

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم زمین

گروه آب‌شناسی - زمین‌شناسی زیست‌محیطی

بررسی ارتباط هیدرولیکی بین چشمه خورخوری و دهگاه،

خراسان شمالی

دانشجو:

مهدی توکلیان مقدم

استاد راهنما:

دکتر غلامحسین کرمی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۹۹

شماره: ۲۷۴
تاریخ: ۳۰/۱/۹۹

شماره:



دانشگاه صنعتی شاهرود

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و بد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مهدی توکلتیان مقدم با شماره دانشجویی ۹۷۰۴۶۱۴ رسیده زمین شناسی گرایش ایشناسی تحت عنوان بررسی ارتباط جیدرولیکی بین چشمه خورخوری و دهگاد، خراسان شمالی که در تاریخ ۹۹/۱۱/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐	ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸	☒
ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۶	☐	د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹	☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐			
نوع تحقیق: نظری ☐		عملی ☒	

عضو عراب داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر غلامحسین کریمی	دانشیار	
۲- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی اکبر مومنی	استادیار	
۳- استاد منتحن اول	دکتر هادی جعفری	دانشیار	
۴- استاد منتحن دوم	دکتر حمید امامعلی زاده	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: آقای دکتر رمضان رحمانی اومالی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۹۹/۱/۲۷



تقدیم به پیشگاه امام زمان (عج)

و دست‌های پینه‌بسته پدر و قلب مهربان مادرم

و همسر مهربان و فداکارم....

سیاسگزاری

سپاس و ستایش بر خدای جل و جلاله، که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید. سپاس بیکران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

خدای را شاکرم از اینکه به من توان داد تا بتوانم گامی کوچک در مسیر تحصیل علم بردارم. سپاس او را که قدرت و عظمتش در ذره ذره عالم نهفته است. او که طبیعت را در گرو شناخت خود برای ما خلق کرد و گفت بنگرید در زمین و در آن تعقل کنید.

با یاری خدای مهربان و کمک اساتید و دوستان و حمایت خانواده‌ام توانستم پایان‌نامه خود را به سرانجام برسانم. در ابتدا از استاد محترم و دلسوزم، دکتر غلامحسین کرمی سپاسگزارم.

از پدر و مادر مهربان که هرچه دارم از آن‌هاست. از نگاهشان صلابت، از رفتارشان محبت و از صبرشان ایستادگی را آموختم. آن‌ها همواره در طول تحصیل، متحمل زحماتم بوده و تکیه‌گاه من در مواجهه با مشکلات، و وجودشان همیشه مایه دلگرمی من می‌باشد و رسیدن به تمام تجربه‌های یکتا و زیبای زندگی، مدیون حضور سبز آن‌هاست تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از اساتید محترم دانشکده علوم زمین که هرچه از زمین آموختم حاصل زحمات دلسوزانه آن‌هاست، از همسر عزیز و مهربانم که با دلسوزی و فداکاری مرا در کلیه مراحل تحصیل کارشناسی ارشد و این پایان‌نامه همراهی کرده است تشکر ویژه می‌نمایم.

در نهایت همیشه قدردان زحمات آقای دکتر عبدا.. شمسی و دوست عزیزم فرشاد رنجبری مازگی می‌باشم. به امید آنکه توفیق یابم جز خدمت به خلق خداوند نکوشم.

مهدی توکلیان مقدم

تعهد نامه

اینجانب مهدی توکلیان مقدم دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین‌شناسی گرایش آشناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی ارتباط هیدرولیکی بین چشمه خورخوری و دهگاه، خراسان شمالی تحت راهنمایی دکتر غلامحسین کرمی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در 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 می باشد 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 می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است 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 اخلاقی انسانی رعایت شده است .

تاریخ ۹۹، ۱۱، ۲۷

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. 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 نمی باشد.

• متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده

چشمه‌های کارستی خورخوری و دهگاه در حدود ۲۰ کیلومتری جنوب غرب بجنورد و در جنوب بدرانلو واقع شده‌اند. آبخوان چشمه‌های کارستی منطقه را عمدتاً سازند آهکی تیرگان تشکیل می‌دهد. به منظور بررسی وجود و یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب چشمه‌های کارستی منطقه طی ۱۳ ماه اندازه‌گیری شد. اندک بودن ضریب تغییرات آبدهی، هدایت الکتریکی و یون‌های اصلی، تک شیب بودن منحنی فرود چشمه‌های منطقه و همچنین توسعه کم عوارض ژئومورفولوژی کارست در منطقه بیانگر سیستم غالب جریان افشان - مجرای در منطقه می‌باشد. در این تحقیق، حوضه آبرگیر چشمه‌های منطقه به صورت مقدماتی ترسیم گردید. برای محدوده حوضه‌های آبرگیر مشخص شده برای چشمه‌ها، مقدار میانگین بارش سالیانه از روش نمودار ارتفاع - بارش ایستگاه‌های مجاور و اصلاحات انجام شده برابر با ۴۹۸ میلی‌متر تعیین گردید. با توجه به بازدهای صحرایی و ارزیابی درصد پوشش خاک، توسعه فضاهای انحلالی و سایر عوارض ژئومورفولوژیکی کارست، درصد تغذیه سالیانه در محدوده مورد نظر برابر با ۴۳ درصد برآورد شد. با داشتن مقادیر بارش و درصد تغذیه سالیانه، حجم تغذیه سالیانه در حوضه آبرگیر مقدماتی برای چشمه‌های خورخوری، سیدلی و دهگاه به ترتیب برابر با حدود ۳/۲، ۱/۸ و ۳ میلیون متر مکعب در سال برآورد شد. علاوه بر این حجم تخلیه سالیانه چشمه‌ها از طریق هیدروگراف سالیانه چشمه‌ها برای چشمه‌های خورخوری، سیدلی و دهگاه به ترتیب برابر با حدود ۳، ۱/۸ و ۵ میلیون متر مکعب در سال محاسبه گردید. مقایسه حجم تغذیه و تخلیه سالیانه برای چشمه‌های خورخوری و سیدلی بیانگر خطای نسبی حدود ۷ درصد می‌باشد. که این خطای ناچیز موید این است که حوضه‌های آبرگیر ترسیم شده برای این دو چشمه از دقت مناسبی برخوردار بوده است و می‌توان محدوده‌های تعیین شده را به عنوان حوضه‌های آبرگیر چشمه‌ها محسوب نمود. اما تفاوت فاحش میان مقدار تغذیه و میزان تخلیه برای چشمه دهگاه را اینگونه می‌توان تفسیر کرد: از آنجا که حوضه آبرگیر مقدماتی چشمه دهگاه، در قسمت جنوبی به حوضه آبرگیر چشمه‌های سیدلی و خورخوری محدود شده و در قسمت‌های شمالی منطقه، به دامنه ارتفاعات محدود شده و از لحاظ فیزیوگرافی و هیدروژئولوژی امکان اصلاح محدوده و افزایش مساحت حوضه آبرگیر ترسیم شده وجود ندارد؛ از این رو می‌توان چنین نتیجه گرفت که بین چشمه دهگاه و چشمه‌های کارستی سیدلی و خورخوری ارتباط هیدرولیکی وجود داشته و بخشی از آب چشمه‌های خورخوری و سیدلی که در بالا دست چشمه دهگاه قرار دارند پس از نفوذ در شن و ماسه درشت کف رودخانه، در محل ظهور چشمه دهگاه تخلیه می‌شوند.

کلمات کلیدی: ارتباط هیدرولیکی، حوضه آبرگیر، چشمه کارستی دهگاه، چشمه کارستی خورخوری

فهرست مطالب

ز	چکیده
ح	فهرست مطالب
ک	فهرست شکل‌ها
م	فهرست جدول‌ها
۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق
۳	۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
۴	۳-۱- آب و هوای منطقه مورد مطالعه
۵	۱-۳-۱- نمودار امپروترمیک منطقه مورد مطالعه
۶	۴-۱- زمین‌شناسی عمومی منطقه
۸	۱-۴-۱- چین‌شناسی منطقه
۱۱	۲-۴-۱- زمین‌شناسی ساختاری منطقه
۱۲	۵-۱- ژئومورفولوژی محدوده مورد مطالعه
۱۳	۶-۱- هیدرولوژی منطقه
۱۴	۷-۱- هیدروژئولوژی منطقه
۱۵	فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین
۱۷	۱-۲- معرفی کارست
۱۹	۲-۲- طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی
۲۰	۳-۲- جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی
۲۱	۴-۲- ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی
۲۴	۵-۲- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی
۲۷	۶-۲- تغذیه در کارست
۲۹	۷-۲- حوضه آبریز چشمه‌های کارستی
۳۰	۱-۷-۲- روش بیلان هیدرولوژیکی
۳۱	۲-۷-۲- سایر روش‌ها
۳۵	فصل سوم: روش انجام کار
۳۶	۱-۳- جمع‌آوری آمار و اطلاعات مرتبط با تحقیق

۳۷	۲-۳- انجام بازدیدهای صحرایی
۳۷	۳-۳- ترسیم نقشه زمین‌شناسی پایه منطقه
۳۸	۴-۳- اندازه‌گیری‌های صحرایی
۳۸	۳-۴-۱- نمونه‌برداری هیدروشیمیایی از چشمه‌ها
۳۹	۳-۴-۲- اندازه‌گیری دبی
۳۹	۳-۴-۳- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی
۴۰	۳-۴-۴- اندازه‌گیری pH
۴۰	۳-۵- اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی
۴۱	۳-۵-۱- اندازه‌گیری یون‌های اصلی
۴۱	الف- محاسبه درصد خطای آزمایش
۴۲	ب- کل مواد محلول
۴۲	پ- محاسبه ضرایب اشباع
۴۲	۳-۵-۲- اندازه‌گیری عناصر فرعی
۴۳	۳-۶- تعیین محدوده حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه
۴۵	فصل چهارم: بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه
۴۶	۴-۱- بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی منطقه
۴۶	۴-۱-۱- بررسی هیدروگراف چشمه‌های کارستی منطقه
۵۳	۴-۱-۲- بررسی منحنی فرود چشمه‌های کارستی منطقه
۵۷	۴-۲- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی منطقه
۵۷	۴-۲-۱- بررسی تغییرات زمانی هدایت الکتریکی چشمه‌های کارستی
۵۹	۴-۲-۲- بررسی غلظت یون‌های اصلی در چشمه‌های کارستی
۶۰	۴-۲-۳- بررسی غلظت عناصر فرعی در چشمه‌های کارستی
۶۱	۴-۲-۴- پارامترهای محاسباتی کیفی در چشمه‌های کارستی
۶۲	۴-۲-۵- ارزیابی رخساره‌های هیدروژئوشیمیایی در چشمه‌های کارستی
۶۸	۴-۲-۶- ارزیابی فرایندهای ژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان
۶۹	۴-۳- ارزیابی توسعه کارست در منطقه مورد مطالعه
۷۰	۴-۳-۱- ارزیابی توسعه کارست با استفاده از عوارض مورفولوژیکی
۷۳	۴-۳-۲- ارزیابی توسعه کارست با استفاده از خصوصیات هیدروژئولوژیکی

