..... ۱۰۷

- شکل ۵-۱۶- منحنی رنگ نمود (غلظت رنگ) مشاهده شده در چشمه خدرزنده ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۷- منحنی رنگ نمود (غلظت رنگ) مشاهده شده در گمانه PR2 ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۸- مسیر جریان ردیاب از یال شمالی به یال جنوبی ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۹- فراوانی نسبی سرعت‌های جریان از ردیابی در سطح جهان ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۲۰- اثر مقیاس در میزان هدایت هیدرولیکی دولومیت‌های آهکی سازند جهرم-آسماری ..... ۱۱۶
- شکل ۵-۲۱- مقدار نشت بر اساس هدایت هیدرولیکی در مقیاس کوچک ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۲۲- مقدار نشت بر اساس هدایت هیدرولیکی در مقیاس محلی ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۲۳- مقدار نشت بر اساس هدایت هیدرولیکی در مقیاس ناحیه‌ای ..... ۱۲۲

#### فصل ششم:

- شکل ۶-۱- جهت جریانهای آب زیرزمینی از رودخانه و یال شمالی به سمت یال جنوبی ..... ۱۲۵
- شکل ۶-۲- نمودار شماتیک از هدایت هیدرولیکی شبکه کارستی سازند جهرم-آسماری ..... ۱۲۷
- شکل ۶-۳- نمودار شماتیک از تماس مخزن با شبکه کارستی ..... ۱۲۹

## فهرست جدول‌ها

### فصل اول:

- جدول ۱-۱- مشخصات سد مخزنی بهشت‌آباد..... ۴
- جدول ۲-۱- مقادیر پارامترهای بلندمدت درجه حرارت، بارندگی و تبخیر ماهیانه..... ۱۵
- جدول ۳-۱- رده‌بندی اقلیمی دومارتن (به نقل از علیزاده ۱۳۹۰)..... ۱۷
- جدول ۴-۱- مقادیر سیل در نقاط مورد نظر در دوره بازگشتهای مختلف..... ۲۲
- جدول ۱-۴- مشخصات و مختصات گمانه‌های تاق‌دیس جهرم-آسماری (مهر ۱۳۹۵)..... ۶۱

### فصل چهارم:

- جدول ۲-۴- میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات پارامترهای فیزی‌کوشیمیایی چشمه‌ها و رودخانه..... ۶۶
- جدول ۳-۴- میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات پارامترهای فیزی‌کوشیمیایی گمانه‌ها..... ۶۷
- جدول ۴-۴- موقعیت و مقادیر ایزوتوپهای برداشت شده از بارش..... ۷۱
- جدول ۵-۴- موقعیت و مقادیر ترکیب ایزوتوپی آب رودخانه..... ۷۴
- جدول ۶-۴- موقعیت و مقادیر ترکیب ایزوتوپی آب چشمه خدرزنده..... ۷۶
- جدول ۷-۴- موقعیت و مقادیر ترکیب ایزوتوپی آب گمانه‌ها..... ۷۷

### فصل پنجم:

- جدول ۱-۵- ضرایب هیدرودینامیک سازند جهرم-آسماری..... ۹۶

- جدول ۵-۲- میزان هدایت هیدرولیکی بر اساس منحنی فرود چشمه ..... ۱۰۱
- جدول ۵-۳- حد سرعت بین جریان افشان و مجرای ..... ۱۱۱
- جدول ۵-۴- مقادیر سرعت بدست آمده در یال جنوبی تاقدیس سنگویل ..... ۱۱۴
- جدول ۵-۵- میزان هدایت هیدرولیکی محاسبه شده با استفاده از روشهای مختلف ..... ۱۱۵

## ۱- فصل اول: مقدمه

در این فصل، ابتدا بیان مساله و اهداف تحقیق ارائه می‌شود و سپس مختصری درباره موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، مشخصات کلی طرح سد بهشت‌آباد، زمین‌شناسی، هواشناسی و هیدرولوژی محدوده مورد نظر ارائه خواهد شد.

### ۱-۱- بیان مساله

پارامترهای هیدروژئولوژیک سیستم‌های جریان در سنگهای کارستی و غیر کارستی معمولاً با تغییر اثر مقیاس تغییر می‌کند. دامنه تغییر اثر مقیاس در سنگهای همسو و همگن کمتر از سنگهای ناهمسو و غیرهمگن می‌باشد. در محیطهای کارستی نیز به دلیل ناهمگنی و ناهمسویی جریان به صورت یک طیف از یک محیط کاملاً افشان تا یک محیط کاملاً مجرای وجود دارد. به همین دلیل پارامترهای هیدروژئولوژیک نیز در یک محیط کارستی می‌تواند در مقیاسهای مختلف دارای دامنه نوسانات زیادی باشد. به طوری که هر مقیاس، شرایط ناپیوستگی‌های آن مقیاس را در دل خود بیان می‌کند. در مقیاس آزمایشگاهی پارامترهای هیدروژئولوژیک متاثر از مشخصات ماتریکس سنگ، در مقیاس کوچک به طور عمده تابع مشخصات درز و شکستگی‌ها کوچک، در مقیاس محلی تابع مشخصات درز و شکستگی‌ها و مجاری جریان کارستی محلی و در مقیاس ناحیه‌ای تابع مشخصات معادل همه ناپیوستگی‌ها اعم از درزو شکستگی مجاری کوچک و بزرگ می‌باشد. با توجه به اینکه آهک‌های کارستی به طور معمول ناهمسو و ناهمگن می‌باشد و ناهمگنی آبخوان‌های کارستی معمولاً با هدایت

هیدرولیکی مشخص می‌گردد، در این راستا هدایت هیدرولیکی با روشهای مختلف در سه مقیاس کوچک، محلی و ناحیه‌ای در آهکهای کارستی جناح راست مخزن سد بهشت‌آباد آزمایش گردید. در نهایت اثر مقیاس در آهکهای جهرم-آسماری محاسبه و تاثیر آن بر میزان نشت از مخزن برآورد گردید.

### ۱-۲- اهداف تحقیق

آهکهای جهرم-آسماری در جناح راست مخزن سد بهشت‌آباد دارای پدیده مورفولوژیکی پیشرفته همچون پولیه، دولین، گودیهای مسدود و ... نمی‌باشند ولی وجود چشمه‌های کارستی در پایین دست ساختگاه که بزرگترین آنها با دبی متوسط حدود ۴۳۵ لیتر بر ثانیه (مجموع چشمه‌ها حدود ۷۰۰ لیتر بر ثانیه) و در پایین دست ساختگاه قرار دارد، نگرانی ارتباط هیدرولیکی مخزن با چشمه‌های پایین دست را ایجاد کرده است. در این شرایط تعیین صحیح نوع جریان و پارامترهای هیدروژئولوژیک کارست می‌تواند در تعیین جهت و راستای پرده تزریق، تحلیل نشت و حتی موقعیت صحیح قرارگیری محور دارای اهمیت بسزایی باشد. هدف از این مطالعات در مرحله اول ارزیابی اثر مقیاس در میزان هدایت هیدرولیکی دولومیت‌های آهکی جناح راست مخزن سد بهشت‌آباد و در مرحله بعد تعیین میزان این عدم قطعیت در مقدار نشت آب از مخزن و تکیه‌گاه سد می‌باشد.

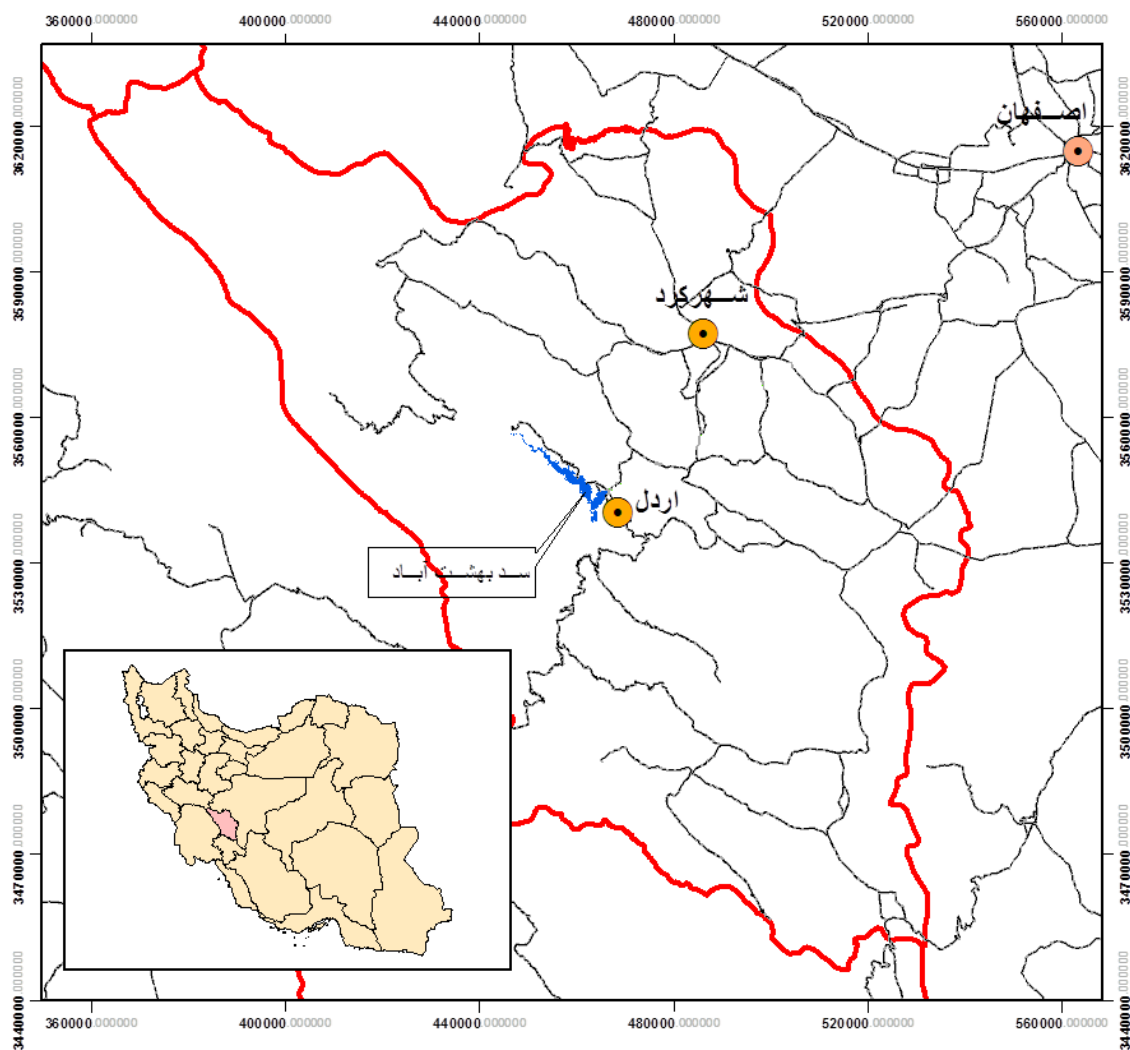
### ۱-۳- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

ساختگاه سد بهشت‌آباد در ۱۵۰۰ متری غرب روستای شیخ محمود و در فاصله حدود ۲۷۰۰ متر از محل تلاقی دو رودخانه کوه‌رنگ و بهشت‌آباد، روی رودخانه بهشت‌آباد واقع است (شکل ۱-۱).

مساحت حوضه‌آبگیر رودخانه بهشت‌آباد در محل تلاقی با رودخانه کوه‌رنگ برابر با ۵۱۰۹ کیلومتر مربع است، که به دو حوضه‌آبگیر بهشت‌آباد و کوه‌رنگ تقسیم می‌گردد. حوضه‌آبگیر بهشت‌آباد با

مساحت حدود ۳۸۷۸ کیلومترمربع واقع در شمال حوضه مطالعاتی و بخش بزرگی از دشتهای مورد مطالعه در منطقه را در بر می گیرد. از زیر حوضه های این حوضه می توان به حوضه آبرگیر رودخانه های کیار، جهان بین و جونقان اشاره نمود.

اصلی ترین راه دسترسی به محدوده مورد مطالعه مسیر اصفهان - زرین شهر - شهرکرد - خراچی و اردل می باشد.



شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

#### ۴-۱- مشخصات کلی سد بهشت آباد

سد بهشت آباد یک سد بتنی دوقوسی با حجم مخزن کل ۱۸۰۰ میلیون متر مکعب و حجم مفید ۱۳۰۰ میلیون متر مکعب می باشد. این سد در مرحله مطالعات مرحله دوم و هدف اصلی از ایجاد آن تامین آب شرب فلات مرکزی ایران در نظر گرفته شده است. ارتفاع سد ۱۸۴ متر، طول تاج ۴۵۶ متر، عرض تاج ۶ متر و عرض پی ۴۰ متر می باشد. مشخصات کلی این سد در جدول (۱-۱) ارائه شده است.

جدول ۱-۱- مشخصات سد مخزنی بهشت آباد

مشخصه	مقدار
حجم کل مخزن	۱۸۰۰ میلیون متر مکعب
حجم مفید مخزن	۱۳۰۰ میلیون متر مکعب
رقوم کف رودخانه	۱۶۰۸ متر از سطح دریا
رقوم نرمال	۱۷۸۵ متر از سطح دریا
ارتفاع سد	۱۸۴ متر
طول تاج	۴۵۶ متر
عرض تاج	۶ متر
عرض پی	۴۰ متر

#### ۵-۱- زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

گستره مورد مطالعه از دیدگاه زمین شناسی ناحیه ای و از نظر واحدهای ساختمانی - رسوبی ایران، در زون زاگرس بلند (رورانده) واقع گردیده است (Stoklin:1968). این زون به شدت خرد شده و گسله بوده و به صورت نوار کم عرض (۷۰ تا ۱۰۰ کیلومتر) در بین زون سنندج - سیرجان در شمال شرق و زون زاگرس چین خورده در جنوب غرب محصور می باشد.



## ۱-۵-۱- ژئومورفولوژی منطقه

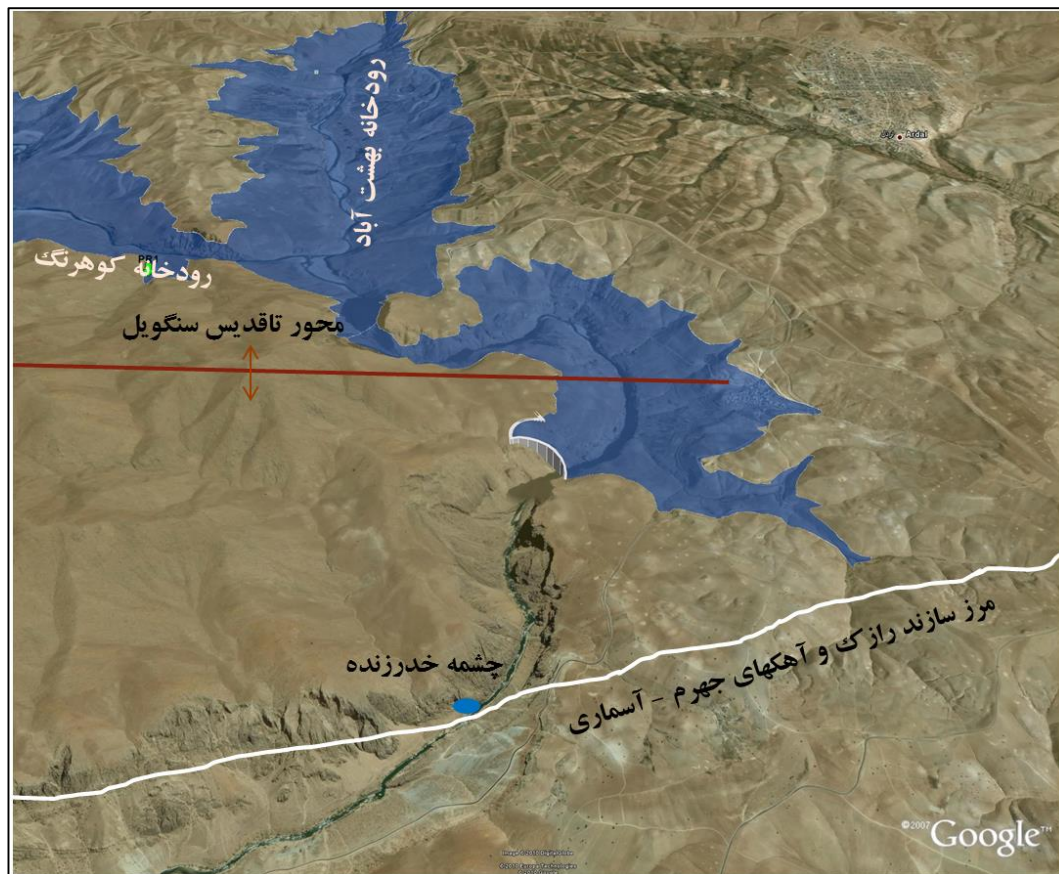
محدوده ساختگاه سد بهشت آباد در حوضه آبریز رودخانه کارون و در ناحیه زاگرس رورانه واقع شده است که یک ناحیه کوهستانی با ستیغ‌های بلند و دره‌های ژرف و کم پهنا می‌باشد. رشته کوه‌های محدوده مورد مطالعه عمدتاً روند شمال غربی - جنوب شرقی دارند. عوامل تکتونیکی نظیر گسل‌های رانده، وجود چین‌خوردگی و تنوع لیتولوژیکی نقش اصلی را در شکل‌دهی منطقه داشته و باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در توپوگرافی آن گردیده است. این عوامل باعث ایجاد کوه‌های بلند و نواحی فروافتاده شده است. در برخی از نواحی فروافتاده پس از آخرین مرحله کوهزایی دریاچه‌هایی شکل گرفت که آثار رسوبات آن در دشت اردل، بند ناغان و منطقه کوه‌رنگ قابل مشاهده است.

ریخت اصلی منطقه را کوه‌های مرتفع تشکیل داده‌اند که عمدتاً از جنس آهک، آهک دولومیتی و دولومیت هستند. سنگ‌ها و سازندهای مارنی، دامنه‌ها و نقاط کم ارتفاع‌تر را تشکیل می‌دهند.

در شمال شرق گستره محدوده مورد مطالعه، چین‌خوردگی و راندگی اردل باعث ایجاد ارتفاعات سالدارون و سوخته با بلندای بیش از ۳۲۰۰ متر شده است. راندگی‌های کردان، بیابان دره، آسیاب بادینه و چین‌خوردگی در جنوب و جنوب غرب محدوده، ارتفاعات سنگویل و کوه‌های هفت پیران و میلی را با بلندای بین ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر تشکیل داده است. در فاصله بین این راندگی‌ها و ارتفاعات، یک فروافتادگی (ناودیس) شکل گرفته که بخش بزرگ آن را سازندهای فرسایش‌پذیر رازک و بختیاری تشکیل داده است. این فروافتادگی (ناودیس) بعداً ساختگاه دریاچه‌ای شده که امروزه رسوبات آن، بخش وسیعی را پوشش داده‌اند.

در شرق مخزن، رسوبات دریاچه‌ای حداکثر تا تراز ۱۸۵۰ متر قرار گرفته است. در حقیقت محل دریاچه فعلی سد، بخشی از دریاچه قدیمی است که رسوبات آن، دشت اردل را ایجاد کرده و هم اکنون بخش بزرگ کف مخزن را تشکیل داده است. به دلیل وجود رسوبات دریاچه‌ای و آبرفتی و فرسایش‌پذیری این رسوبات، ریخت حاکم بر محدوده مخزن ریخت تپه ماهوری می‌باشد.

رودخانه کوه‌رنگ در پایین دست روستای بهشت‌آباد به رودخانه بهشت‌آباد پیوسته و پس از آن وارد تنگه ۷ شکل آهک‌های جهرم-آسماری تاقدیس سنگویل می‌گردد. ساختگاه سد حدود ۲/۵ کیلومتر پایین‌تر از این تنگه و در دره‌ای به نام شیخ محمود واقع شده است شکل هندسی این دره نامتقارن بوده، به طوری که شیب دیواره راست و چپ به ترتیب در حدود ۳۵ و ۸۰ درجه می‌باشد. جهت حرکت رودخانه تقریباً شرقی- غربی و شیب بستر آن در حدود ۰.۱٪ می‌باشد. عمق دره حدود ۲۲۰ متر و عرض آن تقریباً ۴۰۰ متر است. شکل (۲-۱) وضعیت هندسی قرارگیری محور و مخزن سد را نسبت به محور تاقدیس سنگویل و رودخانه‌های محدوده نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱- وضعیت قرارگیری محور و مخزن سد نسبت به آهک‌های تاقدیس سنگویل

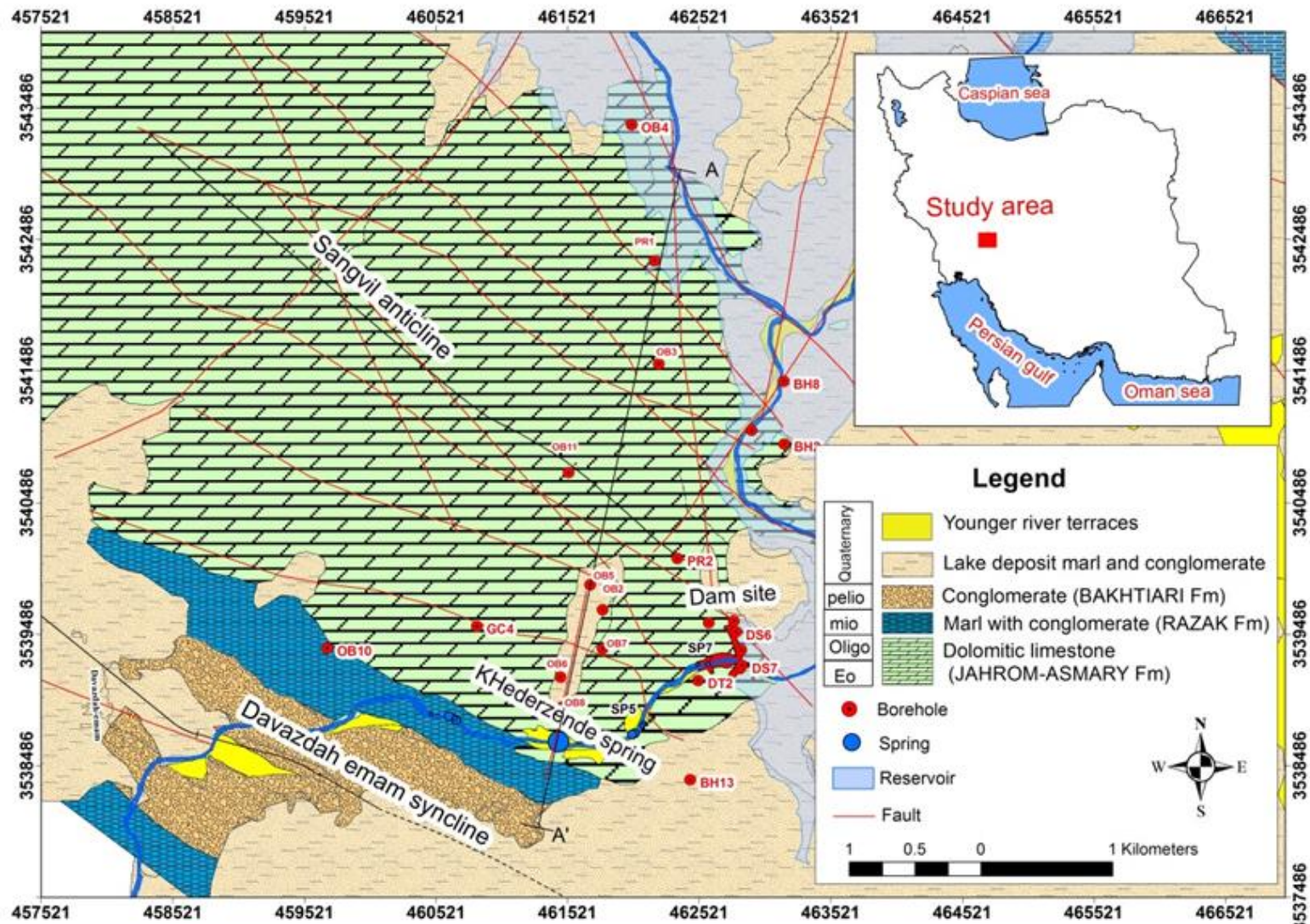
## ۱-۵-۲- چینه‌شناسی

محدوده مورد مطالعه از نظر چینه‌شناسی از سنگ‌های رسوبی کربناته تشکیل شده است. نهشته‌های سنگی از نظر زمانی غالباً متعلق به دوران‌های سنوزوئیک بوده و بیشتر از نوع کربناته می‌باشند. جوانترین واحدهای رسوبی ناحیه نیز شامل کنگلومرای اواخر سنوزوئیک و اوایل دوران کواترنری و نهشته‌های جوانتر تا عهد حاضر می‌باشد. مخزن سد در جناح راست و ساختگاه سد بهشت‌آباد بر روی سازند جهرم-آسماری قرار می‌گیرد (شکل ۱-۳). این سازند در جناح راست مخزن، تاقدیس سنگویل را تشکیل داده که در یال جنوبی سازندهای رازک و بختیاری روی آهکهای این تاقدیس قرار دارد، ولی در یال شمالی سازندهای رازک و بختیاری از بین رفته و وجود ندارد این موضوع باعث شده مخزن در یال شمالی به طور مستقیم با آهکهای جهرم آسماری در ارتباط باشد (شکل ۱-۴). خصوصیات چینه‌شناسی سازندهای محدوده مورد مطالعه در ادامه ارائه شده است.

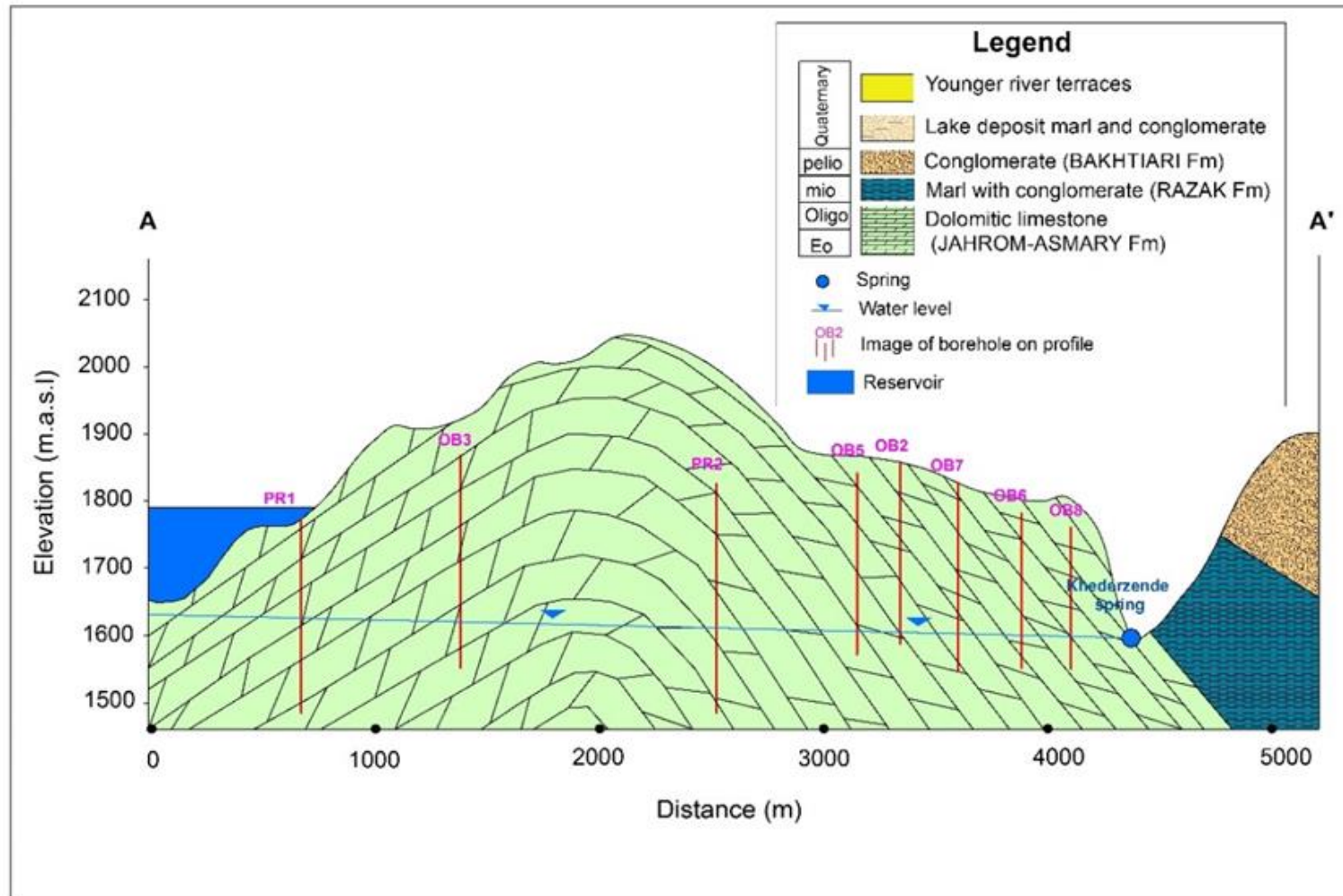
### ۱-۵-۲-۱- سازند جهرم-آسماری

از نظر سنگ چینه‌شناسی، این سازند را می‌توان متشکل از دو سازند جهرم و آسماری با جنس آهک و دولومیت آهکی دانست. سازند جهرم با سن ائوسن - الیگوسن و سازند آسماری با سن الیگومیوسن از سازندهای کربناته می‌باشند. مرز بین این دو واحد نامشخص و به صورت تدریجی است. بنابراین تفکیک بین این دو واحد در محدوده ساختگاه و مخزن امکان‌پذیر نیست، به همین دلیل به صورت واحد جهرم-آسماری نامبرده می‌شود. ضخامت این سازند در این محدوده بیش از ۸۰۰ متر تخمین زده شده است. این واحد، قسمت اعظم تاقدیس سنگویل را تشکیل داده است و جناح راست مخزن و ساختگاه سد بر روی این واحد زمین‌شناسی قرار می‌گیرد.

سازند جهرم-آسماری از دیدگاه هیدروژئولوژی دارای اشکال مورفولوژی و هیدرولوژی کارست و مناسب برای تشکیل آبخوان‌های کارستی است.



شکل ۱-۳- زمین شناسی محدوده ساختگاه و مخزن سد بهشت آباد



شکل ۱-۴- پروفیل زمین شناسی محدوده مخزن به سمت پایین دست در جناح راست



شکل ۱-۵- رخنمون سازند جهرم-آسماری در محدوده ساختگاه سد بهشت آباد

#### ۱-۵-۲-۲- سازند رازک

سازند رازک از مارن سبز روشن تا خاکستری تشکیل شده است و سن آن میوسن میانی - بالایی می‌باشد. این سازند بر روی سازند جهرم-آسماری قرار دارد و از دیدگاه هیدروژئولوژیکی عملکرد این سازند به صورت یک مرز آب‌بند فیزیکی نسبت به آبخوان‌های اطراف خود می‌باشد. به طوری که چشمه خدرزنده به عنوان بزرگترین خروجی تاقدیس سنگویل در پایین دست محور سد در مرز این سازند نمایان شده است.

### ۱-۵-۲-۳- سازند بختیاری

این سازند از تناوب کنگلومرای ضخیم لایه و میان لایه‌هایی از ماسه سنگ، سیلتستون و گل‌سنگ تشکیل شده و سن آن پلیوسن می‌باشد. از دیدگاه هیدروژئولوژی بخش‌های کنگلومرایی و ماسه سنگی این سازند پتانسیل تشکیل آبخوان‌هایی با ضریب ذخیره پایین و محلی را دارا می‌باشند.



شکل ۱-۶- رخنمون سازند رازک و سازند بختیاری بر روی سازند جهرم-آسماری در یال جنوبی تاق‌دیس

### ۱-۵-۲-۴- نهشته‌های کوتاه‌تر

این نهشته‌ها در محدوده شامل دو بخش رسوبات دریاچه‌ای و نهشته‌های آبرفتی است. نهشته‌های دریاچه‌ای شامل مارن و نهشته‌های ریزدانه در قسمت‌های مرکزی و نهشته‌های درشت‌دانه و کنگلومرایی در حواشی (ساحل دریاچه قدیمی) می‌باشند. این رسوبات، افقی بوده و به صورت بین‌انگشتی به هم تبدیل می‌شوند. ضخامت آنها حداکثر ۳۵۰ متر و سن آنها با توجه به عدم تأثیرگذاری آخرین دوره کوهزایی (پاسادنین) بر روی آنها، پلیستوسن در نظر گرفته شده است. نهشته‌های آبرفتی

و واریزه‌ای بخش گسترده‌ای از سواحل رودخانه بهشت‌آباد، کوه‌رنگ و نواحی اطراف دشت را پوشانده است. این رسوبات حاصل رسوب‌گذاری در محیط رودخانه‌ای، پای دامنه‌ها و مخروط‌افکنه‌ها هستند.

### ۱-۵-۳- زمین‌شناسی ساختمانی

از نظر تقسیم‌بندی‌های انجام شده در مورد زمین‌شناسی ایران، محدوده مورد مطالعه در پهنه کوهزاد زاگرس و بین پهنه‌های سنندج - سیرجان و زاگرس رورانده (مرتفع) واقع شده است. از مهمترین خصوصیات پهنه زاگرس، وجود تعداد قابل توجهی گسل‌های رانده بزرگ است که در اثر عملکرد آنها ورقه‌های رانده متعددی ایجاد شده است. در این نواحی به طور معمول ساختهای تاقدیسی و ناودیسی کامل دیده نمی‌شود. در پهنه‌های مزبور به علت اعمال تکتونیک فشاری، از اواخر کرتاسه به بعد کلیه سنگ‌ها تحت تأثیر قرار گرفته و بریده و خرد شده‌اند. به طور کلی ساختارهای تکتونیکی اصلی ناحیه را در سه بخش گسل‌ها، چین خوردگی‌ها و درزه‌ها می‌تواند مورد توجه قرار داد.

### ۱-۵-۳-۱- گسل‌ها

گسل‌های محدوده عمدتاً دارای راستای شمال‌غرب - جنوب‌شرق و شیب به سمت شمال‌شرقی می‌باشد و از راستای گسل اصلی زاگرس تبعیت می‌کند. مهمترین گسل در فاصله پنج کیلومتری شمال محدوده مورد مطالعه به نام گسل اردل قرار دارد. این گسل از حوالی شهریار شروع شده و تا شهر ناغان ادامه دارد و از مجموعه گسل‌های جوان زاگرس همراه با فعالیت لرزه‌خیزی می‌باشد. گسل اردل در قسمت جنوب‌غربی تاقدیس سالدارون قرار دارد و باعث بریده شدن یال جنوب‌غربی آن و همچنین بالا آمدگی این تاقدیس و رانده شدن آن بر روی سازندهای سنوزوئیک شده است. سازوکار گسل اردل در زمان کنونی همچون گسل اصلی زاگرس، راندگی راستالغز راست‌بر می‌باشد. در محدوده آهکهای جهرم-آسماری جناح راست نیز عمدتاً امتداد گسلها دارای راستای شمال‌غرب - جنوب‌شرق می‌باشد. علاوه بر این گسلها یکسری گسل با راستای شمالی - جنوبی در این آهکها وجود دارد که



می‌تواند در ارتباط هیدرولیکی یال شمالی و جنوبی تاقدیس نقش داشته باشد. در شکل (۳-۱) موقعیت این گسلها در آهکهای جهرم-آسماری جناح راست مخزن نمایش داده شده است.

#### ۱-۵-۳-۲- چین‌ها

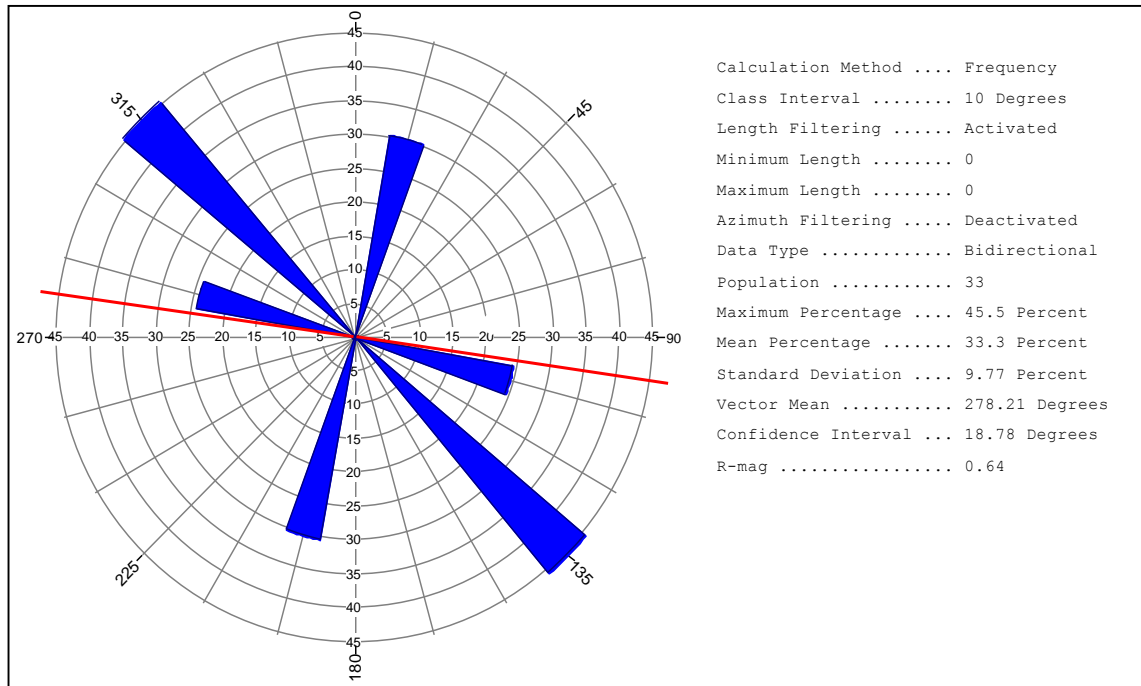
مطابق شکل (۴-۱) تاقدیس سنگویل در جناح راست از آهکهای جهرم-آسماری تشکیل شده است. روی آهکهای این تاقدیس در یال جنوبی سازندهای رازک و بختیاری قرار دارد ولی در یال شمالی سازندهای رازک و بختیاری وجود ندارد این موضوع باعث شده مخزن سد در یال شمالی به طور مستقیم با آهکهای جهرم-آسماری در ارتباط باشد.

ساختگاه سد در یال جنوبی این تاقدیس قرار گرفته و مسیر رودخانه نیز در این دره، تقریباً موازی محور تاقدیس می‌باشد. به نظر می‌رسد جهت جریان رودخانه، تحت تأثیر گسل‌ها و ناپیوستگی‌های موازی محور چین به صورت شرقی-غربی قرار گرفته است. به دلیل قرارگیری این تنگه در یال جنوبی تاقدیس، شیب لایه‌ها در هر دو دیواره تنگه به سمت جنوب می‌باشد. بنابراین شیب لایه‌ها در دیواره شمالی (جناح راست) به سمت رودخانه، و در دیواره جنوبی (جناح چپ) به سمت داخل دیواره می‌باشد.

#### ۱-۵-۳-۳- درزه و شکستگی‌ها

درزه و شکستگی‌ها از جمله عمومی‌ترین پدیده‌های ساختاری منطقه هستند که تقریباً در تمام واحدهای سنگی، حتی در تراس‌های آبرفتی قدیمی نیز دیده می‌شوند. درزه و شکستگی‌ها دارای راستا و شیب‌های متفاوتی بوده و طول، بازشدگی، فاصله و پرشدگی متفاوتی دارند و بررسی آنها در مطالعات هیدروژئولوژی و روندیابی جهت جریان عمومی آب زیرزمینی در سازندهای سخت و شناسایی معابر و مسیرهای افق‌های کارستی در سنگ‌های کربناته از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. بنابراین برداشت راستای شکستگی‌ها در تاقدیس سنگویل انجام شده و نتایج آن به صورت نمودار گل

سرخی در شکل (۷-۱) ارائه شده است. روند غالب شکستگی‌ها یک روند شمال غرب جنوب شرق می‌باشد که با توجه به بررسی وضعیت سطح آب زیرزمینی از طریق شبکه پیزومتری موجود این روند با جهت جریان عمومی آب زیرزمینی تاقدیس مطابقت دارد.



شکل ۷-۱- نمودار گل‌سرخ‌ی درز و شکستگی‌های غالب تاقدیس سنگویل (زاینده‌آب ۱۳۸۶)

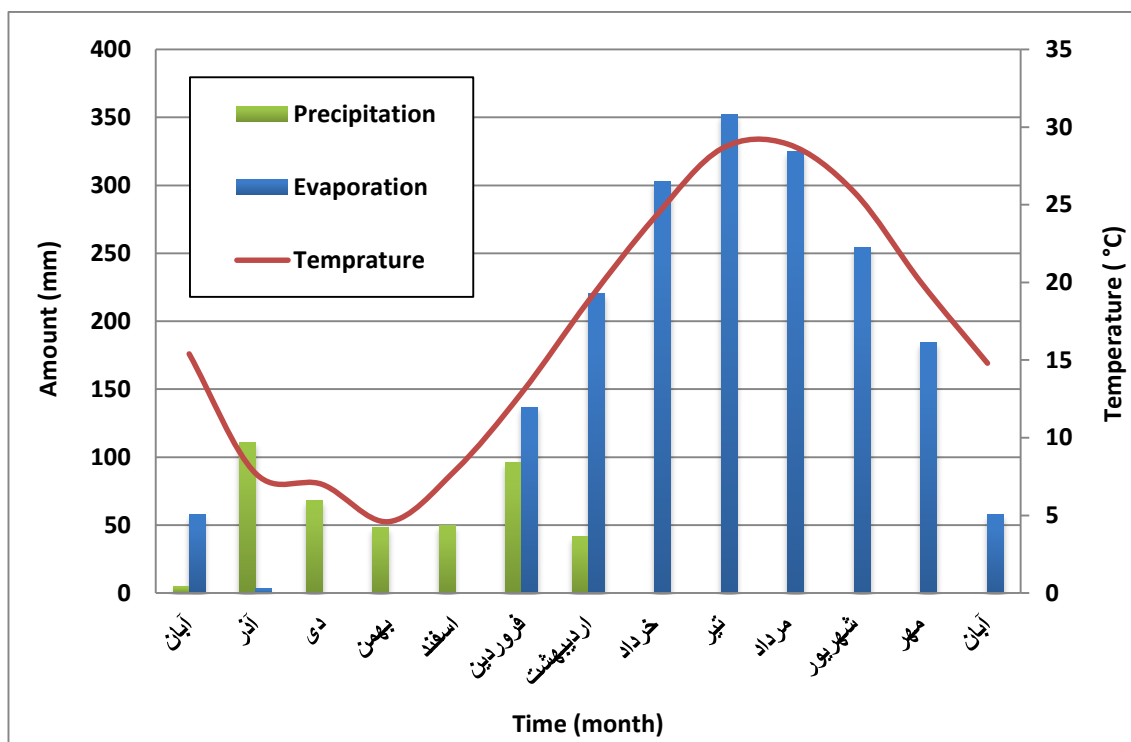
## ۶-۱- هواشناسی

بر اساس مطالعات هواشناسی سد بهشت‌آباد متوسط بارش سالانه در حوضه‌آبگیر ساختگاه سد ۶۶۰ میلیمتر می‌باشد با توجه به اینکه آورد سد از دو حوضه بزرگ تشکیل شده متوسط بارش سالانه در حوضه‌آبگیر بهشت‌آباد ۴۶۹ میلیمتر و متوسط بارش سالانه در کل حوضه‌آبگیر شاخه کوه‌رنگ ۱۲۶۵ میلیمتر می‌باشد. جهت بررسی وضعیت اقلیم منطقه مورد مطالعه از اطلاعات مربوط به ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اردل استفاده شده است. جدول (۲-۱) مقادیر درجه حرارت و بارندگی مربوط به منطقه مورد مطالعه را به صورت بلند مدت نشان می‌دهد.

با توجه به آمار ارائه شده توسط این ایستگاه، بیشترین مقدار بارندگی در بهمن ماه و بیشترین دما مربوط به مرداد ماه است. همچنین کمترین مقدار بارندگی مربوط به مرداد ماه و حداقل دما نیز مربوط به بهمن ماه می‌باشد. میانگین سالیانه بارندگی و دما به ترتیب حدود ۴۸۵ میلی‌متر و ۱۵/۱ درجه سانتیگراد است. براساس اطلاعات بلند مدت تبخیر نیز بیشترین مقدار تبخیر در تیر ماه و کمترین مقدار آن در ماه‌های دی، بهمن و اسفند رخ می‌دهد. میزان بارندگی، تبخیر و دما در محدوده مطالعاتی در سال آبی مورد مطالعه مطابق با نمودار شکل (۱-۸) می‌باشد.

جدول ۱-۲- مقادیر پارامترهای بلندمدت درجه حرارت، بارندگی و تبخیر ماهیانه

ماه	میانگین درجه حرارت (درجه سانتیگراد)	میانگین بارندگی ماهیانه (میلی متر)	میانگین تبخیر مایانه
مهر	۱۸/۸	۲/۳	۲۰۸/۵
آبان	۱۱/۷	۹۰/۳	۹۰/۴
آذر	۵/۴	۸۳/۹	۹/۳
دی	۴/۲	۴۶	۰
بهمن	۴/۰	۹۶/۸	۰
اسفند	۷/۵	۶۸/۴	۰
فروردین	۱۱/۹	۶۹/۴	۸۲/۷
اردیبهشت	۱۶/۱	۲۵/۹	۱۸۹/۱
خرداد	۲۲/۸	۰/۱	۲۹۵/۱
تیر	۲۷/۰	۰/۳	۳۳۸
مرداد	۲۷/۵	۰	۳۴۰/۱
شهریور	۲۴/۳	۱/۶	۲۸۵/۳
سالیانه	۱۵/۱	۴۸۵	۱۸۳۸



شکل ۸-۱ - میزان بارندگی، تبخیر و دما بر اساس ایستگاه سینوپتیک اردل از آبان ۱۳۹۶ تا آبان ۱۳۹۷

در این مطالعه جهت تعیین اقلیم منطقه از ضریب دومارتن و نمودار آمبروترمیک استفاده گردید این طبقه‌بندی بر اساس میانگین بارندگی و دمای سالانه می‌باشد. در این طبقه بندی شاخص خشکی بر اساس معادله زیر محاسبه می شود.

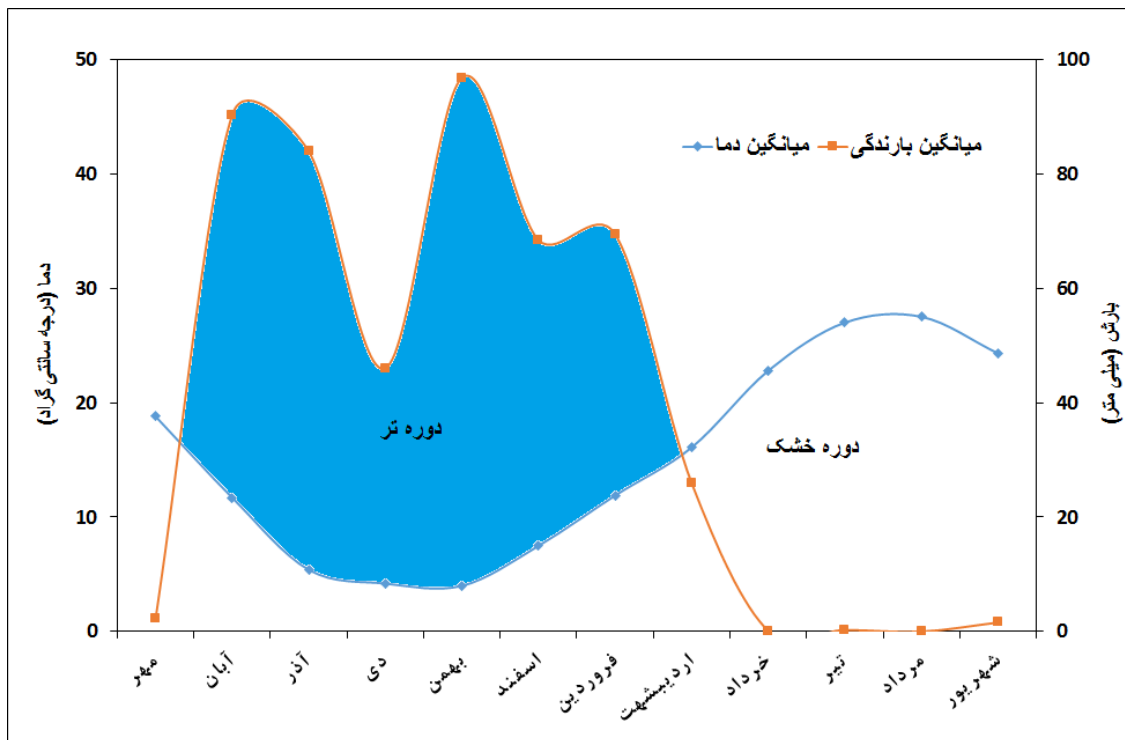
$$I = \frac{P}{T + 10} \quad (1)$$

به طوری که،  $I$  شاخص خشکی،  $P$  میانگین بارندگی سالانه، و  $T$  میانگین نرمال سالانه دما است. دامنه تغییرات مقادیر شاخص خشکی براساس اقلیم های مختلف در جدول (۱-۳) آورده شده است. در محدوده مورد مطالعه بر اساس اطلاعات ایستگاه سینوپتیک اردل (با میانگین بارندگی ۴۸۵ میلیمتر و متوسط دمای سالیانه ۱۵/۱ درجه سانتیگراد) شاخص خشکی ۱۹/۳۲ بدست می‌آید که مطابق این رده بندی، محدوده مطالعاتی دارای اقلیم نیمه خشک می‌باشد.

جدول ۱-۳- رده‌بندی اقلیمی دومارتن (به نقل از علیزاده ۱۳۹۰)

شاخص خشکی	نوع اقلیم
<۱۰	خشک
۱۰-۲۰	نیمه خشک
۲۰-۲۴	مدیترانه‌ای
۲۴-۲۸	نیمه مرطوب
۲۸-۳۵	مرطوب
>۳۵	بسیار مرطوب

نمودار آمبروترمیک منطقه بر اساس تغییرات میانگین ماهیانه دمای هوا و بارندگی ترسیم و در شکل (۹-۱) ارائه شده است. طبق این نمودار ماه‌های آبان، آذر، دی، بهمن، اسفند، فروردین و اردیبهشت به عنوان ماه‌های مرطوب سال و ماه‌های خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر ماه‌های خشک سال به حساب می‌آید.



شکل ۹-۱- نمودار آمبروترمیک محدوده بر اساس میانگین بلند مدت دمای هوا و بارندگی

## ۷-۱- هیدرولوژی

حوضه آبخیز سد بهشت‌آباد با وسعت ۵۱۱۰ کیلومتر مربع در نیمه شمالی استان چهارمحال و بختیاری و در بخش مرکزی کوه‌های زاگرس واقع شده است. کوه‌های سالدارون، هزارگزی، جهان بین، چوبین، پره داس، شهیدان، زراب و احمد لیوه، ارتفاعات مهم منطقه می‌باشند. حوضه مورد مطالعه از شمال و شرق به حوضه آبخیز زاینده‌رود، از غرب به حوضه آبخیز رودخانه بازفت و از جنوب به حوضه آبخیز رودخانه‌های سبزکوه و آقبلاغ محدود می‌گردد. نقطه خروجی حوضه (محل احداث سد)، در ۵/۵ کیلومتری جنوب غرب روستای بهشت‌آباد و پایین دست محل تلاقی رودخانه‌های بهشت‌آباد و کوه‌رنگ قرار دارد. حوضه آبخیز مورد مطالعه را می‌توان به دو قسمت اصلی تقسیم کرد. قسمت نخست یعنی حوضه آبخیز کوه‌رنگ در برگیرنده ۲۴/۱ درصد از مساحت کل حوضه می‌باشد که سد و تونل اول کوه‌رنگ و مجموعه سد و تونل دوم کوه‌رنگ و تونل ماربران در قسمت بالا دست آن در حال بهره‌برداری می‌باشند. همچنین سد و تونل سوم کوه‌رنگ هم اکنون در میانه حوضه در حال احداث است که با بهره‌برداری از آن کل آبهای سطحی بالادست آن به حوضه زاینده‌رود منقل خواهد شد. دومین قسمت، یعنی حوضه آبخیز رودخانه بهشت‌آباد در برگیرنده ۷۵/۹ درصد از مساحت کل حوضه می‌باشد که خود از دو رودخانه جونقان و کیار تشکیل می‌گردد. پس از بهره‌برداری از سد و تونل سوم کوه‌رنگ سهم حوضه آبخیز کوه‌رنگ از مساحت کل حوضه به ۱۳/۴ درصد و سهم حوضه آبخیز بهشت‌آباد به ۸۶/۶ درصد می‌رسد. یعنی در آن زمان از ۴۴۷۸ کیلومتر مربع مساحت کل حوضه ۳۸۷۸ کیلومتر مربع به حوضه بهشت‌آباد و ۵۹۹ کیلومتر مربع به حوضه کوه‌رنگ اختصاص خواهد داشت.

آبراهه اصلی رودخانه کوه‌رنگ از ارتفاعات زردکوه بختیاری در بخش چلگرد واقع در شمال غرب استان چهارمحال و بختیاری سرچشمه گرفته و پس از طی ۳۰ کیلومتر به آن می‌پیوندد. رودخانه کوه‌رنگ پس از عبور از سد دوم کوه‌رنگ و در فاصله ۷۰ کیلومتری از نقطه شروع حوضه به محل

احداث سد سوم کوهرنگ می‌رسد. رودخانه کوهرنگ در ادامه با پیوستن رودخانه دوآب و عبور از مجاورت روستاهای دشتک، رستم‌آباد و کاج درفاصله ۱۲۷ کیلومتری از نقطه شروع به رودخانه بهشت‌آباد می‌پیوندد. آبراهه اصلی رودخانه بهشت‌آباد از ارتفاعات سیاه سرد و کوه آیک در جنوب شرق شهر بروجن و در شرق استان چهارمحال و بختیاری شروع شده و در ادامه در ۸۲ کیلومتر در کنار روستای خراجی آب جهان بین که از شمال استان سرچشمه می‌گیرد و به آن می‌پیوندد. در ادامه مسیر آب شلمزار نیز به آن ملحق شده و در ۱۰۴/۵ کیلومتر از نقطه شروع با رودخانه جونقان که خود از دو رودخانه گرگک و سراب تشکیل شده است یکی می‌شود و از این به بعد رودخانه بهشت‌آباد نامیده می‌شود. رودخانه بهشت‌آباد در ادامه با عبور از تنگ درکش و رکش و با گذر از کنار روستای بهشت‌آباد در ۱۱۹ کیلومتر از نقطه شروع با رودخانه کوهرنگ یکی شده و رودخانه حاصل در پایین دست محل تلاقی و در محل دره شیخ محمود به ساختگاه سد می‌رسد (زاینده‌آب ۱۳۸۶). در شکل (۱-۱۰) موقعیت حوضه آبگیر سد و آبراهه‌ها و رودخانه‌های منتهی به محور سد مشخص گردید.

### ۱-۷-۱- مساحت و محیط حوضه

مساحت حوضه آبگیر طبیعی در ساختگاه سد ۵۱۰۹/۵ کیلومتر مربع است. با توجه به مساحت حوضه آبگیر بالادست سد سوم کوهرنگ که ۶۳۱/۴ کیلومتر مربع می‌باشد، بعد از بهره‌برداری از سد و تونل سوم کوهرنگ، مساحت حوضه آبگیر در ساختگاه سد به ۴۴۷۸/۱ کیلومتر مربع کاهش خواهد یافت.

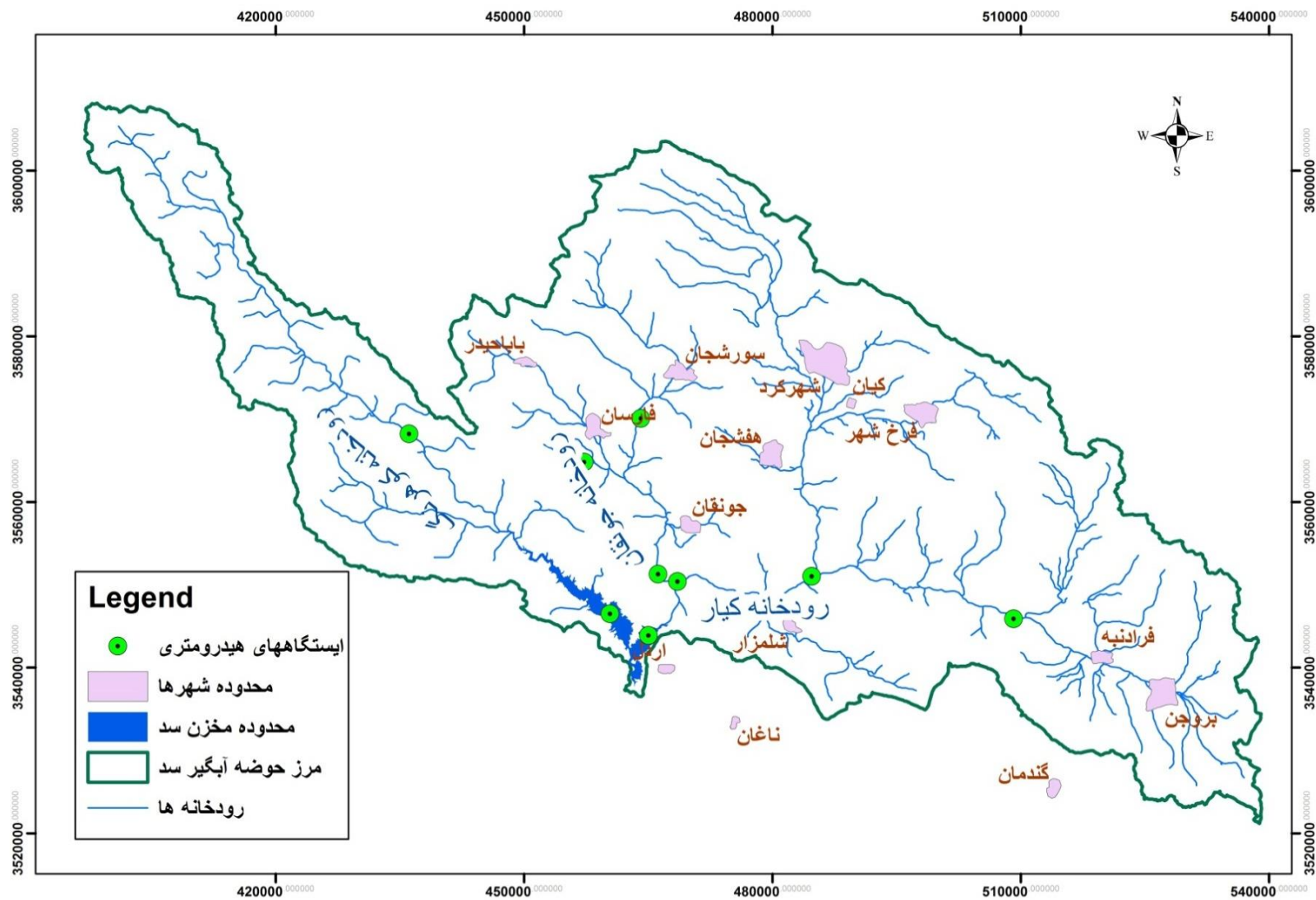
مساحت حوضه آبگیر کوهرنگ در شرایط طبیعی ۱۲۳۰/۱ کیلومتر مربع است که معادل ۲۴/۱ درصد از مساحت کل حوضه می‌باشد. پس از بهره‌برداری از تونل سوم کوهرنگ مساحت حوضه آبگیر کوهرنگ به ۵۹۸/۷ کیلومتر مربع و سهم آن از مساحت حوضه ساختگاه سد به ۱۳/۴ درصد کاهش می‌یابد. در مقابل، سهم مساحت حوضه آبگیر بهشت‌آباد که در شرایط طبیعی با ۳۸۷۸/۱ کیلومتر مربع، ۷۵/۹ درصد از مساحت حوضه ساختگاه سد را تشکیل می‌دهد پس از بهره‌برداری از تونل سوم تا ۸۶/۶ درصد افزایش می‌یابد.

محیط حوضه آبرگیر در شرایط طبیعی برابر  $541/9$  کیلومتر مربع است. ضمن اینکه محیط حوضه آبرگیر رودخانه بهشت آباد تا محل تلاقی با کوهرنگ  $377/1$  کیلومتر و محیط حوضه آبرگیر بهشت آباد تا محل تلاقی با کوهرنگ برابر با  $251/9$  کیلومتر می باشد.

### ۱-۷-۲- آبدهی در ساختگاه سد

با توجه به نزدیکی ایستگاههای کاج و بهشت آباد به محل تلاقی و نیز ساختگاه سد و نبود چشمه های قابل توجه در فاصله این ایستگاهها تا محل تلاقی، آبدهی شاخه های کوهرنگ و بهشت آباد را می توان با آبدهی این رودخانه ها در محل ایستگاههای کاج و بهشت آباد برابر دانست. بنابراین آبدهی دراز مدت شاخه بهشت آباد برابر  $579/0$  میلیون متر مکعب و آبدهی شاخه کوهرنگ برابر  $773/3$  میلیون متر مکعب و در مجموع  $1352/3$  میلیون متر مکعب خواهد بود که در صورت بهره برداری از تونل سوم کوهرنگ این مقدار کاهش خواهد یافت. با کسر نمودن آبدهی در محل ساختگاه سد کوهرنگ، آبدهی دراز مدت در ساختگاه سد پس از بهره برداری از تونل سوم کوهرنگ به طور متوسط برابر  $1070$  میلیون متر مکعب در سال خواهد بود.





شکل ۱-۱- نقشه هیدروگرافی حوضه آبریز سد بهشت آباد

### ۱-۷-۳- برآورد سیل در ساختگاه سد

با توجه به نزدیکی ایستگاه بهشت‌آباد به محل تلاقی با کوه‌رنگ می‌توان مقادیر سیل این ایستگاه را به عنوان مقادیر سیل رودخانه بهشت‌آباد در محل تلاقی در نظر گرفت. بنابراین با لحاظ کردن این واقعیت که زمان تمرکز این دو رودخانه در محل تلاقی تقریباً برابر می‌باشد و با فرض وقوع همزمان سیلاب در دو حوضه که در واقع بدترین حالت ممکن است می‌توان گفت سیلاب در ساختگاه سد مجموع سیلاب دو رودخانه خواهد بود. جدول (۱-۴) مقادیر سیل رودخانه‌های بهشت‌آباد و کوه‌رنگ و مقادیر برآورد شده برای ساختگاه سد را در دوره‌های بازگشت مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۱-۴- مقادیر سیل در دوره بازگشت‌های مختلف بر حسب متر مکعب بر ثانیه (زاینده آب ۱۳۸۶)

دوره بازگشت (سال)									مکانهای مورد نظر
۱۰۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲	
۴۰۷۵/۸	۲۳۴۲/۳	۱۹۶۰/۱	۱۲۵۸/۳	۱۰۲۱/۶	۸۱۶/۹	۵۸۷/۶	۴۳۹/۲	۲۶۴/۳	ساختگاه سد
۱۲۶۴/۴	۷۳۲/۷	۶۱۶/۸	۴۰۴/۹	۳۳۳/۶	۲۷۱/۷	۲۰۲/۱	۱۵۶/۶	۱۰۱/۹	حوضه بهشت‌آباد
۲۸۱۱/۴	۱۶۰۹/۶	۱۳۴۳/۳	۸۵۳/۴	۶۸۸/۰	۵۴۵/۲	۳۸۵/۵	۲۸۲/۶	۱۶۲/۴	حوضه کوه‌رنگ

### ۱-۸- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل ۶ فصل می‌باشد که محتویات این فصل‌ها به طور مختصر معرفی می‌شوند:

فصل اول: در این فصل بیان مساله و اهداف تحقیق ارائه گردید و سپس به مختصری درباره موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، مشخصات کلی طرح سد بهشت‌آباد، زمین‌شناسی، هواشناسی و هیدرولوژی پرداخته شده است.

فصل دوم: در این فصل پیشینه تاریخی از مباحث مرتبط با موضوع پایان‌نامه مطرح شده است. این مباحث به طور کلی شامل گذشته‌ای از مسائل جریان در محیط‌های کارستی و همچنین اثر مقیاس

در محیط‌های کارستی و غیرکارستی می‌باشد. با توجه به اینکه تاثیر مقیاس بر پارامترهای هیدروژئولوژیک و در نتیجه تحلیل نشت از مخزن سدها رابطه مستقیم دارد گذشته‌ای از مطالعات مختلف در زمینه نشت از مخازن کارستی نیز در این فصل بررسی شده است.

فصل سوم: در این فصل روش کار و روند مطالعات انجام شده جهت تاثیر مقیاس بر پارامترهای هیدروژئولوژی و میزان نشت از سد به طور مختصر ارائه گردید.

فصل چهارم: در این فصل مطالعات هیدروژئولوژی و بررسیهای اکتشافی بر روی آهکهای چهارم-آسماری جناح راست مخزن توضیح داده شده است.

فصل پنجم: در این فصل برای تعیین اثر مقیاس آزمایش‌های مختلف در مقیاسهای مختلف بررسی شده و تاثیر آن بر روی میزان نشت از مخزن انجام گردید.

فصل ششم: در این فصل نتایج حاصل از مطالعات هیدروژئولوژی، هیدروشیمی و ایزوتوپی آهکهای جناح راست مخزن مطرح گردید همچنین نتایج حاصل از اثر مقیاس بر پارامترهای هیدروژئولوژیک این آهکها و نتایج حاصل از تاثیر مقیاس بر تحلیل نشت از مخازن کارستی توضیح داده شده است.



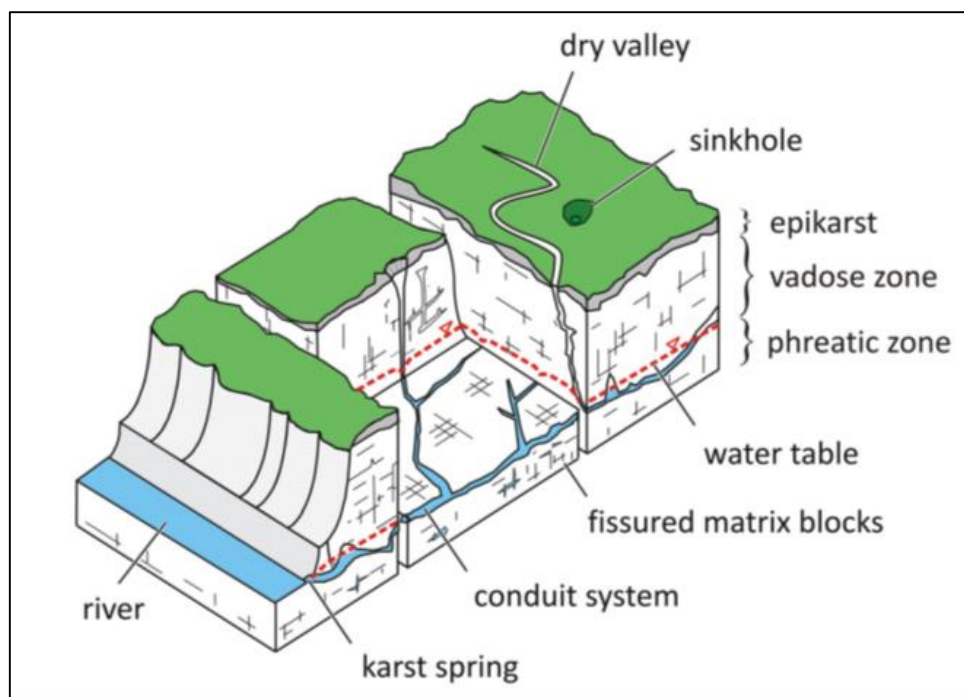
## ۲- فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین

وجود تخلخل ثانویه و شبکه‌های جریان باعث ناهمگنی کارست می‌گردد. به همین دلیل میزان هدایت هیدرولیکی با تغییر مقیاس تغییرات بسیار زیادی را شامل می‌شود. به طوری که هدایت هیدرولیکی در مقیاس‌های کوچک (مغزه‌های حفاری، آزمایش لوژن و اسلاگ) در مقایسه با مقیاس‌های محلی (آزمایش پمپاژ) و مقیاس‌های بزرگ (منحنی فرود، ردیابی و دارسی) به مراتب کمتر می‌باشد. در این شرایط تعیین دقیق مقدار هدایت هیدرولیکی با توجه به مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی اهمیت بسزایی دارد. همچنین انتخاب میزان هدایت هیدرولیکی صحیح با توجه به درگیری مخزن سد در محیط‌های کارستی به تحلیل صحیح نشت از مخزن بسیار مهم می‌باشد. در این فصل به مطالعات پیشین در مورد جریان در محیط‌های کارستی، اثر مقیاس بر تعیین میزان هدایت هیدرولیکی و نشت از مخازن کارستی پرداخته خواهد شد.

### ۲-۱- جریان در کارست

سنگهای کارستی حدود ۲۰ درصد از سطح قاره‌ها را می‌پوشاند (White 1988) و تقریباً یک چهارم مردم جهان، آب آشامیدنی خود را از منابع آب کارستی تأمین می‌کنند (Ford and Williams 1989). سنگهای کارستی کربناته ۱۱ درصد مساحت کل کشور (۱۸۵۰۰۰ کیلومتر مربع) را فرا گرفته است که از این میزان ۵۵ درصد در زاگرس، ۲۵ درصد در ایران مرکزی و ۱۵ درصد در البرز و ۵ درصد در شرق، جنوب شرق و کپه داغ ایران قرار دارد (ناصری ۱۳۷۰).

کارست، سرزمینی است با هیدرولوژی و اشکال سطحی (Landforms) مشخص با یک سیستم زهکشی زیر سطحی وسیع که برخاسته از سنگهای با قابلیت بالای انحلال در آبهای طبیعی است. کارست به طور وسیع در سنگهای کربناته (به طور مشخص آهک) گسترش می‌یابد. اما محدود به سنگهای آهکی نمی‌باشد و می‌تواند در سایر سنگها، همچون سنگهای نمکی و گچی نیز توسعه پیدا کند. این مناطق با کانالهای انحلالی، گودیهای مسدود، پولیه، دولین (حفرات بلعنده)، غارها و دره‌های خشک مشخص می‌گردند (Jenning 1985, White 1988, Ford and Williams 1989). در شکل (۱-۲) مدل مفهومی از یک سیستم کارستی نمایش داده شده است.



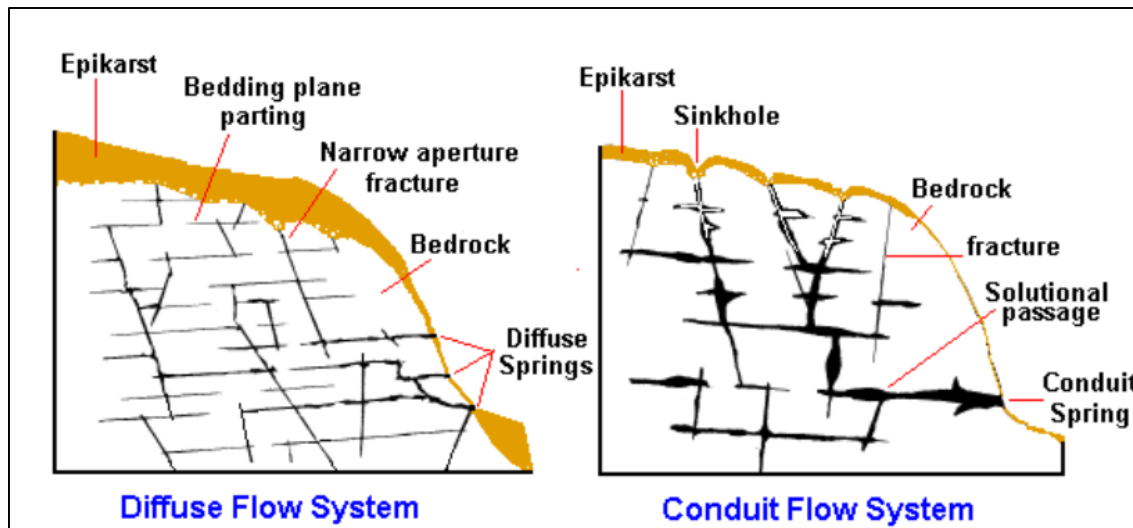
شکل ۱-۲- مدل مفهومی از یک سیستم کارستی (EPA 2002)

## ۲-۲- نوع جریان در سیستم‌های کارستی

با توجه به ناهمگنی آبخوان‌های کارستی، جریان آب می‌تواند از ماتریکس سنگ، بازشدگی‌ها و حفرات انحلالی ثانویه صورت پذیرد. بر این اساس محققین مختلف آبخوان‌های کارستی را به دو دسته افشان (Diffuse flow) و مجرایبی (Conduit flow) تقسیم‌بندی کرده‌اند (e.g. Burdon and Papakis 1963)

White and Schmidt 1966, Shuster and White 1971, Atkinson 1977, Karami 2002). شکل

(۲-۲) تصویری شماتیک از آبخوان‌های کارستی با جریان افشان و مجرای می‌دهد.

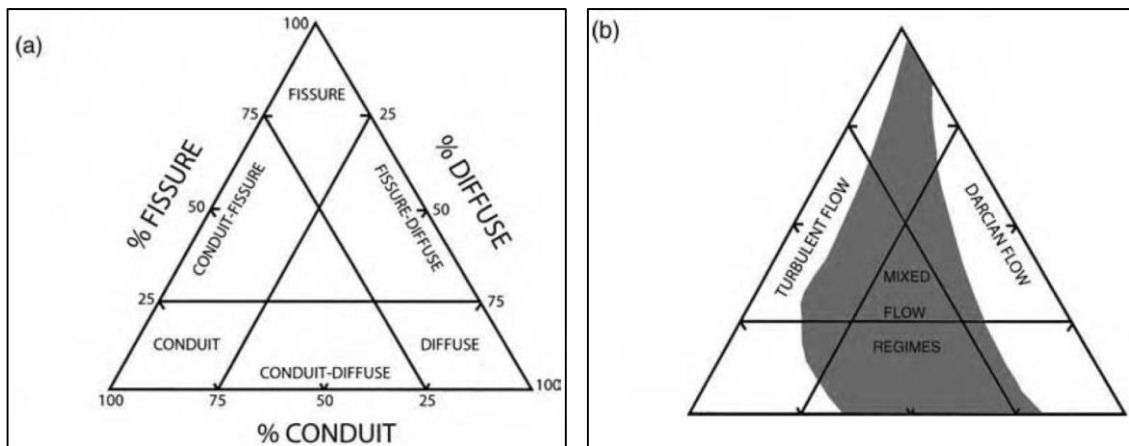


شکل ۲-۲- شماتیک آبخوان‌های کارستی با جریان افشان و مجرای (Karami 2002)

به جریان آب در مجاری و شکستگی‌ها با بازشدگی بیش از یک سانتی‌متر جریان مجرای گفته می‌شود، این نوع جریان در اغلب موارد آشفته و از قانون داری پیروی نمی‌کند (White and Longyear 1962). به جریان آب در منافذ و همچنین در مجاری و شکستگی‌های با عرض بازشدگی کمتر از یک سانتی‌متر جریان افشان گفته می‌شود این نوع جریان خطی بوده و از قانون داری پیروی می‌کند (ASTM 1995). در جریان افشان زمان ماندگاری زیاد و سرعت جریان کم و در جریان مجرای زمان ماندگاری کم و سرعت زیاد می‌باشد. دو سیستم جریان افشان و مجرای دو سر یک طیف پیوسته از جریان حاکم بر آبخوان‌های کارستی است. در همین راستا تعیین نوع جریان آب به صورت یک طیف از یک محیط کاملاً افشان تا یک محیط کاملاً مجرای شرایط جریان را از یک محیط هموزن و معادله داری تا یک محیط غیرهمگن و معادلات جریان در مجاری ممکن می‌سازد (Shuster and White 1971). این موضوع باعث می‌گردد توالی از انواع آبخوان‌های کارستی، با نسبت جریان‌های متفاوت در طبیعت ایجاد گردد (Mull et al. 1988). بر این اساس آبخوان‌های

کارستی را به سه دسته، جریان افشان، حدواسط (افشان- مجرای یا مجرای- افشان) و مجرای تقسیم‌بندی کرده‌اند (Quinlan and Ewers 1985). برخی از محققین نیز آبخوان‌های کارستی را محیطی با تخلخل سه‌گانه (Triple porosity) شامل سیستم جریان افشان، مجرای و درز و شکافی در نظر گرفته‌اند (Atkinson 1985, Worthington 1999, White 2005).

اتکینسون (Atkinson 1985) با استفاده از داده‌های موجود در محدوده‌های کارستی در چین که توسط یوان (Yuan 1981, 1983) مطالعه شده بود. با در نظر گرفتن سه نوع سیستم جریان مجرای، افشان و درز و شکافی یک نمودار سه تایی برای طبقه‌بندی جریان در انواع آبخوان‌های کارستی ارائه نموده است. این مدل ارتباط مستقیم نوع جریان با رژیم جریان در محیط کارستی را نشان می‌دهد (شکل ۲-۳).



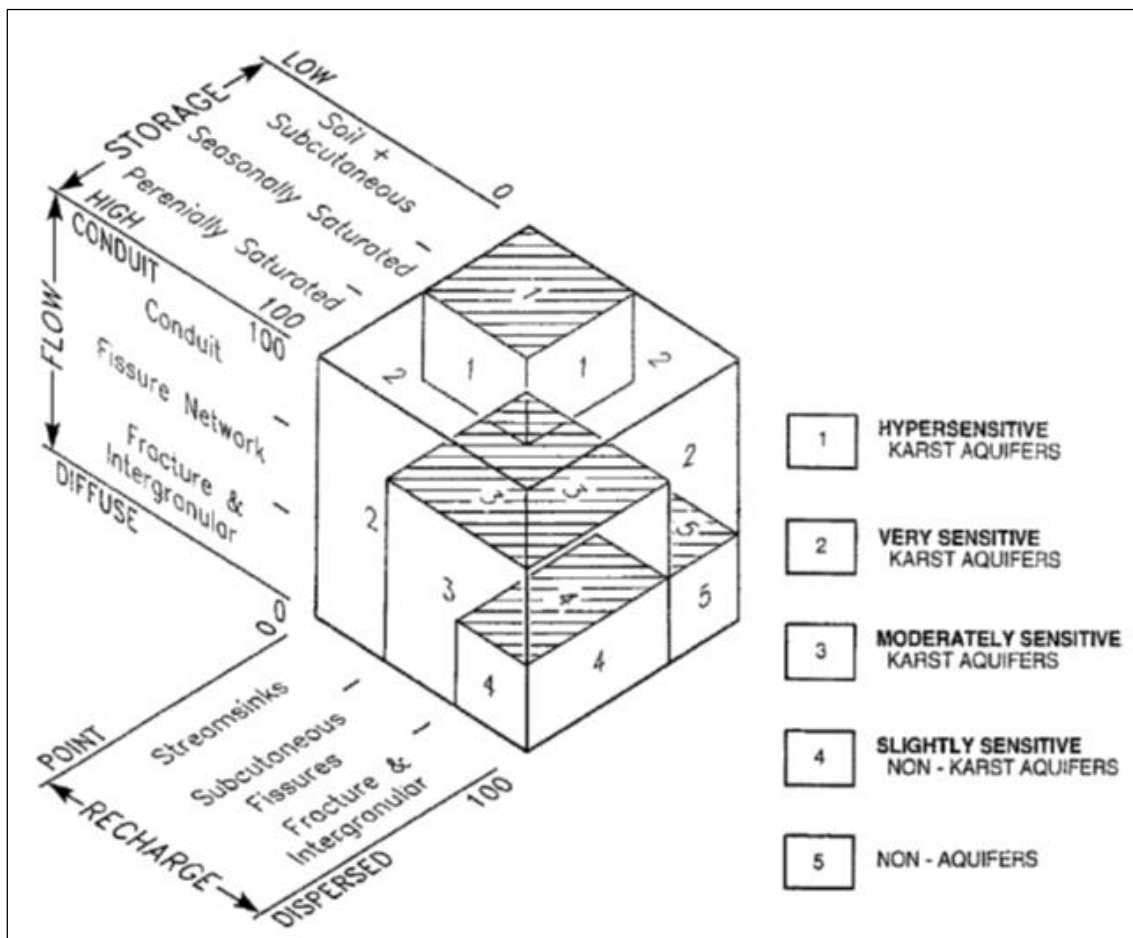
شکل ۲-۳- تقسیم‌بندی نوع جریان و ارتباط آن با رژیم جریان (Atkinson 1986)

هوبز و اسمارت (Hobbs and Smart 1986) نیز مدل مفهومی برای آبخوان‌های کارستی که در آن سه ویژگی تغذیه، ذخیره و نوع جریان در محدوده بین جریان افشان و مجرای در نظر گرفته شده طراحی و بر این اساس آبخوان‌های کارستی را به پنج گروه شامل ۱- آبخوان‌های کارستی به شدت حساس ۲- آبخوان‌های کارستی با حساسیت بالا ۳- آبخوان‌های کارستی نسبتاً حساس ۴- آبخوان‌های

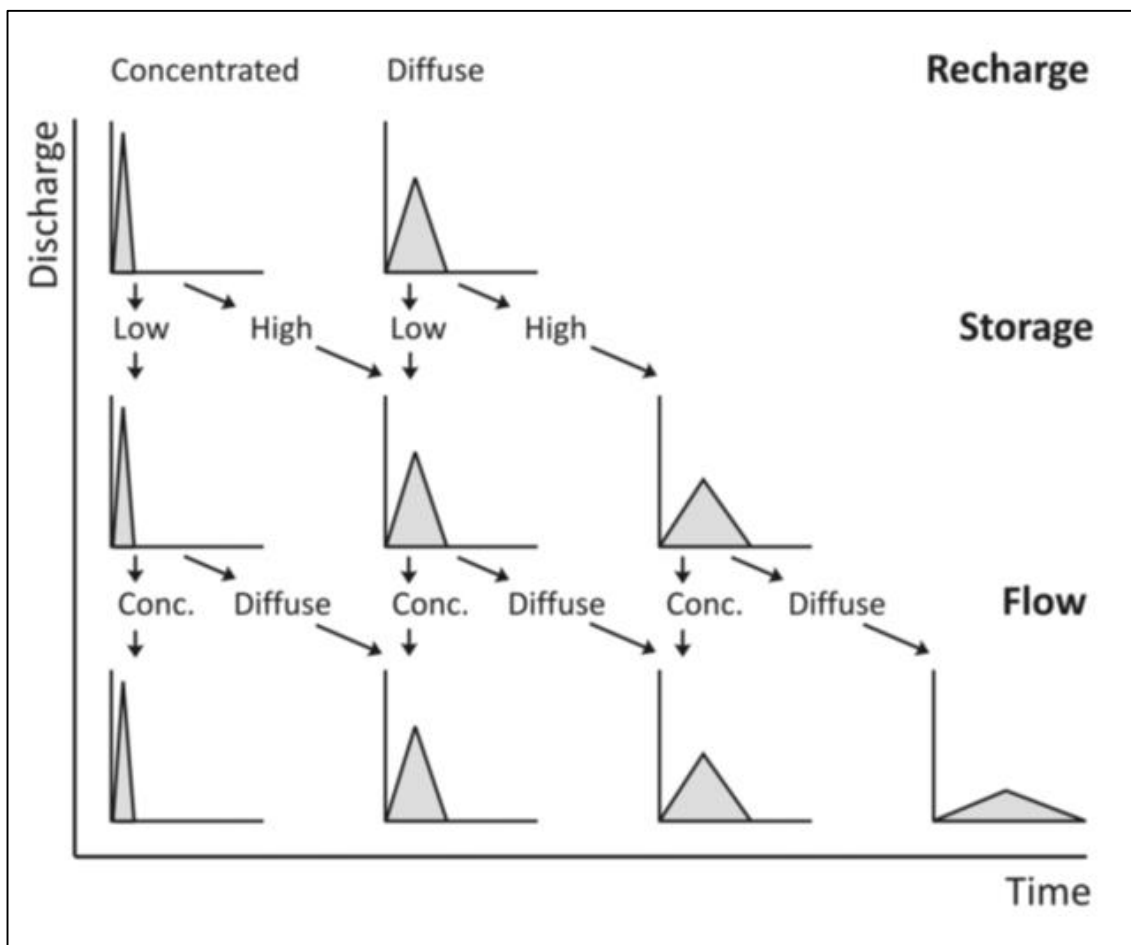


غیرکارستی با حساسیت کم ۵- غیر آبخوان تقسیم بندی نموده است. شکل (۲-۴) تقسیم بندی آبخوانها را بر اساس تغذیه ذخیره و نوع جریان نشان می دهد.

همچنین این دو محقق (Hobbs and Smart 1986) تاثیر دوگانه تغذیه و ذخیره را بر روی هیدروگراف جریان بررسی نمودند. مطابق با این بررسی هر چه تغذیه از حالت متمرکز به حالت افشان و همچنین هرچه میزان ذخیره آبخوان بیشتر باشد جریان به سمت افشان و بر عکس هرچه تغذیه به صورت متمرکز و میزان ذخیره کمتر باشد جریان به حالت مجرای نزدیک می گردد. شکل (۲-۵) تاثیر توام تغذیه و ذخیره در نوع جریان را نشان می دهد.



شکل ۲-۴- تقسیم بندی آبخوان های کارستی بر اساس تغذیه، ذخیره و نوع جریان (Hobbs and Smart 1986)



شکل ۲-۵- تاثیر دو گانه تغذیه و ذخیره در نوع جریان (Hobbs and Smart 1986)

## ۲-۳- نشت از سدهای کارستی

ایجاد سد در سازندهای کارستی دارای خطر میزان نشت آب بیش از اندازه از مخزن می‌باشد که وجود پیچیدگی‌های کارست باعث پیچیده شدن بیشتر این موضوع می‌گردد. به همین دلیل نیاز است روش‌های مختلف بررسی هیدروژئولوژی برای مشخص شدن وضعیت کارستی شدن محدوده مخزن و محور سدها در مناطق کارستی بکار گرفته شود.

کارست از جمله آسیب‌پذیرترین پدیده‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی در جهان برای طراحی و توسعه پروژه‌های مهندسی از جمله سدها می‌باشد (Gutierrez et al. 2014). نشت از مخازن و تکیه گاههای سدها در تعداد زیادی از سدها در مناطق کارستی سرتاسر جهان گزارش شده است

(Milanovic 2004). نقشه‌های هیدروژئولوژی و ژئومورفولوژی دقیق با بکار بردن روشهای سنجش از دور، ترکیب روشهای ژئوفیزیک و ژئوتکنیک، آزمایشهای ردیابی و کنترل کردن طولانی مدت سطح آب زیرزمینی نیازهای اساسی در مطالعات نشت از سدها می‌باشد (Milanovic 2004).

محمدی و رئیسی (۲۰۰۵) سه مرحله برای بررسی میزان نشت از سدها در مناطق کارستی پیشنهاد می‌کنند که شامل: الف: شناخت هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی محدوده ب: تعریف عملکرد و سیستم کارست بعد از ایجاد مخزن و ج: ارزیابی پتانسیل نشت می‌باشد.

کرمی و همکاران (۱۳۹۲) کاربرد ردیابها در بررسی فرار و نشت آب از مخازن و تکیه گاههای سدها، مطالعات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی کارست و بررسیهای اکتشافی را جهت تعیین مدل مفهومی کارست پیشنهاد مطالعات ردیابی ذکر کرده‌اند.

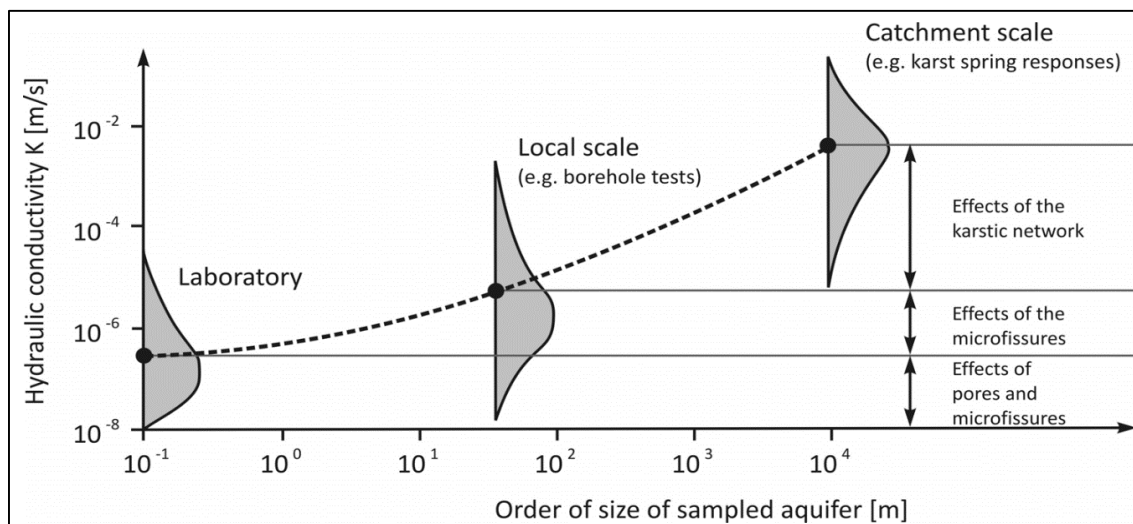
به طور کلی برای شناسایی منشاء و مسیرهای نشت از سدها از تکنیک‌های مختلفی استفاده می‌شود. برای مثال استفاده از پاسخ سطح آب زیرزمینی و تخلیه چشمه نسبت به تغییرات تراز آب در مخزن (Sahugillo 1985, Turkmen 2003, Bonacci and Bonacci 2013)، استفاده از آزمایشهای ردیابی برای تعیین جهت جریان و سرعت جریان قبل از احداث و تعیین میزان نشت از مخزن و تکیه‌گاهها بعد از احداث سد (Quinlan 1985, Turkmen *et al.* 2002, Mozafari and Raeisi 2015)، استفاده از مطالعات هیدروشیمیایی منابع آب برای تعیین نوع جریان، منشاء جریانهای زیرزمینی و انجام تحلیل‌های هیدروژئوشیمیایی (Karimi 2003, Torak *et al.* 2006, and Al-Omsh *et al.* 2008)، استفاده از روشهای مختلف ژئوفیزیکی برای تعیین مدل زمین‌شناسی محدوده که زیربنای تفاسیر هیدروژئولوژی است و بررسی پدیده‌های زمین‌شناسی به صورت پیوسته در محدوده ساختگاه (Ginther and Charlton 2009, Bedrosian *et al.* 2012, Nassimi and Mohammadi 2016)، استفاده از ردیابهای ایزوتوپی پایدار و ناپایدار برای تبیین شرایط هیدروژئولوژی قبل از احداث مخزن سد، تعیین ارتباط هیدرولیکی جریانهای آب زیرزمینی و مشخص کردن مکانیسم نشت از مخزن به

سمت پایین دست (Gunay *et al.* 1995, Crilley and Torak 2002, and Laksiri 2007)، استفاده از حفاریهای اکتشافی و انجام آزمایش‌های نفوذپذیری برای روشن شدن شرایط هیدروژئولوژی و خطر احداث سد در سازندهای کارستی (Zogovic 1993, Jarvis *et al.* 2003, Milanovic *et al.* 2010). با توجه به اینکه هدایت هیدرولیکی مهمترین پارامتر در تحلیل نشت به حساب می‌آید و میزان آن در مقیاس‌های مختلف دارای دامنه تغییرات زیادی است. در این مطالعات علاوه بر اثر مقیاس بر میزان هدایت هیدرولیکی سازند جهرم-آسماری تاثیر این اثر بر تحلیل نشت از مخازن کارستی بررسی گردید.

## ۲-۴- اثر مقیاس در محیط‌های کارستی و غیر کارستی

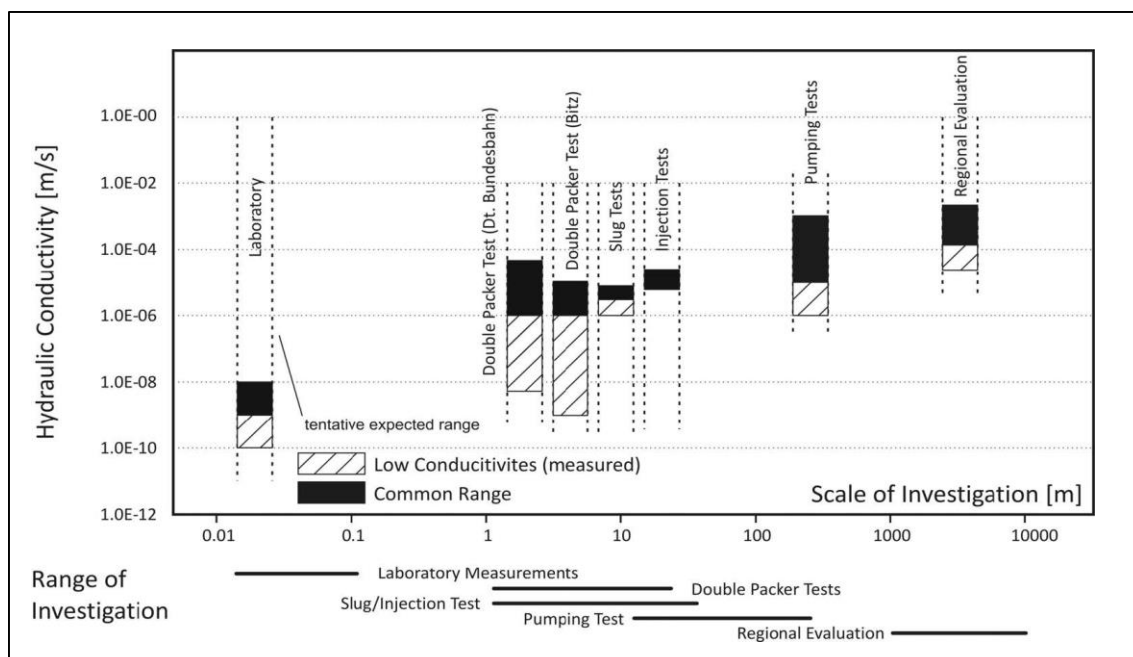
آهک‌های ناحیه‌ای به طور معمول ناهمسو و ناهمگن می‌باشد و ناهمگنی آبخوان‌های کارستی معمولاً با هدایت هیدرولیکی مشخص می‌گردد (Castany 1984, Karami 2002). وجود تخلخل ثانویه و شبکه‌های جریان باعث ناهمگنی کارستی می‌گردد. به همین دلیل میزان هدایت هیدرولیکی با تغییر مقیاس تغییرات بسیار زیادی را شامل می‌شود. در این شرایط تعیین دقیق مقدار هدایت هیدرولیکی کارستی با توجه به مطالعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی و مقیاس مناسب مخزن، در تحلیل نشت اهمیت بسزایی دارد.

کرالی (Kiraly 1975) با مطالعه بر روی آبخوان‌های کارستی و درز و شکافی کوه جورا (Jura) در سوئیس بیان کرد افزایش کوچک تا محلی هدایت هیدرولیکی به علت شکستگی‌ها ایجاد می‌گردد و افزایش هدایت هیدرولیکی در مقیاس ناحیه‌ای به علت شبکه کارستی مجرای ایجاد می‌گردد (شکل ۲-۶).



شکل ۲-۶- اثر مقیاس در میزان هدایت هیدرولیکی آبخوان کارستی (Király 1975)

سوتر (Sauter 1991) هدایت هیدرولیکی در کارست را با استفاده از روشهای مختلف محاسبه نمود و نتیجه گرفت هدایت هیدرولیکی با افزایش مقیاس در محیطهای کارستی بالا می‌رود. در بین روشهای مختلف کمترین هدایت هیدرولیکی با استفاده از روشهای آزمایشگاهی و بیشترین هدایت هیدرولیکی از ارزیابی مقیاس حوضه حاصل می‌گردد (شکل ۲-۷).



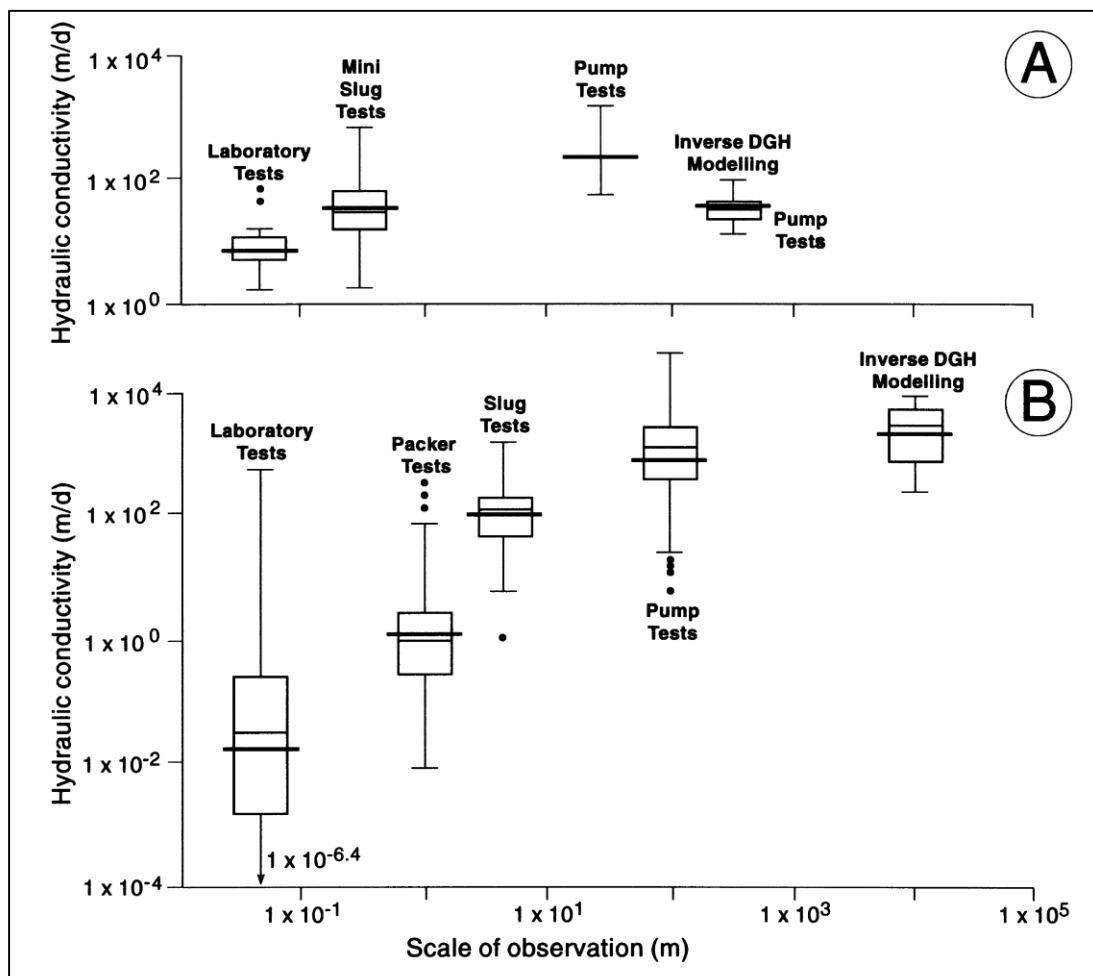
شکل ۲-۷- ارتباط بین روش آزمایش، مقیاس آزمایش و هدایت هیدرولیکی آبخوان کارست (Sauter 1991)

کلوزر (Clouser 1992) انواع مختلف از سنگهای بلورین را آنالیز نمود و بیان نمود نفوذپذیری این سنگها می‌تواند از مقیاس کوچک (Small scale) تا محلی (Local scale) به سه برابر افزایش یابد ولی از مقیاس محلی تا ناحیه‌ای (Regional scale) تغییر چندانی نمی‌کند.

راوی تو و چرکاور (Rovey II and Cherkauer 1995) هدایت هیدرولیکی را در ۵ واحد هیدرواستراتیگرافی کربناته در مقیاس‌های مختلف اندازه‌گیری کردند و دریافتند هدایت هیدرولیکی با مقیاس به طور مستقیم ارتباط دارد. این دو محقق در همان سال (Rovey II and Cherkauer 1995) دریافتند اثر مقیاس با محیط زمین‌شناسی و تخلخل ثانویه ارتباط دارد. به این ترتیب که در رسوبات با تخلخل ثانویه نرخ افزایش هدایت هیدرولیکی بیشتر از رسوبات با تخلخل اولیه می‌باشد به همین دلیل در محیط‌های متراکم هدایت هیدرولیکی ۲ تا ۵۰۰ برابر آزمایش اسلاگ و در محیط‌های درزه‌دار نرخ افزایش معمولاً ضریبی از ۳ و برای محیط‌های کارستی نرخ افزایش بدون محدودیت می‌باشد.

براون (Brown 1998) پارامترهای آبخوان‌های کارستی را در مقیاس‌های مختلف جمع‌آوری نمود این محقق اثر ناهمگنی را با روش‌های مختلف اندازه‌گیری بررسی کرد در این مطالعات از آزمایش‌های مقیاس کوچک (آزمایش لوزن) تا محلی (Pumping test) استفاده و ناهمگنی محیط کارستی بررسی گردید.

ویتاکرا و اسمارت (Whitakera and Smart 2000) با مطالعه بر روی آبخوان لوکایان (Lucayan) در ایسلند دریافتند اثر مقیاس در این آبخوان از مقیاس‌های کمتر از آزمایش پمپاژ به صورت خطی افزایش می‌یابد و به نمونه‌های کمتر از یک متر محدود می‌گردد.



شکل ۲-۸- اثر مقیاس بر میزان هدایت هیدرولیکی در آهکهای کارستی منطقه لوکایان

میک و هوورکا (Mace and Hovorka 2000) از روشهای مختلف برای تعیین هدایت هیدرولیکی در آبخوان ادوارد (Edward) تگزاس استفاده کردند. آنها دریافتند هدایت هیدرولیکی ماتریکس آهک ۰/۰۱۳ متر بر روز و در تستهای گمانه‌ای ۳/۳ متر بر روز که ۲۵۰ برابر بزرگتر از ماتریکس می‌باشد. هالیهان و همکاران (Halihan *et al.* 2001) از اطلاعات نفوذپذیری در مقیاس‌های مختلف (آزمایشگاهی، محلی و ناحیه‌ای) در آبخوان ادوارد (Edwards) در تگزاس برای ارزیابی هدایت هیدرولیکی در مقیاس بزرگ و مقیاس‌های کوچک استفاده نمودند. آنها نتیجه گرفتند هدایت هیدرولیکی با اثر مقیاس افزایش پیدا می‌کند و در صورت افزایش نیافتن دلیل آن مرتبط نبودن کامل شکستگی‌ها و مجاری با هم می‌باشد.

دیلون و همکاران (Dillon *et al.* 2001) مطرح کردند استفاده از اطلاعات گمانه‌ای برای تعیین میزان نفوذپذیری تخمین‌های کمی نسبت به واقعیت توده ارائه می‌دهند و دلیل آن در برنگرفتن فضاهای خالی است که در حجم آزمایش قرار نگرفته است.

سوتر (Sauter 2005) روشهای مختلف آزمایش تعیین تراوایی در مقیاس‌های کوچک تا ناحیه‌ای را در محیط کارستی مورد ارزیابی قرار داد و بیان نمود روابط مختلف هدایت هیدرولیکی و مقیاس می‌تواند ناشی از شکل و رتبه شبکه سیستم زهکشی کارستی باشد.

گالواو و همکاران (Galvao *et al.* 2016) داده‌های نفوذپذیری را بر روی آبخوان کارستی لاگواس (Iagoas) در برزیل جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل کردند تفسیر داده‌ها نشان دهنده افزایش نفوذپذیری از مقیاس کوچک به مقیاس محلی و کاهش از مقیاس محلی به منطقه‌ای است. آنها نتیجه گرفتند کاهش اثر مقیاس از مقیاس محلی به ناحیه‌ای ناشی از وجود کارست به صورت محلی و در امتداد ساختارهای تکتونیکی می‌باشد که باعث توسعه کم تخلخل ثانویه در این آبخوان شده است.

مک‌میلان و همکاران (McMillan *et al.* 2018) عدم قطعیت داده‌های هیدرولوژیکی را در پنج دسته، عدم اطمینان اندازه‌گیری، عدم قطعیت ناشی از تحلیل، عدم قطعیت درون‌یابی، عدم قطعیت اثر مقیاس و عدم قطعیت مدیریت داده‌ها تقسیم بندی نمودند. آنها نتیجه گرفتند در مطالعات هیدروژئولوژی، شناخت و کم کردن هر یک از این عدم قطعیت‌ها می‌تواند منجر به تجزیه و تحلیل ریسک، کاهش هزینه‌ها و نتایج شفاف شود که باعث افزایش اعتماد مدیران عمومی و آب می‌شود.

تحقیقات دیگر هیدروژئولوژی نیز وجود دارد که ارتباط اثر مقیاس با میزان هدایت هیدرولیکی را در سنگهای آذرین و درزو شکافی (Marchul *et al.* 2004, Illman 2007) و سازندهای رسوبی غیرکربناته (Lundon *et al.* 2001, Kurikami *et al.* 2008, Chapuis 2013) بررسی نموده است. این تحقیقات همگی ارتباط افزایش میزان هدایت هیدرولیکی با افزایش مقیاس در سنگهای ناهمگن و ناهمسو را به شکل‌های مختلف بیان کرده‌اند.



### ۳- فصل سوم: روش انجام کار

در این فصل روند مطالعات انجام شده جهت تاثیر مقیاس بر پارامترهای هیدروژئولوژی و میزان نشت از سد به طور مختصر ارائه می‌گردد. به طور کلی در انجام این تحقیق کارهای زیر انجام شده است.

- جمع آوری آمار و اطلاعات و مطالعات انجام شده در ساختگاه سد بهشت‌آباد
- تحلیل نوسانات سطح آب گمانه‌ها
- تعیین حوضه آبگیر چشمه‌ها و نوع جریان آبخوان
- بررسی هیدروشیمی گمانه‌ها، چشمه‌ها و رودخانه
- مطالعات ایزوتوپی منابع آب محدوده
- تحلیل شرایط هیدروژئولوژی کارست در جناح راست مخزن
- بررسی اثر مقیاس بر میزان هدایت هیدرولیکی در آهکهای جهرم - آسماری
- بررسی تاثیر مقیاس در برآورد میزان نشت

#### ۳-۱- جمع آوری آمار و اطلاعات و مطالعات انجام شده در ساختگاه سد بهشت‌آباد

جمع آوری آمار و اطلاعات با هدف بررسی هیدروژئولوژی و تاثیر اثر مقیاس آهکهای جهرم آسماری جناح راست مخزن سد بهشت‌آباد انجام گردید. برای انجام مطالعات هیدروژئولوژی سطح آب ۲۷ گمانه اکتشافی بر روی تاقدیس جناح راست مخزن به صورت ماهیانه برداشت گردید. همزمان مظهر چشمه‌ها بسترسازی و دبی مهمترین چشمه در جناح راست (چشمه خدرزنده) و جناح چپ (SPL) به

صورت هفتگی با استفاده از میکرومولینه برداشت گردید. نمونه برداری هیدروشیمی از چشمه‌ها، گمانه‌ها و رودخانه به صورت ماهیانه در طول یک سال آبی انجام و آنالیز گردید.

در مطالعات ایزوتوپی از چشمه خدرزنده و یک گمانه (OB5) به صورت ماهیانه نمونه برداری انجام گردید. نمونه برداری بارش به صورت تجمعی در ارتفاعات مختلف در فصل تر بصورت ماهیانه برداشت شد. همچنین از رودخانه و سایر گمانه‌ها و چشمه‌ها در دو نوبت (فصل خشک و تر) نمونه برداری انجام و به آزمایشگاه انرژی اتمی ایران ارسال گردید.

برای تعیین صحیح اثر مقیاس بر هدایت هیدرولیکی آهکهای جهرم-آسماری، روشهای مختلف آزمایش تعیین هدایت هیدرولیکی در منطقه انجام گردید. در مقیاسهای کوچک (Sub-local) برای تعیین میزان هدایت هیدرولیکی آزمایش لوژن تمامی اطلاعات مربوط در ۲۷ گمانه در جناح راست مخزن جمع آوری گردید. در این گمانه‌ها حدود ۱۴۸۵ تست لوژن با طول مقاطع اندازه‌گیری عمدتاً ۵ متری و به صورت پیوسته انجام گرفته است. همچنین آزمایش اسلاگ در ۷ گمانه در محدوده‌های با عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی پایین و سطح مقطع ۳ تا ۵ متر انجام گردید. برای تعیین میزان هدایت هیدرولیکی در مقیاس محلی دبی چشمه و سطح آب نزدیکترین گمانه به چشمه همزمان در طول دو سال آبی به صورت هفتگی اندازه‌گیری گردید. در مقیاس ناحیه‌ای تعیین میزان هدایت هیدرولیکی با استفاده از روشهای ردیابی رنگی، منحنی فرود و روش گرادیان (Gradient approach) انجام شد. ردیاب رنگی با ماده رنگی اورانین (فلئورسین سدیم) و تزریق داخل گمانه صورت گرفته و نمونه برداری و آنالیز مربوط به این ردیابی دو سال و نیم از گمانه‌ها، چشمه‌های پایین دست و رودخانه به طول انجامیده است. برای روش منحنی فرود و گرادیان هیدرولیکی سطح آب گمانه‌ها به صورت ماهیانه و هفتگی و دبی چشمه خدرزنده به صورت هفتگی اندازه‌گیری گردید.

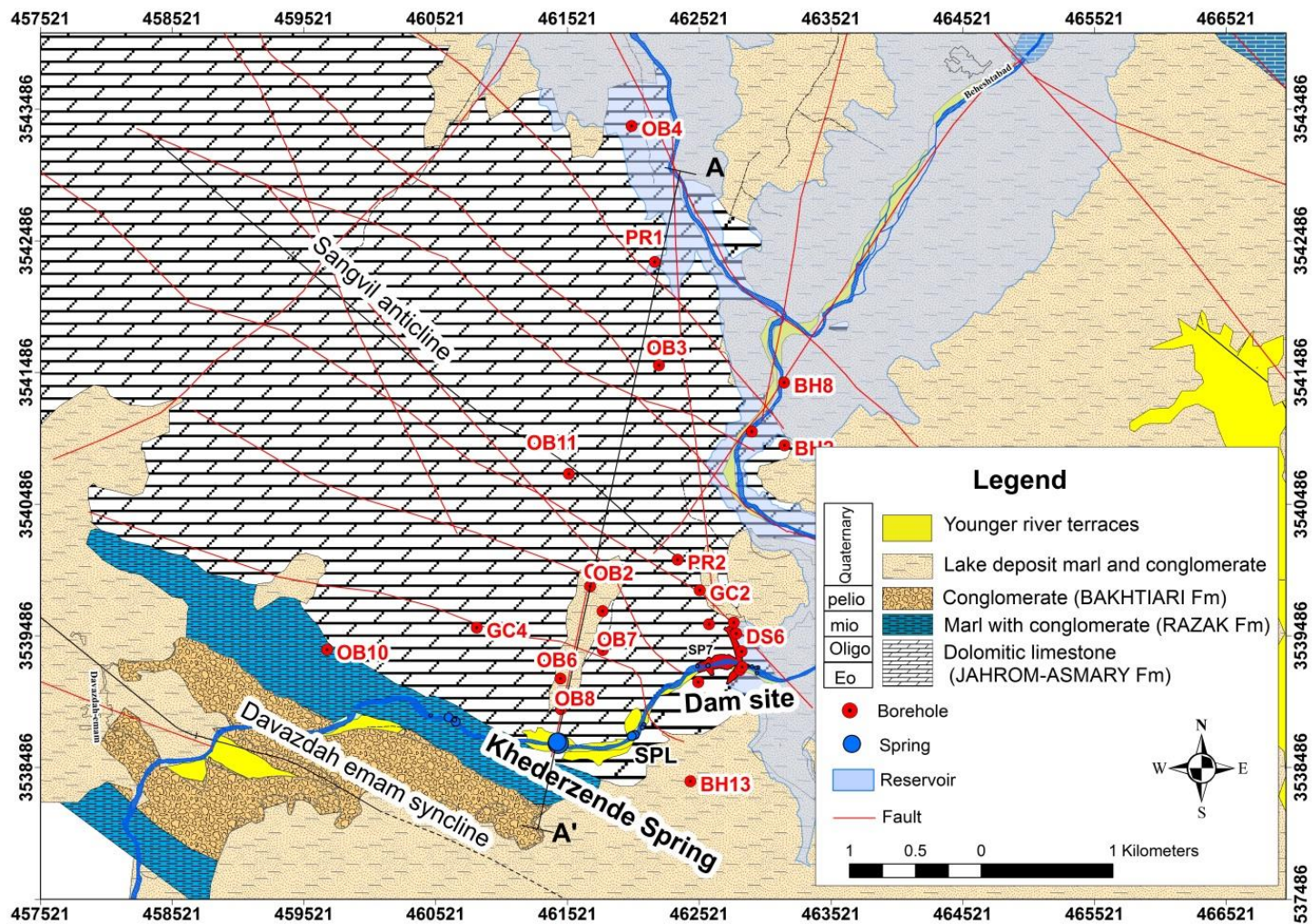
علاوه بر موارد یاد شده، مطالعات مرحله اول سد شامل مطالعات ژئوتکنیک، هواشناسی، هیدرولوژی و زمین‌شناسی سد بهشت‌آباد جمع آوری و استفاده گردید.

### ۲-۳- تحلیل نوسانات سطح آب گمانه‌ها

۲۷ گمانه در آهکهای جناح راست مخزن با اهداف مختلف حفاری شده است بیشترین عمق حفاری گمانه مربوط به گمانه OB<sub>11</sub> با عمق ۵۰۰ متر و کمترین عمق گمانه مربوط به گمانه DT<sub>2</sub> با عمق ۷۵ متر می‌باشد. موقعیت این گمانه‌ها در شکل (۱-۳) نمایش داده شده است. سطح آب این گمانه‌ها در یال شمالی و جنوبی به صورت ماهیانه اندازه‌گیری گردید (شکل ۲-۳). همچنین با توجه به اینکه اطلاعات دقیقتر برای تعیین هدایت هیدرولیکی در مقیاس محلی نیاز بود از گمانه OB<sub>8</sub> که نزدیکترین گمانه به چشمه خدرزنده است، تراز سطح آب به صورت هفتگی در طول دو سال آبی اندازه‌گیری شد. در نهایت با استفاده از سطح آبهای برداشت شده هیدرولیک جریان آب زیرزمینی تاقدیس و نحوه جریان آب زیرزمینی در حال حاضر بررسی گردید. همچنین با توجه به جریانهای موجود جریان آب زیرزمینی پس از احداث مخزن مورد مطالعه قرار گرفت.

### ۳-۳- تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌ها و نوع جریان آبخوان

برای تحلیل هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی پایین دست محور چشمه خدرزنده و چشمه جناح چپ (SPL) برای اندازه‌گیری دبی بستر سازی شد. تغییرات دبی این چشمه‌ها به صورت هفتگی و در طول سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۶-۱۳۹۵ بررسی گردید (شکل ۳-۳). مطابق با اندازه‌گیری‌های انجام شده چشمه خدرزنده دارای حداکثر آبدهی ۶۳۰ لیتر بر ثانیه و حداقل ۳۴۰ لیتر بر ثانیه و به طور متوسط ۴۳۸ لیتر بر ثانیه است. همچنین چشمه جناح چپ (SPL) با حداکثر آبدهی ۸۰ لیتر بر ثانیه و حداقل ۱۰ لیتر بر ثانیه و به طور متوسط ۳۸ لیتر بر ثانیه است. با استفاده از اطلاعات برداشت شده حوضه آبرگیر چشمه‌های پایین دست مشخص گردید و نوع جریان کارستی در آبخوان تاقدیس مورد مطالعه قرار گرفت.



شکل ۳-۱- موقعیت گمانه های یال شمالی و جنوبی تاقدیس سنگویل



شکل ۳-۲- اندازه‌گیری سطح آب گمانه‌ها در آهکهای چهارم - آسماری



شکل ۳-۳- بستر سازی چشمه‌های پایین دست جهت اندازه‌گیری

### ۴-۳- بررسی هیدروشیمی گمانه‌ها، چشمه‌ها و رودخانه

برای تعیین نوع جریان با استفاده از پارامترهای فیزیکوشیمیایی از چشمه خدرزنده (SP<sub>5</sub>) و چشمه SP<sub>L</sub>، گمانه‌های PR1 و PR2 در یال شمالی، گمانه‌های OB5 و OB7 در یال جنوبی، رودخانه در بالادست چشمه‌ها (R1) و رودخانه در پایین دست چشمه‌ها (R2) به صورت ماهیانه اندازه‌گیری صورت گرفت (شکل ۴-۳). همچنین پارامترهای هدایت الکتریکی، اسیدیتته و دما به صورت صحرایی اندازه‌گیری گردید. موقعیت این نقاط در شکل (۳-۵) نمایش داده شده است. با استفاده از اندازه‌گیری‌های انجام شده نوع جریان کارستی و ارتباط هیدرولیکی منابع آب در شرایط حال حاضر مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۴-۳- نحوه نمونه‌برداری هیدروشیمیایی از گمانه‌ها



شکل ۳-۵- نحوه اندازه‌گیری پارامترهای صحرایی در گمانه‌های تاقدیس

### ۳-۵- مطالعات ایزوتوپی منابع آب محدوده

برای تعیین منشأ بزرگترین چشمه پایین دست سد و ارتباط هیدرولیکی یال شمالی و جنوبی تاقدیس از ایزوتوپ‌های محیطی منابع آب محدوده استفاده گردید. در همین راستا نمونه‌برداری از بارش به صورت تجمعی و تک بارش در ارتفاعات مختلف حوضه آبرگیر چشمه، در فصل تر در ۵ محدوده به صورت ماهیانه برداشت شد. تعداد ۳۵ نمونه از بارندگی به صورت تجمعی در ارتفاعات مختلف و ۵ نمونه از یک بارش در ارتفاعات مختلف برداشت گردید. همچنین از بارشهای برف صورت گرفته در محدوده ۹ نمونه، در ارتفاعات و بارشهای مختلف برداشت گردید. نحوه استتار نمونه‌گیر ایزوتوپی و چگونگی نمونه‌گیری در شکل (۳-۶) تا شکل (۳-۸) نمایش داده شده است. همچنین از چشمه خدرزنده به صورت ماهیانه (۱۲ نمونه) و از گمانه‌های یال شمالی و یال جنوبی تاقدیس ۲۰ نمونه ایزوتوپی در حداقل و حداکثر سطح ایستابی برداشت گردید. از رودخانه نیز در ۴ محدوده در بالادست چشمه و در حداقل و حداکثر آبدهی نمونه‌برداری انجام گردید و به آزمایشگاه انرژی اتمی

ایران ارسال گردید (شکل ۳-۹). موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در طول تاق‌دیس مطابق شکل (۳-۳-۱۰) می‌باشد. برای آنالیز ایزوتوپی آب از دستگاه طیف‌سنجی لیزری (Spectroscopy-Laser LGR) استفاده گردید. این دستگاه ساخت شرکت (Los Gatos Research) است و بر پایه تکنولوژی (OA- ICOS (Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy) عمل می‌نماید. اساس کار این دستگاه بر جداسازی طیف‌های منعکس شده از آینه‌هایی با قدرت انعکاس بالا که درون حفراتی تعبیه شده، می‌باشد. استفاده از آینه‌هایی با چنین قابلیت، به طور مؤثری طول خط سیر پرتو نور را تا حدود ۳۰۰۰ متر گسترش می‌دهد که از ملزومات کار برای طیف‌نمایی لیزری می‌باشد. همچنین این خط سیر نوری طولانی ایجاد شده، سبب افزایش قدرت جذب می‌گردد (Lis et al. 2008). طبق مدل اتمی بور، اتم‌ها وقتی فوتون‌ها را جذب می‌کنند که انرژی فوتون درست برابر با اختلاف انرژی دو تراز انرژی اتم باشد. بنابراین طول موج دستگاه بایستی نسبت به جذب طیفی نمونه مورد نظر و ایزوتوپولوگ‌های آن که در اینجا  $H_2O$  می‌باشد، تنظیم گردد. در نتیجه این دستگاه به طور اختصاصی تنها جهت بررسی نسبت‌های ایزوتوپی مولکول‌های آب عمل می‌نماید (ابوکاظمی ۱۳۸۱). بر اساس نتایج آنالیز شده ابتدا خط آب جوی محدوده مورد مطالعه تعیین و سپس بر اساس نتایج آنالیز مقادیر  $\delta^{18}O$  و  $\delta D$  در نمونه‌های جمع‌آوری شده ارتباط بین رودخانه، آبخوان کارستی و چشمه خدرزنده بررسی گردید. در این مطالعات با استفاده از ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار و تحلیل موازنه جرمی سهم تغذیه آبخوان از هر یک از منشاءهای تغذیه‌ای و ارتباط هیدرولیکی منابع آب مشخص گردید در نهایت با مشخص شدن ارتباطها در حال حاضر، شرایط پس از احداث مخزن تحلیل گردید.





شکل ۳-۶- نحوه استتار نمونه گیر بارش در ارتفاعات



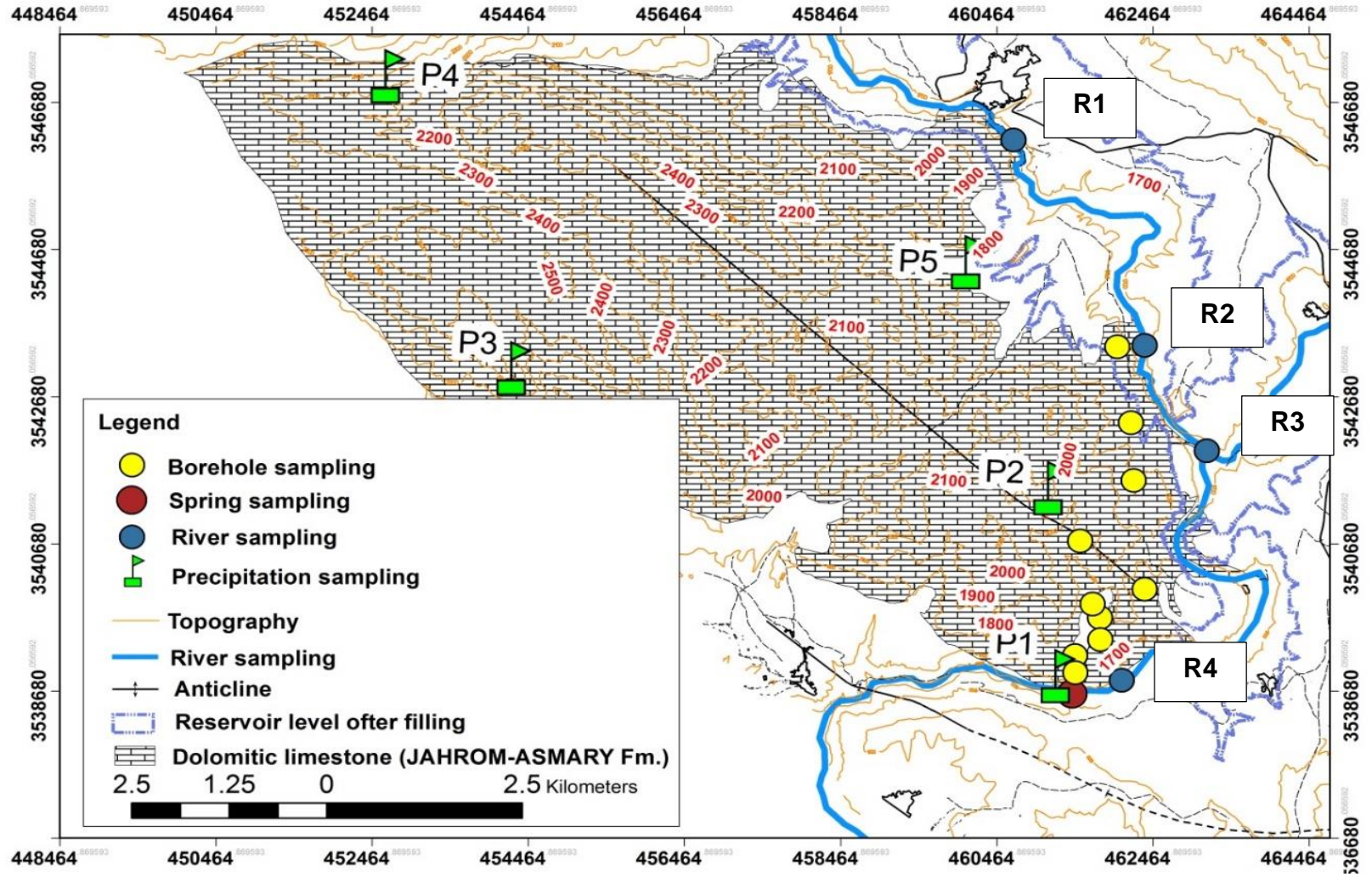
شکل ۳-۷- نحوه برداشت نمونه‌های ایزوتوپی بارش



شکل ۳-۸- نمونه‌گیری و برداشت پارامترهای صحرایی نمونه‌های بارش



شکل ۳-۹- بسته بندی و ارسال نمونه ها به آزمایشگاه



شکل ۳-۱۰- موقعیت محدوده‌های نمونه‌برداری ایزوتوپی

### ۳-۶- تحلیل شرایط هیدروژئولوژی کارست محدوده

برای تعیین اثر مقیاس بر میزان نفوذپذیری و میزان نشت در ابتدا مطالعات هیدروژئولوژی کارست محدوده انجام گردید. در این راستا با استفاده از اطلاعات و اندازه‌گیری‌های انجام شده بررسی‌های مختلف هیدروژئولوژی برای تعیین ارتباط هیدرولیکی یال شمالی و جنوبی تاقدیس سنگویل صورت گرفت. از سطح آب آبخوان سازند جهرم - آسماری در جناح راست برای تعیین ارتباط هیدرولیکی و نوع جریان کارستی استفاده گردید. با استفاده از تخلیه چشمه‌ها در یال جنوبی و پایین دست محور سد نیز نوع جریان و حوضه آبرگیر چشمه‌ها مشخص گردید. همچنین از تغییرات پارامترهای ایزوتوپی و هیدروشیمی آبخوان در جناح راست مخزن نوع جریان و ارتباط هیدرولیکی منابع آب در شرایط فعلی و زمان آبرگیری مخزن مشخص گردید. در نهایت با استفاده از کل مطالعات انجام شده ارتباط هیدرولیکی منابع آب در شرایط فعلی (قبل از احداث مخزن) مشخص گردید و مدل جریان در شرایط احداث سد مخزنی بهشت‌آباد پیش‌بینی گردید. همچنین با استفاده از این مطالعات مقیاس درگیر مخزن و نحوه محاسبه نشت از مخزن سد بهشت‌آباد در مقیاس صحیح مورد مطالعه قرار گرفت.

### ۳-۷- بررسی اثر مقیاس در آهک‌های جهرم آسماری

در گستره‌های کارستی مقدار هدایت هیدرولیکی با مقیاس رابطه مستقیم دارد. برای تعیین اثر مقیاس بر میزان هدایت هیدرولیکی در آهک‌های جهرم-آسماری در جناح راست مخزن سد بهشت‌آباد، روشهای آزمایش تعیین هدایت هیدرولیکی در مقیاس‌های مختلف انجام گردید. در این راستا هدایت هیدرولیکی در سه مقیاس کوچک، محلی و ناحیه‌ای در آهک‌های کارستی جناح راست مخزن آزمایش و محاسبه گردید. در مقیاسهای کوچک (Sub-local) از اطلاعات آزمایشهای لوژن و آزمایش اسلاگ استفاده گردید. در مقیاس محلی از روش اندازه‌گیری همزمان دبی چشمه خدرزنده و سطح آب گمانه OB5 روی چشمه با فرضیات معادلات چاه پمپاژ استفاده شد. در مقیاس ناحیه‌ای تعیین میزان هدایت

هیدرولیکی با استفاده از روشهای ردیابی رنگی، منحنی فرود و گرادیان هیدرولیکی (Gradient approach) انجام شد ردیاب رنگی با ماده رنگی اورانین (فلئورسین سدیم) و تزریق داخل گمانه صورت گرفته است با استفاده از سرعت محاسبه شده در آزمون ردیابی، هدایت هیدرولیکی در این روش محاسبه گردید. در روش منحنی فرود از اطلاعات اندازه‌گیری دبی چشمه خدرزنده در پایین دست محور و تعیین حوضه آبرگیر چشمه و مرزهای جریان برای تعیین هدایت هیدرولیکی استفاده گردید. در روش گرادیان هیدرولیکی با استفاده از خطوط ایزوپیز ترسیم شده بر اساس سطح آب گمانه‌ها و دبی خروجی چشمه‌ها میزان هدایت هیدرولیکی با استفاده از معادله داری محاسبه شد. در نهایت اثر مقیاس آهکهای جهرم - آسماری در جناح راست مخزن سد بهشت آباد تعیین گردید. با استفاده از اطلاعات هدایت هیدرولیکی محاسبه شده در روشهای مختلف، عدم قطعیت ناشی از اثر مقیاس در سازند جهرم - آسماری مشخص گردید. بر همین اساس تفاوت مقدار هدایت هیدرولیکی این آهکها در مقیاس کوچک نسبت به مقیاس محلی و ناحیه‌ای مشخص شد. همچنین شعاع تاثیر آزمایش برای تعیین هدایت هیدرولیکی معادل توده کارستی مشخص گردید.

### ۳-۸- بررسی اثر مقیاس در برآورد میزان نشت

برای تعیین مقدار نشت از نرم افزار Seep2D در محیط GMS استفاده شد و مقدار نشت از مخزن در یال شمالی به سمت پایین دست و یال جنوبی محاسبه گردید. برای شبکه‌بندی مدل تعداد ۷۴۸ گره و ۱۳۱۱ المان در نظر گرفته شده است همچنین در این مدل سطح مقطع در تماس با مخزن و سطح مقطع رودخانه و تراز چشمه‌های پایین دست به عنوان مرز جریان با بار ثابت در نظر گرفته شده است و ۵۰ متر زیر تراز چشمه (۱۵۴۵) به عنوان مرز بدون جریان (Noflow boundry) فرض گردید. با استفاده از این مدل و هدایت هیدرولیکی در مقیاسهای مختلف میزان نشت در هر مقیاس برآورد گردید.



## ۴- فصل چهارم: هیدروژئولوژی محدوده سد

برای تعیین اثر مقیاس در آهکهای جهرم-آسماری تاقدیس سنگویل و تحلیل نشت از جناح راست مخزن سد بهشت‌آباد، مطالعات هیدروژئولوژی مرتبط با موضوع انجام گردید. این مطالعات شامل بررسی‌های اکتشافی، بررسی سطح آب گمانه‌ها، حوضه آبرگیر و هیدروگراف چشمه‌های پایین دست، مطالعات هیدروشیمی و ایزوتوپی گمانه‌ها، چشمه‌ها و رودخانه می‌باشد.

### ۴-۱- هیدروژئولوژی کارست سازند جهرم-آسماری

با توجه به اینکه جناح راست مخزن به طور متناوب با آهکهای آسماری و رسوبات دریاچه‌ای تماس دارد، عمده مسایل هیدروژئولوژی مخزن مربوط به تماس مخزن با آهکهای جهرم-آسماری این محدوده می‌باشد. در این سازند سیماهای سطحی کارست پیشرفته از قبیل آب‌فروچاله (Sinkhole)، چاه قائم (Shaft)، پولیه (polje)، وجود ندارد و آثار کارست اکثراً به صورت کارن‌های شکافی (Cracked Karrens) است (شکل ۴-۱). در مورد آثار هیدرولوژیک کارست نیز می‌توان به وجود چشمه‌های دائمی در پایین دست رودخانه و در محل تنگه شیخ‌محمود اشاره کرد.

آبخوان تاقدیس سنگویل در یال جنوبی به مرز نفوذناپذیر سازند رازک و در یال شمالی توسط مارنهای دریاچه‌ای و رودخانه محدود می‌گردد. مرزهای فیزیکی نفوذناپذیر موجود منجر به این شده‌اند تا بخش عمده تغذیه آبخوان به صورت درجا (Autogenic) و از طریق نفوذ مستقیم بارندگی و آب ذوب برف توسط شبکه‌های درزه و شکستگی به داخل رخنمون سنگ‌های کربناته یال شمالی و جنوبی تاقدیس

صورت گیرد. البته شواهد پیرومتریک حاکی از این است که در یال شمالی تاقدیس و در امتداد رودخانه کوه‌رنگ و بخشی از رودخانه بهشت‌آباد تا حوالی محور سد سطح آب زیرزمینی از حدود ۲۸ تا ۹ متر پایین‌تر نسبت به تراز رودخانه قرار گرفته است. چنین شرایطی موجب شده تا تراز رودخانه در یال شمالی سطح اساس فرسایش نباشد و آب‌های جاری در سطح مقطع رودخانه آبخوان کربناته را تغذیه کنند. بررسی‌های هیدروژئولوژی نشان دهنده سطح اساس فرسایش کارست محلی در یال جنوبی تاقدیس و در محل تنگ شیخ محمود می‌باشد. بنابراین خروجی‌های آبخوان مورد نظر در امتداد رودخانه بهشت‌آباد و در محل تنگ شیخ محمود در یک بازه ۱/۵ کیلومتری در هر دو جناح متمرکز شده‌اند. ظهور این چشمه‌ها به صورت چشمه‌های منفرد و زون‌های تراوش می‌باشد که از سیستم‌های گسله و درز و شکستگی تخلیه می‌گردند. بزرگترین خروجی این آبخوان، چشمه خدرزنده با دبی متوسط ۴۳۵ لیتر بر ثانیه از نزدیک سطح تماس سازند مارنی رازک با سازند کربناته آسماری - جهرم از سیستم گسله جناح راست تخلیه می‌گردد (شکل ۴-۲). همچنین چشمه SPL با دبی متوسط ۳۸ لیتر بر ثانیه مهم‌ترین منبع آب جناح چپ به شمار می‌رود (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۱- کارنهای ایجاد شده در آهک‌های سازند جهرم-آسماری





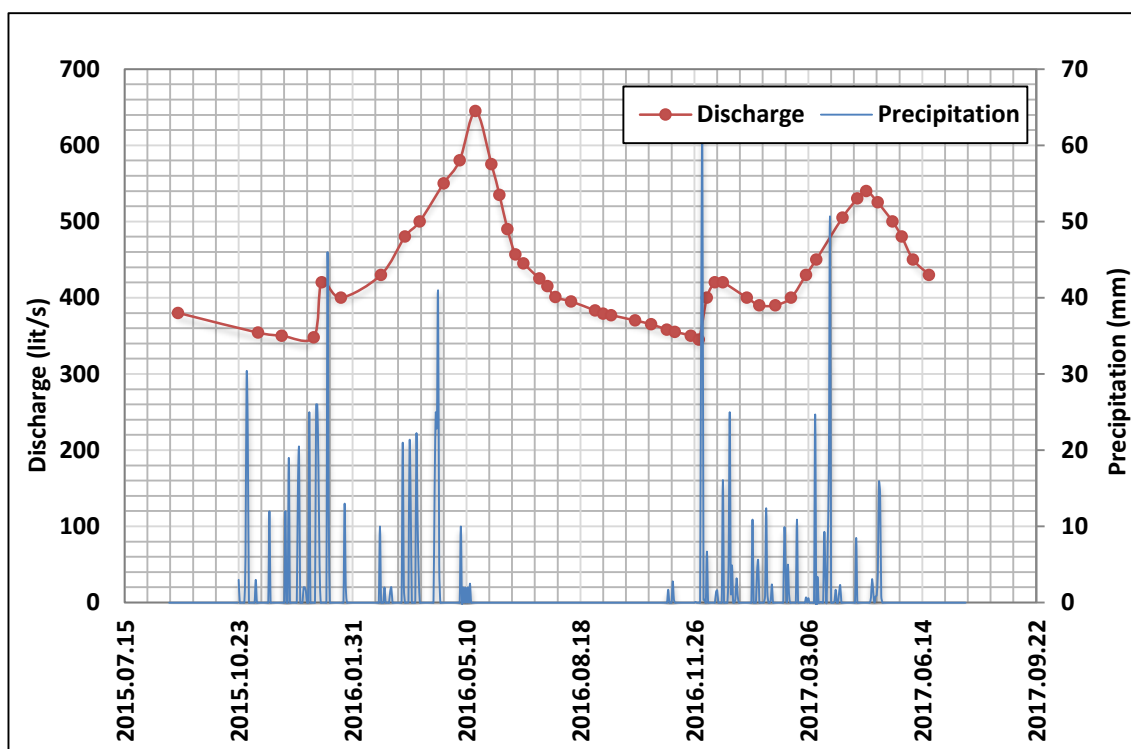
شکل ۴-۲- چشمه خدرزنده در پایین دست محور و جناح راست



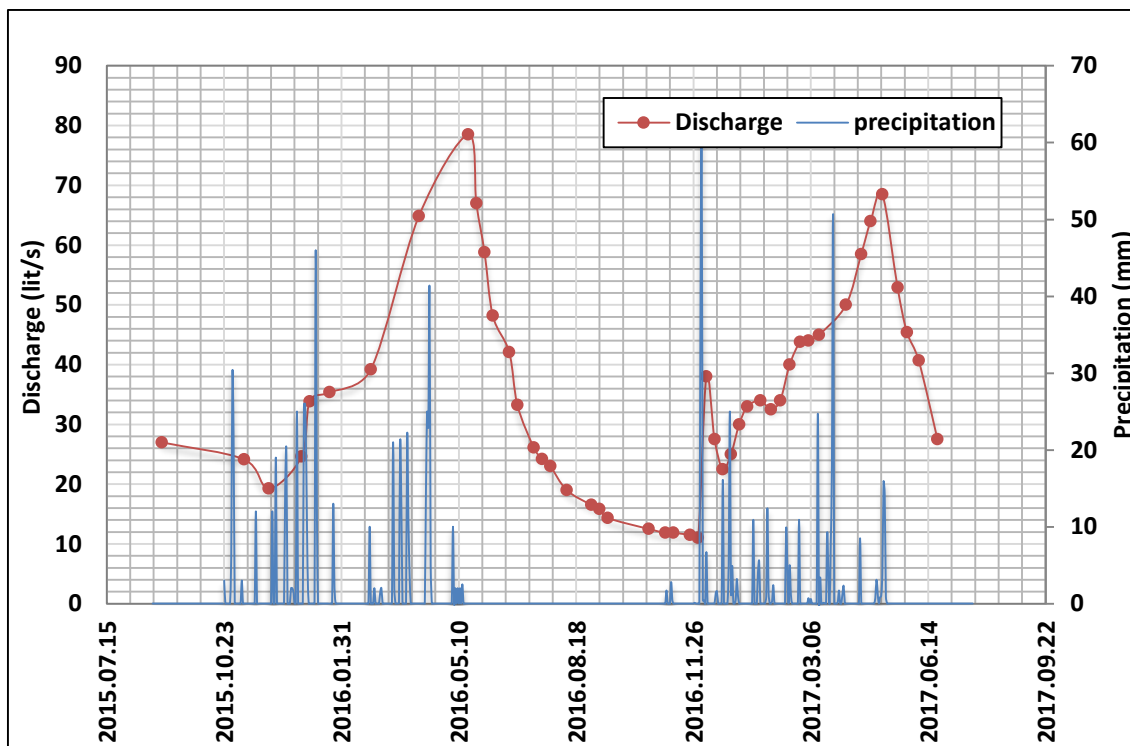
شکل ۴-۳- چشمه SPL مهمترین چشمه در جناح چپ و پایین دست محور

#### ۴-۱-۱- دبی چشمه‌های خدرزنده و SPL

برای تحلیل هیدروژئولوژی چشمه‌های کارستی پایین دست محور، تغییرات دبی به صورت هفتگی و ماهیانه و در طول سال آبی ۹۶-۱۳۹۵ برداشت گردید. مطابق با اندازه‌گیری‌های انجام شده چشمه خدرزنده دارای حداکثر آبدهی ۶۳۰ لیتر بر ثانیه و حداقل ۳۴۰ لیتر بر ثانیه و به طور متوسط ۴۳۸ لیتر بر ثانیه است. همچنین چشمه جناح چپ (SPL) با حداکثر آبدهی ۸۰ لیتر بر ثانیه و حداقل ۱۰ لیتر بر ثانیه و به طور متوسط ۳۸ لیتر بر ثانیه است. در شکل‌های (۴-۴) و (۵-۴) هیدروگراف این چشمه‌ها نسبت به بارندگی روزانه ایستگاه اردل مقایسه شده است.



شکل ۴-۴- هیدروگراف چشمه خدرزنده نسبت به تغییرات بارندگی



شکل ۴-۵- هیدروگراف چشمه SP<sub>I</sub> نسبت به تغییرات بارندگی

#### ۴-۱-۲- بررسی هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های پایین دست محور سد

تجزیه و تحلیل بخش نزولی هیدروگراف کمک شایانی در مورد شناخت سیستم درونی آبخوان می‌نماید. متداولترین فرمول جهت توصیف یال نزولی هیدروگراف مطابق با معادله (۱) می‌باشد که توسط مایلت ارائه شده است (Maillet 1905).

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

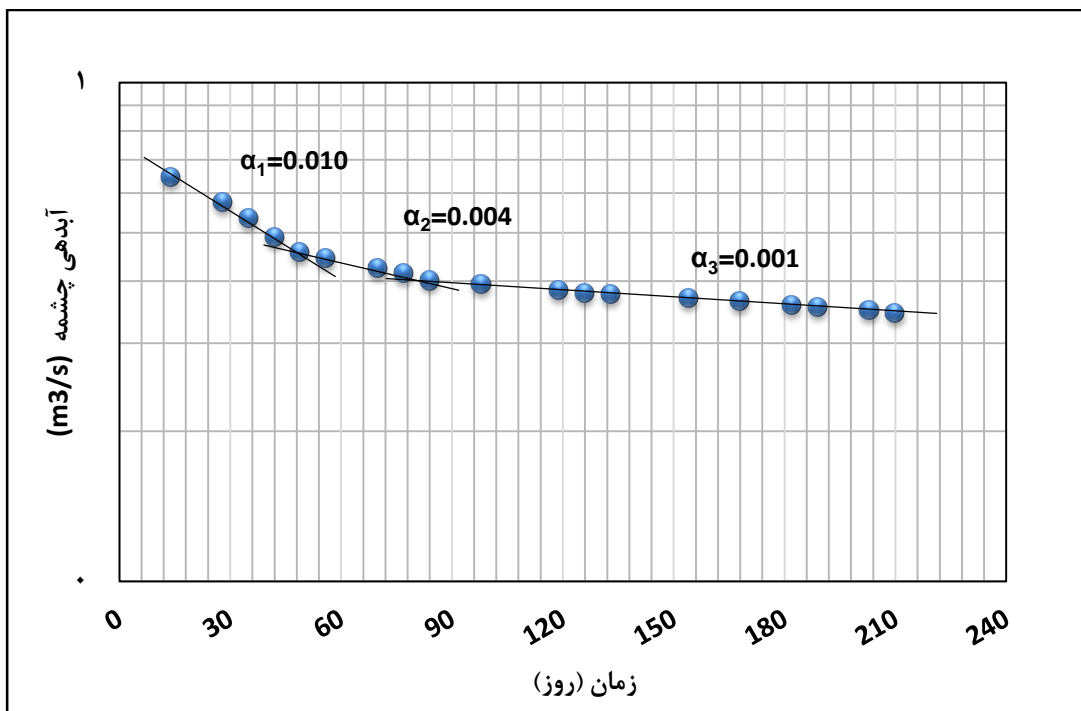
که در آن،  $Q_0$ : آبدهی چشمه در زمان  $t_0$ ،  $Q_t$ : آبدهی بعد از مدت زمان  $t$  و  $\alpha$ : ضریب فرود چشمه است بر اساس این معادله پارامتر بدون بعد  $\alpha$  از معادله (۲) محاسبه می‌گردد.

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0.4343t} \quad (2)$$

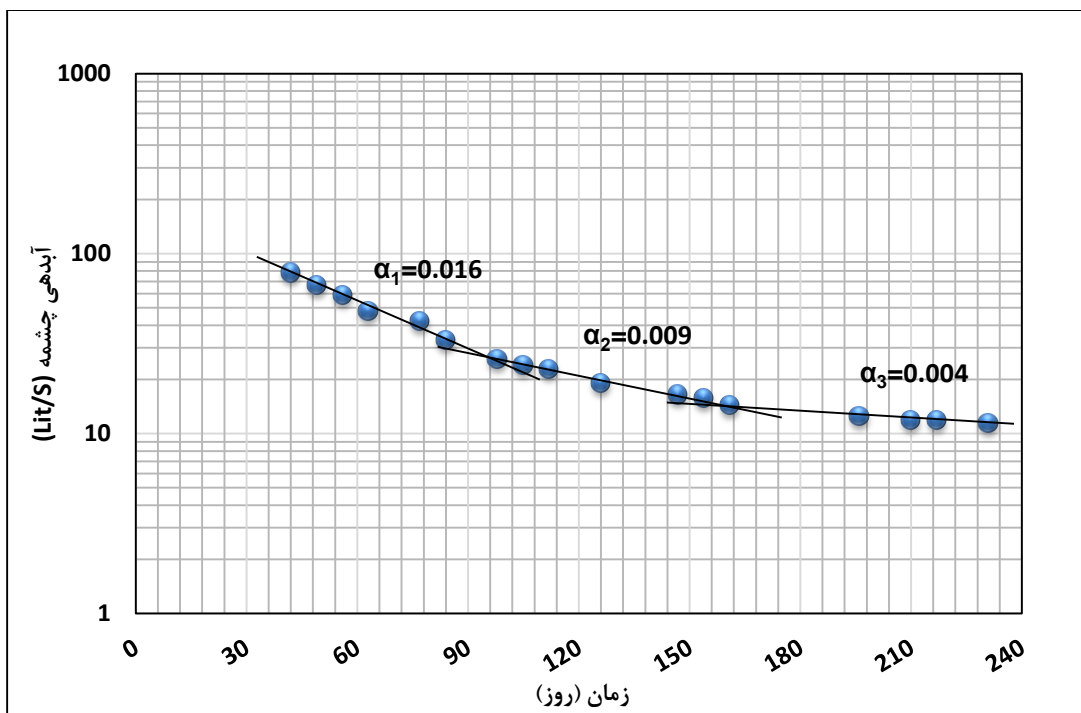
معمولاً در منحنی فرود چشمه‌های کارستی بیش از یک ضریب فرود وجود دارد. در ابتدای دوره فروکش شیب منحنی بیشتر بوده و مقدار ضریب فرود  $\alpha_1$  بزرگتر است. با گذشت زمان شیب منحنی

کمتر شده و ضریب فرود کمتر می‌گردد. ضرایب فرود بزرگتر نماینده تخلیه سریع‌تر آب از مجاری بزرگ و ضرایب فرود کوچکتر نماینده تخلیه کندتر آب از درز و شکاف و منافذ ماتریکس آبخوان در نظر گرفته می‌شود (Milanovic 1981, White 1988, Sauter 1992). با توجه به بررسیهایی که تا کنون بر روی منحنی فرود چشمه‌های کارستی انجام شده است مقدار ضریب فرود بیش از ۰/۱ بیانگر وجود سیستم جریان مجرای، بین ۰/۱ تا ۰/۰۱ بیانگر وجود جریان حدواسط (افشان - مجرای) و کمتر از ۰/۰۱ بیانگر وجود جریان افشان می‌باشد (Veini 1997, Karanjac and Altaj 1980).

منحنی فرود چشمه خدرزنده ( $SP_5$ ) از اواخر اردیبهشت ماه شروع شده و دارای سه شیب است.  $\alpha_1$  با شیب ۰/۰۱ نشان دهنده جریان حدواسط (افشان - مجرای) و  $\alpha_2, \alpha_3$  با ضرایب ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۱ نمایانگر جریان افشان است (شکل ۴-۶). چشمه  $SP_L$  نیز دارای سه شیب  $\alpha_1$  با شیب ۰/۰۱ و نشان دهنده جریان حدواسط (افشان - مجرای) و  $\alpha_2, \alpha_3$  با ضرایب ۰/۰۰۹ و ۰/۰۰۴ نمایانگر جریان افشان در کارست این تاقدیس می‌باشد (شکل ۴-۷). همچنین با توجه با حجم تخلیه در هر رژیم جریان سهم جریان حدواسط (افشان - مجرای) حدود ۱۵ درصد و سهم جریان افشان حدود ۸۵ درصد محاسبه گردید.



شکل ۴-۶- ضرایب فرود چشمه خدرزنده در سال آبی (۹۶-۱۳۹۵)



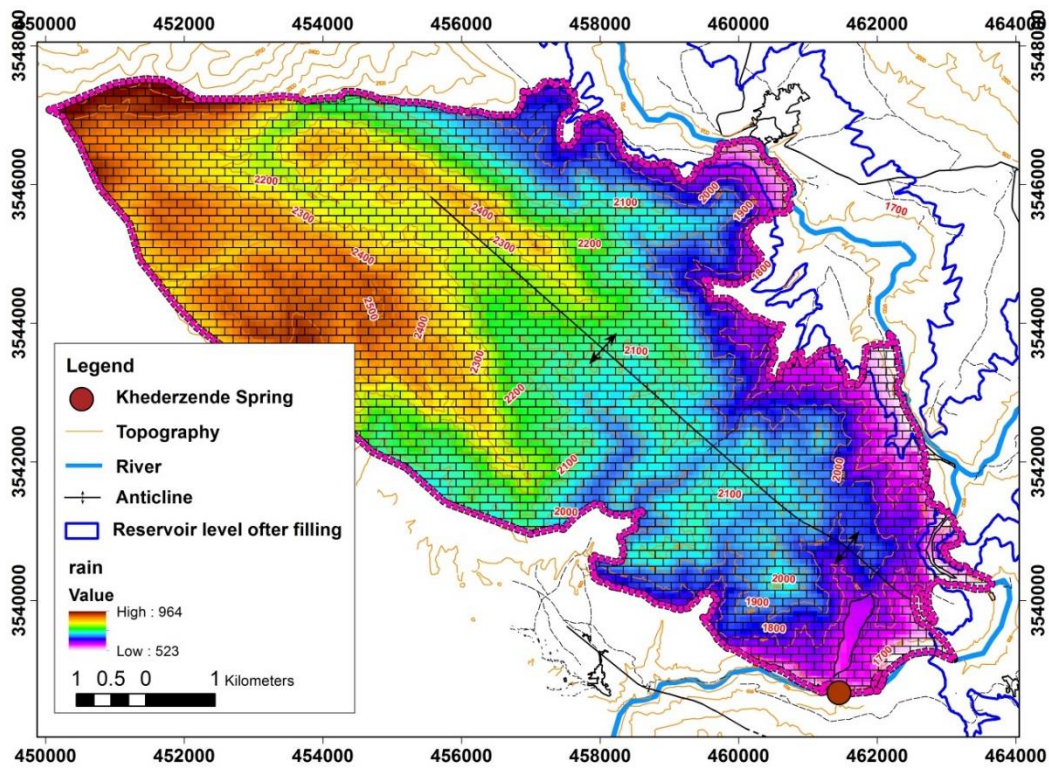
شکل ۴-۷- ضرایب فرود چشمه SP1 در سال آبی (۹۶-۱۳۹۵)

#### ۴-۱-۳- حوضه آبخیز چشمه‌های کارستی پایین دست محور

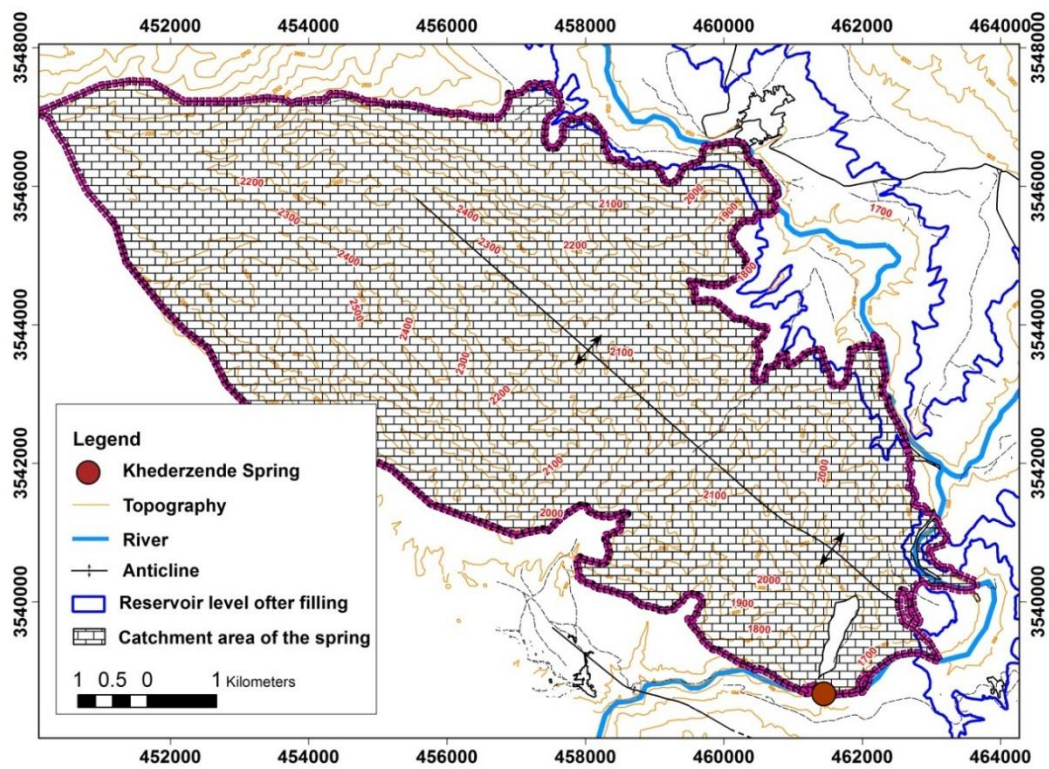
مساحت حوضه آبخیز چشمه‌های کارستی در پایین دست محور با استفاده از معادله زیر محاسبه گردید (Bonacci 2012).

$$Q = IAP \quad (3)$$

که در این معادله، A: مساحت حوضه آبخیز بر حسب کیلومتر مربع، P: بارندگی محدوده بر حسب میلیمتر، I: میزان نفوذ و Q تخلیه چشمه بر اساس مدت بیلان می‌باشد. نتایج اندازه‌گیری چشمه‌ها در یال جنوبی تاقدیس سنگویل بیانگر این است که در سال بیلان به طور متوسط حدود ۷۰۰ لیتر بر ثانیه آب از یال جنوبی تخلیه شده است. با توجه به اینکه مطالعات ایزوتوپی نشان دهنده سهم پانزده درصدی تغذیه از رودخانه می‌باشد سهم تغذیه چشمه‌ها از رودخانه حدود ۱۰۰ لیتر بر ثانیه برآورد گردید به همین دلیل ۶۰۰ لیتر بر ثانیه از دبی چشمه برای تعیین حوضه آبخیز در نظر گرفته شد. همچنین بر اساس شرایط مورفولوژیکی کارست تاقدیس، میزان نفوذ ۴۲ درصد برآورد گردید و متوسط بارش سالانه بر اساس خطوط همباران ۷۱۷ میلیمتر در محدوده تاقدیس محاسبه شده است (شکل ۴-۸). بنابراین مساحت حوضه آبخیز چشمه‌های پایین دست در حدود ۶۳ کیلومتر مربع محاسبه گردید که این میزان با مساحت کل تاقدیس که حدود ۶۴ کیلومتر مربع می‌باشد همخوانی دارد. به همین دلیل کل رخنمون آهکهای جهرم-آسماری به عنوان حوضه آبخیز چشمه‌ها در یال جنوبی در نظر گرفته شد. مطابق شکل (۴-۹) هم آهکهای یال شمالی و هم یال جنوبی تاقدیس سنگویل حوضه آبخیز چشمه‌های پایین دست محور سد را تشکیل می‌دهد.



شکل ۴-۸- میزان بارش در رخنمون تاقدیس آهکی در سال بیلان



شکل ۴-۹- حوزه آبیگر چشمه‌های پایین دست محور و یال جنوبی

#### ۴-۱-۴- سطح آب زیرزمینی و جهت جریان عمومی آبخوان

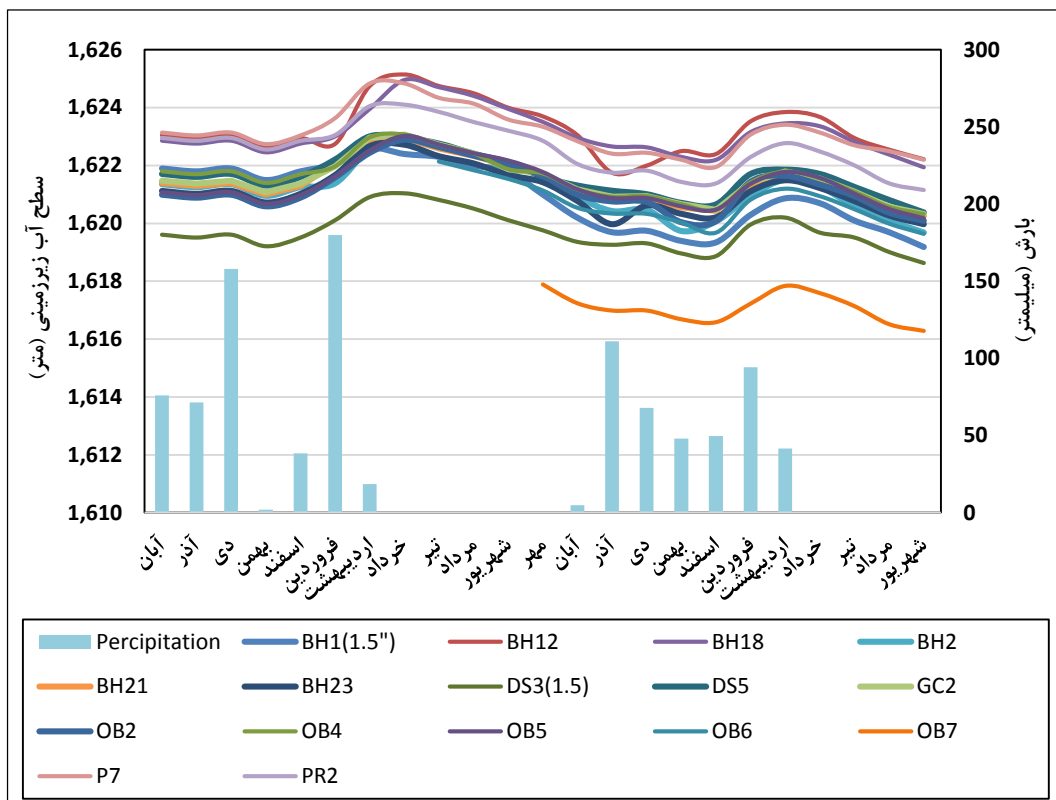
۲۷ گمانه در آهکهای جناح راست مخزن با اهداف مختلف حفاری شده است. در جدول (۴-۱) مشخصات کلی و موقعیت این گمانه‌ها آورده شده است. سطح آب این گمانه‌ها در یال شمالی و جنوبی به صورت ماهیانه اندازه‌گیری گردید. بررسی سطح آب زیرزمینی گمانه‌ها نشان داد سطح آب در آبخوان چهارم-آسماری بین تراز ۱۶۰۰ تا ۱۶۲۵ متر از سطح دریا (m.a.s.l) متغیر است (شکل ۴-۱۰). تراز سطح آب در یال شمالی تا محدوده ساختگاه سد زیر تراز رودخانه قرار دارد و تراز سطح آب از ساختگاه تا مرز سازند رازک در یال جنوبی بالای تراز رودخانه قرار دارد. در حال حاضر سطح آب از سمت گمانه‌ها در یال شمالی و یال جنوبی با تراز حدود ۱۶۲۵ متر به سمت چشمه‌ها در یال جنوبی با تراز حدود ۱۵۹۵ با گرادیان حدود ۷ در هزار کاهش پیدا می‌کند. در این شرایط با احداث سد با تراز نرمال مخزن ۱۷۸۰ متر (m.a.s.l) و متوسط تراز آب زیرزمینی در یال شمالی (حدود ۱۶۲۵)، ۱۵۸ متر ارتفاع آب به تراز آب زیرزمینی آبخوان کارستی در یال شمالی اضافه خواهد شد.

با توجه به اینکه گمانه PR<sub>2</sub> دقیقاً در محور تاقدیس قرار گرفته است. همبستگی بین گمانه‌ها در یال شمالی و یال جنوبی نسبت به این گمانه مورد بررسی قرار گرفت که اکثراً دارای همبستگی بالای ۹۰ درصد می‌باشد (شکل ۴-۱۱). همچنین مقایسه تراز آب زیرزمینی با بارندگی روزانه نشان می‌دهد حدود یک ماه طول می‌کشد تا بارندگی بر سطح آب زیرزمینی تأثیرگذار باشد. فاصله بین حداقل و حداکثر ارتفاع سطح آب زیرزمینی در همه گمانه‌ها تقریباً با هم برابر و ۲/۵ تا ۳ متر است. این همبستگی بالا بین سطح آب گمانه‌ها و فاصله کم نوسان حداقل و حداکثر می‌تواند نشان دهنده یک سیستم همگن و افشان با ضریب ذخیره نسبتاً بالا باشد.

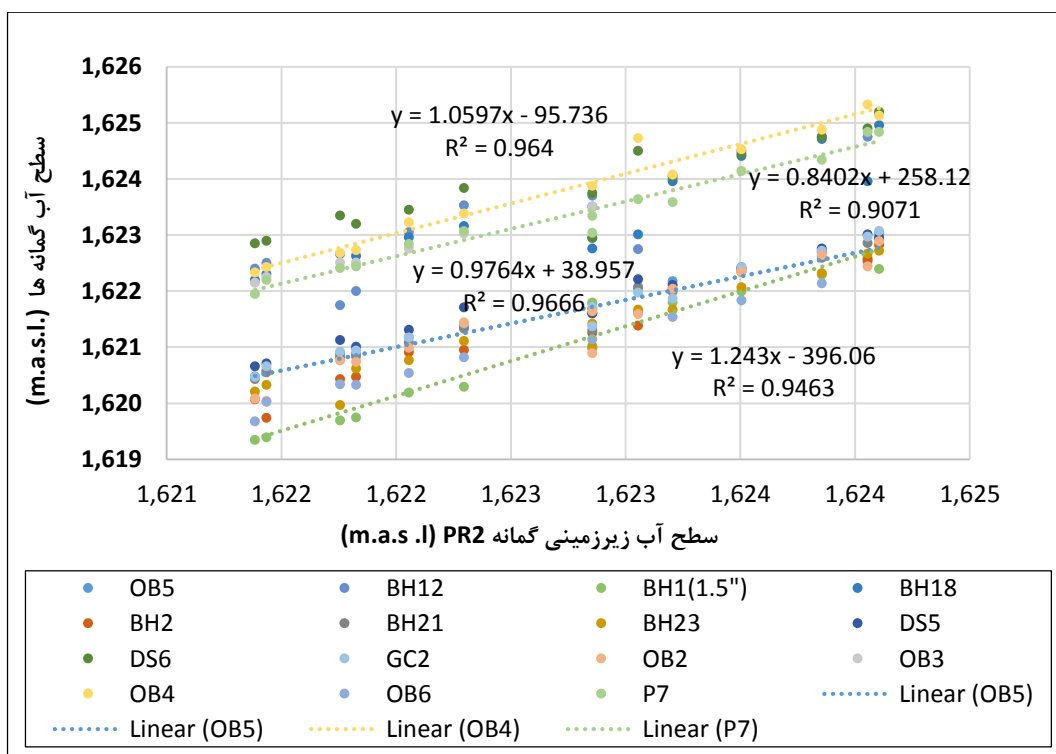


جدول ۴-۱- مشخصات و مختصات گمانه‌های ناقدیس جهرم-آسماری (مهر ۱۳۹۵)

تراز سطح آب (m a.s.l.)	عمق سطح آب (m)	عمق گمانه (m)	UYM(Y)	UTM(X)	نام گمانه
۱۶۲۱/۰	۳۱/۷	۳۰۰/۳	۴۶۲۹۲۱	۳۵۴۱۰۳۶	BH1
۱۶۲۳/۷	۲۰/۹	۱۲۰/۰	۴۶۳۹۴۶	۳۵۴۰۱۹۱	BH12
۱۶۰۷/۵	۲۰/۱۱	۲۳۰/۲	۴۶۲۴۵۴	۳۵۳۸۳۸۰	BH13
۱۶۲۳/۵	۱۴۲/۷	۲۳۷/۰	۴۶۳۸۸۳	۳۵۴۰۷۸۴	BH18
۱۶۲۱/۶	۲۱۳/۶	۲۴۰/۰	۴۶۳۱۶۹	۳۵۴۰۹۳۲	BH2
۱۶۲۱/۷	۱۸۶/۹	۲۸۲/۱	۴۶۲۵۹۵	۳۵۳۹۵۷۳	BH21
۱۶۲۱/۴	۱۵۸/۴	۱۷۰/۰	۴۶۲۷۸۵	۳۵۳۹۵۸۶	BH23
۱۶۲۱/۲	۳۱/۸	۱۹۵/۰	۴۶۳۱۶۵	۳۵۴۱۴۰۷	BH8
۱۶۱۹/۸	۱۲/۱	۲۵۰/۰	۴۶۲۸۲۹	۳۵۳۹۲۲۸	DS3
۱۶۱۶/۷	۱۵/۱	۲۲۰/۰	۴۶۲۸۳۱	۳۵۳۹۲۲۶,۱	DS4
۱۶۲۱/۶	۵۰/۲	۲۵۰/۰	۴۶۲۸۴۳	۳۵۳۹۳۶۷	DS5
۱۶۲۳/۸	۹۷/۸	۳۰۰/۰	۴۶۲۸۰۲	۳۵۳۹۵۰۱	DS6
۱۶۱۲/۹	۲/۸	۳۰/۰	۴۶۲۸۴۷	۳۵۳۹۲۴۹	DS7
۱۶۱۱/۹	۶۵/۶	۷۵/۰	۴۶۲۵۱۴	۳۵۳۹۱۳۴	DT2
۱۶۲۱/۷	۱۶۱/۸	۲۵۰/۰	۴۶۲۵۲۵	۳۵۳۹۸۳۱	GC2
۱۶۲۴/۷	۲۶۶/۷	۳۰۸/۰	۴۶۰۸۳۲	۳۵۳۹۵۴۷	GC4
۱۶۰۸/۹	۲۶۷/۱	۳۲۰/۰	۴۵۹۶۹۶	۳۵۳۹۳۸۱	OB10
۱۶۲۵/۱	۳۲۱/۵	۵۰۰/۰	۴۶۱۵۳۱	۳۵۴۰۷۱۵	OB11
۱۶۲۱/۶	۲۶۴/۰	۲۷۰/۰	۴۶۱۷۸۸	۳۵۳۹۶۷۲	OB2
۱۶۲۳/۵	۲۴۵/۲	۳۱۵/۰	۴۶۲۲۱۶	۳۵۴۱۵۴۰	OB3
۱۶۲۳/۹	۸۹/۰	۱۵۰/۰	۴۶۲۰۰۸	۳۵۴۳۳۵۸	OB4
۱۶۲۱/۵	۲۲۰/۵	۲۷۰/۰	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	OB5
۱۶۲۱/۱	۱۵۹/۴	۲۳۰/۰	۴۶۱۴۶۷	۳۵۳۹۱۶۱	OB6
۱۶۱۷/۹۰	۲۲۲/۲	۲۸۰/۰	۴۶۱۷۸۹	۳۵۳۹۳۷۸	OB7
۱۵۹۹/۲	۱۶۰/۱	۲۱۰/۰	۴۶۱۴۷۱	۳۵۳۸۹۲۷	OB8
۱۶۲۳/۳	۷۸/۴	۲۸۵/۰	۴۶۴۰۰۷	۳۵۳۹۵۶۷	PR1
۱۶۲۴/۹	۱۴۰/۵	۳۴۰/۰	۴۶۲۱۸۴	۳۵۴۲۳۲۴	PR2

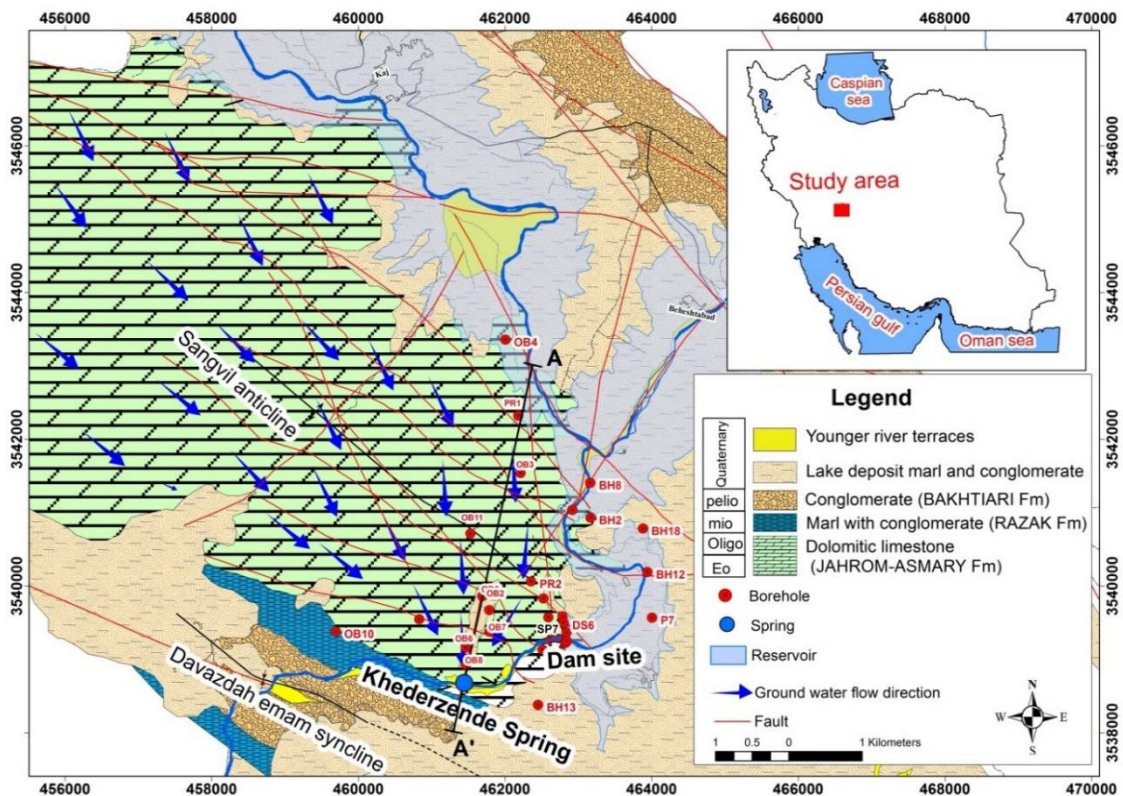


شکل ۴-۱۰- نوسانات سطح آب گمانه‌ها از آبان ۱۳۹۴ تا شهریور ۱۳۹۶



شکل ۴-۱۱- همبستگی سطح آب گمانه‌ها در جناح راست مخزن نسبت به سطح آب گمانه (PR<sub>2</sub>)

با توجه به سطح آب گمانه‌ها جهت جریان آب زیرزمینی هم از یال شمالی و هم از یال جنوبی به سمت سطح اساس فرسایش در چشمه‌های یال جنوبی است. در چنین شرایطی با احداث سد مخزنی ارتباط هیدرولیکی بین مخزن و چشمه پایین دست برقرار خواهد شد. با استفاده از سطح آب گمانه‌ها و موقعیت چشمه‌ها جهت جریان آب زیرزمینی در حال حاضر ترسیم گردید. متوسط تراز رودخانه در یال شمالی ۱۶۵۰ متر و متوسط تراز سطح آب زیرزمینی در یال شمالی ۱۶۲۵ متر می‌باشد به همین دلیل رودخانه در یال شمالی به عنوان تغذیه کننده عمل می‌کند. مطابق شکل (۴-۱۲) در حال حاضر جریان آب زیرزمینی از یال شمالی (محدوده تماس مخزن با آهک) به یال جنوبی انتقال و در نهایت در چشمه‌های پایین دست تخلیه می‌گردد. با توجه به بررسی‌های انجام شده گرادیان فعلی سطح آب زیرزمینی از سمت مخزن در یال شمالی به سمت چشمه‌ها در تراز ۱۵۹۵ متر (تراز چشمه خدرزنده) ۷ در هزار می‌باشد. با در نظر گرفتن این جریان پس از آبیگری مخزن (تراز ۱۷۸۰ متر) و وجود این ارتباط هیدرولیکی، جریانی با گرادیان ۳۷ در هزار و سطح مقطع بیشتر به سمت پایین دست اتفاق خواهد افتاد.



شکل ۴-۱۲- جهت جریان آب زیرزمینی به سمت چشمه‌های یال جنوبی تاقدیس

#### ۴-۲- تغییرات هیدروشیمی گمانه‌ها، چشمه‌ها و رودخانه محدوده

بر اساس نوع جریان پاسخ هیدروشیمیایی چشمه نسبت به بارندگی متفاوت می‌باشد. پس از بارندگی آبدهی چشمه‌های افشان و مجرای افزایش پیدا می‌کند و همزمان با این افزایش پارامترهای هیدروشیمیایی نیز بسته به نوع جریان دستخوش تغییر می‌گردد. به طور کلی در سیستم‌های مجرای تغییرات سریعتر و ضریب تغییرات نیز بیشتر است ولی در سیستم‌های افشان این تغییرات کندتر و ضریب تغییرات آن نیز کمتر است (Shuster and White 1971).

با استفاده از اطلاعات کمی و کیفی ماهیانه چشمه‌ها، رودخانه و گمانه میانگین، ضرایب تغییرات و انحراف معیار متغیرهای مختلف محاسبه گردید. مطابق جدول‌های (۲-۴) و (۳-۴) اطلاعات چشمه‌ها و گمانه‌ها نشان می‌دهد آنیون و کاتیون این منابع عمدتاً دارای ضریب تغییرات ۱۰ تا ۲۰ درصد است. دبی چشمه خدرزنده به عنوان بزرگترین خروجی آبخوان حدود ۱۵ درصد تغییرات دارد. هدایت

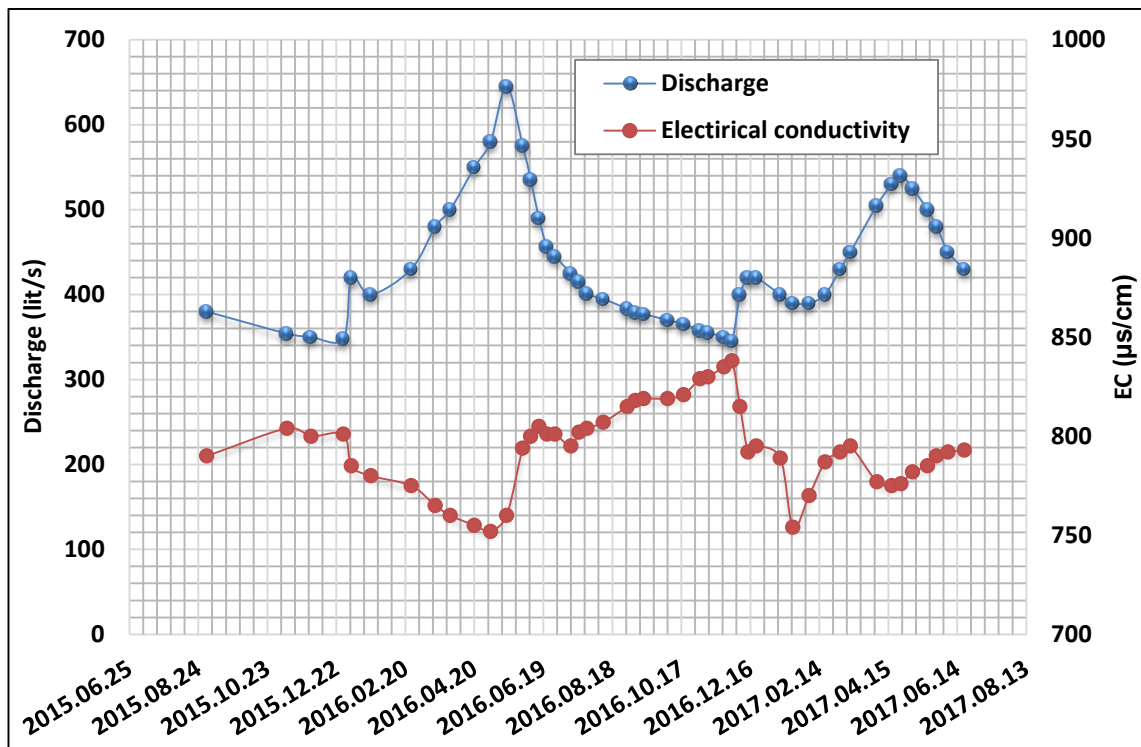
الکتریکی چشمه‌ها و گمانه‌ها به عنوان مهمترین پارامترهای کیفی دارای ضریب تغییرات حدود ۵ درصد می‌باشد. این نتایج همانند نتایج منحنی فرود نشان دهنده وجود سیستم کارستی حدواسط (افشان-مجرایی) و افشان در این آبخوان است. همچنین تغییرات فیزیکوشیمیایی رودخانه در بالادست و پایین دست چشمه‌ها عمدتاً دارای ضریب تغییرات بین ۲۰ تا ۵۰ درصد است که نسبت به تغییرات چشمه‌ها و گمانه‌ها دارای تغییرات به مراتب بیشتری می‌باشد. به طور مثال میزان EC رودخانه در فصل تر و در ماههای فروردین و اردیبهشت به حدود ۳۷۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر و در ماههای مهر و آبان به حدود ۸۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر می‌رسد. ولی میزان هدایت هیدرولیکی چشمه‌ها بین ۷۵۰ تا ۸۵۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر تغییر می‌کند (شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴). همچنین تغییرات دمایی در هر دو مقطع رودخانه ( $R_1, R_2$ ) بین ۶ درجه در بهمن ماه تا ۲۱ درجه در تیر ماه متغیر می‌باشد. در حالی که تغییرات دمای چشمه‌ها بین ۱۲/۵ تا ۱۳/۵ درجه سانتیگراد تغییر می‌کند (شکل ۴-۱۵ و ۴-۱۶). تغییرات کم هیدروشیمی چشمه‌ها، گمانه‌های یال شمالی و گمانه‌های یال جنوبی نسبت به هیدروشیمی رودخانه می‌تواند به دلیل تاثیر تغذیه کم رودخانه بر روی آبخوان تاقدیس باشد.

جدول ۴-۲- میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات پارامترهای فیزیکوشیمیایی چشمه‌ها و رودخانه

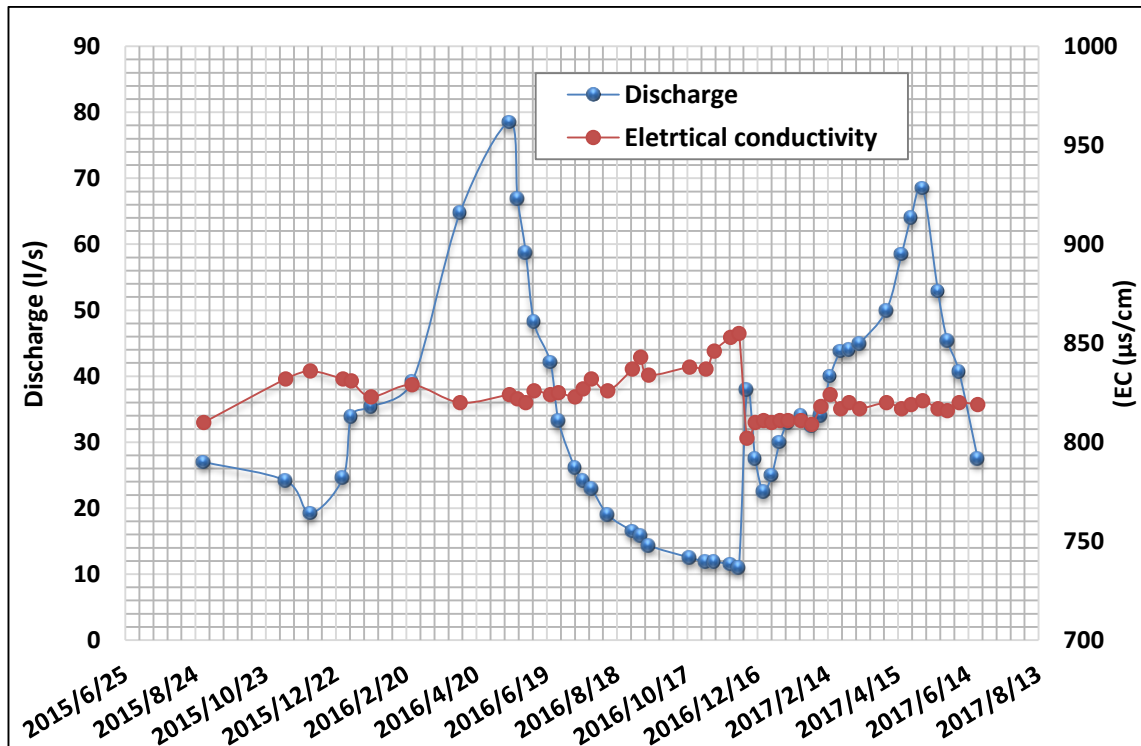
SP <sub>s</sub>			SP <sub>L</sub>			R <sub>1</sub>			R <sub>2</sub>			منبع
N=12			N=12			N=12			N=12			تعداد برداشت
Ave	SD	CV	Ave	SD	CV	Ave	SD	CV	Ave	SD	CV	پارامتر
۲/۵۳	۰/۳۴	۱۳/۶۳	۲/۵۶	۰/۳۳	۱۲/۸۸	۲/۳۰	۰/۳۸	۱۶/۷۳	۲/۳۹	۰/۳۵	۱۴/۴۷	کلسیم (meq/l)
۱/۲۱	۰/۱۸	۱۵/۰۳	۱/۵۱	۰/۲۳	۱۵/۲۲	۰/۷۶	۰/۳۷	۴۸/۱۷	۰/۹۳	۰/۳۵	۳۷/۲۴	منیزیم (meq/l)
۴/۲۲	۰/۶۲	۱۴/۷۶	۴/۳۵	۰/۶۴	۱۴/۶۶	۲/۲۱	۰/۹۷	۴۳/۶۶	۲/۵۸	۱/۰۴	۴۰/۱۹	سدیم (meq/l)
۰/۰۶	۰/۰۱	۱۷/۷۴	۰/۰۸	۰/۰۱	۱۴/۴۴	۰/۰۹	۰/۰۳	۳۱/۹۶	۰/۰۸	۰/۰۳	۳۶/۵۹	پتاسیم (meq/l)
۳/۱۵	۰/۳۹	۱۲/۳۳	۳/۴۰	۰/۲۷	۷/۹۹	۲/۶۱	۰/۳۷	۱۴/۲۳	۲/۷۰	۰/۴۰	۱۴/۷۶	بیکربنات (meq/l)
۱/۳۴	۰/۰۸	۵/۸۳	۱/۳۶	۰/۰۷	۵/۴۵	۰/۸۰	۰/۲۱	۲۶/۵۵	۰/۹۰	۰/۳۱	۳۴/۲۳	سولفات (meq/l)
۳/۹۲	۰/۲۱	۵/۴۰	۴/۱۴	۰/۲۶	۶/۲۲	۲/۰۵	۱/۰۶	۵۲/۰۵	۲/۴۹	۱/۱۵	۴۶/۱۸	کلراید (meq/l)
۵۷۴/۵۰	۳۶/۳۰	۶/۳۰	۶۰۳/۶۰	۳۹/۹۰	۶/۶۲	۴۰۰/۹۴	۸۶/۰۴	۲۱/۴۶	۴۱۱/۴۵	۱۳۰/۷۹	۳۱/۷۹	کل مواد جامد محلول در آب (mg/l)
۷۹۴/۱۰	۲۱/۷۰	۲/۷۰	۸۲۴/۰۰	۱۱/۴۱	۱/۳۹	۵۴۳/۲۷	۱۲۱/۰۷	۲۲/۲۸	۶۰۶/۲۷	۱۳۰/۸۳	۲۱/۵۸	هدایت الکتریکی (μS./cm)
۸/۱۰	۰/۳۰	۴/۰۳	۸/۱۰	۰/۳۰	۴/۳۰	۸/۲۴	۰/۳۲	۳/۸۳	۸/۱۱	۰/۳۰	۳/۶۸	اسیدیته
۱۳/۱۰	۰/۲۰	۱/۸۰	۱۳/۰۲	۰/۲۰	۱/۲۰	۱۳/۱۳	۵/۰۴	۳۸/۳۸	۱۲/۸۴	۴/۰۹	۳۱/۸۳	دما (°C)
۴۳۸/۷۰	۶۹/۴۰	۱۵/۸۰	۳۵/۳۰	۱۶/۹۰	۴۷/۹۰	۲۹/۱۸	۲۲/۴۶	۷۶/۹۹	۲۹/۹۹	۲۲/۴۸	۷۴/۹۴	دبی (lit/s)

جدول ۳-۴- میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات پارامترهای فیزیکوشیمیایی گمانه‌ها

PR <sub>1</sub>			PR <sub>2</sub>			OB <sub>5</sub>			OB <sub>8</sub>			نام گمانه
N=12			N=12			N=12			N=12			تعداد برداشت
Ave	SD	CV	Ave	SD	CV	Ave	SD	CV	Ave	SD	CV	پارامتر
۱/۸۳	۰/۲۷	۱۴/۷۴	۲/۳۱	۰/۳۸	۱۶/۴۵	۱/۹۶	۰/۲۶	۱۳/۱۶	۱/۵۵	۰/۲۰	۱۲/۸۷	کلسیم (meq/l)
۱/۵۰	۰/۲۴	۱۶/۱۳	۱/۶۰	۰/۲۹	۱۸/۰۶	۱/۵۷	۰/۲۶	۱۶/۸۵	۱/۳۳	۰/۲۱	۱۵/۵۴	منیزیم (meq/l)
۰/۱۵	۰/۰۲	۵۱/۴۱	۲/۸۳	۰/۵۳	۱۸/۸۴	۲/۳۶	۰/۳۷	۱۵/۸۲	۰/۱۶	۰/۰۳	۱۷/۷۴	سدیم (meq/l)
۰/۱۹	۰/۰۴	۱۹/۱۴	۰/۰۹	۰/۰۱	۱۵/۵۱	۰/۰۶	۰/۰۱	۱۹/۲۵	۰/۱۳	۰/۰۳	۲۱/۶۵	پتاسیم (meq/l)
۲/۴۱	۰/۱۶	۶/۷۲	۲/۸۹	۰/۲۰	۶/۷۸	۲/۸۵	۰/۳۴	۱۲/۰۰	۲/۲۸	۰/۱۹	۸/۴۲	بیکربنات (meq/l)
۰/۹۷	۰/۰۸	۷/۹۴	۱/۳۱	۰/۲۳	۱۷/۲۸	۱/۱۹	۰/۱۳	۱۱/۲۸	۰/۵۶	۰/۱۲	۲۰/۸۸	سولفات (meq/l)
۰/۴۴	۰/۰۸	۱۸/۳۷	۳/۱۵	۰/۲۱	۶/۵۵	۱/۸۲	۰/۲۲	۱۲/۲۱	۰/۴۲	۰/۰۶	۱۵/۶۰	کلراید (meq/l)
۲۸۴/۸۰	۱۴/۰۷	۴/۹۴	۵۰۳/۴۰	۲۸/۲۰	۵/۶۰	۴۰۴/۶۰	۲۸/۰۲	۶/۹۳	۲۵۲/۲۰	۱۹/۵۳	۷/۷۴	کل مواد جامد محلول در آب (mg/l)
۳۹۷/۴۰	۴۸/۳۴	۱۲/۱۶	۵۲۹/۰۰	۲۶/۷۵	۵/۰۶	۵۲۳/۸۰	۲۶/۴۱	۵/۰۴	۳۳۰	۰/۰۲	۶/۸۸	هدایت الکتریکی (μS./cm)
۸/۱۰	۰/۳۷	۴/۶۳	۸/۰۰	۰/۴۱	۵/۰۶	۸/۱۰	۰/۴۱	۵/۱۲	۸/۱۰	۰/۳۶	۴/۴۵	اسیدیته
۱۵/۱۰	۱/۱۳	۷/۴۸	۱۵/۰۰	۱/۵۱	۱۰/۰۲	۱۵/۵۰	۰/۸۴	۵/۳۸	۱۵/۵۰	۰/۸۴	۵/۳۸	دما (°C)

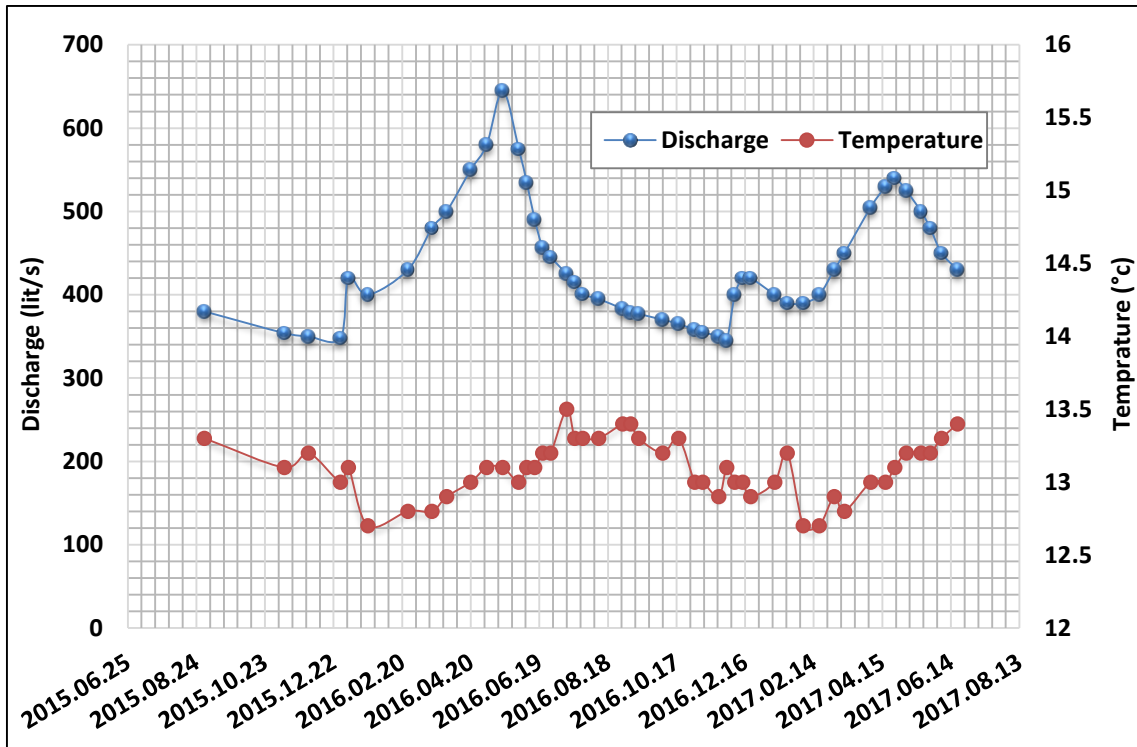


شکل ۴-۱۳- هیدروگراف تغییرات دبی چشمه خدرزنده (SP5) نسبت به تغییرات هدایت الکتریکی

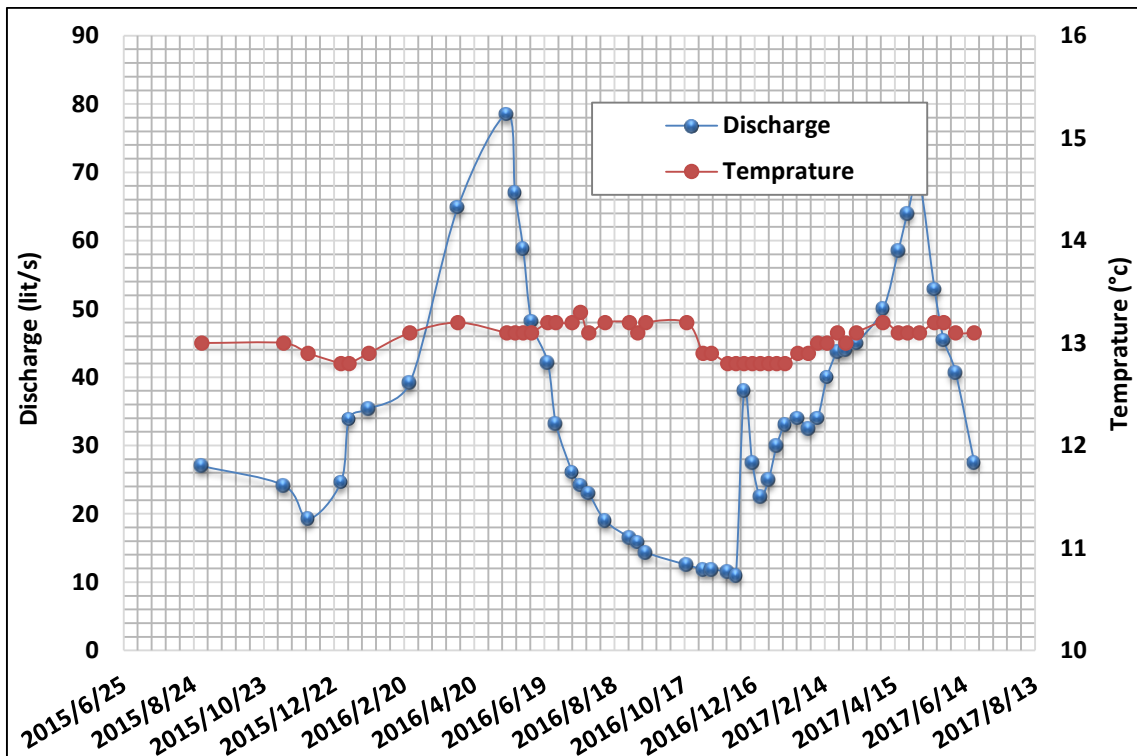


شکل ۴-۱۴- هیدروگراف تغییرات دبی چشمه SP<sub>L</sub> نسبت به تغییرات هدایت الکتریکی





شکل ۴-۱۵- هیدروگراف تغییرات دبی چشمه خدرزنده (SP5) نسبت به تغییرات دما



شکل ۴-۱۶- هیدروگراف تغییرات دبی چشمه SPL نسبت به تغییرات دما

#### ۴-۳- مطالعات ایزوتوپی منابع آب محدوده

تغییرات ترکیب ایزوتوپی به تاریخچه آب از زمان تبخیر از اقیانوس‌ها و تشکیل ابر و زمان بارش و چگونگی نفوذ آب به داخل زمین بستگی دارد. این تغییرات می‌تواند جهت تعیین زمان تغذیه، سرعت جریان و مشخص نمودن اثر جریانهای سریع استفاده گردد (Mazor 2004). در این مطالعه از ایزوتوپیهای پایدار برای تعیین منشاء بزرگترین چشمه پایین دست سد و ارتباط هیدرولیکی یال شمالی و جنوبی استفاده گردید.

#### ۴-۳-۱- تعیین خط بارش محلی محدوده مورد مطالعه

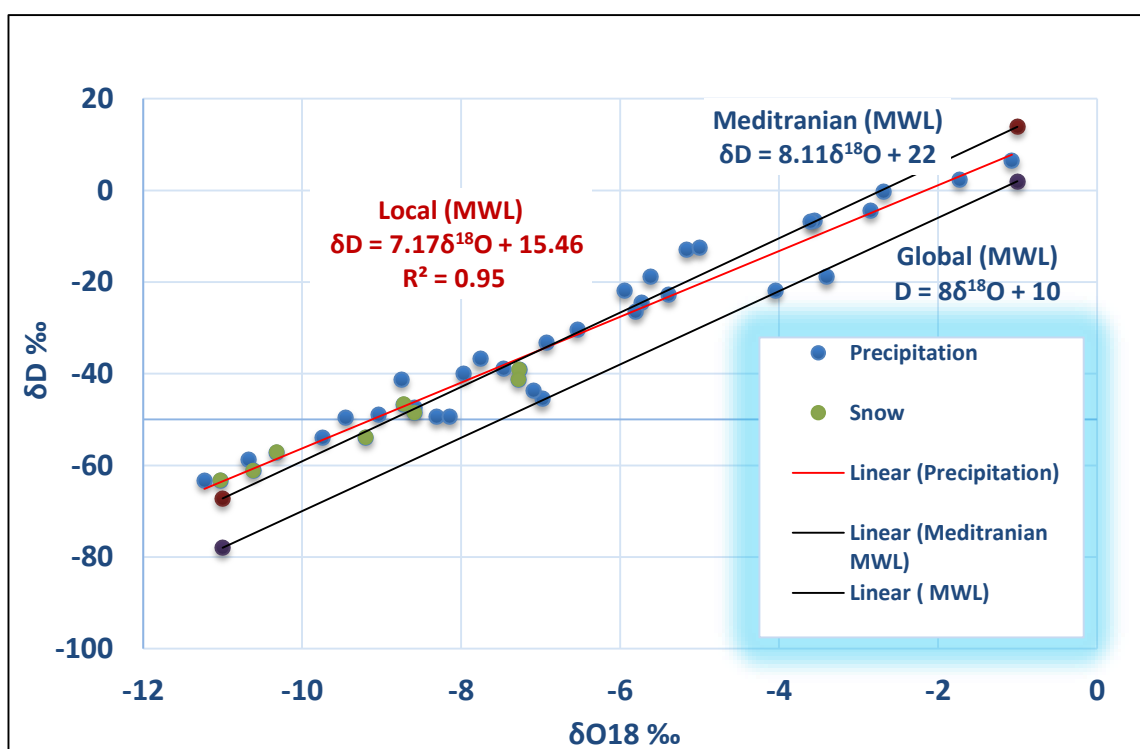
برای تعیین خط بارش محلی تعداد ۴۰ نمونه از بارندگی در ۵ ایستگاه و در ارتفاعات مختلف به صورت تجمعی و تک بارش برداشت گردید. همچنین از بارشهای برف صورت گرفته در محدوده ۹ نمونه، در ارتفاعات و بارشهای مختلف برداشت و آنالیز گردید. بارشها در محدوده به طور عمده در فصل تر و از آبان ماه تا اردیبهشت ماه رخ می‌دهد.

مطابق با جدول (۴-۴) در نمونه‌های باران مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  بین حداقل ۱۱/۲۳- پرمیل تا حداکثر آن ۱/۰۷- پرمیل و برای  $\delta\text{D}$  بین ۶۳/۲۱- تا ۶/۵۳- پرمیل متغیر است. همچنین میانگین مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta\text{D}$  بارش باران به ترتیب ۶/۱۴- و ۲۷/۹۴- پرمیل می‌باشد. در بارشهای برف مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  بین حداقل ۱۱/۰۳- پرمیل تا حداکثر ۷/۲۷- پرمیل و برای  $\delta\text{D}$  بین ۶۳/۲۴- تا ۳۹/۰۴- پرمیل است. همچنین میانگین مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta\text{D}$  بارش برف به ترتیب ۹/۱۲- و ۵۱/۶۸- پرمیل اندازه‌گیری گردید. این مقادیر برای برای کل بارش (برف و باران) در محدوده تاقدیس به طور میانگین برای  $\delta^{18}\text{O}$  ۷/۱۱- پرمیل و برای  $\delta\text{D}$  ۳۵/۴۴- پرمیل است.

جدول ۴-۴- موقعیت و مقادیر ایزوتوپیهای برداشت شده از بارش

D-excess (%)	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	مختصات		نوع بارش	نام ایستگاه
			X	Y		
۲۳/۴۳	-۴۸/۸۹	-۹/۰۴	۴۶۰۱۰۸	۳۵۴۴۵۱۰	باران	P5
۲۶/۶۳	-۶۳/۲۱	-۱۱/۲۲	۴۵۲۶۷۶	۳۵۴۷۰۳۸	باران	P4
۲۴/۱۲	-۵۳/۸۸	-۹/۷۵	۴۵۴۲۸۷	۳۵۴۳۰۷۱	باران	P3
۲۱/۳۹	-۴۷/۳۳	-۸/۵۹	۴۶۱۵۱۹	۳۵۳۸۶۴۹	باران	P <sub>kh</sub>
۲۱/۷۹	-۶/۶۱	-۳/۵۵	۴۶۰۱۰۸	۳۵۴۴۵۱۰	باران	P5
۲۱/۳۸	-۲۴/۴۶	-۵/۷۳	۴۵۲۶۷۶	۳۵۴۷۰۳۸	باران	P4
۱۰/۵۰	-۲۱/۹۰	-۴/۰۵	۴۵۴۲۸۷	۳۵۴۳۰۷۱	باران	P3
۲۰/۷۷	-۳۸/۹۱	-۷/۴۶	۴۶۱۵۱۹	۳۵۳۸۶۴۹	باران	P <sub>kh</sub>
۱۰/۳۴	-۴۵/۵۰	-۶/۹۸	۴۶۰۱۰۸	۳۵۴۴۵۱۰	باران	P5
۱۵/۷۹	-۴۹/۳۳	-۸/۱۴	۴۵۲۶۷۶	۳۵۴۷۰۳۸	باران	P4
۱۳/۱۳	-۴۳/۵۹	-۷/۰۹	۴۶۱۵۱۹	۳۵۳۸۶۴۹	باران	P <sub>kh</sub>
۲۲/۰۶	-۳۰/۲۶	-۶/۵۴	۴۵۴۲۸۷	۳۵۴۳۰۷۱	باران	P3
۲۰/۳۰	-۲۲/۸۲	-۵/۳۹	۴۶۱۵۱۹	۳۵۳۸۶۴۹	باران	P <sub>kh</sub>
۱۹/۹۵	-۲۶/۴۵	-۵/۸۰	۴۶۰۱۰۸	۳۵۴۴۵۱۰	باران	P5
۲۶/۶۵	-۵۸/۷۹	-۱۰/۶۸	۴۵۲۶۷۶	۳۵۴۷۰۳۸	باران	P4
۲۶/۱۵	-۴۹/۴۵	-۹/۴۵	۴۵۴۲۸۷	۳۵۴۳۰۷۱	باران	P3
۱۶/۲۱	-۲/۳۷	-۱/۷۳	۴۶۱۱۶۴	۳۵۴۱۴۳۹	باران	P2
۲۵/۷۵	-۲۱/۸۵	-۵/۹۵	۴۶۱۱۶۴	۳۵۴۱۴۳۹	باران	P2
۲۸/۳۳	-۱۲/۹۵	-۵/۱۶	۴۶۱۱۶۴	۳۵۴۱۴۳۹	باران	P2
۲۵/۲۹	-۳۶/۷۹	-۷/۷۶	۴۶۱۱۶۴	۳۵۴۱۴۳۹	باران	P2
۱۸/۵۰	-۴/۳۰	-۲/۸۵	۴۶۱۱۶۴	۳۵۴۱۴۳۹	باران	P2
۲۱/۹۶	-۶/۸۴	-۳/۶۰	۴۶۱۲۵۹	۳۵۳۸۸۸۷	باران	P1
۲۷/۵۰	-۱۲/۵۰	-۵/۰۰	۴۶۱۲۵۹	۳۵۳۸۸۸۷	باران	P1
۲۶/۱۵	-۱۸/۸۱	-۵/۶۲	۴۶۱۲۵۹	۳۵۳۸۸۸۷	باران	P1
۲۲/۳۲	-۳۳/۱۲	-۶/۹۳	۴۶۱۲۵۹	۳۵۳۸۸۸۷	باران	P1
۱۵/۰۹	-۶/۵۳	-۱/۰۷	۴۶۱۲۵۹	۳۵۳۸۸۸۷	باران	P1
۱۸/۵۰	-۵۴/۳۸	-۹/۱۱	۴۵۴۲۸۷	۳۵۴۳۰۷۱	برف	P3
۲۰/۲۴	-۴۸/۴۸	-۸/۵۹	۴۵۲۶۷۶	۳۵۴۷۰۳۸	برف	P4
۲۳/۱۱	-۴۶/۶۵	-۸/۷۲	۴۵۲۶۷۶	۳۵۴۷۰۳۸	برف	P4
۱۹/۱۲	-۳۹/۰۴	-۷/۲۷	۴۵۴۲۸۷	۳۵۴۳۰۷۱	برف	P3
۱۷/۰۰	-۴۱/۲۴	-۷/۲۸	۴۵۴۲۸۷	۳۵۴۳۰۷۱	برف	P3
۲۵/۴۴	-۵۷/۱۲	-۱۰/۳۲	۴۵۲۶۷۶	۳۵۴۷۰۳۸	برف	P4
۲۳/۸۴	-۶۱/۱۲	-۱۰/۶۲	۴۵۲۶۷۶	۳۵۴۷۰۳۸	برف	P4
۱۹/۷۴	-۵۳/۸۶	-۹/۲۰	۴۵۴۲۸۷	۳۵۴۳۰۷۱	برف	P3
۲۵/۰۰	-۶۳/۲۴	-۱۱/۰۳	۴۵۴۲۸۷	۳۵۴۳۰۷۱	برف	P3

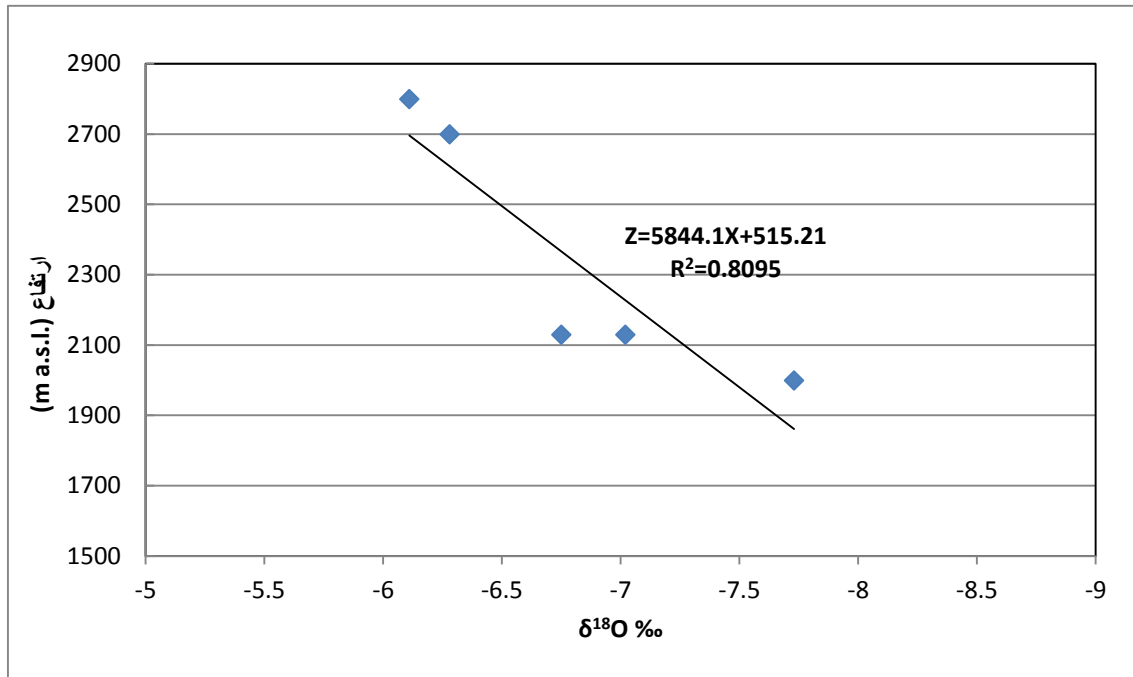
با استفاده از نمونه‌های بارش برف و باران، خط بارش محلی (Local meteoric water line) ترسیم و رابطه  $\delta D = 7.17\delta^{18}O + 15.46$  با همبستگی ۹۵ درصد حاصل گردید (شکل ۴-۱۷). این خط نسبت به خط بارش آب جهانی  $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$  و خط بارش آب مدیترانه‌ای  $\delta D = 8.11\delta^{18}O + 22$  دارای شیب کمتر ولی از نظر عرض از مبدأ دوتریوم (Deuterium excess) که از رابطه  $d = \delta D - 8\delta^{18}O$  محاسبه می‌گردد (Dansgaard 1964). بین خط جهانی (GMWL) و مدیترانه‌ای (MMWL) قرار دارد که نشان دهنده شرایط اقلیم محلی در محدوده مورد مطالعه است (کریمی ۱۳۹۲).



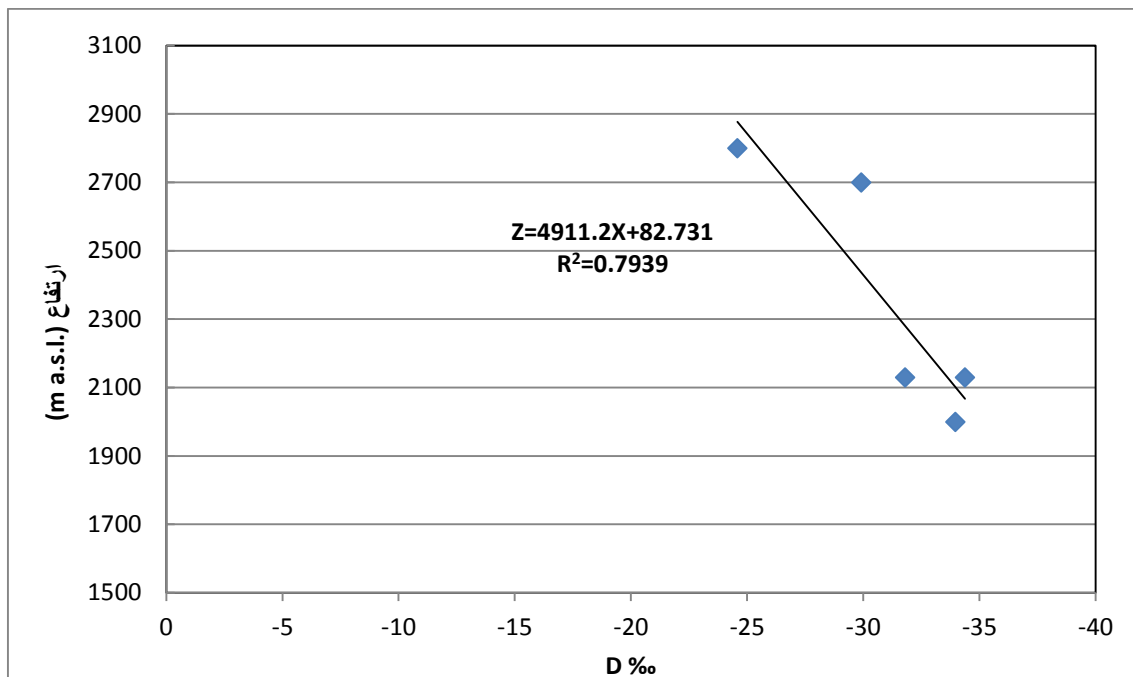
شکل ۴-۱۷- نمودار خط آب جوی محلی در محدوده مورد مطالعه

تغییرات  $\delta^{18}O$  نمونه‌های بارندگی نسبت به ارتفاع حدود ۰/۱۹ پرمیل (per mil) در هر ۱۰۰ متر با همبستگی حدود ۷۰ درصد است (شکل ۴-۱۸ و ۴-۱۹) و تغییرات  $\delta^{18}O$  نمونه‌های بارندگی نسبت به حجم بارش حدود ۱/۳ پرمیل در هر ۲۰ میلی‌متر بارش، با همبستگی حدود ۵۰ درصد می‌باشد.

همچنین با همبستگی کم (۴۰ درصد) تغییرات  $\delta^{18}\text{O}$  نمونه‌های بارنگی نسبت به دما حدود ۰/۹ پرمیل (per mil) در هر ۵ درجه تغییر دما است.



شکل ۴-۱۸- نمودار تغییرات ایزوتوپی  $\delta^{18}\text{O}$  نسبت به ارتفاع در یک تک بارش



شکل ۴-۱۹- نمودار تغییرات ایزوتوپی  $\delta D$  نسبت به ارتفاع در یک تک بارش

#### ۴-۳-۲- ترکیب ایزوتوپی رودخانه، گمانه‌ها و چشمه

با اندازه‌گیری ایزوتوپهای محیطی منابع آب زیرزمینی و سطحی هر محدوده به همراه تحلیل‌های هیدروژئولوژی می‌توان منشأهای مختلف تغذیه را مشخص نمود (Clark and Fritz 1997). آب رودخانه‌ها از رواناب سطحی، جریانهای زیرسطحی و آب زیرزمینی تشکیل شده است بنابراین از دیدگاه ایزوتوپی آب رودخانه‌ها را می‌توان ترکیبی از رواناب و آب زیرزمینی دانست که رواناب شامل جریانهای سطحی و زیرسطحی است (Lu et al. 2006).

از رودخانه در ۴ ایستگاه در بالادست چشمه و در حداقل و حداکثر آبدهی نمونه‌برداری انجام گردید. مطابق جدول (۴-۵) در نمونه‌های برداشت شده از رودخانه، مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  بین حداقل  $-۶/۶۷$  تا حداکثر  $-۶/۱۳$  پرمیل و برای دوتریوم بین  $-۳۳/۸۳$  تا  $-۲۶/۳۴$  پرمیل متغیر است. میانگین مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta\text{D}$  رودخانه به ترتیب  $-۶/۴۹$  و  $-۲۹/۸۳$  می‌باشد که به مراتب دارای دامنه تغییرات کمتر از آب بارندگی است. این امر نشان می‌دهد تاثیر رواناب در دبی پایه رودخانه کم و در عوض تاثیر آب زیرزمینی که عمدتاً چشمه‌ها می‌باشند در دبی پایه رودخانه کوه‌رنگ زیاد می‌باشد.

جدول ۴-۵- موقعیت و مقادیر ترکیب ایزوتوپی آب رودخانه

D-excess (%)	$\delta\text{D}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	مختصات		تاریخ برداشت	نام ایستگاه
			X	Y		
۲۲/۶۹	-۲۸/۸۳	-۶/۴۴	۴۶۲۶۴۵	۳۵۴۲۳۹۲	مهر ۱۳۹۷	R1
۲۳/۶۹	-۲۹/۰۸	-۶/۶۳	۴۶۳۸۹۴	۳۵۴۲۵۳۰	مهر ۱۳۹۷	R2
۲۱/۶۱	-۲۷/۴۳	-۶/۱۳	۴۶۱۲۱۷	۳۵۳۸۶۷۷	مهر ۱۳۹۷	R3
۲۵/۷۴	-۲۶/۳۴	-۶/۵۱	۴۶۲۶۹۴	۳۵۳۴۶۲۳	مهر ۱۳۹۷	R4
۱۹/۸۴	-۳۱/۴۴	-۶/۴۱	۴۶۲۶۴۵	۳۵۴۲۳۹۲	اردیبهشت ۱۳۹۷	R1
۲۰/۸۵	-۳۲/۵۱	-۶/۶۷	۴۶۲۶۴۵	۳۵۴۲۳۹۲	اردیبهشت ۱۳۹۷	R2
۲۰/۰۵	-۳۳/۲۳	-۶/۶۶	۴۶۲۶۹۴	۳۵۳۴۶۲۳	اردیبهشت ۱۳۹۷	R3
۲۲/۲۰	-۲۹/۸۰	-۶/۵۰	۴۶۳۸۹۴	۳۵۴۲۵۳۰	اردیبهشت ۱۳۹۷	R4

چشمه خدرزنده با دبی متوسط ۴۴۰ لیتر بر ثانیه در یال جنوبی تاقدیس و پایین دست محور سد قرار گرفته است. همانطور که توضیح داده شد منحنی فرود چشمه خدرزنده (SP5) از اواخر اردیبهشت ماه

شروع شده و دارای سه شیب است  $\alpha_1$  با شیب  $0/01$  نشان دهنده جریان حدواسط و  $\alpha_2$  و  $\alpha_3$  با ضرایب  $0/004$  و  $0/001$  نمایانگر جریان افشان در این تقادیس می‌باشد. با توجه به اطلاعات برای بررسی تغییرات ایزوتوپی آبخوان کارستی محدوده از چشمه خدرزنده به صورت ماهیانه (۱۲ نمونه) و از گمانه‌های یال شمالی و یال جنوبی تقادیس ۲۰ نمونه ایزوتوپی در حداقل و حداکثر سطح ایستابی برداشت گردید.

مطابق جدول (۴-۶) میانگین ترکیب ایزوتوپی چشمه برای  $\delta^{18}O$  برابر  $7/0$ - (حداقل  $7/6$ - و حداکثر  $6/4$ -) پرمیل و برای دوتریوم برابر  $33/8$ - (حداقل  $39/0$ - و حداکثر  $31/8$ -) پرمیل است. همچنین میانگین ترکیب ایزوتوپی برای گمانه‌های تقادیس برای  $\delta^{18}O$  برابر  $7/0$ - (حداقل  $7/6$ - و حداکثر  $6/3$ -) و برای دوتریوم برابر  $34/64$ - (حداقل  $42/1$ - و حداکثر  $32/0$ -) پرمیل است (جدول ۴-۷). با در نظر گرفتن کل اطلاعات چشمه و گمانه‌ها به عنوان ترکیب ایزوتوپی آبخوان تقادیس میانگین  $\delta^{18}O$  آبخوان برابر  $7/0$ - و برای  $\delta D$  برابر  $34/22$ - پرمیل است که دارای دامنه تغییرات بسیار کمتر از بارندگی می‌باشد. ترکیب ایزوتوپی آبخوان کارستی بین ترکیب ایزوتوپی رودخانه کوه‌رنگ و بارندگی قرار دارد. موقعیت نمونه‌های برداشت شده از رودخانه، گمانه‌ها و چشمه در نمودار  $\delta^{18}O$  و  $\delta D$  پیاده گردید (شکل ۴-۲۰). همانطور که مشخص است ترکیب ایزوتوپی چشمه بین ترکیب ایزوتوپی گمانه‌های یال شمالی، یال جنوبی و رودخانه قرار دارد و ترکیب ایزوتوپی گمانه‌های یال شمالی به ترکیب ایزوتوپی رودخانه نزدیکتر است. به همین دلیل این مطالعات همانند سطح آب زیرزمینی گمانه‌ها، ارتباط هیدرولیکی بین رودخانه، آب زیرزمینی در یال شمالی، آب زیرزمینی در یال جنوبی و چشمه در حال حاضر را تایید می‌کند.

مطابق با تغییرات  $^{18}O$  نسبت به ارتفاع، متوسط ارتفاع تغذیه حوضه آبرگیر چشمه‌های یال جنوبی حدود ۲۲۰۰ متر است. بر اساس اطلاعات ماهیانه ایزوتوپی ایستگاههای بارانسنجی میزان انحراف معیار در بارندگی تقادیس بسیار بالاست این در صورتی است که اطلاعات ماهیانه ایزوتوپ چشمه

خدرزنده و گمانه‌ها دارای انحراف معیار بسیار پایین و حداقل و حداکثر داده‌ها بسیار نزدیک به هم می‌باشد. با توجه به اینکه تغذیه به صورت نقطه‌ای (Sinkhole) در آبخوان وجود ندارد و تغذیه عمدتاً توسط سیستم درز و شکستگی در آهکهای جهرم آسماری انجام می‌گردد. انتظار می‌رفت تفریق ایزوتوپی بیشتری در ترکیب ایزوتوپیهای بارشهای نفوذی انجام گردد ولی ایزوتوپیهای آبخوان کارستی بر روی خط آب جوی و در محدوده مقادیر ایزوتوپی سبک قرار می‌گیرند. دلیل این موضوع زمان بارش و حجم بارش‌های محدوده می‌باشد. به طوری که بارش در محدوده فقط در فصل تر صورت می‌گیرد که رطوبت هوا بیشترین و تبخیر در این ماهها در حد صفر است در این شرایط تأثیر دما بر ایزوتوپیهای بارش محدوده بسیار کم است. از سویی دیگر میزان تغییر ترکیب ایزوتوپی نسب به حجم و نوع بارش نشان دهنده تأثیر زیاد این پارامترها بر ترکیب ایزوتوپی است. به همین دلیل می‌توان گفت بارشهای با حجم بالا و تغذیه از برف ترکیب ایزوتوپی آبخوان تاقدیس را تعیین می‌کند و بارشهای با حجم کم و مقدار ایزوتوپ بالا کمتر در آبخوان نفوذ می‌کنند.

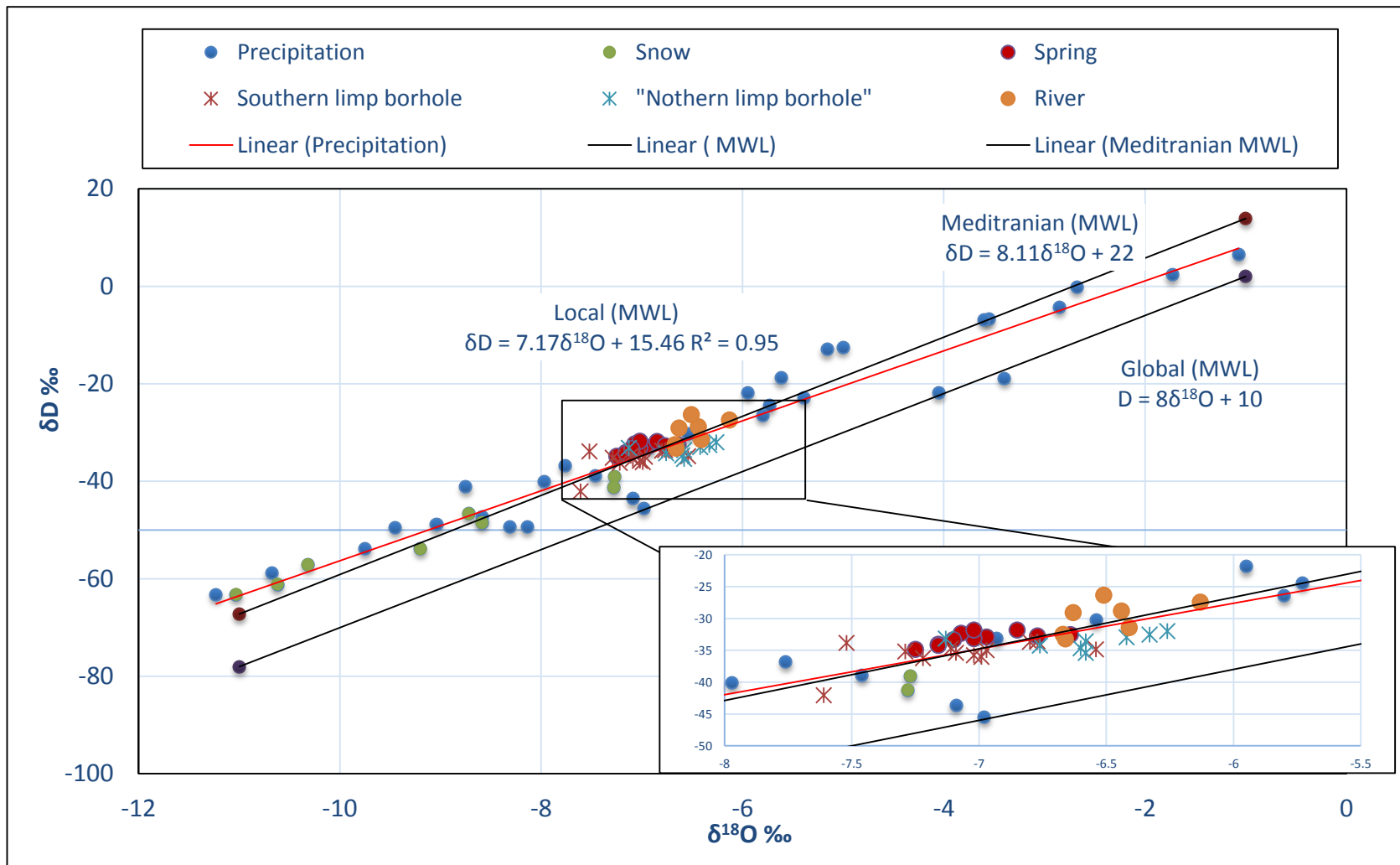
جدول ۴-۶- موقعیت و مقادیر ترکیب ایزوتوپی آب چشمه خدرزنده

D-excess (‰)	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	مختصات		تاریخ برداشت
			X	Y	
۲۲/۸۵	-۳۲/۹۱	-۶/۹۷	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	آذر ۱۳۹۶
۲۳/۲۱	-۳۴/۰۷	-۷/۱۶	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	دی ۱۳۹۶
۲۲/۹۷	-۳۳/۱۹	-۷/۰۲	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	بهمن ۱۳۹۶
۲۴/۲۳	-۳۲/۳۳	-۷/۰۷	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	اسفند ۱۳۹۶
۲۲/۹۶	-۳۱/۸۴	-۶/۸۵	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	فروردین ۱۳۹۷
۲۴/۳۵	-۳۱/۸۱	-۷/۰۲	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	اردیبهشت ۱۳۹۷
۲۰/۵۸	-۳۲/۵۴	-۶/۶۴	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	خرداد ۱۳۹۷
۲۱/۴۲	-۳۲/۷۴	-۶/۷۷	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	تیر ۱۳۹۷
۲۳/۱۳	-۳۴/۸۷	-۷/۲۵	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	مرداد ۱۳۹۷
۲۳/۰۶	-۳۴/۲۲	-۷/۱۶	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	شهریور ۱۳۹۷
۲۳/۴۵	-۳۳/۳۵	-۷/۱۰	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	مهر ۱۳۹۷
۲۱/۶۱	-۳۹/۰۳	-۷/۵۸	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	آبان ۱۳۹۷
۱۴/۱۵	-۳۷/۰۵	-۶/۴۰	۴۶۱۴۲۷	۳۵۳۸۶۳۸	آذر ۱۳۹۷



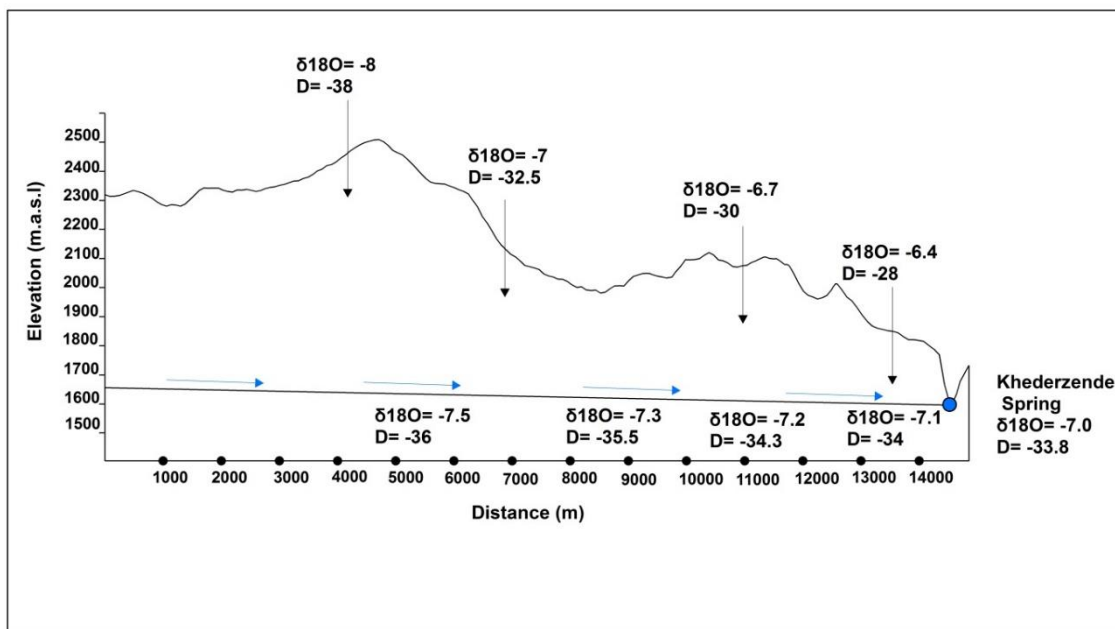
جدول ۴-۷- موقعیت و مقادیر ترکیب ایزوتوپی آب گمانه‌ها

D-excess (‰)	$\delta D$ (‰)	$\delta^{18}O$ (‰)	مختصات		تاریخ برداشت	نام ایستگاه
			X	Y		
۲۱/۴۹	-۳۶/۲۷	-۷/۲۱	۴۶۲۱۸۴	۳۵۴۲۳۲۵	اردیبهشت ۱۳۹۷	PR1
۲۳/۱۲	-۳۵/۲۰	-۷/۲۹	۴۶۲۳۵۷	۳۵۴۰۰۶۳	اردیبهشت ۱۳۹۷	PR2
۲۳/۸۸	-۳۳/۱۶	-۷/۱۳	۴۶۱۷۸۸	۳۵۳۹۶۷۲	اردیبهشت ۱۳۹۷	OB2
۲۲/۱۴	-۳۴/۷۴	-۷/۱۱	۴۶۲۲۱۶	۳۵۴۱۵۴۰	اردیبهشت ۱۳۹۷	OB3
۱۷/۴۶	-۳۴/۸۶	-۶/۵۴	۴۶۲۰۰۸	۳۵۴۳۳۵۸	اردیبهشت ۱۳۹۷	OB4
۱۷/۲۴	-۳۵/۴۰	-۶/۵۸	۴۶۱۴۶۷	۳۵۳۹۱۶۱	اردیبهشت ۱۳۹۷	OB6
۱۹/۰۶	-۳۳/۵۸	-۶/۵۸	۴۶۱۷۸۹	۳۵۳۹۳۷۸	اردیبهشت ۱۳۹۷	OB7
۱۸/۳۹	-۳۲/۹۷	-۶/۴۲	۴۶۱۴۷۱	۳۴۳۸۹۲۸	اردیبهشت ۱۳۹۷	OB8
۲۰/۳۵	-۳۵/۸۱	-۷/۰۲	۴۶۱۵۳۱	۳۵۴۰۷۱۶	اردیبهشت ۱۳۹۷	OB11
۲۶/۲۹	-۳۳/۸۷	-۷/۵۲	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	اردیبهشت ۱۳۹۷	OB5
۱۹/۷۹	-۳۴/۲۹	-۶/۷۶	۴۶۱۷۸۸	۳۵۳۹۶۷۲	مهر ۱۳۹۶	OB2
۲۰/۷۸	-۳۴/۹۸	-۶/۹۷	۴۶۲۲۱۶	۳۵۴۱۵۴۰	مهر ۱۳۹۶	OB3
۲۰/۵۷	-۳۳/۵۹	-۶/۷۷	۴۶۲۰۰۸	۳۵۴۳۳۵۸	مهر ۱۳۹۶	OB4
۱۸/۱۱	-۳۴/۶۹	-۶/۶۰	۴۶۱۴۶۷	۳۵۳۹۱۶۱	مهر ۱۳۹۶	OB6
۱۸/۱۰	-۳۱/۹۸	-۶/۲۶	۴۶۱۷۸۹	۳۵۳۹۳۷۸	مهر ۱۳۹۶	OB7
۱۸/۱۱	-۳۲/۵۳	-۶/۳۳	۴۶۱۴۷۱	۳۵۳۸۹۲۸	مهر ۱۳۹۶	OB8
۱۹/۸۶	-۳۶/۰۶	-۶/۹۹	۴۶۱۵۳۱	۳۵۴۰۷۱۶	مهر ۱۳۹۶	OB11
۲۰/۷۰	-۳۳/۷۰	-۶/۸۰	۴۶۲۱۸۴	۳۵۴۲۳۲۵	مهر ۱۳۹۶	PR1
۲۱/۳۰	-۳۵/۴۲	-۷/۰۹	۴۶۲۳۵۷	۳۵۴۰۰۶۳	مهر ۱۳۹۶	PR2
۱۸/۸۲	-۴۲/۰۶	-۷/۶۱	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	مهر ۱۳۹۶	OB5
۲۸/۵۴	-۳۳/۲۲	-۷/۷۲	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	آذر ۱۳۹۶	OB5
۲۹/۹۷	-۳۲/۹۱	-۷/۸۶	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	دی ۱۳۹۶	OB5
۲۸/۵۹	-۳۴/۵۳	-۷/۸۹	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	بهمن ۱۳۹۶	OB5
۲۷/۸۲	-۳۴/۵۸	-۷/۸۰	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	اسفند ۱۳۹۶	OB5
۲۸/۵۸	-۳۴/۸۶	-۷/۹۳	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	فروردین ۱۳۹۷	OB5
۲۷/۲۵	-۳۴/۹۹	-۷/۷۸	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	خرداد ۱۳۹۷	OB5
۲۵/۲۷	-۳۶/۴۹	-۷/۷۲	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	تیر ۱۳۹۷	OB5
۲۱/۸۲	-۳۸/۶۶	-۷/۵۶	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	مرداد ۱۳۹۷	OB5
۲۲/۸۴	-۳۷/۸۸	-۷/۵۹	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	شهریور ۱۳۹۷	OB5
۱۹/۶۸	-۳۵/۸۴	-۶/۹۴	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	آبان ۱۳۹۷	OB5
۱۴/۸۰	-۴۰/۳۲	-۶/۸۹	۴۶۱۶۹۳	۳۵۳۹۸۶۱	آذر ۱۳۹۷	OB5



شکل ۴-۲- نمودار مقادیر  $\delta^{18}O$  و  $\delta D$  منابع آب زیرزمینی محدوده نسبت به خط آب جوی محلی

ترکیب ایزوتوپی نمونه‌های آب گمانه‌ها در ترازهای مختلف نشان می‌دهد مقدار ایزوتوپ‌ها در گمانه‌های با تراز بالاتر به سمت گمانه‌های با تراز پایین‌تر سنگین‌تر می‌گردد این موضوع به دلیل نفوذ ترکیبات ایزوتوپی سنگین‌تر بارش، در ارتفاعات پایین‌تر حوضه آبرگیر چشمه است. به طوری که هر چه به سمت ترازهای پایین و خروجی چشمه‌ها نزدیک می‌گردد، ترکیب ایزوتوپی گمانه‌ها به ترکیب ایزوتوپی چشمه نزدیک‌تر می‌گردد. مدل مفهومی تغییرات ایزوتوپهای پایدار آبخوان کارستی مطابق با شکل (۴-۲۱) می‌باشد.



شکل ۴-۲۱- مدل مفهومی تغییرات ایزوتوپ‌های طبیعی در طول تاقدیس

### ۴-۳-۳- موازنه جرمی ترکیب ایزوتوپی منابع آب محدوده

ترکیب مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta\text{D}$  آب زیرزمینی معادل وزنی منشاء تغذیه نظیر ترکیب ایزوتوپی سالانه آب بارش و رودخانه است. همانطور که گفته شد آبخوان کارستی تاقدیس از طریق بارش بر روی حوضه آبرگیر چشمه و رودخانه تغذیه می‌گردد. از این رو تعیین سهم هر یک از این منابع برای تشریح شرایط هیدروژئولوژیک منطقه از اهمیت بسزای برخوردار است. ترکیب ایزوتوپی چشمه و آبخوان کارستی به مقادیر ترکیب ایزوتوپی  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta\text{D}$  و نسبت حجمی تغذیه از هر یک از منشاءهای

تغذیه وابسته است. با استفاده از تحلیل موازنه جرمی برای مقادیر ترکیب‌های ایزوتوپی، درصد‌های تغذیه آبخوان از منشاء‌های مختلف تغذیه برآورد می‌گردد این اختلاط از معادله خطی ساده‌ای تعیین می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌گردد (Yeh et al. 2009).

$$C(V_A + V_B) = AV_A + BV_B \quad (4)$$

$$C = A \frac{V_A}{V_A+V_B} + \frac{V_B}{V_A+V_B} = A(1 - X) + BX \quad (5)$$

که در آن عبارات A، B و C به ترتیب بیانگر مقدار ایزوتوپ‌های پایدار در آب بارندگی، آب رودخانه و آب زیرزمینی است. عبارات  $V_A$  و  $V_B$  به ترتیب مقدار حجمی تغذیه از آب بارندگی و آب رودخانه می‌باشد عبارت X نسبت تغذیه از رودخانه و (1-X) نسبت تغذیه از بارش در حوضه آبگیر چشمه است.

محاسبه نسبت تغذیه آبخوان تاقدیس با بکارگیری این معادله، هم بر اساس میانگین مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{18}\text{O}$  و هم بر اساس میانگین مقادیر ایزوتوپی  $\delta\text{D}$  در آب بارندگی، رودخانه و چشمه انجام گردید. بر اساس مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{18}\text{O}$  نتایج بدست آمده نشان دهنده سهم ۸۵ درصدی آب بارندگی و سهم ۱۵ درصدی رودخانه در تغذیه چشمه می‌باشد. بر اساس مقادیر ایزوتوپی  $\delta\text{D}$  سهم بارندگی در تغذیه چشمه ۷۸ درصد و سهم رودخانه برابر ۲۲ درصد می‌باشد.

#### ۴-۳-۴- تحلیل مطالعات ایزوتوپی

برای تعیین مسیرهای احتمالی نشت از مخزن و تعیین ارتباط هیدرولیکی رودخانه، آبخوان کارستی و چشمه پایین دست از ایزوتوپ‌های پایدار محیطی  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta\text{D}$  استفاده گردید. برای این منظور خط آب جوی محلی محدوده به صورت رابطه  $\delta\text{D} = 7.17\delta^{18}\text{O} + 15.46$  تعیین گردید. مقادیر ایزوتوپی برای کل بارش (برف و باران) در محدوده تاقدیس به طور میانگین برای  $\delta^{18}\text{O}$  ۷/۱۱- پرمیل و برای  $\delta\text{D}$  ۳۵/۴۴- پرمیل است. مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  نمونه‌های بارندگی نسبت به ارتفاع و حجم کاهش پیدا می‌کند

به طوری که مقدار  $\delta^{18}\text{O}$  نمونه‌ها حدود ۰/۱۹ پرمیل (per mil) در هر ۱۰۰ متر افزایش ارتفاع کاهش پیدا می‌کند و نسبت به حجم بارش حدود ۱/۳ پرمیل با هر ۲۰ میلیمتر افزایش بارش کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات  $\delta^{18}\text{O}$  نمونه‌های بارنگی نسبت به دما زیاد نمی‌باشد و حدود ۰/۹ پرمیل (per mil) در هر ۵ درجه تغییر دما است. در نمونه‌های برداشت شده از رودخانه میانگین مقادیر  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta\text{D}$  رودخانه به ترتیب ۶/۴۹- و ۲۹/۸۳- می‌باشد که به مراتب دارای دامنه تغییرات کمتر از آب بارندگی است. دامنه تغییرات کم رودخانه نشان می‌دهد تاثیر رواناب در دبی پایه رودخانه کم و در عوض تاثیر آب زیرزمینی که عمدتاً چشمه‌ها می‌باشند در دبی پایه رودخانه کوه‌رنگ و بهشت‌آباد زیاد می‌باشد. میانگین ترکیب ایزوتوپی چشمه برای  $\delta^{18}\text{O}$  برابر ۷/۰- (حداقل ۷/۶- و حداکثر ۶/۴-) پرمیل و برای دوتریوم برابر ۳۳/۸- (حداقل ۳۹/۰- و حداکثر ۳۱/۸-) پرمیل است. مقادیر ترکیب ایزوتوپی برای گمانه‌های تاقدیس برای  $\delta^{18}\text{O}$  برابر ۷/۰- (حداقل ۷/۶- و حداکثر ۶/۳-) و برای دوتریوم برابر ۳۴/۶۴- (حداقل ۴۲/۱- و حداکثر ۳۲/۰-) پرمیل است. با در نظر گرفتن کل اطلاعات چشمه و گمانه‌ها به عنوان ترکیب ایزوتوپی آبخوان تاقدیس میانگین  $\delta^{18}\text{O}$  آبخوان برابر ۷/۰- و برای  $\delta\text{D}$  برابر ۳۴/۲۲- پرمیل است که نشان می‌دهد منابع آب زیرزمینی محدوده دارای دامنه تغییرات بسیار کمتر از بارندگی می‌باشد.

ترکیب ایزوتوپی چشمه بین ترکیب ایزوتوپی گمانه‌های یال شمالی، یال جنوبی و رودخانه قرار دارد و ترکیب ایزوتوپی گمانه‌های یال شمالی به ترکیب ایزوتوپی رودخانه نزدیکتر است. به همین دلیل این مطالعات نیز همانند سایر مطالعات هیدروژئولوژی، ارتباط هیدرولیکی بین رودخانه، آب زیرزمینی در یال شمالی، آب زیرزمینی در یال جنوبی و چشمه در حال حاضر را تایید می‌کند. محاسبه نسبت تغذیه چشمه تاقدیس از رودخانه و بارش بر اساس میانگین مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{18}\text{O}$  و هم بر اساس میانگین مقادیر ایزوتوپی  $\delta\text{D}$  در آب بارندگی، رودخانه و چشمه انجام گردید بر اساس مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{18}\text{O}$  نتایج بدست آمده نشان دهنده سهم ۸۵ درصدی آب بارندگی و سهم ۱۵ درصدی رودخانه در

تغذیه چشمه می‌باشد. بر اساس مقادیر ایزوتوپی  $\delta D$  سهم بارندگی در تغذیه چشمه ۷۸ درصد و سهم رودخانه برابر ۲۲ درصد می‌باشد.

#### ۴-۴- تحلیل شرایط هیدروژئولوژی کارست جناح راست

بررسی‌های مختلف هیدروژئولوژی برای تعیین ارتباط هیدرولیکی یال شمالی و جنوبی تاقدیس سنگویل صورت گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده همدیگر را تایید می‌کنند. سطح آب آبخوان سازند جهرم - آسماری در جناح راست مخزن دارای نوسانات بسیار مشابه با اختلاف حداقل و حداکثر ۲/۵ تا ۳ متر است. جریان از یال شمالی با تراز حدود ۱۶۲۵ به سمت چشمه‌ها در یال جنوبی با تراز حدود ۱۵۹۵ و با گرادیان حدود ۷ در هزار صورت می‌گیرد. تخلیه از چشمه‌ها در یال جنوبی و پایین دست محور سد با نوسانات مشابه دارای سه ضریب فرود است. ضریب  $\alpha_1$  در پایه  $10^{-2}$  نشان دهنده جریان افشان - مجرای و ۱۵ درصد از جریان آبخوان را شامل می‌گردد. ضرائب  $\alpha_2, \alpha_3$  در پایه  $10^{-3}$  نمایانگر جریان افشان آبخوان و حدود ۸۵ درصد جریان منحنی فرود چشمه را تشکیل می‌دهد. تغییرات پارامترهای هیدروشیمی آبخوان در جناح راست مخزن در چشمه‌ها و گمانه‌ها نیز دارای نوسانات کم است. این تغییرات برای آنیونها و کاتیونها کمتر از ۲۰ درصد و برای هدایت الکتریکی و pH کمتر از ۵ درصد است این میزان تغییرات نشان دهنده جریان افشان تا حدواسط (افشان - مجرای) آبخوان کارستی جهرم - آسماری می‌باشد.

ایزوتوپهای پایدار ارتفاع تغذیه منابع آب یال جنوبی را حدود ۲۳۰۰ متر (ارتفاع از سطح دریا) و از بارشهای پر حجم و برف نشان می‌دهد. این موضوع با واقعیت توپوگرافی و نوع و میزان بارش در محدوده تاقدیس منطبق است. ترکیب ایزوتوپی چشمه‌های یال جنوبی حد فاصل مقادیر ایزوتوپی گمانه‌های یال شمالی و یال جنوبی قرار دارد که نشان می‌دهد حوضه آبخیز چشمه‌ها در یال جنوبی چه در جناح چپ (SPL) و چه در جناح راست (SP5) سد از دو یال تاقدیس منشأ می‌گیرد.

به طور کلی بررسی‌های هیدروژئولوژی نشان می‌دهد آبخوان کارستی جهرم - آسماری در جناح راست مخزن سد یک آبخوان با نوع جریان افشان تا افشان - مجرای است. تغذیه این آبخوان از دو یال تاقدیس و عمدتاً از طریق سیستم درز و شکستگی‌ها صورت می‌گیرد. جهت جریان آب زیرزمینی از یال شمالی به سمت یال جنوبی بوده و در چشمه‌های یال جنوبی تخلیه می‌گردد. در چنین شرایطی ارتباط هیدرولیکی بین یال شمالی تاقدیس با یال جنوبی در شرایط فعلی وجود دارد این ارتباط در زمان تشکیل مخزن، بین مخزن و چشمه‌های پایین دست محور سد با گرادیان بیشتر (حدود ۳۷ در هزار) برقرار می‌گردد. در این صورت با آگیری سد، عمده جریان نشتی از جناح راست مخزن در یال شمالی تاقدیس به سمت یال جنوبی حرکت کرده و در نهایت در چشمه‌های یال جنوبی تخلیه می‌گردد. به همین دلیل می‌توان گفت برای آبنندی جناح راست مخزن به سمت پایین دست باید چاره اندیشی گردد.





## ۵- فصل پنجم: تاثیر مقیاس بر آهکهای جهرم-آسماری در جناح

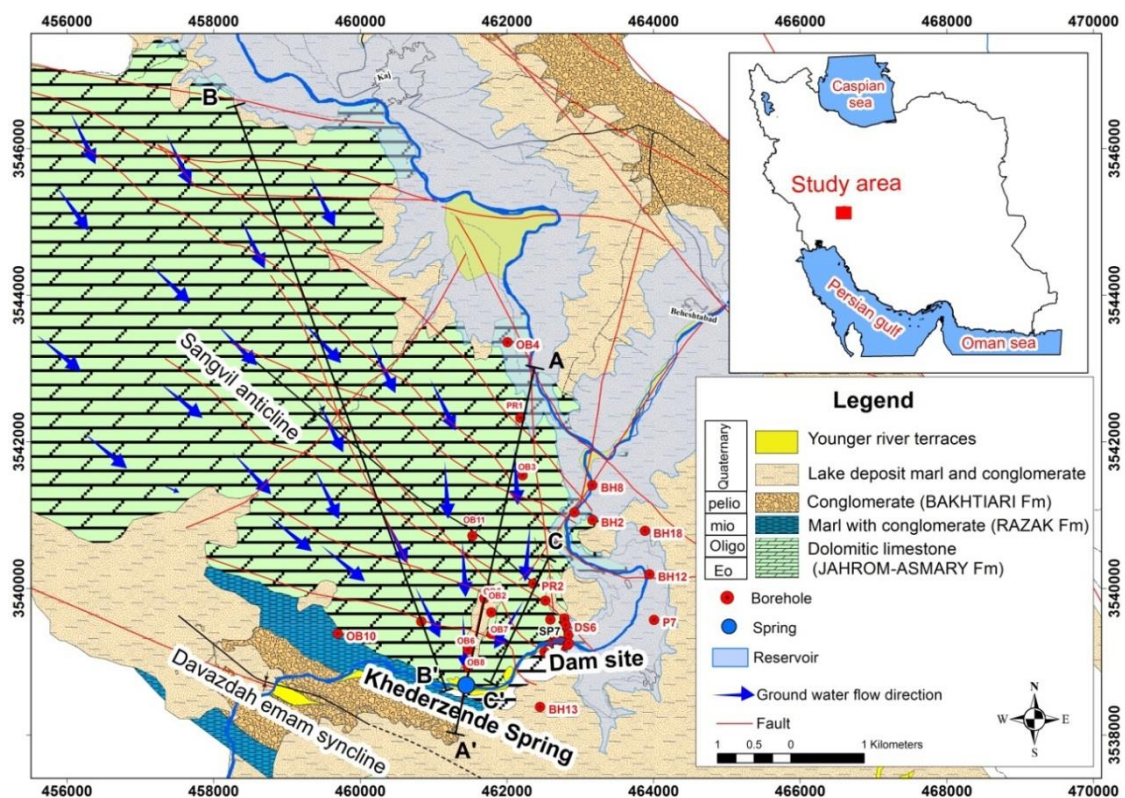
### راست مخزن سد

با توجه به اینکه آهکهای کارستی به طور معمول ناهمسو و ناهمگن می‌باشد و ناهمگنی آبخوان‌های کارستی معمولاً با هدایت هیدرولیکی مشخص می‌گردد، به همین دلیل هدایت هیدرولیکی به عنوان مهمترین پارامتر هیدروژئولوژیک با روشهای مختلف در سه مقیاس کوچک، محلی و ناحیه‌ای در آهکهای کارستی جناح راست مخزن سد بهشت‌آباد آزمایش گردید. در نهایت اثر مقیاس در آهکهای جهرم-آسماری محاسبه و تاثیر آن بر میزان نشت از مخزن برآورد گردید.

### ۵-۱- اثر مقیاس بر میزان هدایت هیدرولیکی سازند جهرم-آسماری

دستیابی به اطلاعات هیدروژئولوژی همواره با عدم قطعیت مواجه می‌باشد این عدم قطعیت می‌تواند ناشی از عوامل مختلف همچون عدم قطعیت اندازه‌گیری، تحلیل داده‌ها، میانبایی داده‌ها، اثر مقیاس و ... باشد (McMillan *et al.* 2018). اثر مقیاس یکی از مهمترین عدم قطعیت‌ها برای تعیین هدایت هیدرولیکی گستره‌های کارستی است. به طوری که با تغییر حجم نمونه و تغییر نوع آزمایش میزان هدایت هیدرولیکی تغییر پیدا می‌کند. معمولاً هدایت هیدرولیکی در مقیاس‌های کوچک (مغزه‌های حفاری، آزمایش لوزن و اسلاگ) در مقایسه با مقیاس‌های محلی (آزمایش پمپاژ) و مقیاس‌های بزرگ (منحنی فرود، ردیابی و دارسی) به مراتب کمتر می‌باشد. هدایت هیدرولیکی در هر مقیاس، شرایط ناپیوستگی‌ها در آن مقیاس را در دل خود بیان می‌کند به طوری که در مقیاس کوچک هدایت

هیدرولیکی غالب مربوط به درز و شکستگی‌ها کوچک، در مقیاس محلی هدایت هیدرولیکی غالب مربوط به درز و شکستگی‌ها و مجاری جریان کارستی محلی و در مقیاس ناحیه‌ای میزان هدایت هیدرولیکی معادل همه ناپیوستگی‌ها اعم از درزو شکستگی مجاری کوچک و بزرگ کارستی در هدایت هیدرولیکی می‌باشد (Sauter 1991). این مسئله باعث وجود طیفی از هدایت هیدرولیکی با افزایش مقیاس می‌گردد. برای تعیین این اثر در آهکهای جهرم - آسماری جناح راست مخزن سد آزمایشهای مختلف انجام شد سپس برای تعیین میزان نشت از مخزن در جناح راست نیز، مقطع نماینده جریان از مخزن (A-A') مدلسازی گردید و به کل سطح تماس مخزن با آهک تعمیم داده شد (شکل ۵-۱). در نهایت مقدار نشت با استفاده از میزان هدایت هیدرولیکی در مقیاس‌های مختلف محاسبه و مقایسه گردید.



شکل ۵-۱- مقطع نماینده جریان (A-A') به سمت پایین دست مخزن

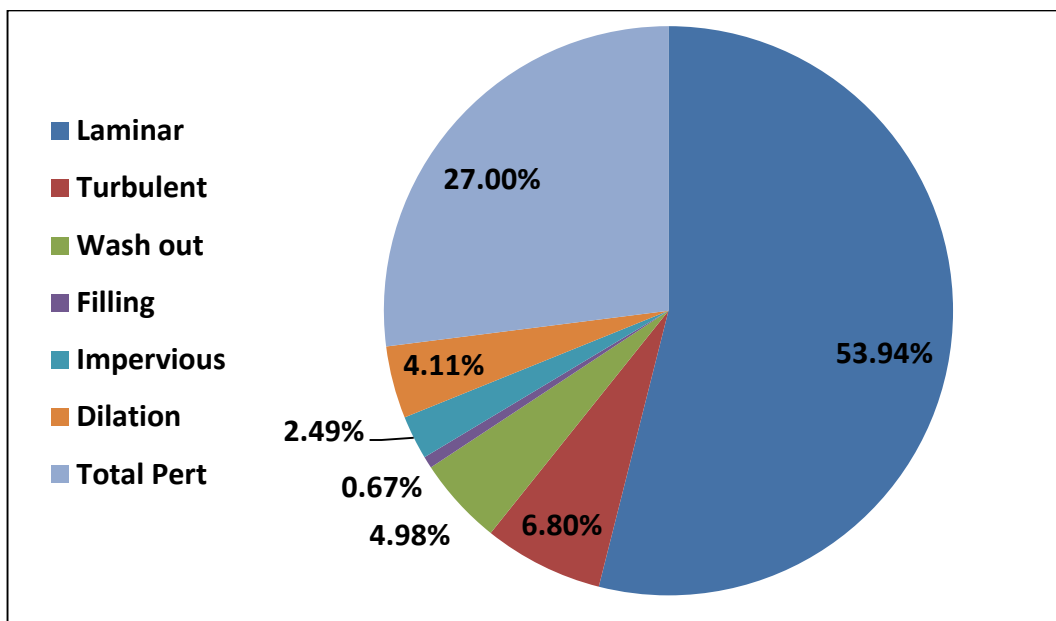
## ۵-۱-۱- انجام و تحلیل آزمایش‌ها در مقیاس کوچک

هدایت هیدرولیکی در کارست را میتوان با استفاده از روشهای مختلف محاسبه نمود. در بین روشهای مختلف کمترین هدایت هیدرولیکی با استفاده از روشهای آزمایشگاهی و بیشترین هدایت هیدرولیکی از ارزیابی مقیاس حوضه حاصل می‌گردد. آزمایشهای مقیاس کوچک (Sub-local scale) شامل آزمایش لوژن (Double packer test)، اسلاک (Slug test) و تزریق آب (Injection test) می‌باشد (Sauter 1991). از روشهای ذکر شده، در این مطالعات برای تعیین هدایت هیدرولیکی در مقیاس کوچک از روش‌های لوژن و اسلاک استفاده گردید.

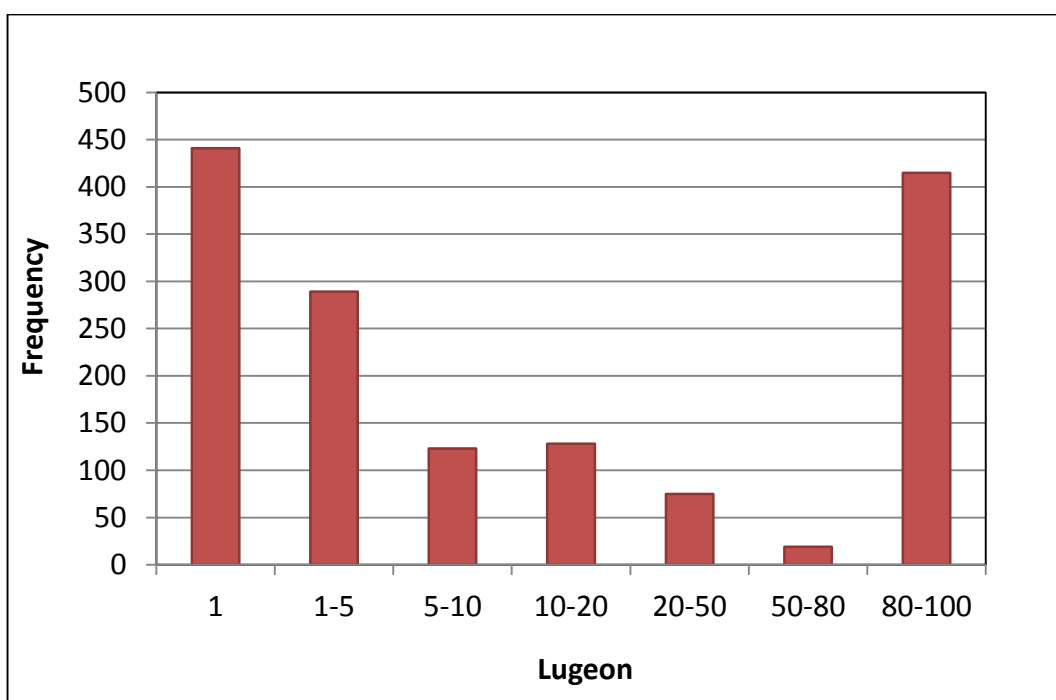
### ۵-۱-۱-۱- آزمایش‌های لوژن

برای تعیین میزان هدایت هیدرولیکی با استفاده از آزمایش لوژن تمامی اطلاعات مربوط به این آزمایش در ۲۷ گمانه در جناح راست مخزن جمع‌آوری گردید. این گمانه‌ها با هدف بررسی پرده تزریق، زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی مخزن و ساختگاه حفاری گردیده است. کمترین عمق گمانه مربوط به گمانه DT<sub>2</sub> با عمق حدود ۷۰ متر و بیشترین عمق گمانه مربوط به گمانه OB<sub>11</sub> با عمق ۵۰۰ متر می‌باشد. گمانه‌ها به صورت تلسکوپی حفاری شده و قطر شروع حفاری ۱۰۱ میلی‌متر و قطر اتمام حفاری ۷۶ میلی‌متر گزارش شده است. در این گمانه‌ها حدود ۱۴۸۵ تست لوژن با طول مقاطع اندازه‌گیری عمدتاً ۵ متری و به صورت پیوسته انجام گرفته است (زاینداب ۱۳۸۶). بررسی رفتار لوژن نشان داد حدود ۵۴ درصد لوژنها دارای رفتار لامینار (Laminar)، ۷ درصد رفتار آشفته (Turbulent) و ۵ درصد آبشستگی (Washout)، ۲ درصد غیر قابل نفوذ (Impervious)، ۴ درصد جذب آب در اثر پدیده اتساع (Dilation) و ۲۸ درصد هدر رفت آب یا فشار نگرفته (Total pert) گزارش شده است (شکل ۵-۲). در این میان بیشترین فراوانی آزمایشهای لوژن مربوط به لوژن ۱ با نتیجه حدود ۴۴۰ آزمایش و در مرحله بعد لوژن بین ۸۰ تا ۱۰۰ با نتیجه ۴۱۵ آزمایش است (شکل ۵-۳). این شرایط نشان دهنده ناهمگنی و ناهمسویی در کارست محدوده می‌باشد. همچنین بررسی آزمایش لوژن نسبت

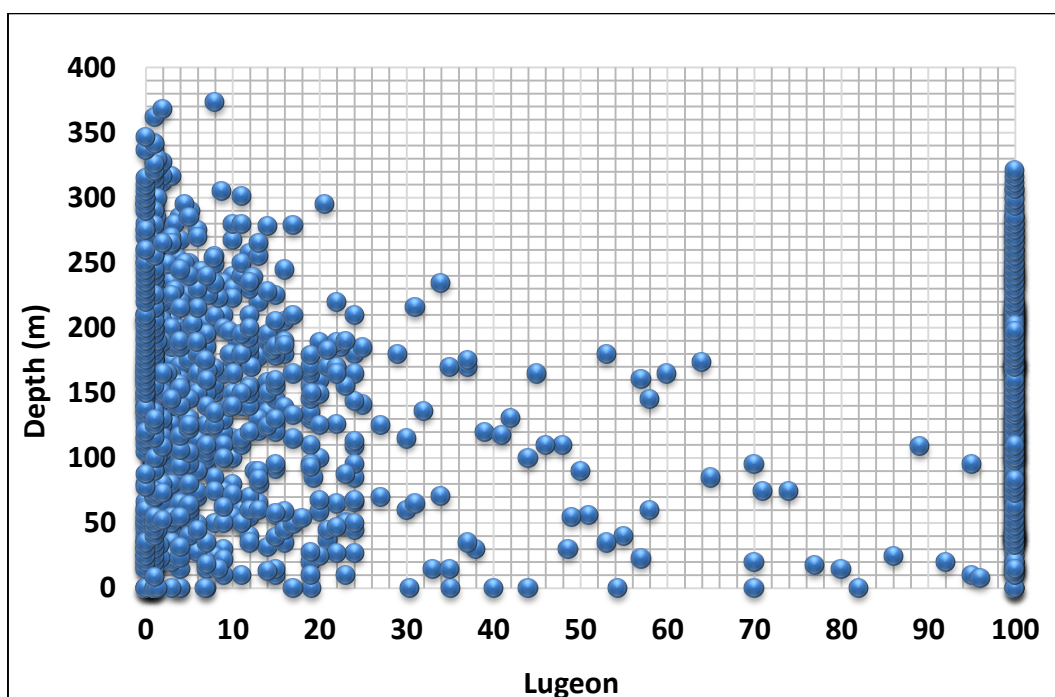
به عمق بدون در نظر گرفتن رفتار هدر رفت کامل آب (Total pert) یک روند کاهشی نشان می‌دهد. ولی با در نظر گرفتن رفتار هدر رفت کامل آب میتوان گفت مقدار لوژن نسبت به عمق دارای روند کاهشی نیست که خود دلیلی بر کارستی بودن این آهکها است (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵- رفتارهای مختلف آزمایش لوژن در آهکهای چهارم-آسماری



شکل ۳-۵- فراوانی اعداد لوژن در آهکهای چهارم-آسماری



شکل ۵-۴- تغییر مقدار اعداد لوژن آهکهای جهرم-آسماری نسبت به عمق گمانه

برای تبدیل اعداد لوژن به هدایت هیدرولیکی بر اساس قوانین دارسی، مدل‌های تحلیلی مختلفی ارائه شده است (Hvorslev 1951, Gibson 1963, Hamm *et al.* 2007, Yihdego 2017). در این مطالعات با توجه به اینکه عمده رفتار لوژنها لامینار می‌باشد از معادله (Hvorslev 1951) و آخرین گام فشاری آزمایش برای تخمین هدایت هیدرولیکی استفاده گردید.

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} \ln \left[ \frac{L}{2r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{2r_w}\right)^2} \right] \quad (1)$$

$$H = H_w + H_p - H_l \quad (2)$$

که در آن،  $K$ : میزان هدایت هیدرولیکی،  $Q$ : حجم آب در شرایط پایدار،  $L$ : طول مقطع مورد آزمایش،  $H$ : فشار مؤثر در مقطع مورد آزمایش،  $r_w$ : شعاع گمانه،  $H_w$ : عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی و  $H_p$ : فشار تزریق است.

کمترین میزان هدایت هیدرولیکی با استفاده از این روش  $1/93 \times 10^{-8}$  متر بر ثانیه و بیشترین مقدار آن  $1/5 \times 10^{-5}$  متر بر ثانیه محاسبه گردید. میانگین هندسی هدایت هیدرولیکی با استفاده از این روش در مقاطع ۱۰ متری حدود  $2/73 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه برآورد گردید. این مقدار میانگین هدایت هیدرولیکی در مقیاس کوچک (Sub local) آهکهای جهرم-آسماری را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است وجود ۲۸ درصد داده‌های هدر رفت آب (Total pert) یا فشار نگرفته در محیط کارستی باعث در نظر نگرفتن بخش عمده‌ای از نفوذپذیری‌ها در این روش می‌گردد که اتفاقاً نفوذپذیری اصلی توده سنگ را تشکیل می‌دهد و این آزمایش با مقیاس کوچک قادر به اندازه‌گیری آن نیست.

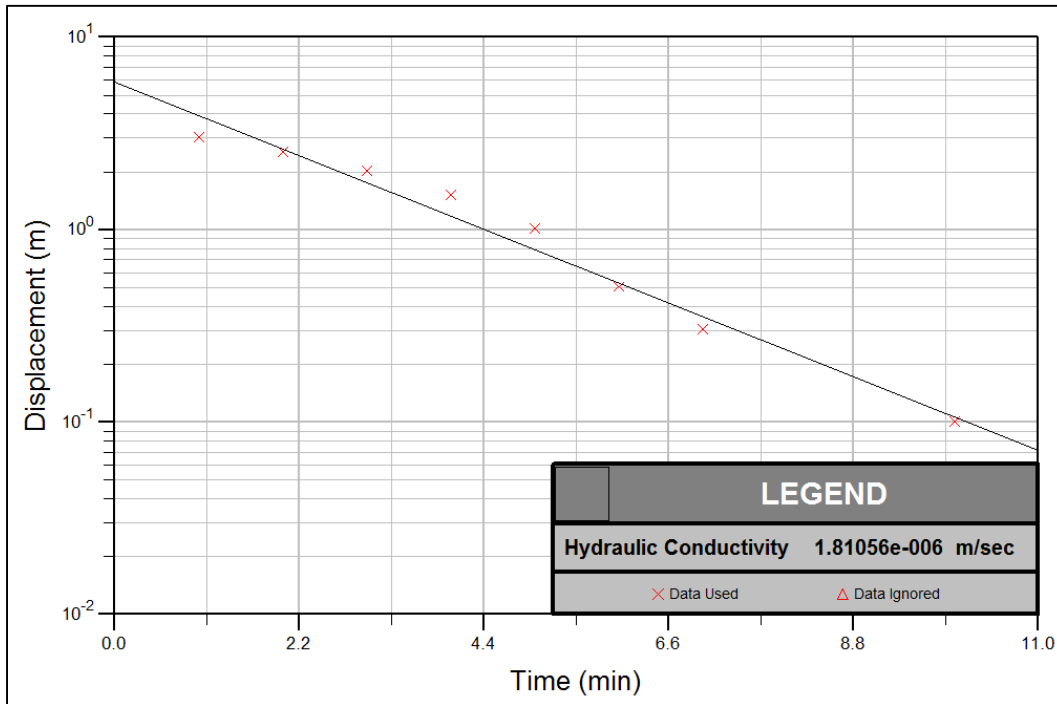
#### ۵-۱-۱-۲- آزمایش اسلاگ

این آزمایش در هفت مقطع حفاری شده با عمق برخورد به سطح آب کم، انجام گردید. گمانه‌ها پیزومتر شده و در مقاطع ۳ تا ۵ متری مشبک و آب به داخل گمانه تزریق گردید و زمان پایین رفت سطح آب و میزان افت برداشت گردید. در این مقیاس میزان هدایت هیدرولیکی با استفاده از روش بوور و رایس و معادله زیر (Bouwer and Rice 1976) در نرم افزار Aquifer Win32 تحلیل گردید (شکل‌های ۵-۵ و ۶-۵).

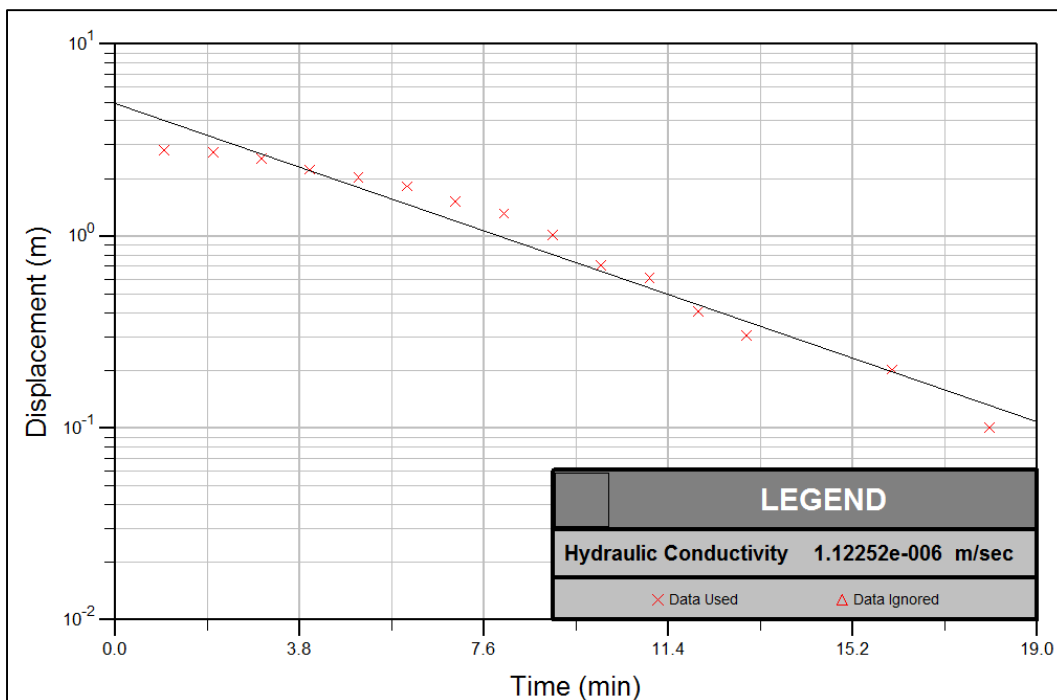
$$K_r = \frac{r_c^2 \ln(R_e/r_w)}{2L_e} \frac{1}{t} \ln \left[ \frac{H_0}{H_t} \right] \quad (3)$$

که در این معادله،  $K_r$ : هدایت هیدرولیکی،  $r_c$ : شعاع لوله پیزومتری،  $r_w$ : شعاع گسترش گراول،  $R_e$ : شعاع مؤثر حذف اثر ارتفاع آب،  $L_e$ : طول لوله مشبک شده،  $H_0$ : میزان افت در زمان  $t=0$ ،  $H_t$ : میزان افت در زمان  $t=t$  می‌باشد.

در این مطالعات مطابق با تحلیل‌های انجام شده میزان هدایت هیدرولیکی در کمترین حالت  $1/1 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه و در بیشترین حالت  $3/3 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه برآورد شد. میزان هدایت هیدرولیکی با استفاده از این روش به طور میانگین حدود  $2/1 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه محاسبه گردید.

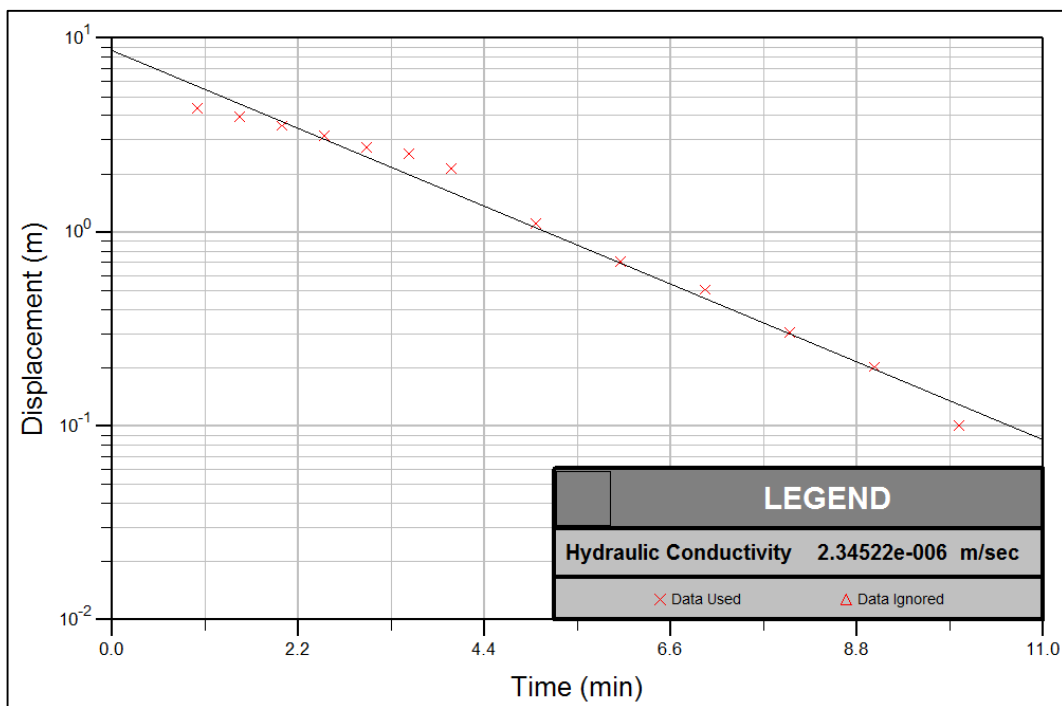


الف

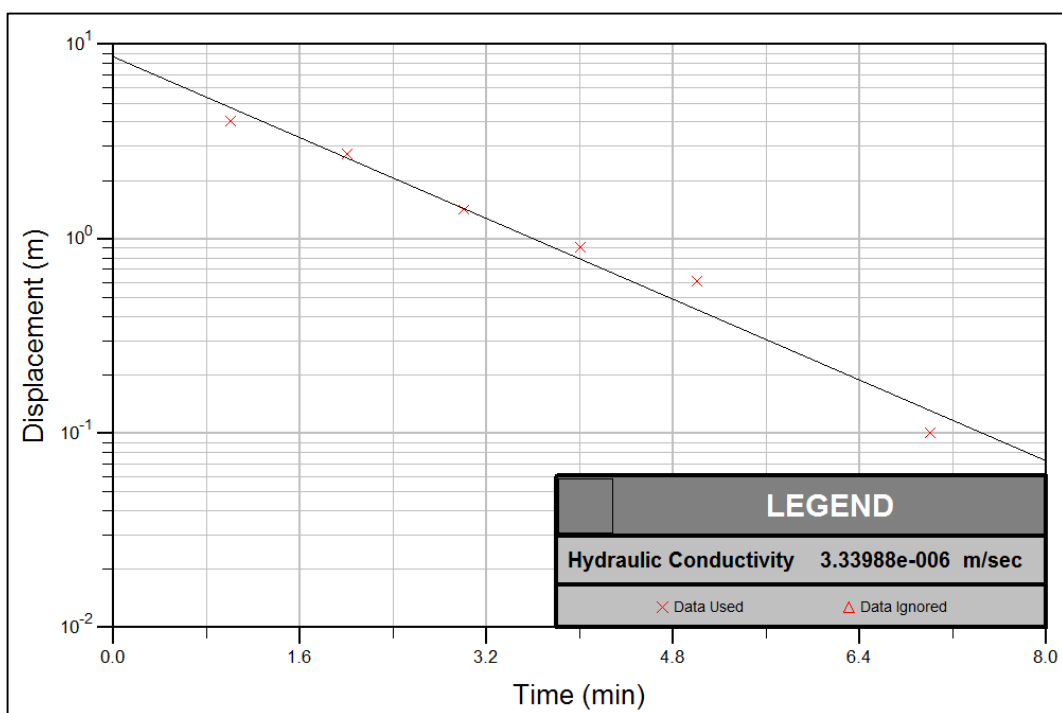


ب

شکل ۵-۵- مقدار هدایت هیدرولیکی در آزمایش اسلاگ الف: مقطع P1 ب: مقطع P2



الف



ب

شکل ۵-۶- میزان هدایت هیدرولیکی در آزمایش اسلاگ الف: مقطع P3 ب: مقطع P4



## ۵-۱-۲- انجام و تحلیل آزمایش‌ها در مقیاس محلی

با توجه به اینکه آزمایش پمپاژ در محدوده به دلایل مختلف صورت نگرفت. برای تعیین هدایت هیدرولیکی در مقیاس محلی از دبی چشمه و سطح آب گمانه نزدیک به آن استفاده گردید. دبی جریان خروجی متمرکز یک آبخوان کارستی می‌تواند به عنوان یک چاه پمپاژ فرض شده و قابلیت انتقال و آبدهی ویژه آن محاسبه گردد. برای این منظور باید حداقل یک پیزومتر در نزدیک چشمه حفاری گردد تا نوسان سطح آب آبخوان را نشان دهد. تخلیه از یک چشمه را میتوان مانند یک آزمایش پمپاژ با دبی متغیر مورد بررسی قرار داد. در این صورت مقادیر  $\Delta H$  در گمانه مجاور به عنوان نزول متوالی بار آبی آبخوان در جریان غیردائم در طول دوره تخلیه به حساب می‌آید. معادله تاپس از نظر ریاضی بهترین شکل بیان این نوع جریان می‌باشد و برای یک آبخوان کارستی ضرایب هیدرودینامیک از معادله‌های زیر حاصل می‌گردد (Milanovic 1981).

$$\Delta H = \frac{0.183 \times Q}{T} \left( \log \frac{2.25t}{x^2 S} + \log t \right) \quad (4)$$

که در این معادله،  $\Delta H$ : کاهش سطح آب آبخوان،  $Q$ : آبدهی چشمه،  $X$ : فاصله بین چشمه و پیزومتر،  $t$ : زمان،  $T$ : قابلیت انتقال آبخوان کارستی،  $S$ : تخلخل مؤثر می‌باشد.

تغییرات  $\Delta H$  برحسب  $t$  خط مستقیمی را نشان می‌دهد اگر  $t$  روی محور طولها و  $\Delta H$  روی محور عرضها در مقیاس نیمه لگاریتمی رسم شود و در فاصله زمانی  $\log(t)=1$ ، قابلیت انتقال ( $T$ ) بوسیله رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{0.183 \times Q_a}{C} \quad (5)$$

که در این معادله،  $Q_a$ : میانگین تخلیه برای بخشی از منحنی فروکش که بوسیله ضریب تخلیه مربوطه  $\alpha$  مشخص شده،  $C$ : کاهش  $\Delta H$  در فاصله زمانی که  $\log(t) = 1$  است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C = \frac{\Delta R}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta R_2 - \Delta R_1}{\log t_2 - \log t_1} \quad (6)$$

که در آن،  $\Delta R$ : تغییرات ذخیره دینامیکی آبخوان کارستی برحسب میلیمتر بار پیزومتریک و  $t$ : فاصله زمانی است که در آن ذخیره برای ستون آب  $\Delta R$  تغییر می‌کند.

آبدهی ویژه نیز بوسیله رابطه زیر بدست می‌آید:

$$S = \frac{2.25T t_0}{x^2} \quad (7)$$

که در آن،  $t_0$ : زمانی که سطح آب  $\Delta H = 0$  است یا وقتی که ذخیره آب در آبخوان تحت بررسی ( $\Delta H$ ) به سمت صفر می‌رود یا هنگامی که  $\Delta R = 0$  است.

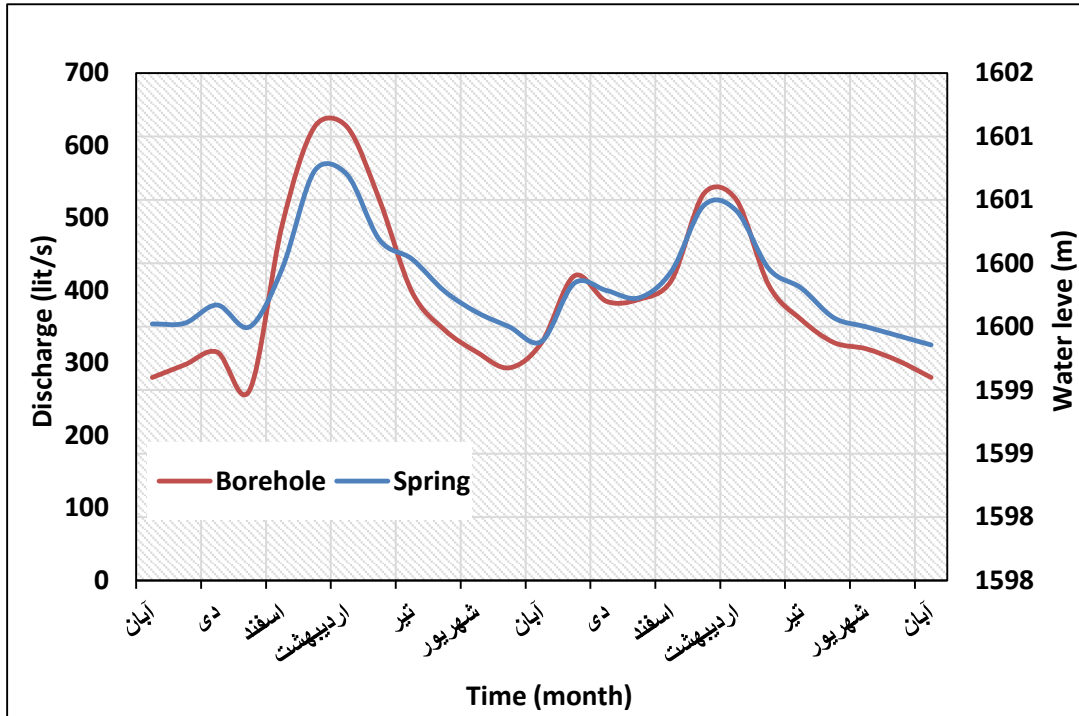
آبدهی ویژه همچنین از معادله‌های زیر بدست می‌آید:

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta H} \quad (8)$$

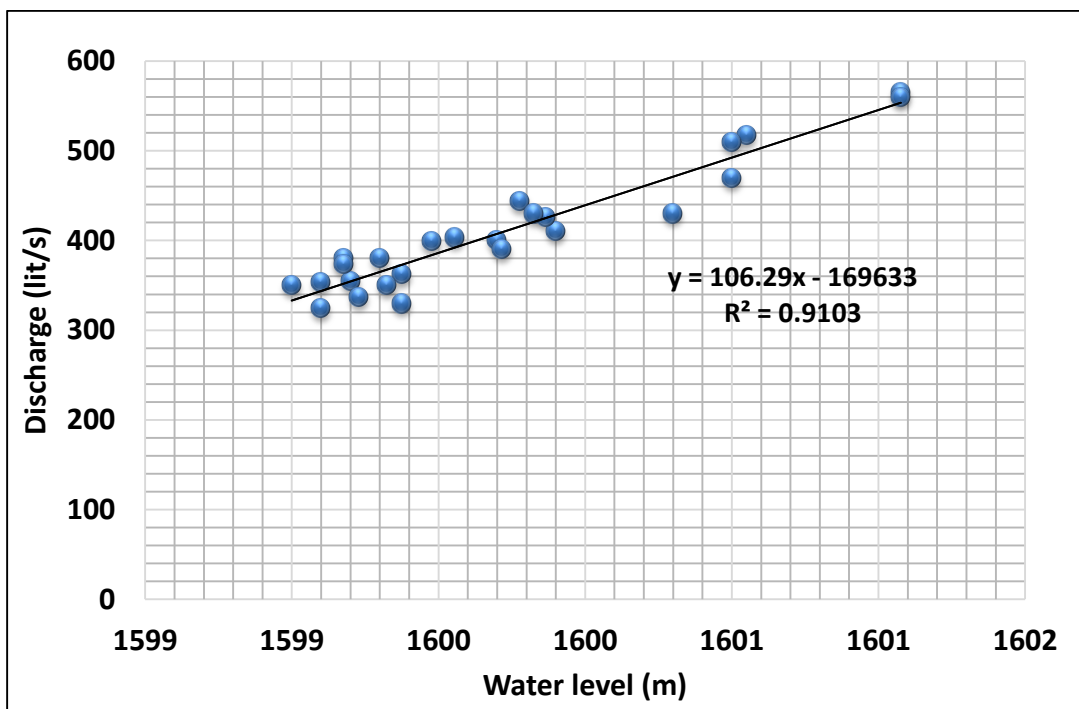
$$S = \frac{V_w}{V_r} \quad (9)$$

که در این معادلات،  $\Delta R$ : تغییرات ذخیره دینامیکی آبخوان کارستی برحسب میلیمتر بار پیزومتریک  $\Delta H$ : کاهش سطح آب آبخوان،  $V_w$ : حجم آبی خروجی از آبخوان،  $V_r$ : حجم توده سنگی زهکشی شده در این روش اطلاعات دبی بزرگترین چشمه پایین دست به نام چشمه خدرزنده و سطح آب گمانه نزدیک به چشمه (OB8) به صورت هفتگی در طول دو سال آبی برداشت گردید (شکل ۵-۷). مطابق شکل (۵-۸) همبستگی بین دبی چشمه و سطح آب گمانه بالای ۹۰ درصد و خطی است. این میزان همبستگی می‌تواند نشان دهنده هم سو و همگن بودن دولومیت‌های آهکی سازند جهرم-آسماری در حد فاصل گمانه و چشمه می‌باشد. ناهمگنی و ناهمسویی در آبخوان کارستی باعث کاهش ارتباط

هیدرولیکی چشمه و گمانه‌ها می‌گردد و معمولاً توسط ضرایب همبستگی کوچکتر مشخص می‌گردد (Milanovic 1981).



شکل ۵-۷- تغییرات دبی چشمه و سطح آب گمانه نزدیک چشمه (سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۶-۱۳۹۵)



شکل ۵-۸- نمودار همبستگی بالای سطح آب گمانه و دبی چشمه

میزان K محاسبه شده در این روش برای منحنی‌های فرود در جریان‌های افشان بین  $4/1 \times 10^{-5}$  تا  $7/1 \times 10^{-5}$  متر بر ثانیه و برای جریان متوسط  $2 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه محاسبه گردید. که بر اساس درصد جریان متوسط و افشان هدایت هیدرولیکی معادل توده با استفاده از این روش  $8 \times 10^{-5}$  متر بر ثانیه است. همچنین میزان آبدهی ویژه با استفاده از معادلات ۵ و ۶ محاسبه گردید که میزان آن بین ۲ تا ۴ درصد برآورد شد (جدول ۵-۱).

جدول ۵-۱- ضرایب هیدرودینامیک سازند چهارم-آسماری

K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /day)	s	$\alpha$	$\Delta H_0$ (mm)	$\Delta H_t$ (mm)	$\Delta R$ (mm)	$Q_0$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{ave}$ (m <sup>3</sup> /s)	C
$2/0 \times 10^{-4}$	۵۳۲/۷۰	۰/۰۲	۰/۰۱۰	۷۷/۶۳	۶۰/۷۵	۱۶/۸۸	۰/۵۸	۰/۵۲	۱۲/۷
$7/1 \times 10^{-5}$	۱۵۴/۷۵	۰/۰۳	۰/۰۰۴	۲۰۲/۵۰	۱۸۰/۰۰	۲۲/۵۰	۰/۴۵	۰/۴۳	۵۲/۸
$4/1 \times 10^{-5}$	۸۸/۷۲	۰/۰۴	۰/۰۰۱	۵۴۰/۰۰	۵۰۶/۲۵	۳۳/۷۵	۰/۴۰	۰/۳۷	۶۵/۹

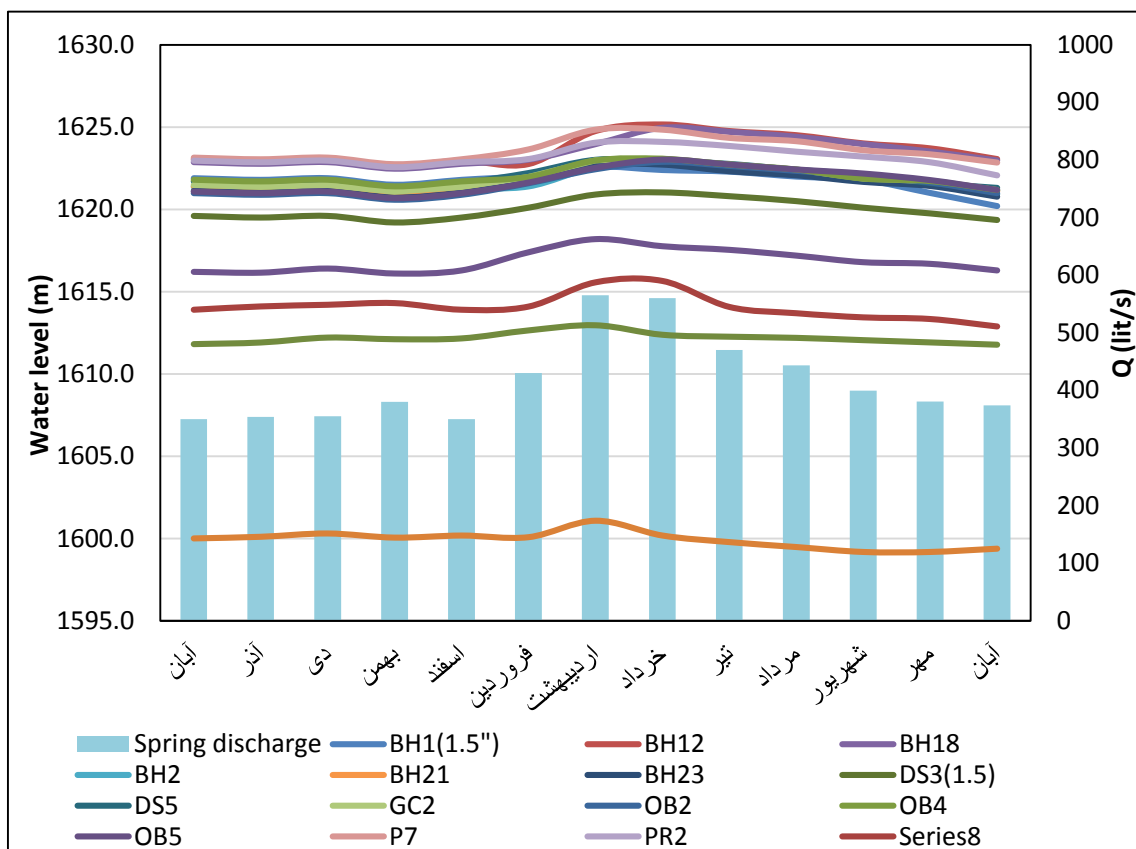
$\alpha$ : recession curve coefficient of spring, S: storage coefficient, T: transmissivity, K: hydraulic conductivity  $\Delta R$ : change of piezometric head, C ratio of  $\Delta R$  to time span

### ۵-۱-۳- انجام و تحلیل آزمایش‌ها در مقیاس ناحیه‌ای

هدایت هیدرولیکی کارست در مقیاس ناحیه‌ای توسط روشهای متعددی از جمله استفاده از منحنی فرود چشمه‌ها (Recession curve)، تخمین از گرادیان یا روش دارسی (Gradient approach)، ردیابی رنگی (Dye tracer test) و مدلسازی (Modelling) انجام می‌گردد. از بین روشهای ذکر شده در این مطالعات برای تعیین هدایت هیدرولیکی در مقیاس ناحیه‌ای از روش دارسی، استفاده از منحنی فرود و ردیابی رنگی استفاده گردید که در ادامه توضیح داده شده است.

### ۱-۳-۱-۵- استفاده از تخمین گرادیان یا روش داریسی

در روش تخمین گرادیان (Gradient approach) سطح آب گمانه‌ها در جناح راست به صورت ماهیانه اندازه‌گیری گردید. سطح آب گمانه‌های مشرف به چشمه دارای نوسانات مشابه و به طور متوسط بین تراز ۱۶۰۰ تا ۱۶۲۵ متر از سطح دریا تغییر می‌کند. تغییرات سطح آب زیرزمینی گمانه‌ها در جناح راست مخزن در طول یک سال آبی در شکل (۵-۹) نمایش داده شده است.

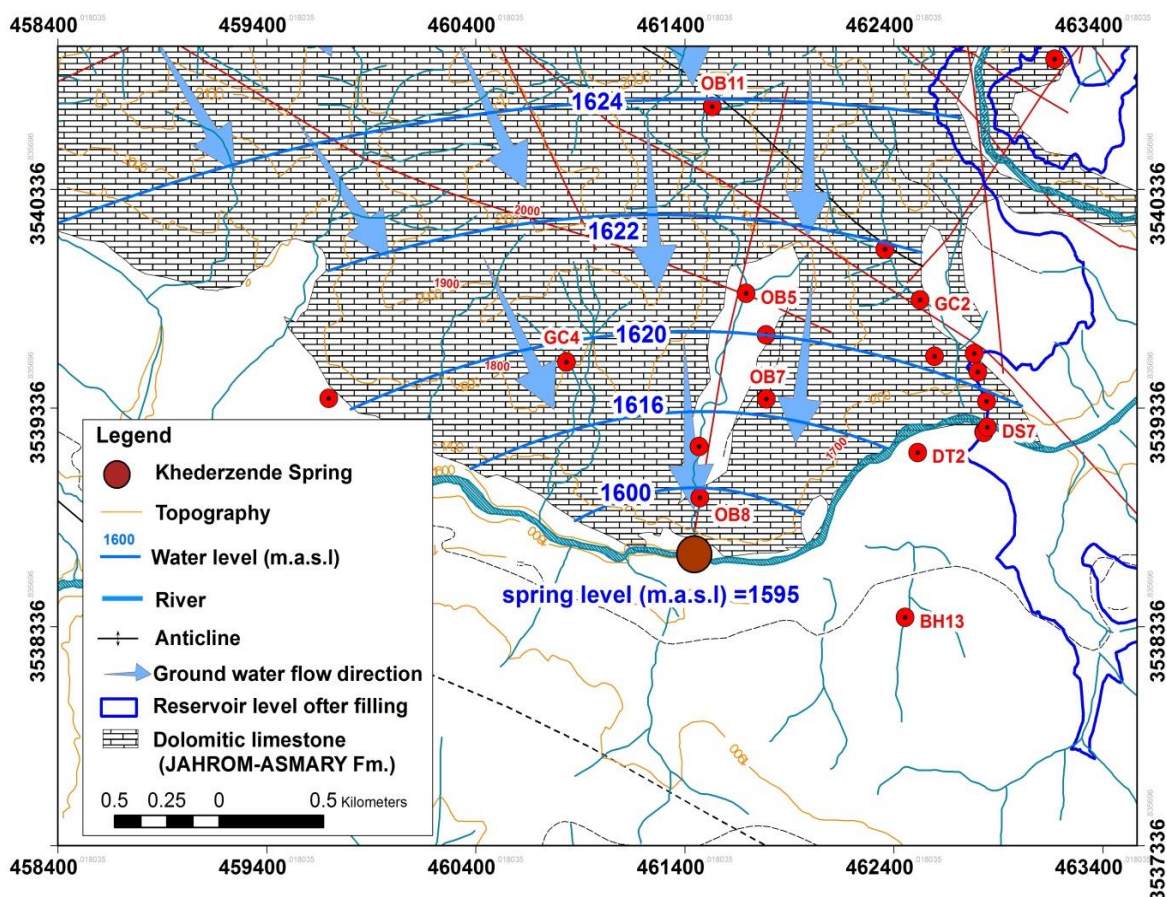


شکل ۵-۹- تغییرات سطح آب زیرزمینی و دبی چشمه خدرزنده از آبان ۱۳۹۵ تا آبان ۱۳۹۶

با استفاده از اطلاعات سطح آب زیرزمینی گمانه‌های نزدیک به چشمه شبکه جریان ترسیم گردید. با داشتن سلولهای جریان به سمت چشمه و استفاده از معادله داریسی میزان هدایت هیدرولیکی محاسبه گردید.

$$Q = KA \frac{dh}{dl} \quad (10)$$

که در این معادله،  $K$ : هدایت هیدرولیکی،  $Q$ : جریان خروجی از چشمه‌ها،  $A$ : سطح مقطع جریان  $\frac{dh}{dl}$  گرادیان هیدرولیکی است. در این روش کمترین هدایت هیدرولیکی مربوط به مقطعی در فاصله ۵۰۰ متری چشمه و با گرادیان  $0/044$  و میزان  $1/05 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه است و بیشترین هدایت هیدرولیکی مربوط به مقطعی در فاصله ۱۱۳۰ متر و با گرادیان  $0/023$  و میزان  $1/4 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین میزان هدایت هیدرولیکی معادل توده کارستی با توجه به مقاطع مختلف و در زمانهای حداقل و حداکثر سطح آب حدود  $1/2 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه محاسبه گردید (شکل ۵-۱۰).



شکل ۵-۱۰- خطوط ایزوپیز در آهکهای مشرف به چشمه خدرزنده

### ۵-۱-۳-۲- استفاده از آنالیز منحنی فرود چشمه

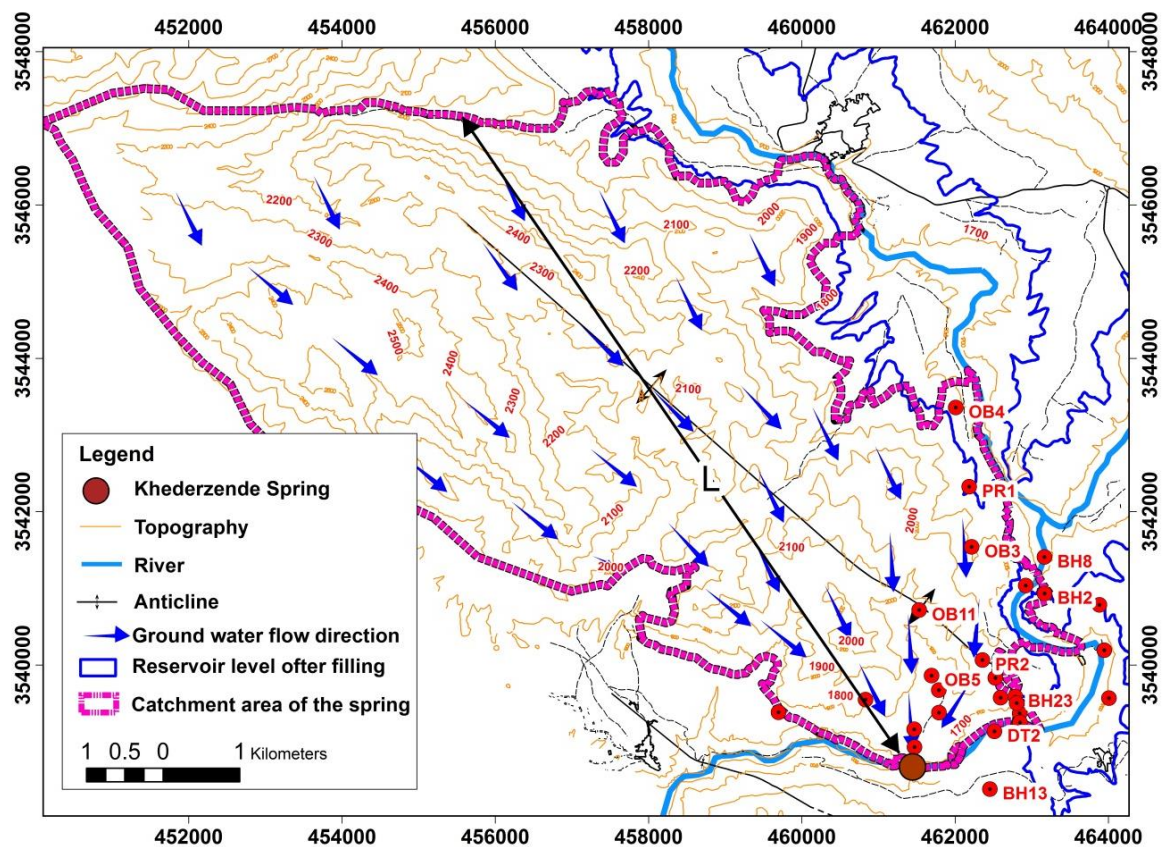
در روش آنالیز منحنی فرود (recession curve analysis) از قسمت فرود هیدروگراف آبدهی چشمه برای تعیین میزان هدایت هیدرولیکی استفاده می‌گردد. در این رابطه بوناچی (Bonacci 1993)، بادکه

و کروتِه (Baedke & Kroethe 2001) پیشنهاد کرده‌اند که می‌توان هدایت هیدرولیکی را از طریق استفاده از تجزیه و تحلیل هیدروگراف تخلیه چشمه برآورد نمود. معروفترین معادله به منظور برآورد متوسط هدایت هیدرولیکی ناحیه‌ای کارست، استفاده از معادله‌ی رورابوف (Rorabaugh 1964) می‌باشد.

$$T = \frac{\alpha 4Sl^2}{\pi^2} \quad (11)$$

که در این معادله، T: میزان قابلیت انتقال، S: ضریب ذخیره، l: فاصله خروجی آبخوان تا خط تقسیم آب زیرزمینی و  $\alpha$  ضریب منحنی فرود چشمه کارستی است. برای این منظور دبی چشمه‌ها در یال جنوبی به صورت هفتگی اندازه‌گیری گردید. همانطور که در بخش هیدروژئولوژی توضیح داده شد مطابق با اندازه‌گیری‌های انجام شده چشمه دارای سه منحنی فرود است.  $\alpha_1$  با شیب ۰/۰۱ نشان دهنده جریان حدواسط و  $\alpha_2, \alpha_3$  با ضرایب ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۱ نمایانگر جریان افشان و حدواسط در این تاقدیس می‌باشد. برای هر یک از ضرایب فروکش که نشان دهنده جریان‌های متفاوت در آبخوان کارستی است هدایت هیدرولیکی محاسبه گردید.

برای تعیین فاصله خروجی آبخوان تا خط تقسیم آب زیرزمینی (l) از حوضه آبرگیر محاسبه شده در فصل چهارم استفاده گردید. بر اساس بررسی‌های هیدروژئولوژی مساحت حوضه آبرگیر چشمه‌های پایین دست در حدود ۶۳ کیلومتر مربع محاسبه گردید. این میزان با مساحت کل تاقدیس که حدود ۶۴ کیلومتر مربع می‌باشد همخوانی داشت. به همین دلیل کل رخنمون آهک‌های جهرم-آسماری به عنوان حوضه آبرگیر چشمه‌ها در یال جنوبی در نظر گرفته شد و فاصله خط تقسیم آب زیرزمینی تا خروجی چشمه حدود ۱۰۰۰۰ متر برآورد گردید (شکل ۵-۱۱).



شکل ۵-۱۱- حوضه آبخیز محاسبه شده برای چشمه‌های پایین دست محور

برای تعیین ضریب ذخیره در این روش در هر قسمت از منحنی فرود از معادله زیر استفاده گردید:

$$S = \frac{V_w}{V_t} \quad (12)$$

$$V_t = dh \times A \quad (13)$$

که در این معادلات،  $V_w$ : حجم آب تخلیه شده از چشمه در هر ضریب فرود،  $V_t$ : حجم کل توده تخلیه شده،  $A$ : مساحت حوضه آبخیز و  $dh$ : اختلاف سطح آب زیرزمینی در گمانه‌ها در ابتدا و انتهای هر ضریب فرود است. بر این اساس میزان ضریب ذخیره در زمان تخلیه جریان حدواسط (افشان-مجرایی) حدود  $0.07$  و در زمان تخلیه جریان افشان بین  $0.1$  تا  $0.3$  برآورد گردید.



مطابق با اطلاعات جدول (۵-۱) بر اساس این روش میزان هدایت هیدرولیکی بین  $1/41 \times 10^{-4}$  تا  $3/6 \times 10^{-4}$  متر برثانیه محاسبه گردید. و با استفاده از درصدهای جریان منحنی فروکش چشمه میزان هدایت هیدرولیکی معادل در این روش حدود  $1/6 \times 10^{-4}$  متر برثانیه محاسبه شد.

جدول ۵-۲- میزان هدایت هیدرولیکی بر اساس منحنی فرود چشمه

K (m/s)	T (m <sup>2</sup> /day)	$\alpha$	S	L (m)
۰/۰۰۰۳۶۰	۳۱۲۳	۰/۰۱۱	۰/۰۰۷	۱۰۰۰۰
۰/۰۰۰۱۴۲	۱۲۲۹	۰/۰۰۴	۰/۰۱۰	۱۰۰۰۰
۰/۰۰۰۱۴۱	۱۲۱۷	۰/۰۰۱	۰/۰۳۰	۱۰۰۰۰

$\alpha$ : recession curve coefficient of spring, S: storage coefficient, L: distance between the aquifer output and the groundwater divide line, T: transmissivity, K: hydraulic conductivity

### ۵-۱-۳-۳- استفاده از آزمون ردیابی

آزمون ردیابی دقیقترین روش برای برآورد سرعت و ارتباط هیدرولیکی بین دو نقطه در محیط کارستی می‌باشد. بر اساس فاصله محل تزریق و نقاط نمونه‌برداری و زمان ظهور ردیاب، سرعتها بر اساس زمان اولین ظهور، زمان بیشینه غلظت و متوسط زمان عبور محاسبه می‌گردد (Mull *et al.* 1988). سرعت اوج غلظت بیانگر سرعت جریان‌های غالب در آبخوان است بنابراین سرعت اوج غلظت معیار تجزیه و تحلیل نوع جریان در آبخوان‌های کارستی می‌باشد (Schlulz 1998).

### ۵-۱-۳-۳- ماده ردیاب

برای انجام مطالعات ردیابی در آبهای زیرزمینی از ردیاب‌های متنوعی استفاده می‌گردد. نوع ردیاب با توجه به میزان پایداری در محیط، نبود در آب زیرزمینی، قابلیت انحلال و تشخیص، سهولت تزریق، نمونه برداری و تعیین غلظت، بی‌خطر بودن از لحاظ زیست‌محیطی، شرایط اقتصادی و دسترسی آسان، و همچنین با توجه به اهداف مطالعات و شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه مورد مطالعه تعیین

می‌گردد. ماده رنگی مورد استفاده برای آزمون ردیابی در گمانه PR1، فلئورسین سدیم (Sodium fluorescein) با نام تجاری اورانین (Uranine) دارای فرمول شیمیائی  $C_{20}H_{10}O_5Na_2$  و محلول آن دارای رنگ سبز است که ساخت شرکت Merck آلمان می‌باشد. طول موج پرتودهی و برانگیختگی این ماده به ترتیب ۵۱۳ و ۴۹۲ نانومتر می‌باشد. اورانین بهترین و معمول‌ترین ردیاب مورد استفاده در آبخوان‌های کارستی می‌باشد (Milanovic 2004).

#### ۵-۱-۳-۲- زمان تزریق ردیاب

عملیات تزریق ردیاب در تاریخ ۳۰ مهرماه ۱۳۸۵ انجام شده است. از آنجایی که خروجی‌های محتمل آبخوان تاقدیس سنگویل در حاشیه رودخانه ظهور یافته و در فصل تر مستغرق می‌باشند؛ آزمون ردیابی در زمانی انجام شد که مظهر تمامی این چشمه‌ها از سطح رودخانه خارج شده باشند. از طرفی آمار سطح آب پیزومترها و بده چشمه‌ها، بیانگر ترسال بودن سال آبی ۸۵-۸۶ می‌باشد؛ به طوری که در زمان تزریق، سطح آب زیرزمینی در پیزومترهای موجود، حدود ۳ متر نسبت به سال قبل و بعد از خود بالاتر بوده و نیروی رانش ردیاب به اندازه کافی وجود داشته است. بنابراین در مورد زمان تزریق ردیاب نیز، زمان بهینه انتخاب گردیده‌است (عابدیان ۱۳۸۹).

#### ۵-۱-۳-۳- نمونه‌برداری زمینه

قبل از تزریق ردیاب از محل‌های نمونه‌برداری، چندین نمونه جهت تعیین شدت فلئورسانس طبیعی موجود یا غلظت زمینه (Background Concentration)، برداشت شد. زیرا در صورتی می‌توان گفت که ردیاب در یک محل نمونه‌برداری مشاهده شده‌است که غلظت ردیاب در آن محل، بیشتر از غلظت زمینه باشد. بر این اساس از تمامی محل‌های نمونه‌برداری چند ساعت قبل از عملیات تزریق ردیاب،

نمونه زمینه برداشت شده است. نتایج نشان می‌دهد که در هیچ یک از محل‌های نمونه‌برداری، آلودگی مواد رنگی دارای قابلیت فلئورسانس وجود ندارد.

#### ۵-۱-۳-۳-۴- تزریق آب قبل از عملیات تزریق ردیاب

گمانه‌های حفر شده در آبخوان‌های کارستی به ندرت به سیستم مجاری اصلی آبخوان برخورد می‌نمایند زیرا سیستم مجاری اصلی معمولاً کمتر از یک درصد آبخوان را پوشش می‌دهند (Worthington 1999). پدیده کارستی (انحلالی) آنچنانی در لاگ گمانه تزریق مشاهده نشده است، لذا احتمال اینکه ردیاب در اطراف این گمانه محبوس گردد، وجود داشت. بنابراین برای تعیین میزان آبخوری گمانه و بررسی احتمال وجود جریان از گمانه تزریق به مجاری اصلی آبخوان، پیش از عملیات ردیابی آزمایش تزریق آب انجام شد. از جمله دیگر اهداف تزریق آب، می‌توان به اشباع نمودن ناحیه غیراشباع بالای سطح ایستابی در اطراف گمانه، و در ضمن برقراری یک جریان دائم بین گمانه تزریق و مجاری احتمالی اطراف گمانه که در ادامه ماده رنگی اورانین به آنها منتقل می‌شود، اشاره نمود.

در مجموع حدود ۱۱۳ متر مکعب آب طی مدت زمان ۳ روز قبل از عملیات ردیابی، به گمانه PR1 تزریق گردید؛ که دبی آن بین ۱/۳ تا ۲ لیتر بر ثانیه متغیر در نظر گرفته شد. سطح آب در گمانه تزریق در فواصل زمانی مختلف پمپاژ نیز اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان می‌دهد که سطح ایستابی در گمانه تزریق حداکثر ۶۰ سانتی‌متر تغییر یافته است، که این امر بیانگر آبخوری بالای این گمانه و ارتباط احتمالی آن با مجاری اصلی آبخوان می‌باشد.

#### ۵-۱-۳-۳-۵- تزریق ردیاب

با توجه به نداشتن ورودیهای طبیعی به آبخوان همچون پانور (Ponor) و آب فروچاله (Sinkhole)، عملیات ردیابی به روش تزریق نقطه‌ای در گمانه PR1 انجام گردید مقدار ۳۰ کیلوگرم اورانین با هدف شناسایی و وضعیت جهت جریان آب زیرزمینی و ارتباط هیدرولیکی یال شمالی و جنوبی در این

گمانه تزریق گردید (شکل ۵-۱۲). گمانه PR1 به عمق ۲۸۵ متر و ضخامت اشباع حدوداً ۱۵۰ متر که در یال شمالی طاقدیس سنگویل و جناح راست رودخانه کوهرنگ واقع شده است. قبل از تزریق ردیاب، عمق برخورد به آب در این گمانه ۱۳۶/۹ متر و تراز سطح آب زیرزمینی برابر با ۱۶۲۴/۹ متر از سطح دریا اندازه‌گیری شد. مقادیر نفوذپذیری گمانه تزریق، در مقاطع ۵ متری به کمک آزمایش لوژن اندازه‌گیری شده است که در زیر محدوده سطح ایستابی عموماً ۱۰۰ لوژن و هدر رفت آب گزارش شده است.



شکل ۵-۱۲- تزریق ردیاب در گمانه PR<sub>1</sub> در یال شمالی طاقدیس

#### ۵-۱-۳-۳-۶- تزریق آب پس از عملیات تزریق ردیاب

پس از تزریق ردیاب نیز در مجموع حدود ۶۰۰ مترمکعب آب طی مدت زمان سه روز (با دبی تقریبی ۲/۵ لیتر بر ثانیه)، به منظور شستشوی ردیاب از گمانه و رانش آن به آبخوان تزریق گردید. شیب

هیدرولیکی در محدوده گمانه تزریق در حدود ۰/۰۰۲ می‌باشد. شیب هیدرولیکی کم باعث می‌شود که گنبد تغذیه‌ای آب در محدوده اطراف گمانه تزریق، تا شعاع زیادی بتواند توسعه یابد، به طوری که باعث می‌شود تا آب و به عبارتی ردیاب تزریق شده تا شعاع زیادی در اطراف گمانه تزریق، بر خلاف جهت جریان طبیعی آب حرکت کند. ضمن اینکه به علت پدیده انتشار (Diffusion)، ردیاب نیز می‌تواند تا شعاع بیشتری حتی در خلاف جهت جریان عمومی آب، انتشار یابد.

#### ۵-۱-۳-۷- نمونه برداری و آنالیز نمونه‌ها

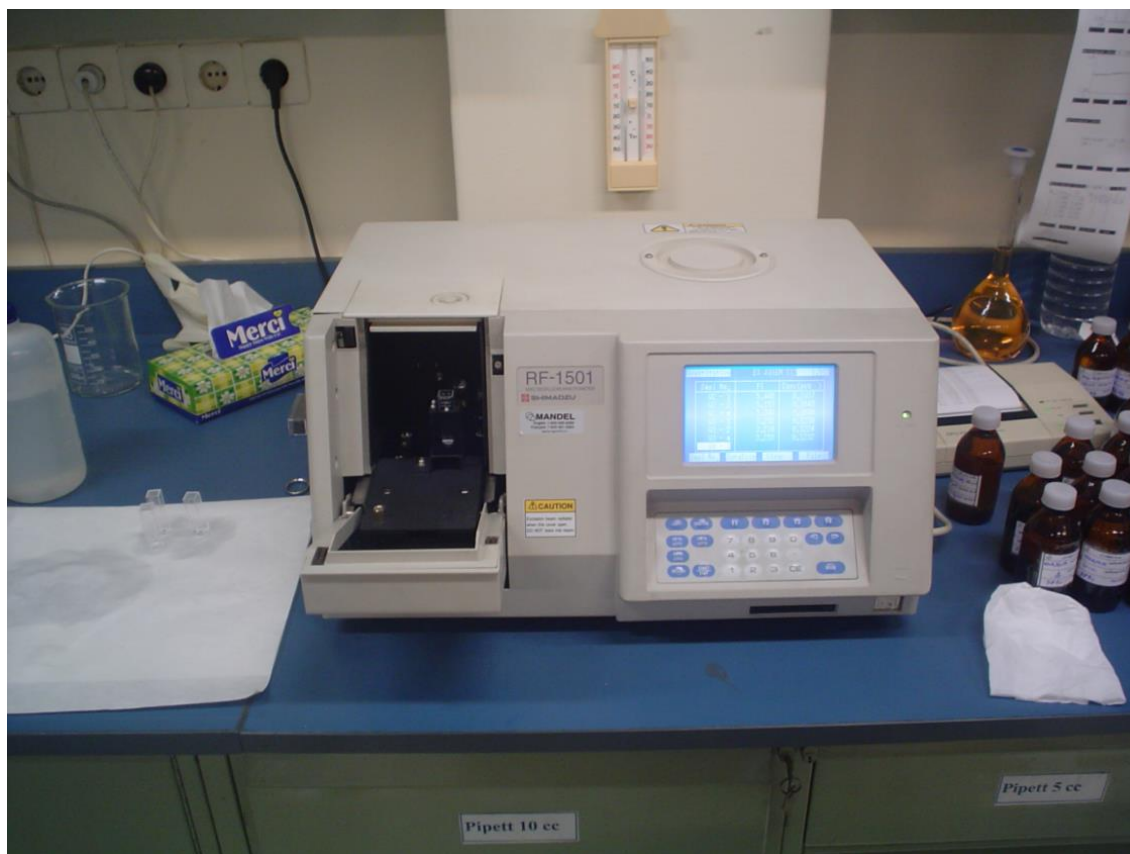
نمونه‌برداری از گمانه‌ها و چشمه‌ها با فواصل زمانی ۲ ساعته به مدت ۵ روز؛ با فواصل زمانی ۴ ساعته به مدت ۱۰ روز؛ با فواصل زمانی ۶ ساعته به مدت ۷ روز؛ با فواصل زمانی ۱۲ ساعته به مدت ۲۰ روز؛ با فواصل زمانی ۲۴ ساعته به مدت ۸۳ روز و با فواصل زمانی هفتگی تا پایان اندازه‌گیری‌ها انجام گردید (شکل ۵-۱۳ و ۵-۱۴). نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفلوریمتر (Spectrofluorimeter) مدل RF-1501 ساخت شرکت شیمادزو (Shimadzu) و توسط گروه محیط زیست مؤسسه تحقیقات آب ایران آنالیز گردید (شکل ۵-۱۵).



شکل ۵-۱۳- نحوه نمونه برداری از گمانه‌ها



شکل ۵-۱۴- نحوه نمونه برداری از چشمه خدرزنده



شکل ۵-۱۵- آنالیز نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفلوریمتر مدل RF-1501

### ۵-۱-۳-۳-۸- مشاهده ردیاب در مسیر جریان از یال شمالی به یال جنوبی

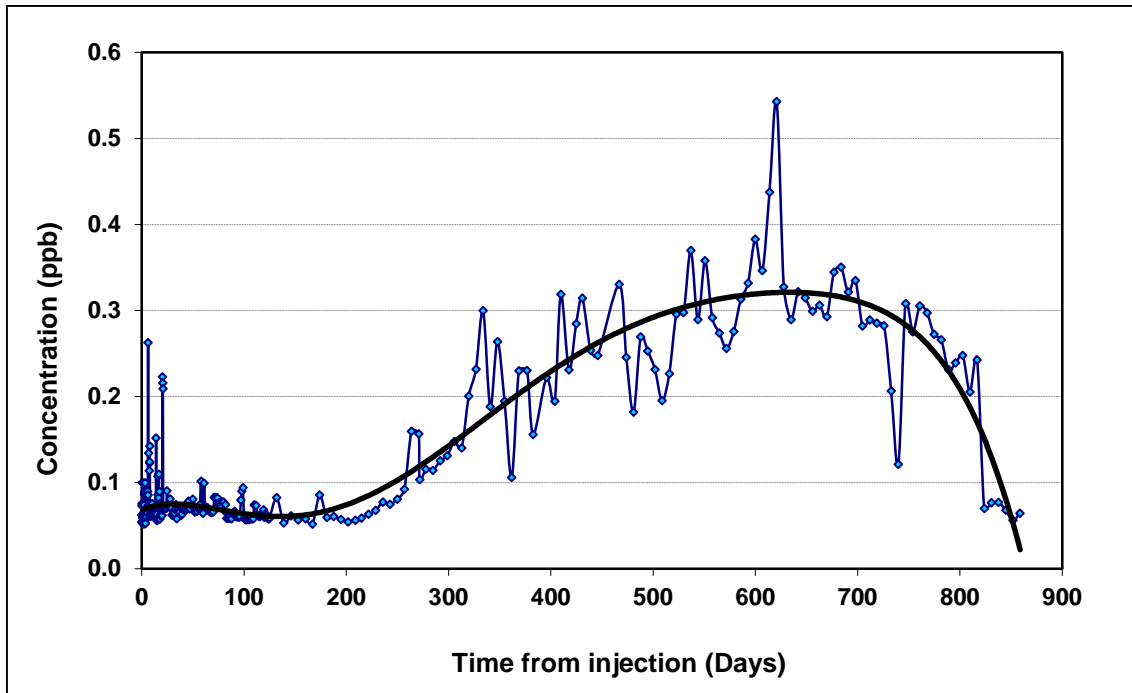
منحنی‌های رنگ‌نمود محل‌های مشاهده ردیاب، کم و بیش به یکدیگر شباهت دارند؛ اما میزان غلظت ردیاب در آنها متفاوت است. بیشترین غلظت ردیاب در گمانه PR2 مشاهده شده، و غلظت ردیاب در ادامه مسیر جریان در اثر پدیده انتشار و همچنین اختلاط با آبهای یال جنوبی تاقدیس سنگویل که در تامین بده چشمه‌ها نقش دارند، کاهش یافته‌است. ردیاب به احتمال زیاد از گمانه تزریق در امتداد درز و شکاف‌ها و گسل‌های عرضی تاقدیس سنگویل، ابتدا به گمانه PR2 می‌رسد. مسیر ردیاب پس از گمانه PR2 به سمت چشمه خدرزنده می‌باشد. با توجه به نقشه زمین‌شناسی شکل (۵-۱)، از نظر تشکیلات زمین‌شناسی و شرایط هیدروژئولوژیکی امکان برقراری ارتباط هیدرولیکی بین گمانه تزریق و گمانه PR2 و چشمه خدرزنده، مورد تایید قرار می‌گیرد (شکل ۵-۱۶ و ۵-۱۷).

مهمترین پارامتر کمی که در آزمون‌های ردیابی محاسبه می‌گردد، سرعت جریان بین نقطه تزریق و نقطه یا نقاط مشاهده ردیاب می‌باشد. آزمون ردیابی دقیق‌ترین روش برای برآورد سرعت جریان بین دو نقطه، در آبخوان‌های کارستی می‌باشد. سرعت با استفاده از معادله عمومی زیر محاسبه می‌گردد:

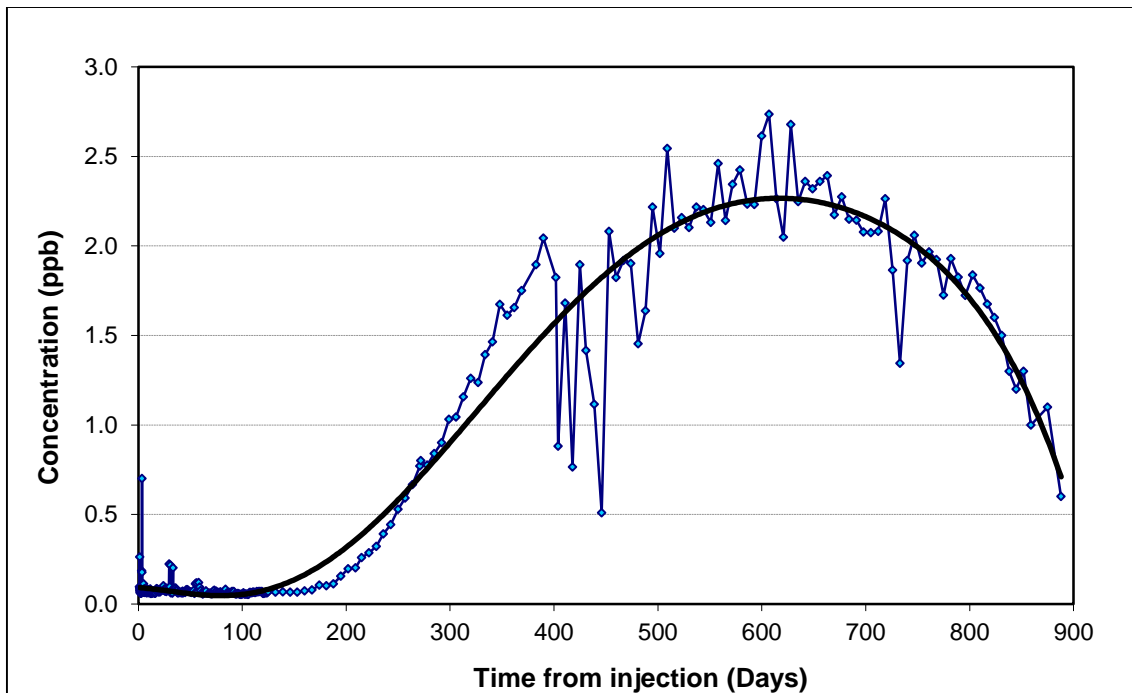
$$V = \frac{x}{t} \quad (14)$$

که در این معادله،  $V$ : سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه،  $x$ : فاصله بر حسب متر و  $t$  زمان بر حسب ثانیه می‌باشد. بر اساس زمان اولین ظهور ( $t_i$ )، زمان بیشینه غلظت ( $t_p$ ) و متوسط زمان عبور ( $\bar{t}$ ) ردیاب بدست آمده از منحنی رنگ‌نمود و فاصله افقی بین محل تزریق و نمونه‌برداری، به ترتیب سرعت‌های بیشینه، اوج غلظت و متوسط، محاسبه می‌گردند در این مسیر سرعت‌های زمان مشاهده ردیاب بر اساس فاصله مسیر مستقیم بین ۰/۴۵ تا ۰/۷۱ متر بر ساعت و بر اساس فاصله مسیر پیشنهادی بین ۰/۸۱ تا ۱/۰۷ متر بر ساعت می‌باشد. همچنین سرعت اوج ردیاب بر اساس فاصله مسیر مستقیم بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۷ متر بر ساعت و بر اساس مسیر احتمالی بین ۰/۲۱ تا ۰/۴ متر بر ساعت برآورد گردید. مطابق با شکل (۵-۱۸) جریان از یال شمالی تاقدیس (محدوده مخزن) به سمت یال جنوبی تاقدیس حرکت و در چشمه‌های پایین دست محور تخلیه می‌گردد.

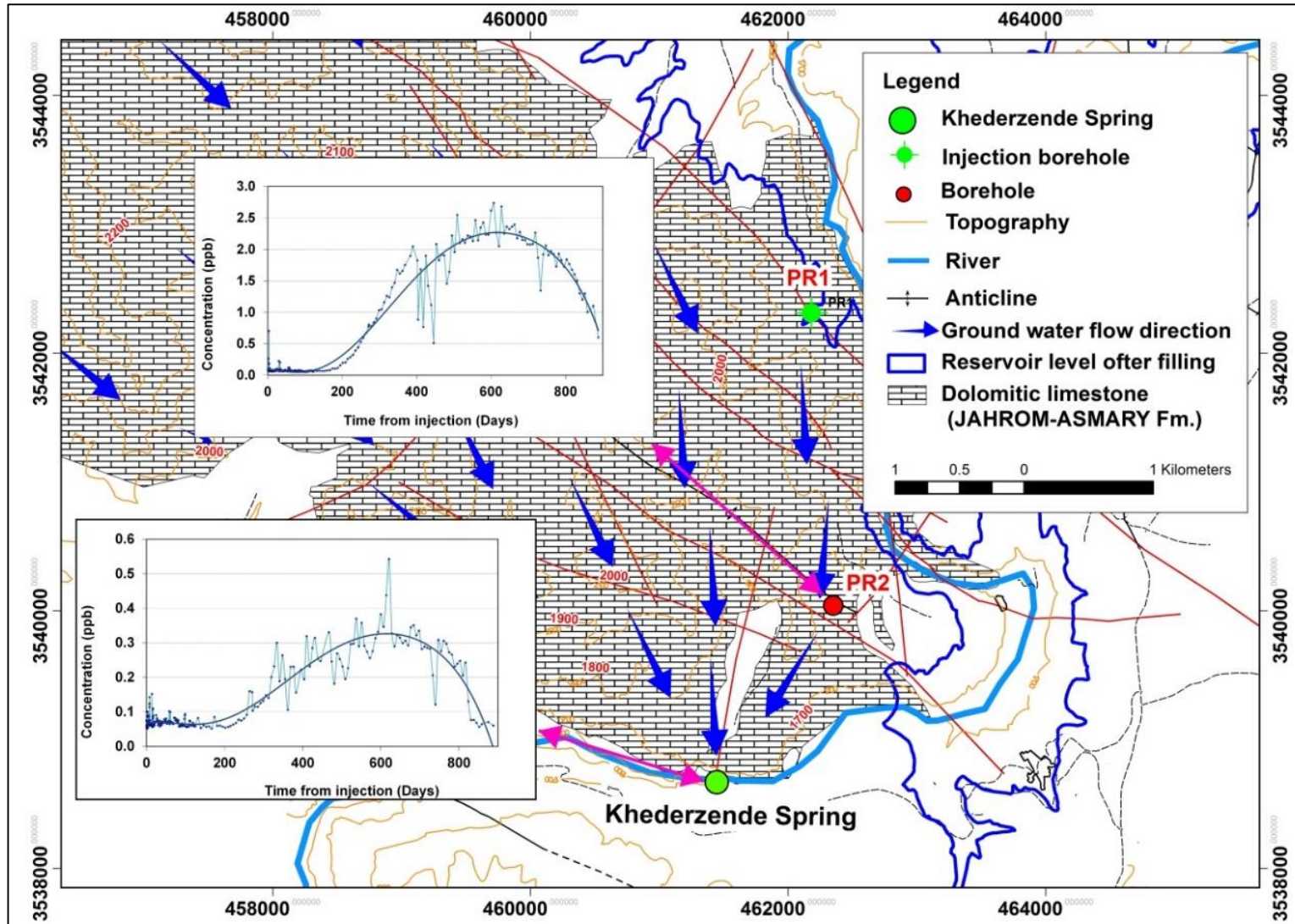




شکل ۵-۱۶- منحنی رنگ نمود (غلظت رنگ) مشاهده شده در چشمه خدرزنده



شکل ۵-۱۷- منحنی رنگ نمود (غلظت رنگ) مشاهده شده در گمانه PR2



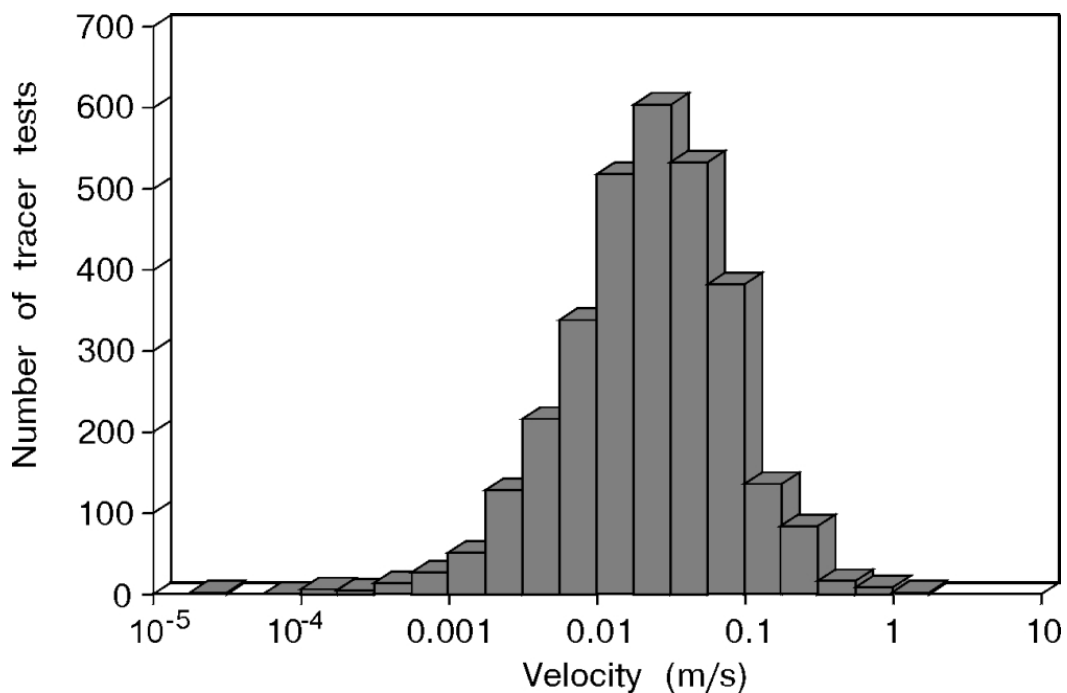
شکل ۵-۱۸- مسیر جریان ردیاب از یال شمالی به یال جنوبی

## ۵-۱-۳-۳-۹- نوع جریان

حد سرعت بین جریان افشان و مجرای (Diffuse and conduit flow)، در برخی مطالعات موردی آبخوان‌های کارستی تعیین شده است (جدول ۵-۳). فراوانی نسبی سرعت‌های جریان مختلف بدست آمده از ردیابی‌های انجام شده بین آبروچاله و چشمه در سطح جهان را نشان می‌دهد که از تعداد ۳۰۸۰ ردیابی، فقط در ۴۰ مورد (یعنی کمتر از ۱/۳ درصد) سرعت کمتر از ۳/۶ متر بر ساعت (۰/۰۰۱ متر بر ثانیه) می‌باشد (Ford and Williams 1989). بنابراین می‌توان پذیرفت که این محدوده سرعت به احتمال زیاد کمترین سرعت جریان مجرای را نشان می‌دهد (شکل ۵-۱۹). در این مطالعه نیز، حد سرعت بین جریان افشان و مجرای برابر با ۳/۶ متر بر ساعت در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه در این ردیابی سرعت‌های زمان مشاهده ردیاب بر اساس فاصله مسیر مستقیم بین ۰/۶۱ تا ۰/۷۱ متر بر ساعت و بر اساس فاصله مسیر پیشنهادی بین ۰/۸۱ تا ۱/۰۷ متر بر ساعت می‌باشد. همچنین سرعت اوج ردیاب بر اساس فاصله مسیر مستقیم بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۷ متر بر ساعت و بر اساس مسیر احتمالی بین ۰/۲۱ تا ۰/۴ متر بر ساعت برآورد گردیده است پس می‌توان گفت تمام سرعت‌های محاسبه شده در ردیابی رنگی در محدوده با نوع جریان افشان قرار دارد (عابدیان ۱۳۸۹).

جدول ۵-۳- حد سرعت بین جریان افشان و مجرای

Velocity	Description	Location	Reference
7.2 m/h>	Diffuse flow	-	(Foster and Milton 1974)
4.2 m/h>	Lowest conduit flow velocity	All over the world	(Ford and Williams 1989)
3.6 m/h>	Diffuse flow	All over the world	(Worthington 1991)
3.6 m/h>	Diffuse flow and conduit flow criterion	All over the world	(ASTM 1995)
3.6 m/h>	Lowest conduit flow velocity	All over the world	(Worthington 2007)



شکل ۵-۱۹- فراوانی نسبی سرعت‌های جریان از ردیابی در سطح جهان (Worthington *et al.* 2000)

### ۵-۱-۳-۳-۱۰- میزان بازیافت رنگ

میزان بازیافت از ماده رنگی ( $M_R$ : Mass of recovered dye tracer) در محل‌های خروج ردیاب به دست می‌آید که با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌گردد (Ford and Williams 1989):

$$M_R = \int_{t=0}^{\infty} (Q \cdot C) dt \Rightarrow M_R = \sum_{i=1}^n (C_i \cdot Q_i \cdot \Delta t_i) \quad (15)$$

که در فرمول فوق،  $M_R$  کل جرم ماده رنگی تخلیه شده از چشمه، و  $C_i$  و  $Q_i$  به ترتیب متوسط غلظت ماده رنگی و متوسط بده خروجی چشمه در بازه زمانی  $\Delta t_i$  می‌باشند. پس از محاسبه جرم ردیاب تخلیه شده از کلیه خروجی‌ها، می‌توان ضریب بازیافت ماده رنگی ( $R_f$ : Recovery factor) را با استفاده از فرمول زیر محاسبه نمود:

$$R_f = \left( \sum_{i=1}^n M_R / M_T \right) \times 100\% \quad (16)$$

که در فرمول فوق،  $\sum_{i=1}^n M_R$  جرم ردیاب تخلیه شده از کلیه خروجی‌ها، و  $M_T$  جرم ردیاب تزریق شده به آبخوان می‌باشد. مقدار جرم ردیاب تخلیه شده در چشمه‌هایی که در آنها ردیاب مشاهده شده است نیز محاسبه گردید، که حدوداً  $5151/37$  گرم از  $25000$  گرم کل ردیاب تزریق شده در گمانه PR1، در چشمه‌های یال جنوبی تاقدیس سنگویل بازیافت شده است بنابراین حدود ۲۱ درصد از ردیاب تزریقی در خروجی‌های آبخوان رویت شده است. مقدار بازیافت ردیاب نسبتاً کم بوده است، که دلایل احتمالی زیر را می‌توان در نظر گرفت:

- بسته به نوع جریان، میزان بازیافت را می‌توان از ۱ تا ۹۵ درصد انتظار داشت. هرچه جریان مجرایتری باشد، می‌توان انتظار بازیافتی تا حدود ۹۵ درصد را داشت؛ و هر چه جریان افشان‌تر باشد، اثر باقیمانده ردیاب (Tailing effect) در آبخوان طولانی‌تر شده و میزان بازیافت کمتر می‌شود.
- از آنجائی که سیستم جریان آبخوان از نوع غالباً افشان می‌باشد، ممکن است مقدار قابل ملاحظه‌ای از ردیاب توسط ماتریکس آهک جذب شده باشد.
- بخشی از آب خروجی آبخوان می‌تواند وارد رودخانه بهشت‌آباد گردد، و چون بده رودخانه خیلی زیاد است، غلظت ردیاب می‌تواند به قدری کاهش می‌یابد که توسط دستگاه قابل تشخیص نباشد.
- هر چه فاصله بین محل گمانه تزریق ردیاب تا محل مشاهده آن بیشتر باشد، میزان بازیافت ردیاب کمتر خواهد بود.
- مقدار بازیافت ردیاب به نرخ تخلیه شدن کل آبی که در آبخوان کارستی تحت تأثیر ردیاب قرار گرفته نیز بستگی دارد. بطوری‌که هر چه میزان حجم تخلیه آب یا بده چشمه بیشتر باشد، میزان ردیاب بازیافتی نیز بیشتر می‌شود.

### ۵-۱-۳-۳-۱۱- تعیین مقدار هدایت هیدرولیکی

با توجه به اینکه در ردیابی رنگی میزان سرعت محاسبه می‌گردد برای تعیین هدایت هیدرولیکی در این روش از فرمول ارتباط سرعت با هدایت هیدرولیکی در محیط متخلخل استفاده گردید:

$$V = \frac{k}{n} \frac{dh}{dl} \quad (17)$$

که در این معادله،  $K$ : میزان هدایت هیدرولیکی،  $V$ : سرعت جریان،  $n$ : میزان تخلخل،  $dh$ : تغییرات سطح آب و  $dl$ : فاصله نقطه تزریق با محل مشاهده ردیاب است. مطابق با این معادله و بر اساس اولین زمان ظهور ردیاب در چشمه در یال جنوبی میزان هدایت هیدرولیکی حدود  $3/4 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه محاسبه گردید. همچنین هدایت هیدرولیکی معادل توده نیز بر اساس سرعت در زمان پیک به میزان  $1/7 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه بدست آمد (جدول ۵-۴).

جدول ۵-۴- مقادیر سرعت بدست آمده در یال جنوبی تاقدیس سنگویل (بر حسب متر بر ساعت)

چشمه خدرزنده	گمانه PR2	منبع نمونه برداری	
		Straight	Distance to injection
۳۶۸۶	۲۲۴۹	Proposed	
۵۵۲۰	۲۹۹۰		
۲۱۴/۸۸	۱۵۳/۰۴	$t_l$ (Day)	
۰/۰۵۶	۰/۰۶۵	$C_l$ (ppb)	
۵۷۸/۹۶	۶۰۶/۹۶	$t_p$ (Day)	
۰/۵۵۲	۲/۷۳۵	$C_p$ (ppb)	
۰/۷۱	۰/۶۱	Based on straight distance	$v_{max}$ (m/h)
۱/۰۷	۰/۸۱	Based on proposed distance	
۰/۲۷	۰/۱۵	Based on straight distance	$V_p$ (m/h)
۰/۴۰	۰/۲۴	Based on proposed distance	
$t_l$ : time to the leading edge, $C_l$ : leading edge concentration, $t_p$ : time to the peak concentration, $C_p$ : peak concentration, $v_{max}$ : Maximum flow velocity, $V_p$ : peak concentration flow velocity			

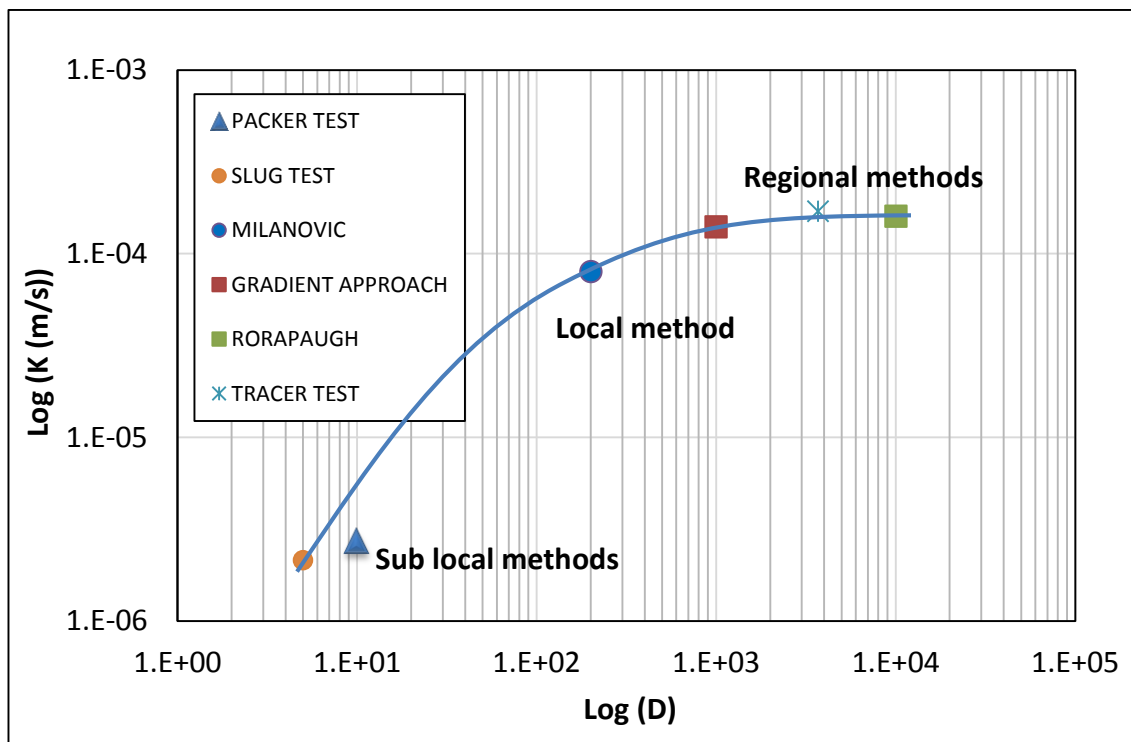
## ۵-۲- تحلیل اثر مقیاس در گستره آهکهای جهرم-آسماری

هدایت‌های هیدرولیکی معادل محاسبه شده در روشهای مختلف برای آبخوان آهکی در جناح راست مخزن متفاوت بوده و در محدوده  $۲/۱ \times ۱۰^{-۶}$  تا  $۱/۷ \times ۱۰^{-۴}$  متر بر ثانیه قرار دارد (جدول ۵-۵). حداقل هدایت هیدرولیکی معادل گستره کربناته مربوط به آزمون اسلاگ در مقیاس کوچک و حداکثر آن مربوط به روش ردیابی و منحنی فرود در مقیاس ناحیه‌ای است. همچنین روش دبی چشمه و سطح آب گمانه به صورت چاه پمپاژ، میزان هدایت هیدرولیکی را در مقیاس محلی برآورد می‌کند. بر اساس اطلاعات در مقیاسهای مختلف میزان هدایت هیدرولیکی محاسبه شده در مقیاس ناحیه‌ای حدود ۷۰ برابر بزرگتر از مقیاس کوچک برآورد گردید. این میزان اختلاف به دلیل اثر مقیاس در محیط کارستی می‌باشد. مطابق با نمودار شکل (۵-۲۰) به طور تقریبی می‌توان گفت هدایت هیدرولیکی معادل آهک‌های کارستی جهرم-آسماری در آزمایشهای با شعاع تاثیر بالای ۵۰۰ متر مشخص می‌گردد.

جدول ۵-۵- میزان هدایت هیدرولیکی محاسبه شده با استفاده از روشهای مختلف

روش	مقیاس	$K_{MIN}$ (m/s)	$K_{MAX}$ (m/s)	$K_{RE}$ (m/s)
آزمایش لوژن (PACKER TEST)	کوچک (sub- local)	$۱/۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۱/۹ \times ۱۰^{-۸}$	$۲/۷ \times ۱۰^{-۶}$
آزمایش اسلاگ (SLUG TEST)	کوچک (sub- local)	$۱/۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۳/۳ \times ۱۰^{-۶}$	$۲/۱ \times ۱۰^{-۶}$
روش میلانویچ (MILANOVIC)	محلی (Local)	$۴/۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۰ \times ۱۰^{-۴}$	$۸/۰ \times ۱۰^{-۵}$
روش دارسی (GRADIENT APPROACH)	ناحیه‌ای (Regional)	$۱/۰ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۳ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۲ \times ۱۰^{-۴}$
روش منحنی فرود (RORABAUGH)	ناحیه‌ای (Regional)	$۱/۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۶ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۶ \times ۱۰^{-۴}$
ردیابی رنگی (TRACER TEST)	ناحیه‌ای (Regional)	$۶/۹ \times ۱۰^{-۵}$	$۳/۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۷ \times ۱۰^{-۴}$

$K_{MIN}$  minimum hydraulic conductivity,  $K_{MAX}$  maximum hydraulic conductivity,  $K_{RE}$  representative hydraulic conductivity



شکل ۵-۲۰- اثر مقیاس در میزان هدایت هیدرولیکی دولومیت‌های آهکی سازند جهرم-آسماری

### ۵-۳- برآورد میزان نشت از مخزن در مقیاس‌های مختلف

با توجه به غیرهمگن و ناهمسو بودن محیط‌های کارستی، پارامترهای هیدروژئولوژیک آبخوان نسبت به مقیاس متغیر می‌باشد به طوری که هر چه توسعه کارست بیشتر باشد تاثیر مقیاس بیشتر است. به همین دلیل احداث سد و درگیری مخزن در مقیاس‌های متفاوت با آهک‌های کارستی می‌تواند با مقادیر نشت متفاوتی مواجه شود. مهمترین پارامتر برای تعیین مقدار نشت از مخازن سدها میزان هدایت هیدرولیکی است که با تغییر مقیاس در محیط‌های کارستی تغییر می‌کند. به همین دلیل با استفاده از هدایت هیدرولیکی در مقیاس‌های مختلف اقدام به برآورد مقدار نشت گردید. برای تعیین مقدار نشت در این مقیاس از نرم افزار Seep2D در محیط GMS استفاده شد و مقدار نشت از مخزن در یال شمالی به سمت پایین دست و یال جنوبی محاسبه گردید. برای شبکه‌بندی مدل تعداد ۷۴۸ گره و ۱۳۱۱ المان در نظر گرفته شده است همچنین در این مدل سطح مقطع در تماس با مخزن و سطح مقطع رودخانه و تراز چشمه‌های پایین دست به عنوان مرز جریان با بار ثابت در نظر گرفته شده



است و ۵۰ متر زیر تراز چشمه (۱۵۴۵) به عنوان مرز بدون جریان (Noflow boundry) در نظر گرفته شده است. در ادامه نتایج مدل‌سازی نشت در مقیاس‌های مختلف ارائه می‌گردد.

### ۵-۳-۱- برآورد نشت از مخزن در مقیاس کوچک

هدایت هیدرولیکی دولومیت‌های آهکی جناح راست سد بهشت‌آباد با استفاده از روش‌های کوچک مقیاس بین  $2/1 \times 10^{-6}$  تا  $2/7 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه محاسبه گردید. بر اساس این مقدار هدایت هیدرولیکی نشت از مخزن در مقطع معرف حدود  $0/04$  لیتر بر ثانیه در هر متر مخزن برآورد گردید (شکل ۵-۲۱). با توجه به آنالیز نشت انجام شده در مقیاس کوچک و سطح مقطع تماس مخزن با آهک، نشت به مقدار حدود ۱۲۰ لیتر بر ثانیه اتفاق خواهد افتاد. به عبارتی می‌توان گفت با در نظر گرفتن این مقیاس در تحلیل نشت از مخزن، تاثیر درز شکستگی‌های بزرگ و شبکه جریان کارستی حذف می‌گردد. به همین دلیل با در نظر گرفتن آزمایش‌های کوچک مقیاس برای تحلیل مخزن سدهایی که به صورت ناحیه‌ای و محلی در تماس با مخزن می‌باشند می‌تواند باعث ایجاد اشتباه فاحش در میزان برآورد نشت گردد.

### ۵-۳-۲- برآورد نشت از مخزن در مقیاس محلی

برای تعیین مقدار نشت در این مقیاس همانند مقیاس کوچک از نرم افزار Seep2D در محیط GMS استفاده شد در دولومیت‌های آهکی جناح راست سد بهشت‌آباد میزان هدایت هیدرولیکی با استفاده از روش مقیاس محلی بین  $8/0 \times 10^{-5}$  تا  $2/0 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه و به طور متوسط  $4/1 \times 10^{-5}$  محاسبه گردید. بر اساس مقدار هدایت هیدرولیکی مقیاس محلی مقدار نشت در مقطع معرف از مخزن حدود  $1/3$  لیتر بر ثانیه در هر متر مخزن برآورد گردید (۵-۲۲). با توجه به آنالیز نشت انجام شده و سطح مقطع تماس مخزن با آهک، نشت به مقدار حدود  $3/9$  متر مکعب بر ثانیه اتفاق خواهد افتاد. با فرض مقیاس درگیر محلی سد بهشت‌آباد با کارست میزان نشت نسبت به مقیاس کوچک ۳۲ برابر می‌گردد

هر چند در این مقیاس اثر درزو شکستگی های بزرگ و مجاری کوچک در آنالیز نشت دیده می شود ولی تاثیر مجاری کارستی اصلی مشخص نمی گردد.

### ۵-۳-۳- برآورد نشت از مخزن در مقیاس ناحیه ای

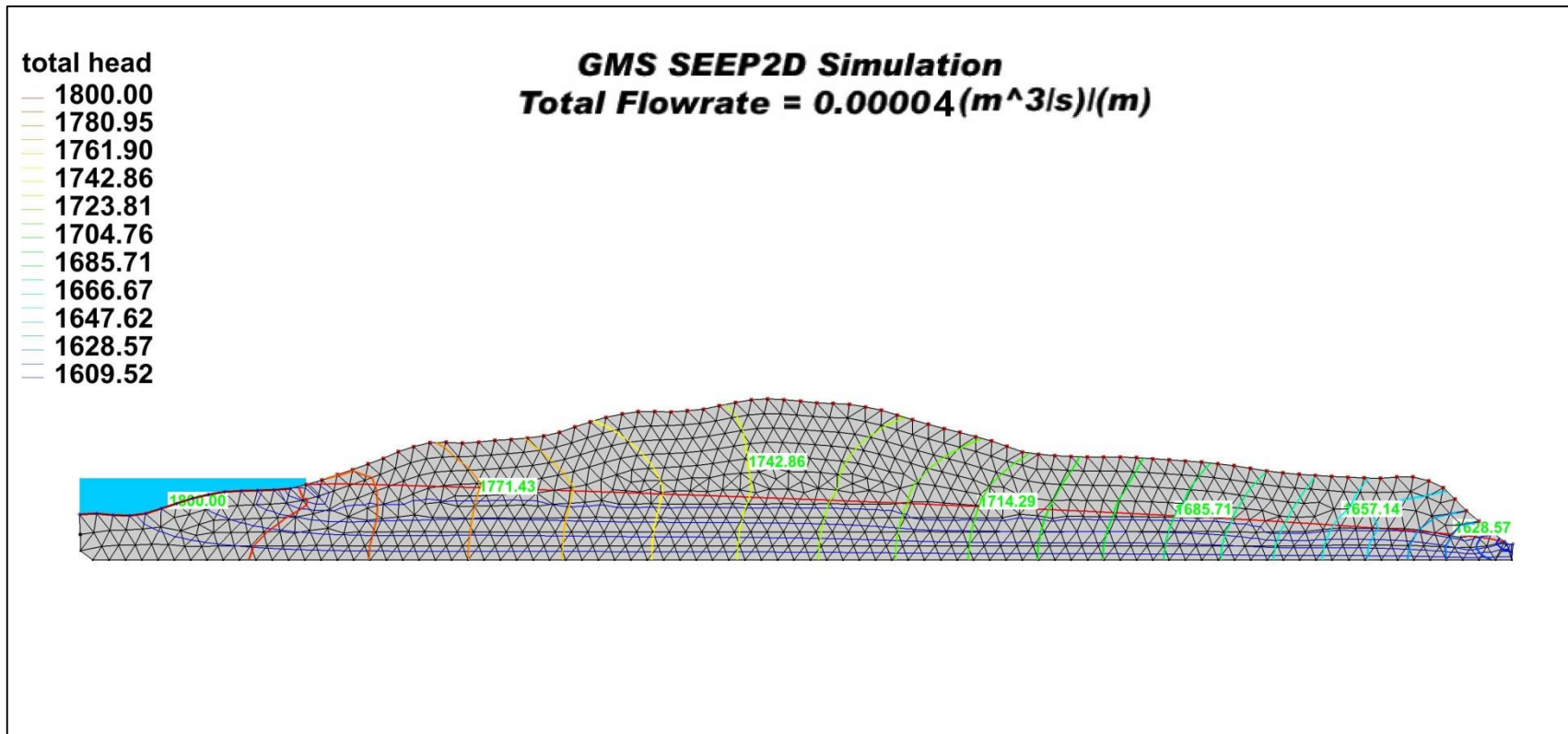
برای تعیین مقدار نشت در این مقیاس نیز از نرم افزار Seep2D در محیط GMS استفاده شد و فرضیات و شبکه بندی مدل تغییر نکرده است. در دولومیت های آهکی جناح راست مخزن سد میزان هدایت هیدرولیکی معادل با استفاده از روش مقیاس ناحیه ای در روشهای مختلف (ردیابی، تخمین از گرادیان و منحنی فرود) بین  $1/2 \times 10^{-4}$  تا  $1/7 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه و به طور متوسط  $1/5 \times 10^{-4}$  محاسبه گردید. بر اساس مقدار هدایت هیدرولیکی ناحیه ای نشت از مخزن در مقطع معرف حدود  $2/7$  لیتر بر ثانیه در هر متر مخزن برآورد گردید (۵-۲۳). با در نظر گرفتن کل سطح تماس با آهک و فرض پارامترهای هیدروژئولوژیک در مقیاس ناحیه ای حدود  $5/4$  تا  $7/8$  متر مکعب بر ثانیه نشت از مخزن در این شرایط اتفاق خواهد افتاد. به عبارتی می توان گفت با در نظر گرفتن این مقیاس در تحلیل نشت از مخزن، تاثیر درزو شکستگی های کوچک و بزرگ و شبکه جریان کارستی دیده می شود در این شرایط با فرض مقیاس درگیر ناحیه ای سد بهشت آباد با کارست، میزان نشت نسبت به مقیاس کوچک ۴۵ تا ۶۵ برابر می گردد.

### ۵-۳-۴- تحلیل اثر مقیاس بر میزان نشت

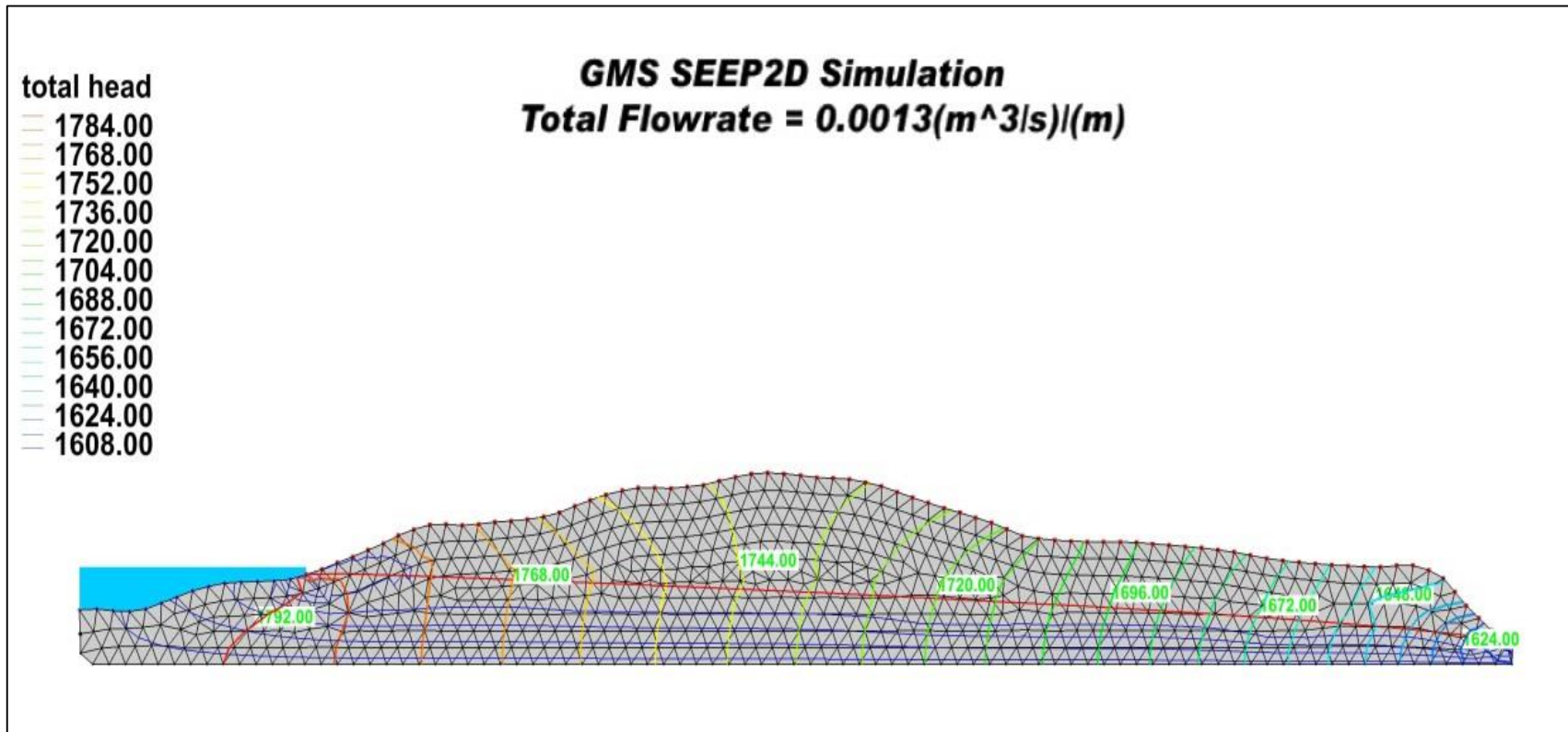
مهمترین پارامتر برای تعیین مقدار نشت از مخازن سدها میزان هدایت هیدرولیکی است که با تغییر مقیاس در محیطهای کارستی تغییر می کند. تخمین صحیح نشت از سدها نیازمند بررسیهای هیدروژئولوژی در تعیین چگونگی تماس سد و مخزن با آبخوانهای کارستی دارد. با توجه به تغییرات هدایت هیدرولیکی مقدار نشت در هر متر مخزن بین  $0/04$  لیتر بر ثانیه (براساس روشهای مقیاس کوچک) تا  $2/7$  لیتر بر ثانیه (براساس روشهای ناحیه ای) متغیر می باشد. این مقدار اختلاف در برآورد

مقدار نشت، ناشی از تاثیر مقیاس در محیط‌های ناهمگن کارستی است. با توجه اینکه برآورد در مقیاس‌های مختلف دارای دامنه وسیعی است. میتوان گفت در محیط‌های کارستی در صورت تشخیص نادرست مقیاس درگیر با کارست و انجام آزمایش در یکی از این مقیاس‌ها، باعث ایجاد اشتباه بزرگی در تخمین میزان نشت از مخزن گردد.

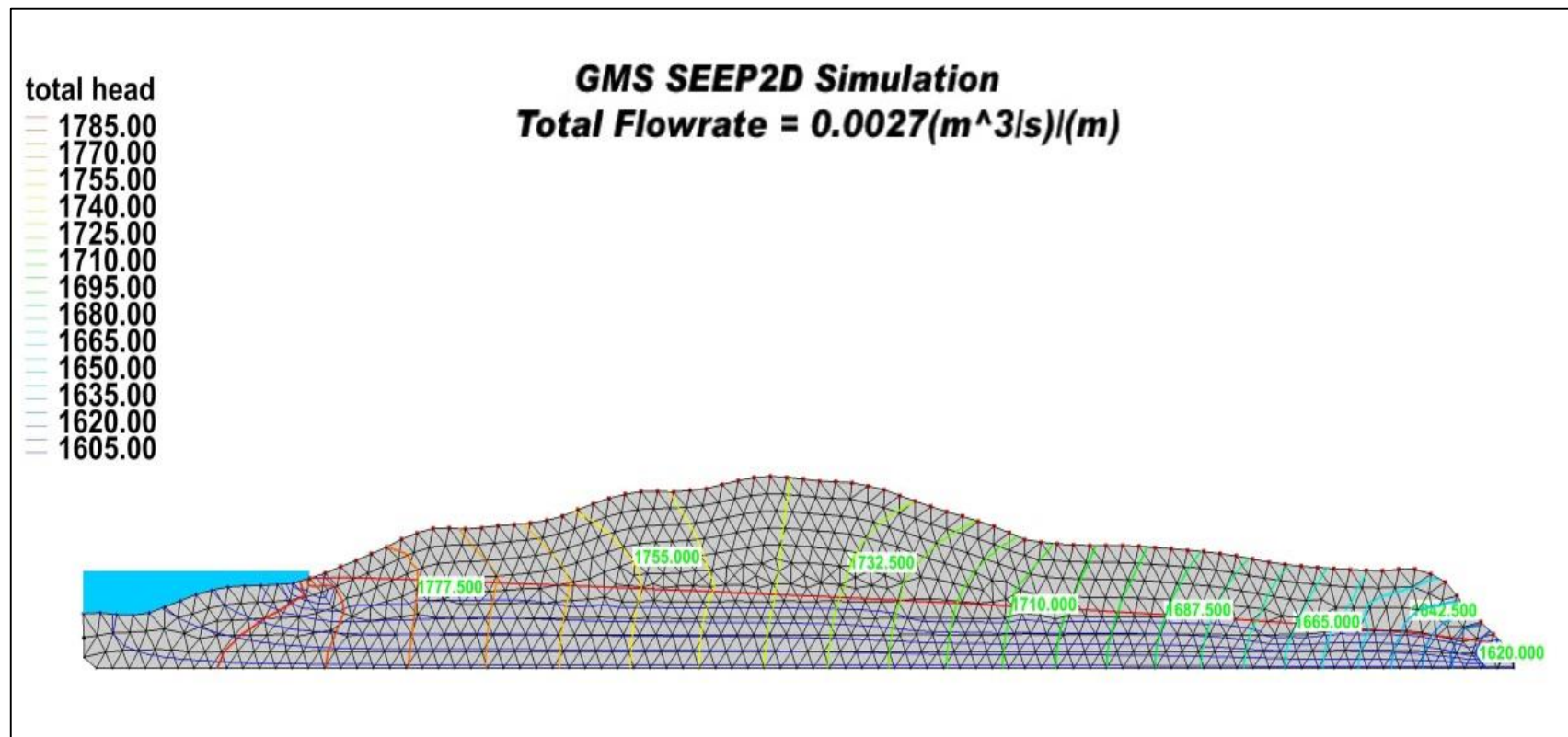
با توجه به اینکه مطالعات هیدروژئولوژی سد بهشت‌آباد نشان داد مخزن به صورت ناحیه‌ای با آبخوان آهکی جناح راست در تماس می‌باشد به همین دلیل مقدار نشت باید براساس هدایت هیدرولیکی ناحیه‌ای ملاک مدلسازی قرار گیرد. مطابق با روش‌های آزمایش در مقیاس ناحیه‌ای، هدایت هیدرولیکی معادل توده بین  $1/2 \times 10^{-4}$  تا  $1/7 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه محاسبه گردیده است. با این میزان هدایت هیدرولیکی مقدار نشت از مخزن سد بین حدود  $5/4$  تا  $7/8$  متر مکعب برثانیه (در حالت بدون ایجاد پرده تزریق) رخ خواهد داد.



شکل ۵-۲۱- مقدار نشت بر اساس هدایت هیدرولیکی در مقیاس کوچک



شکل ۵-۲۲- مقدار نشت بر اساس هدایت هیدرولیکی در مقیاس محلی



شکل ۵-۲۳- مقدار نشت بر اساس هدایت هیدرولیکی در مقیاس ناحیه‌ای

## ۶- فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

در این فصل ابتدا نتایج مطالعات هیدروژئولوژی، هیدروشیمی و ایزوتوپی ارائه می‌گردد. سپس نتایج حاصل از مطالعات بر روی اثر مقیاس و تاثیر آن بر نشت از مخازن کارستی بیان می‌شود و در نهایت به پیشنهادات مربوط به این مطالعات پرداخته خواهد شد.

### ۶-۱- نتایج حاصل از مطالعات هیدروژئولوژی آهکهای کارستی محدوده سد

بررسی‌های مختلف هیدروژئولوژی برای تعیین ارتباط هیدرولیکی یال شمالی و جنوبی تاقدیس سنگویل صورت گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده همدیگر را تایید می‌کنند. سطح آب آبخوان سازند جهرم-آسماری در جناح راست مخزن دارای نوسانات بسیار مشابه با اختلاف حداقل و حداکثر ۲/۵ تا ۳ متر است. جریان از یال شمالی با تراز حدود ۱۶۲۵ به سمت چشمه‌ها در یال جنوبی با تراز حدود ۱۵۹۵ و با گرادیان حدود ۷ در هزار صورت می‌گیرد. تخلیه از چشمه‌ها در یال جنوبی و پایین دست محور سد با نوسانات مشابه دارای سه ضریب فرود است. ضریب  $\alpha_1$  در پایه  $10^{-2}$  نشان دهنده جریان افشان-مجرایبی و حدود ۱۵ درصد از جریان آبخوان کارستی را شامل می‌گردد. ضرائب  $\alpha_2, \alpha_3$  در پایه  $10^{-3}$  نمایانگر جریان افشان آبخوان کارستی و حدود ۸۵ درصد جریان منحنی فرود چشمه‌ها را تشکیل می‌دهد.

تغییرات پارامترهای هیدروشیمی آبخوان در جناح راست مخزن در چشمه‌ها و گمانه‌ها نیز دارای نوسانات کم است. این تغییرات برای آنیونها و کاتیونها کمتر از ۲۰ درصد و برای هدایت الکتریکی و

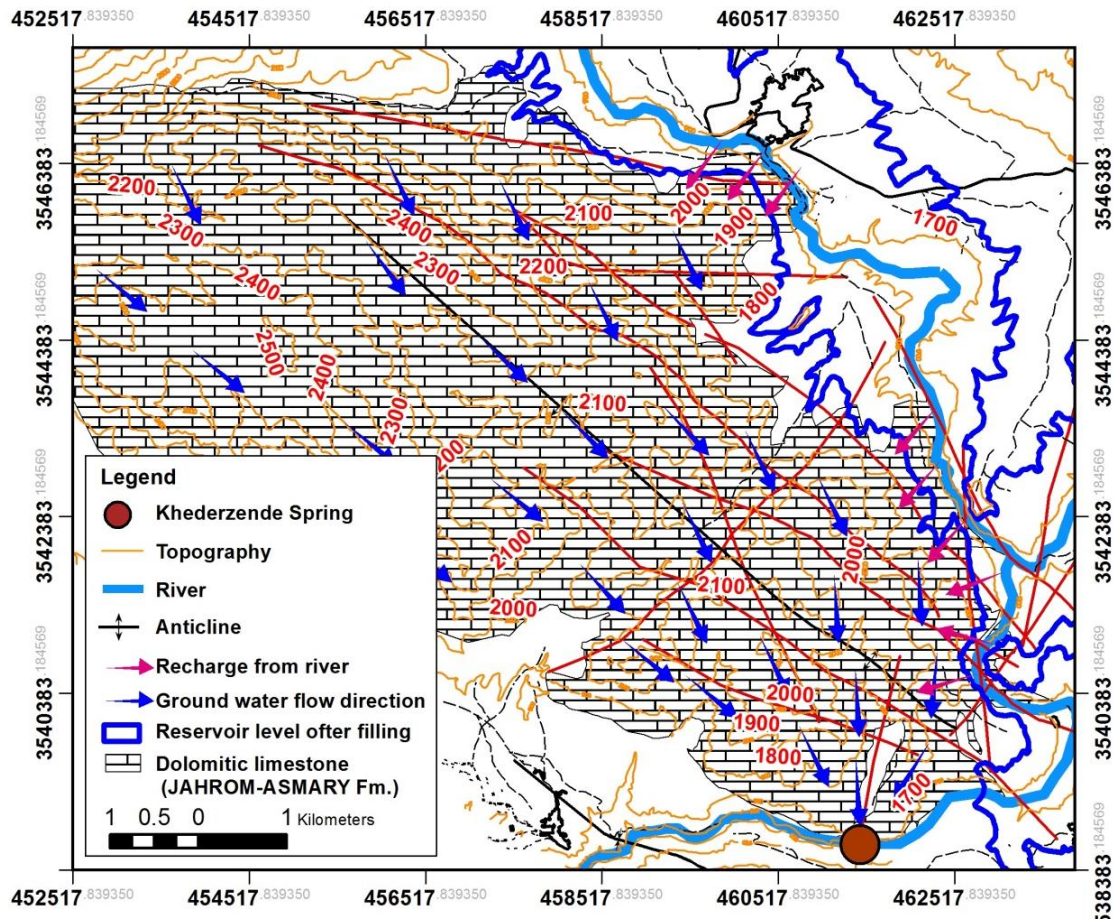
pH کمتر از ۵ درصد است این میزان تغییرات هیدروشیمی نیز نشان دهنده جریان افشان تا حدواسط (افشان-مجرایبی) آبخوان کارستی جهرم-آسماری می‌باشد.

تغییرات ماهیانه ایزوتوپهای محیطی نیز در چشمه‌ها و گمانه‌های آبخوان جناح راست مخزن کم است به طوری که انحراف معیار نمونه‌های ایزوتوپی چشمه و گمانه معرف برای  $\delta^{18}\text{O}$  کمتر از ۰/۲ و برای  $\delta\text{D}$  حدود ۱/۲ پرمیل می‌باشد. ایزوتوپهای پایدار ارتفاع تغذیه منابع آب یال جنوبی را حدود ۲۳۰۰ متر و از بارشهای پر حجم و برف نشان می‌دهد. این موضوع با واقعیت توپوگرافی و نوع و میزان بارش در محدوده تاقدیس منطبق است. همچنین این مطالعات نشان داد چشمه هم از یال شمالی و یال جنوبی تاقدیس و هم از رودخانه منشاء می‌گیرد. بر اساس مقادیر ایزوتوپی  $\delta^{18}\text{O}$  نتایج بدست آمده نشان دهنده سهم ۸۵ درصدی آب بارندگی و سهم ۱۵ درصدی رودخانه در تغذیه چشمه می‌باشد. همچنین بر اساس مقادیر ایزوتوپی  $\delta\text{D}$  سهم بارندگی در تغذیه چشمه ۷۸ درصد و سهم رودخانه برابر ۲۲ درصد می‌باشد. این مطالعات نشان دهنده ارتباط هیدرولیکی بین یال شمال و یال جنوبی و رودخانه در یال شمالی در شرایط حال حاضر می‌باشد.

به طور کلی بررسی‌های هیدروژئولوژی نشان می‌دهد آبخوان کارستی جهرم-آسماری در جناح راست مخزن سد یک آبخوان با نوع جریان افشان تا افشان-مجرایبی است. تغذیه این آبخوان از دو یال تاقدیس و عمدتاً از طریق سیستم درز و شکستگی‌ها صورت می‌گیرد. مطابق شکل (۶-۱) رودخانه در یال شمالی به عنوان تغذیه کننده یال شمالی عمل می‌کند همچنین جهت جریان آب زیرزمینی از یال شمالی به سمت یال جنوبی بوده و در چشمه‌های یال جنوبی تخلیه می‌گردد. در چنین شرایطی ارتباط هیدرولیکی بین یال شمالی تاقدیس با یال جنوبی در شرایط فعلی وجود دارد این ارتباط در زمان تشکیل مخزن، بین مخزن و چشمه‌های پایین دست محور سد با گرادیان بیشتر (حدود ۳۷ در هزار) برقرار می‌گردد. در این صورت با آگیری سد، عمده جریان نشتی از جناح راست مخزن در یال



شمالی تاقدیس به سمت یال جنوبی حرکت کرده و در نهایت در چشمه‌های یال جنوبی تخلیه می‌گردد.



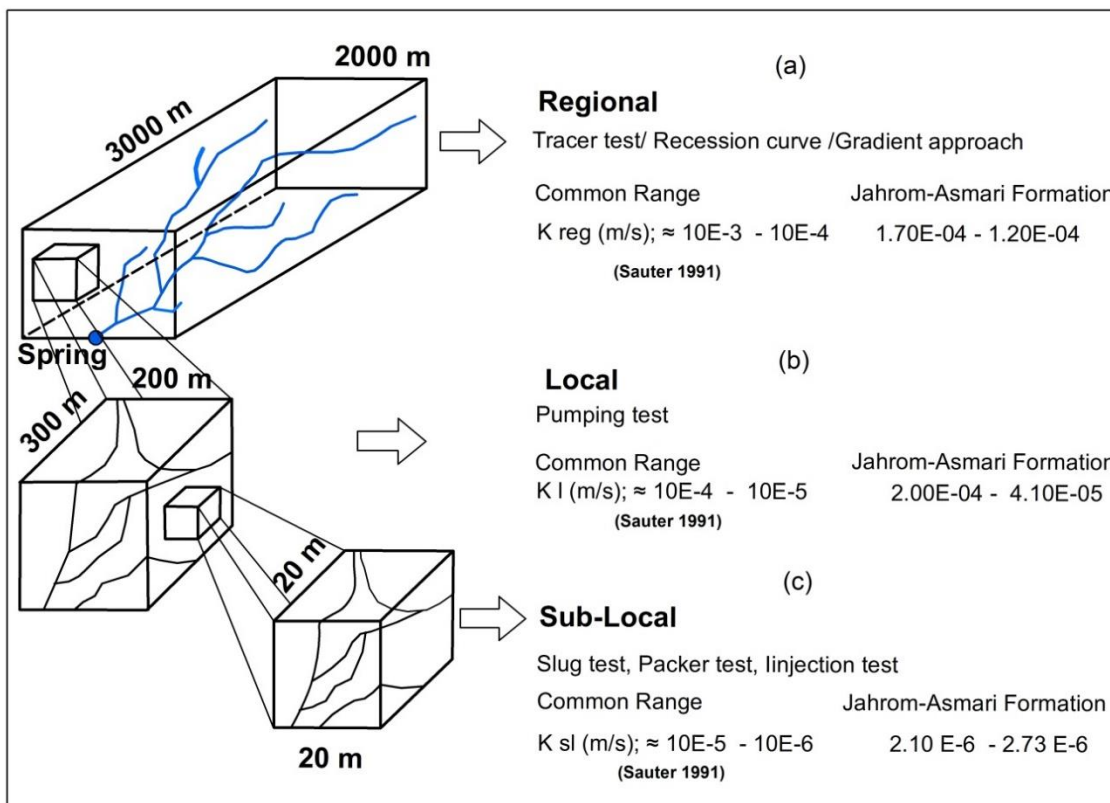
شکل ۶-۱- جهت جریانهای آب زیرزمینی از رودخانه و یال شمالی به سمت یال جنوبی

## ۶-۲- نتایج حاصل از اثر مقیاس در کارست آهکهای جهرم-آسماری

هدایت هیدرولیکی معادل محاسبه شده در روشهای مختلف برای آبخوان آهکی در جناح راست مخزن متفاوت بوده و در محدوده  $2/1 \times 10^{-6}$  تا  $1/7 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه قرار دارد. حداقل هدایت هیدرولیکی مربوط به آزمون اسلاگ در مقیاس کوچک و حداکثر هدایت هیدرولیکی مربوط به روش ردیابی و منحنی فرود است که در مقیاس ناحیه‌ای برآورد گردید. میزان هدایت هیدرولیکی محاسبه شده در مقیاس ناحیه‌ای حدود ۷۰ برابر بزرگتر از مقیاس کوچک برآورد گردید که این میزان اختلاف به دلیل

اثر مقیاس در محیط کارستی می‌باشد. همچنین به طور تقریبی می‌توان گفت هدایت هیدرولیکی معادل ناحیه‌ای توده کارستی در آزمایش‌های با شعاع تاثیر بالای ۵۰۰ متر مشخص می‌گردد.

با توجه به مطالعه اثر مقیاس در دولومیت‌های آهکی جهرم-آسماری میتوان گفت هدایت هیدرولیکی در آهک‌های جهرم-آسماری با افزایش مقیاس، افزایش پیدا می‌کند در این شرایط بسته به اینکه در چه مقیاسی با کارست درگیر وجود دارد آن میزان هدایت هیدرولیکی باید در تحلیل‌های هیدروژئولوژیک مورد استفاده قرار گیرد. در زمان تماس ناحیه‌ای (Regional) با کارست روش‌های تعیین هدایت هیدرولیکی ناحیه‌ای همچون ردیابی، روش داری و روش منحنی فرود برای تخمین مقدار هدایت هیدرولیکی صحیح‌تر است. در صورتی که مقیاس درگیر با کارست به صورت محلی (Local) باشد آزمایش پمپاژ برای تعیین مقدار هدایت هیدرولیکی کارست صحیح‌تر است. همچنین هنگامی که مقیاس درگیر به صورت کوچک (Sub-local) باشد آزمایش پکرتست، تزریق و اسلاگ برای تعیین مقدار هدایت هیدرولیکی روش صحیح‌تری است (شکل ۶-۲).



شکل ۶-۲- نمودار شماتیک از هدایت هیدرولیکی شبکه کارستی سازند جهرم-آسماری a: هدایت هیدرولیکی در مقیاس ناحیه‌ای b: هدایت هیدرولیکی در مقیاس محلی c: هدایت هیدرولیکی در مقیاس کوچک (Sauter 1991)

### ۶-۳- تاثیر مقیاس در میزان نشت از مخزن سدها

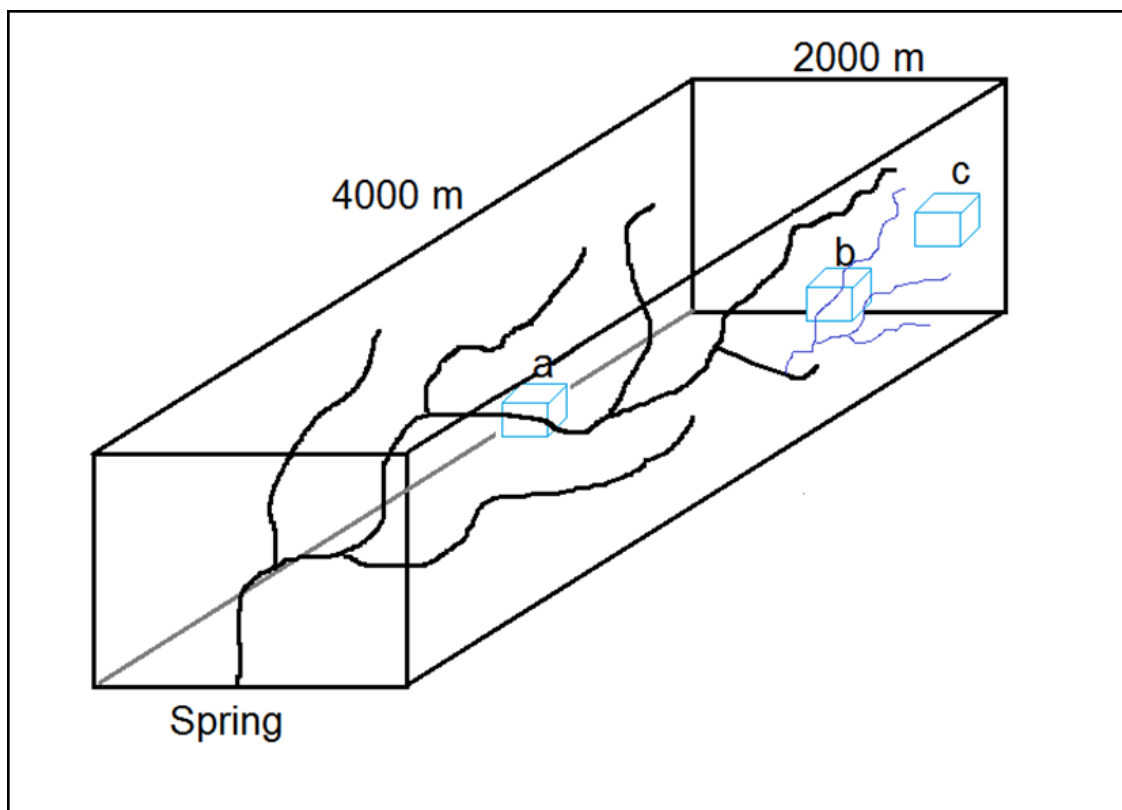
با توجه به غیرهمگن و ناهمسو بودن محیط‌های کارستی، پارامترهای آبخوان نسبت به مقیاس متغیر می‌باشد به طوری که هر چه توسعه کارست بیشتر باشد تاثیر مقیاس بیشتر است به همین دلیل احداث سد و درگیری مخزن در مقیاس‌های متفاوت با آهک‌های کارستی می‌تواند با مقادیر نشت متفاوتی مواجه شود. مهمترین پارامتر برای تعیین مقدار نشت از مخازن سدها میزان هدایت هیدرولیکی است که با تغییر مقیاس در محیط‌های کارستی تغییر می‌کند. برای تعیین میزان هدایت هیدرولیکی در مقیاس‌های مختلف روش‌های مختلفی به کار گرفته می‌شود. تخمین صحیح نشت از سدها نیازمند بررسی‌های هیدروژئولوژی در تعیین چگونگی تماس سد و مخزن با آبخوان‌های

کارستی دارد. در زمان تماس ناحیه‌ای (Regional) با کارست هدایت هیدرولیکی ناحیه‌ای همچون ردیابی، روش دارسی و روش منحنی فرود برای تخمین مقدار نشت صحیح تر است. در صورتی که مقیاس درگیر مخزن به صورت محلی (local) باشد آزمایش پمپاژ برای تعیین مقدار نشت آب صحیح‌تر است. و هنگامی که مقیاس درگیر به صورت کوچک (Sub-local) باشد. آزمایش پکرتست، تزریق و اسلاگ برای تعیین مقدار نشت روش صحیح‌تری است (شکل ۶-۳).

برای تخمین صحیح نشت از مخازن کارستی مطالعات هیدروژئولوژی در تعیین مقیاس درگیری مخزن بسیار با اهمیت است. با تعیین مقیاس درگیر مخزن با کارست استفاده از روش‌های متناسب با مقیاس هر منطقه می‌تواند به محاسبه نشت واقعی از سدها منتهی گردد. در دولومیت‌های آهکی جناح راست سد بهشت‌آباد میزان هدایت هیدرولیکی با استفاده از روشهای مختلف بین  $2/1 \times 10^{-6}$  تا  $1/7 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه محاسبه گردید. این میزان در مقیاس کوچک معادل  $2/1 \times 10^{-6}$  تا  $2/7 \times 10^{-6}$  متر بر ثانیه، در مقیاس محلی حدود  $8 \times 10^{-5}$  متر بر ثانیه، و در مقیاس ناحیه‌ای بین  $1/2 \times 10^{-4}$  تا  $1/7 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه برآورد گردید. این اختلاف باعث تفاوت زیاد در برآورد مقدار نشت می‌گردد. به همین نسبت مقدار نشت از مخزن در شرایط هدایت هیدرولیکی در مقیاس کوچک حدود  $0/04$  لیتر بر ثانیه، با مقیاس محلی حدود  $1/3$  لیتر بر ثانیه و در مقیاس ناحیه‌ای بین  $2/1$  تا  $2/7$  لیتر بر ثانیه در هر متر مخزن برآورد گردید. با توجه به درگیری مخزن در جناح راست در مقیاس ناحیه‌ای می‌توان گفت مقدار نشت از مخزن سد بهشت‌آباد در مقیاس ناحیه‌ای اتفاق خواهد افتاد. در این صورت با در نظر گرفتن سطح مقطع در تماس با مخزن مقدار نشت حدود  $5/4$  تا  $7/8$  متر مکعب بر ثانیه برآورد می‌گردد. با توجه به اینکه اختلاف هدایت هیدرولیکی در مقیاسهای مختلف برای تعیین میزان نشت در محیطهای کارستی بسیار زیاد می‌باشد و در کارست جهرم آسماری این اختلاف بیش از ۷۰ برابر است. به دلیل وجود این عدم قطعیت و همچنین به خاطر اینکه هزینه این روش‌ها نسبت به احداث یک سد بسیار ناچیز است همه روشهای تعیین هدایت هیدرولیکی باید برای احداث یک مخزن بکار گرفته شود. همچنین به دلیل پیچیدگی‌های محیطهای کارستی نمیتوان گفت به دلیل سطح تماس

کم فرار با هدایت هیدرولیکی مقیاس کوچک اتفاق خواهد افتاد ولی میتوان گفت افزایش تماس مخزن با سازندهای آهکی احتمال نشت با هدایت هیدرولیکی ناحیه‌ای را افزایش خواهد داد. تعیین مقیاس کوچک، محلی و یا ناحیه‌ای در تعیین مقیاس درگیر مخزن با محیطهای کارستی نیاز به انجام مطالعات هیدروژئولوژی پیشرفته و حفاریهای اکتشافی دارد این مطالعات در سد بهشت‌آباد تایید کننده میزان نشت با هدایت هیدرولیکی ناحیه‌ای می‌باشد.

در نهایت میتوان گفت اثر مقیاس یکی از مهمترین فاکتورها در محیطهای کارستی برای آب‌بندی مخزن سدها می‌باشد که در مرحله انتخاب محور سد باید در نظر گرفته شود. این اثر باعث می‌گردد در یک گستره کربناته کارستی در موقعیتهای مختلف نشتهای متفاوت رخ دهد. به همین خاطر باید حتی امکان محورهایی انتخاب گردد که مخزن سد به صورت ناحیه‌ای در تماس با شبکه کارستی نباشد.



شکل ۶-۳- نمودار شماتیک از تماس مخزن با شبکه کارستی a: تماس مخزن با آهک در مقیاس ناحیه‌ای

b: تماس مخزن با آهک در مقیاس محلی c: تماس مخزن با آهک در مقیاس کوچک

## ۴-۶- پیشنهادها

- با توجه به اینکه آببندی مهمترین ویژگی مخزن یک سد برای برنامه‌ریزی منابع آب آن می‌باشد به همین دلیل در محدوده‌های کارستی مورفولوژی، تقارن و تنگی دره نباید در اولویت ایجاد یک سد قرار گیرد. در این شرایط حتی امکان محور باید در موقعیت‌هایی قرار گیرد که مرزهای آببند به آن نزدیک و مقیاس درگیر مخزن سد با کارست به صورت ناحیه‌ای نباشد. در تاق‌دیسه‌های کارستی گاهاً با جابجایی محور در ابتدا و انتهای تاق‌دیس و تغییر نوع سد میتوان محوری با مخزن آببند انتخاب کرد.
- با توجه به فرار آب با هدایت هیدرولیکی در مقیاس ناحیه‌ای از جناح راست مخزن رخ خواهد داد و مرزهای آببندی همچون سازند رازک و کم نفوذپذیری همچون سازند بختیاری در پایین دست محور سد بهشت‌آباد وجود دارد. پیشنهاد می‌گردد برای فرار از پیچیدگی‌های کارست نوع سد را تغییر و محور را بر روی این سازندها جانمایی کرد. در این شرایط چشمه‌های کارستی در داخل مخزن غرقاب شده و با طول پرده‌های کوتاهی می‌توان از آببندی مخزن اطمینان حاصل کرد.
- در صورت جا به جا نشدن محور، پیشنهاد می‌گردد جهت پرده تزریق به یک مرز فیزیکی آببند همچون سازند رازک در پایین دست دوخته شود و عمق پرده تا ۱۰۰ متر زیر تراز سطح آب زیرزمینی (تراز ۱۵۲۵ متر) که لوژنها به زیر ۱۰ لوژن کاهش پیدا می‌کند ادامه یابد.
- استفاده از آزمایشهای کوچک مقیاس همچون لوژن، اسلاگ و تزریق آب در محیطهای کارستی برای انجام تحلیل‌های آنالیز نشت می‌تواند منجر به اشتباه بزرگی در تخمین فرار آب از مخازن کارستی گردد. به همین دلیل پیشنهاد می‌گردد آزمایشهای مختلف در مقیاسهای مختلف در محیطهای کارستی صورت گرفته و عدم قطعیت ناشی از اثر مقیاس مورد ارزیابی قرار گیرد.

## منابع مورد استفاده

۱. ابوکاظمی م. ۱۳۸۱ دانشنامه فیزیک (جلد سوم). بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی، چاپ اول.
۲. زاینده‌آب. ۱۳۸۶ گزارش زمین‌شناسی محدوده مخزن و ساختگاه سد بهشت‌آباد.
۳. زاینده‌آب. ۱۳۸۶ گزارش ژئوتکنیک سد بهشت‌آباد.
۴. زاینده‌آب. ۱۳۸۶ گزارش هواشناسی و هیدرولوژی سد بهشت‌آباد.
۵. عابدیان ح. کریمی ح. ۱۳۸۹ ردیابی رنگی در محدوده مخزن سد بهشت‌آباد جهت بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیک سازند جهرم - آسماری، نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، شرکت آب منطقه ای کرمانشاه
۶. علیزاده ا، ۱۳۹۰ اصول هیدرولوژی کاربردی (چاپ ۳۳)، مشهد: دانشگاه امام رضا.
۷. کریمی غ. کاظمی غ. افتخاری ع. نیستانی م. ک. ۱۳۹۲ راهنمای کاربرد ردیابها در بررسی نشت و فرار آب از مخزن و تکیه گاه‌های سد، وزارت نیرو، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، نشریه شماره ۵۶۱.
۸. کریمی ح. ۱۳۹۲ بررسی ترکیب ایزوتوپهای پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در بارشهای زاگرس غربی. نخستین همایش ملی کاربرد ایزوتوپهای پایدار، دانشگاه فردوسی مشهد.
۹. ناصری ح ر. ۱۳۷۰ مطالعه هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی حوضه آبریز سد درودزن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شیراز

10. Al-Omosh H. Al-Farajat M. Zunic F. (2008) Leakage in Bayer Dam in Jordan: Its causes and consequences. Jordan: Journal of Civil Engineering 2(4): 363-375.

11. ASTM (1995) Standard Guide for Design of Ground-Water Monitoring Systems in Karst and Fractured-Rock Aquifers. The American Society for Testing and Materials, CRC Press

12. Atkinson T .C. (1977) Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (G.B) .J.Hydrol.,vol 35:93-110

13. Atkinson, T.C., (1985). Present and future directions in karst hydrogeology. Annales de la Societe Ge´ologique de Belgique, 108, 293–96.

14. Baedke S.J. and Krothe N.C. (2001) Derivation of effective hydraulic parameters of a karst aquifer from discharge hydrograph analysis: Water Resources Research, v. 37, no. 1, p. 13–19.

15. Bedrosian P.A. Burton B.L. Powers M.H. Minsley B.J. Phillips J.D. Hunter L.E. (2012) Geophysical investigations of geology and structure at the Martis Creek Dam, Truckee, California. *Journal of Applied Geophysics* 77: 7-20.
16. Bonacci O. (1993) Karst spring hydrographs as indicators of karst aquifers: *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, v. 38, no. 1, p. 51–62.
17. Bonacci O. (2012) *Karst hydrology: with special reference to the Dinaric karst (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media.
18. Bonacci R.T. Bonacci O. (2013) The possible negative consequences of underground dam and reservoir construction and operation in coastal karst areas: an example of the hydro-electric power plant (HEPP) Ombla near Dubrovnik (Croatia). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13(8): 2041-2052.
19. Bouwer H. Rice R.C. (1976) A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water resources research*, 12(3), pp.423-428.
20. Bradbury K.R. Muldoon M.A. (1990) Hydraulic conductivity determinations in Unlithified glacial and fluvial materials. Pages 138-151 in Nielson DM, Johnson AI, editors. *Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soils*. American Society for Testing and Materials, ASTM STP, Philadelphia
21. Brown D. (1998) An investigation into the controls on groundwater flow at increasing scales in the carboniferous limestone of Middlebarrow Quarry, S. Cumbria, U.K. Ph.D. Univ. of Lancaster, Lancaster
22. Burdon D. I. and Papakis N. (1963) *Handbook of Karst Hydrogeology*. United Nations Special Fund, Athens, 276 pp.
23. Castany G. (1984) Hydrogeological features of carbonate rocks. In: LaMoreaux PE, Wilson BM, Memon BA (eds) *Guide to the hydrology of carbonate rocks*. IHP studies and reports in hydrology, vol 41. UNESCO, Paris, pp. 47- 67
24. Chapuis R.P. (2010) Permeability scale effect in sandy aquifers: A few case studies. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris
25. Chen Y.F. Ling X.M. Liu M.M. Hu R. Yang Z. (2018) Statistical distribution of hydraulic conductivity of rocks in deep-incised valleys, Southwest China. *Journal of Hydrology*, doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.016



26. Clark, I.D. and Fritz P. (1997) Environmental isotopes in hydrology. Lewis, New York.
27. Clauser C. (1992) Permeability of crystalline rocks. EOS, Trans. Am. Geophys. Union 73(21):233-238
28. Crilley D.M. Torak L.J. (2002) Physical and hydrochemical evidence of lake leakage and assessment of karst features in the vicinity of Lake Seminole, southwestern Georgia and northwestern Florida. In American Geophysical Union Fall Meeting Abstracts: American Geophysical Union, Washington, DC, abstract H72C-0864.
29. Dansgaard W. (1964) Stable isotopes in precipitation. Tellus, 16(4), pp.436-468.
30. Dillon P. Pavelic P. Wright M. Peter P. Nefiodovas A. (2001) Small-scale heterogeneity and anisotropy of a confined carbonate aquifer from triaxial tests on core samples. S. a. wohnlich, editor. New Approaches Characterising Groundwater Flow. Swets and Zeitlinger Lisse, 815-819
31. EPA [U. S. Environmental Protection Agency]. (2002) A Lexicon of Cave and karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology, Washington, D. C.: National Center for Environmental Assessment.
32. Ford D. C. and Williams P. W. (1989) Karst geomorphology and hydrology. London: Chapman & Hall, 601 p
33. Foster S. S. D. and Milton V. A. (1974) The permeability and storage of an unconfined Chalk aquifer. Hydrological Sciences Bulletin 19 (1974), pp. 485-500.
34. Galvão P. Halihan T. Hirata R. (2016) The karst permeability scale effect of Sete Lagoas, MG, Brazil. Journal of Hydrology, 532:149-162
35. Gibson R.E. (1963) An analysis of system flexibility and its effect on time-lag in porewater pressure measurements. Géotechnique 13(1), 1–11.
36. Ginther C.H. Charlton J.C. (2009) Comprehensive foundation rehabilitation at Bear Creek Dam. In USSD 29th Annual Conference: United States Society on Dams, Nashville, TN, 4/20/09.
37. Gunay G. Ekmekci M. Tezcan L. (1995) Hydrogeochemical and isotopic evaluation of the hydrogeological system at Ceyhan-Berke dam site, Turkey. Application of tracers in arid zone hydrology. In Proceedings of the Vienna

Symposium, August 1994: International Association of Hydrological Sciences Publication 232: 395-408.

38. Gutierrez F. Parise M. De Waele J. Jourde H. (2014) A review on natural and human-induced geo hazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews* 138: 61-88.
39. Halihan T. Sharp J.M. Robert E.M. (2000) Flow in the San Antonio segment of the Edwards aquifer: matrix, fractures, or conduits? In Sasowsky ID, and Carol MW, editors. *Groundwater flow and contaminant transport in carbonate aquifers*. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands
40. Hamm S.Y. Kim M. Cheong J.Y. Kim J.Y. Son M. Kim T.W. (2007) Relationship between hydraulic conductivity and fracture properties estimated from packer tests and borehole data in a fractured granite. *Eng. Geol.* 92(1), 73–87
41. Hinrichsen E.L. Aharony A. Feder J. Hansen A. Jøssang T. Hardy H.H. (1993) A fast algorithm for estimating large-scale permeabilities of correlated anisotropic media. *Transport Porous Med.* 12(1), 55–72
42. Hobbs S.L. and Smart P.L. (1986) Characterization of carbonate aquifers: a conceptual base, *Proceedings of the 9th International Congress of Speleology, Barcelona, Vol. 1, pp. 43–6.*
43. Hobbs S.L. and Smart P.L. (1986) Characterization of carbonate aquifers: a conceptual base, *Proceedings of the 9th International Congress of Speleology, Barcelona, Vol. 1, pp. 43–6.*
44. Hvorslev M.L. (1951) Time lag and soil permeability in groundwater observations. *Bull 36. Waterways Experiment Station Corps of Engineers. U. S. Army, Vicksburg, Mississippi.*
45. Illman W.A. (2007) Strong field evidence of directional permeability scale effect in fractured rock. *J. Hydrol.* 319 (1–4):227–236
46. Jacobson R.L. Langmuir D. (1974) Controls on the quality variations of some carbonate spring waters. *Journal of Hydrology* 23(3-4): 247-265.
47. Jarvis T. Johnson K.S. Neal J.T. (2003) The money pit: karst failure of Anchor Dam, Wyoming. *Evaporite karst and engineering/environmental problems in the United States. Oklahoma Geological Survey Circular 109: 271-278.*

48. Jennings J. N. (1985) "Karst Geomorphology", Oxford-New York, Basil Blackwell
49. Karami G.H. (2002) Assessment of heterogeneity and flow systems in karstic aquifers using pumping test data. Ph.D. thesis Univ. of Newcastle
50. Karanjac J. Altug A. (1980) Karstic spring recession hydrograph and water temperature analysis: Oymapinar Dam Project, Turkey. *Journal of Hydrology* 45(3-4): 203-217.
51. Karimi H. (2003) Hydrogeological study of aquifers in Khersan 3 Dam area using time variations of physico-chemical parameters. M.Sc. Thesis, Department of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz karst: *Earth-Science Reviews* 138: 61-88.
52. Kiraly L. (1975) Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caracteres physiques des roches karstiques. In *Hydrogeology of Karstic Terrains* (eds Burger A and Dubertret L), International Union of Geological Sciences, Series B, 3:53-67
53. Kurikami H. Takeuchi R. Yabuuchi S. (2008) Scale effect and heterogeneity of hydraulic conductivity of sedimentary rocks at Horonobe URL site. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33:S37-S44
54. Laksiri L.K. (2007) Investigation of Water Leakage Mechanism in the Karstic Dam Site, Samanalawewa, Srilanka: Ph.D. thesis, Department of Engineering Systems and Technology, Graduate School of Science and Engineering, Saga University, Saga, Japan, 136 p.
55. Landon M.K. Rus D.L. Harvey F.E. (2001) Comparison of instream methods for measuring hydraulic conductivity in sandy streambeds. *Groundwater* 39(6):870-885
56. Lis G. Wassenaar L.I. Hendry M.J. (2008) High-precision laser spectroscopy D/H and 18O/16O measurements of microliter natural water samples. *Analytical chemistry* 80(1): 287-293.
57. Lu H.Y. Peng T.R. Liu T.K. Wang C.H. and Huang C.C. (2006) Study of stable isotopes in the Hsinchu-Miaoli area, Taiwan. *Environ. Geol.*, 50(7), 885-898.
58. Mace R.E. Hovorka S.D. (2000) Estimating porosity and permeability in a karstic aquifer using core plugs, well tests, and outcrop measurements. in

- Sasowsky ID, and Wicks CM, Groundwater flow and contaminant transport in carbonate aquifers: Brookfield, Vt., A.A. Balkema, 93-111
59. Maillet E. (1905) Essais d'Hydraulique souterraine et fluviale, Hermann, Paris.
  60. Maréchal J.C. Dewandel B. Subrahmanyam K. (2004) Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered fractured layer of a hard rock aquifer. *Water resources research*, 40(11)
  61. Mazor E. (2004) Chemical and isotopic groundwater hydrology, third edition, Marcel Dekker, Inc
  62. McMillan H.K. Westerberg I.K. and Krueger T. (2018) Hydrological data uncertainty and its implications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(6), p.e1319
  63. Milanovic P. (2004) *Water resources engineering in karst*. CRC press.
  64. Milanovic P.T. (1981) *Karst hydrogeology*. Littleton, CO: Water Resources Publications, 434 pp.
  65. Milanovic S. Stevanovic Z. Jemcov I. (2010) Water losses risk assessment: an example from Carpathian karst. *Environmental Earth Sciences* 60(4): 817-827.
  66. Mohammadi Z. Raeisi E. (2005) The uncertainties in hydrogeological study in karstic dam site. 73th annual meeting of ICOLD, Tehran, Iran.
  67. Mohammadi Z. Raeisi E. Bakalowicz M. (2007) Method of leakage study at the karst dam site. A case study: Khersan 3 Dam, Iran. *Environmental geology* 52(6):1053-1065.
  68. Mozafari M. Raeisi E. (2015) Understanding karst leakage at the Kowsar dam, Iran, by Hydrogeological Analysis Understanding Karst Leakage, Kowsar Dam, Iran. *Environmental and Engineering Geoscience* 21(4): 325-339.
  69. Mull D. S. Liebermann T. D. Smoot J. L. Woosley L. H. J. (1988) Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport Characteristics of ground water in karst terranes. EPA/904/9-88-001. Atlanta, Georgia: U.S. EPA, Region IV.
  70. Mull D.S. Liebermann T.D. Smoot J.L. Woosley L.H.J. (1988) Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport characteristics of groundwater in karst terranes. EPA/904/9-88-001. Atlanta, Georgia: U.S. EPA, Region IV

71. Nassimi A. Mohammadi Z. (2016) Estimation of hydraulic conductivity using geoelectrical data for assessing of scale effect in a karst aquifer. *Acta Carsologica* 45(3): 243-251.
72. Pearson R. Money M.S. (1977) Improvements in the Lugeon or packer permeability test. *Q. Jl Engng Geol.* 10(3):221-239
73. Quinlan J. F. and Ewers R. o. (1985) "Ground water flow in limestone terranes: strategy, rationale and procedure for reliable, efficient monitoring of ground water quality in karst areas." National Symposium and Exposition on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring, Proceedings, National Water Well Association, Worthington, OH, pp. 197-234.
74. Quinlan J.F. (1985) Application of dye-tracing to dam-site evaluation in a Kentucky karst area, USA. In Proceedings of the International Symposium on Karst Water Resources. 544pp.
75. Raeisi E. (2008) Ground-water storage calculation in karst aquifers with alluvium or no-flow boundaries. *Journal of cave and Karst studies* 70(1):62-70
76. Raeisi E. (2008) Ground-water storage calculation in karst aquifers with alluvium or no-flow boundaries. *Journal of cave and Karst studies* 70(1): 62-70.
77. Rorabough M.I. (1964) Estimating changes in bank storage and groundwater contribution to streamflow. *Int. Assoc. Sci. Hydro. Publ.*, 63:432-441
78. Rovey C.W. Cherkauer D.S. (1995) Scale dependency of hydraulic conductivity measurements. *Groundwater*, 33(5):769-780
79. Sahuguillo A. (1985) Spanish experience in karst water resources. In Proceedings of the International Symposium on Karst Water Resources, Ankara, Turkey, July 1985: International Association of Hydrological Sciences Publication 161:133-147.
80. Sauter M. (1991) Assessment of hydraulic conductivity in a karst aquifer at local and regional scale.- In: Quinlan J (Ed.) Proceedings of the 3rd conference on hydrogeology, ecology, monitoring, and management of ground water in karst terranes, 4th–6th December 1991, Nashville, Tennessee. National Ground Water Association, 39-56, Dublin, Ohio.
81. Sauter M. (1992) Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer (Gallusquelle, Malm, SW Germany) PhD Thesis, Tiibingen Geowissenschaftliche Arbeiten, C13.

82. Sauter M. (2005) Scale effects of hydraulic conductivity in karst and fractured aquifers. *Geophysical Research Abstracts*, <https://www.cosis.net/abstracts/EGU05/07748/EGU05-J-07748.pdf>. Accepted 28 April 2005
83. Schlulz H.D. (1998) Evaluation and interpretation of tracing tests. In Käss W, *Tracing Technique in Geohydrology* (pp, 341- 375). Rotterdam/Brookfield: Balkema
84. Shuster E. T. White W. B. (1971) Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers. *Journal of hydrology* 14(2): 93-128.
85. Shuster E.T. and White W.B. (1971) Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing aquifers: *Journal of Hydrology*, v. 14, p. 93–128.
86. Stocklin J. (1968) Structural history and tectonics map of Iran: a review. *Am Assoc Petrol Geol Bull* 52(7):1229-1258
87. Stocklin J. (1968) Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG Bulletin* 52(7): 1229-1258.
88. Torak L.J. Crilley D.M. Painter J.A. (2006) Physical and hydrochemical evidence of lake leakage near Jim Woodruff Lock and Dam and ground-water inflow to Lake Seminole, and an assessment of karst features in and near the lake, southwestern Georgia and northwestern Florida (No. 2005-5084).
89. Turkmen S. (2003) Treatment of the seepage problems at the Kalecik Dam (Turkey). *Engineering Geology* 68(3-4): 159-169.
90. Turkmen S. Ozguler E. Taga H. Karaogullarindan T. (2002) Seepage problems in the karstic limestone foundation of the Kalecik Dam (south Turkey). *Engineering Geology* 63(3-4): 247-257.
91. Veini G. (1997) *Geomorphology hydrogeology geochemistry and evolution of the karst Lower Glen Rose aquifer, South-central Texas*. PhD dissertation, Pennsylvania state University, USA. 721pp.
92. Whitaker F.F. Smart P.L. (2000) Characterising scale-dependence of hydraulic conductivity in carbonates: Evidence from the Bahamas. *Journal of Geochemical Exploration*, 69:133-137

93. White W. B. (1988) *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. New York: Oxford University Press, 464 p.
94. White W. B. and Longyear J. (1962) "Some Limitations on Speleogenetic Speculation Imposed by the Hydraulics of Groundwater Flow in Limestone," *Nittany Grotto Newsletter*, Vol 10, pp. 155 -167.
95. White W.B. (1988) *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. New York: Oxford University Press (vol.464).
96. White, W.B. & Schmidt, V.A., (1966). *Hydrology of a karst area in East - Central West- Virginia*. *Water Resour. Res.*, Vol. 2:549-560
97. Worthington S. R. H. (2007) "Ground-water residence times in unconfined carbonate aquifers." *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 69, no. 1, p. 94-102.
98. Worthington S.R. (1991) *Karst hydrogeology of the Canadian Rocky Mountains*. Ph.D. thesis, McMaster University
99. Worthington S.R. (2007) *Groundwater residence times in unconfined carbonate aquifers*. *Journal of Cave and Karst Studies*, 69(1):94-102
100. Worthington S.R.H. Ford D.C. and Beddows P.A. (2000) Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution, in *Speleogenesis; Evolution of Karst Aquifers* (eds A.V. Klimchouk, D.C. Ford, A.N. Palmer and W. Dreybrodt), National Speleological Society of America, Huntsville, AL, pp. 220–3.
101. Yeh H.F. Lee C.H. Hsu K.C. Chang P.H. and Wang C.H. (2009) *Journal of Environ. Eng. Manage.* 19(4), 185-191.
102. Yihdego Y. (2017) *Hydraulic in situ testing for mining and engineering design: packer test procedure, preparation, analysis and interpretation*. *J.Geotech. Geol. Eng.* 35, 29–44
103. Yuan D. (1981) *A Brief Introduction to China's Research in Karst*. Institute of Karst Geology, Guilin, Guangxi, China.
104. Yuan D. (1983) *Problems of Environmental Protection of Karst Areas*. Institute Karst Geology, Guilin, Guangxi, China, 15 pp.
105. Zogovic D. (1993) *Storage water tightness problems and technical solutions in the highly developed karst area of the Nikšić' Polje*. In *Proceedings of the Hydrogeological Processes in Karst Terranes*, Antalya Symposium and

Field Seminar, October 1990: International Association of Hydrological Sciences Publication 207: 85-93.



## Abstract

Construction of dams on limestone formations, however morphologically, has an appropriate form; but usually causes seepage from the reservoir to the downstream. Also, the construction of a dam on calcareous-karst formations has the risk of over seepage from the reservoir, and the existence of the karst leads to complicating this issue. Therefore, various methods of hydrogeological analysis are needed to determine the condition of karstification of reservoir and dam axis in the karstic areas.

Beheshtabad dam is in investigation studies stage and approximately situated at the far end of the anticline axis named Sangwill, which composed of dolomitic limestone with roughly 700 meters thickness. The right side of the reservoir is mainly in direct contact with this karstic formation. In order to determine the effect of scale effect on hydraulic conductivity and leakage from the reservoir of the dam, Karst's hydrogeological studies of the anticline were carried out. These included measurement of water level and boreholes hydrochemical analysis, measuring springs discharge and hydrochemical condition of springs and environmental isotopic studies. The results showed that karstic aquifer's water level on the right side of the reservoir has very similar fluctuations with a difference between the minimum and maximum of 2.5 to 3 meters. The water level from the northern limb with a level of about 1625 decreases towards the spring in the southern limb with a level of about 1595 and a gradient of about 0.007. Also, spring discharge in the sought limb has the same fluctuation with three coefficients of recession curve. Recession curve coefficient  $\alpha_1$  in the order of  $10^{-2}$  indicates the intermediate flow (diffuse-conduit) make up 15% of the flow and the coefficients  $\alpha_2$  and  $\alpha_3$  in order  $10^{-3}$  indicate the diffuse flow accounts about 85% of the aquifer flow. Hydrochemical and isotopic parameters of springs and boreholes also have low fluctuations. These variations for anions and cations are less than 20% and for Ec and acidity are less than 5%. The amount of environmental isotopes in springs and boreholes does not show any significant variations so that the standard deviation obtained from monthly acquired data is less than 1.2 per mil for  $\delta D$  and less than 0.2 per mil for  $\delta^{18}O$ . The amount of environmental isotopes shows that the source of springs is about 2300 meters and composed of heavy rainfall and snow in two limbs. Also, the isotopic composition of downstream springs is the average of the amount of isotopic value boreholes in the north and sought limbs showing that springs catchment area in left side (SP<sub>L</sub>) and right side (SP<sub>S</sub>) is recharged from both limbs of the anticline.

Finally, the results of the studies show that the Jahrom-Asmari karstic aquifer on the right side of the reservoir is an aquifer with diffuse to diffuse-conduit flow. The aquifer is recharged through two anticline's limb and mainly through the system of joints and fractures. The groundwater flows from the northern limb to the southern limb and is discharged into the springs downstream. In such a condition, the hydraulic connection between the anticline's northern limb with the southern limb is exists. This connection is formed at the time of reservoir formation, between the reservoir and the lower springs of the dam axis with a higher gradient (around 0.037). Therefore, by the dam impoundment, the major seepage current in right abutment of the reservoir in the north limb of anticline towards sought limb and finally discharge in springs downstream of the dam axis

Following the hydrogeological studies of the Jahrom-Asmari Formation and the determination of the hydraulic relationship between the reservoir and downstream of the

dam axis and springs, the effect of the scale on the hydraulic conductivity and leakage from the reservoir of the dam was investigated. In this way several methods have been used for evaluation of hydraulic conductivity and for determining the reservoir leakage in the right side of the dam. These methods are including Lugeon tests, Uranine tracer, gradient approach, and spring recession curves. Also, pumping test was carried out by considering pumping wells assumptions. The results showed a range of hydraulic conductivity values for rock mass from  $2.1 \times 10^{-6}$  m/s in sub-local scale (Slug test) to  $1.7 \times 10^{-4}$  m/s in regional scale (Dye tracing test). In such a context, reservoir leakage is calculated approximately 0.1 lit/s in the sub-local scale to 2.7 lit/s on a regional scale. By considering the fact that reservoir scale is correlated with regional scale, leakage in the right side of Beheshtabad dam is calculated according to a regional scale. Therefore, the leakage amount was predicted to be within the range of 5.4 to 7.8 m<sup>3</sup>/s.

Accordingly, the dam axis should be selected, as far as possible, in cases that the dam's reservoir is not regionally in contact with the karst network. Then, if the reservoir contact is regional, the methods for determining the regional hydraulic conductivity should be used to accurate leakage amount.

**Keywords:** scale effect, karst, dam, hydraulic conductivity, leakage, Beheshtabad.



Shahrood University of Technology  
Faculty of Earth Sciences  
Ph.D. Thesis in Hydrogeology

**Effect of Scale in Identification of Flow Type in Karst: Case Study  
Jahrom-Asmari Limestone's in Right-Side of Beheshtabad Dam**

**By:**

**Hossein Abedian**

**Supervisor:**

**Dr.Gollam Hossein Karami**

**Advisor:**

**Dr.Haji karimi**

**June 2019**