۷۴	۴-۴- تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه
۷۴	۴-۴-۱- ترسیم حوضه‌های آبرگیر مقدماتی
۷۵	۴-۴-۲- تهیه نمودار ارتفاع - بارش منطقه
۷۷	۴-۴-۳- برآورد میانگین بارش سالانه در محدوده حوضه‌های آبرگیر مقدماتی
۷۸	۴-۴-۴- تعیین درصد تغذیه سالیانه در محدوده‌های حوضه آبرگیر مقدماتی
۷۸	۴-۴-۵- ارزیابی بیلان هیدروژئولوژیکی در منطقه
۷۹	۴-۴-۶- صحت‌سنجی حوضه‌های آبرگیر مقدماتی و اصلاح آنها
۸۰	۴-۵- بررسی ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه
۸۰	۴-۵-۱- استفاده از حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی
۸۱	۴-۵-۲- استفاده از خصوصیات هیدروژئوشیمیایی
۸۳	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۸۴	۵-۱- نتیجه‌گیری
۸۴	۵-۱-۱- ارزیابی سیستم غالب جریان در آبخوان‌های کارستی منطقه
۸۵	۵-۱-۲- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی غالب
۸۶	۵-۱-۳- تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه
۸۷	۵-۱-۴- بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه
۸۹	۵-۲- پیشنهادها
۹۰	منابع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه..... ۳
- شکل ۱-۲- متوسط دمای ماهانه درازمدت ایستگاه‌های هواشناسی منطقه..... ۴
- شکل ۱-۳- میانگین بارندگی درازمدت ایستگاه‌های هواشناسی منطقه..... ۵
- شکل ۱-۴- نمودار امپروترمیک منطقه مورد مطالعه..... ۶
- شکل ۱-۵- نقشه کلی تکتونیک ایران..... ۷
- شکل ۱-۶- نمایی از آهک‌های ضخیم لایه سازند تیرگان..... ۱۰
- شکل ۱-۷- واحدهای زمین‌شناسی منطقه دهگاه..... ۱۱
- شکل ۱-۸- نقشه طبقه بندی ارتفاعات منطقه مورد مطالعه..... ۱۳
- شکل ۴-۱- نمایی از چشمه کارستی خورخوری..... ۴۷
- شکل ۴-۲- نمایی از چشمه کارستی سیدلی..... ۴۷
- شکل ۴-۳- نمایی از چشمه کارستی دهگاه..... ۴۸
- شکل ۴-۴- هیدروگراف چشمه کارستی خورخوری برای سال آبی ۹۸-۹۹..... ۵۱
- شکل ۴-۵- هیدروگراف چشمه کارستی سیدلی برای سال آبی ۹۸-۹۹..... ۵۲
- شکل ۴-۶- هیدروگراف چشمه کارستی دهگاه برای سال آبی ۹۸-۹۹..... ۵۲
- شکل ۴-۷- منحنی فرود چشمه کارستی خورخوری در سال آبی ۹۸..... ۵۴
- شکل ۴-۸- منحنی فرود چشمه کارستی سیدلی در سال آبی ۹۸..... ۵۵
- شکل ۴-۹- منحنی فرود چشمه کارستی دهگاه در سال آبی ۹۸..... ۵۵
- شکل ۴-۱۰- نمودار پایپر مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه خورخوری..... ۶۳
- شکل ۴-۱۱- نمودار پایپر مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه سیدلی..... ۶۴
- شکل ۴-۱۲- نمودار پایپر مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه دهگاه..... ۶۴
- شکل ۴-۱۳- نمودار استیف مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه خورخوری..... ۶۵
- شکل ۴-۱۴- نمودار استیف مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه سیدلی..... ۶۶
- شکل ۴-۱۵- نمودار استیف مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه دهگاه..... ۶۶
- شکل ۴-۱۶- نمودار شولر نمونه‌های چشمه‌های کارستی منطقه..... ۶۷

- شکل ۴-۱۷- نمایی از کارن‌های موجود در حوضه آبگیر چشمه کارستی دهگاه..... ۷۱
- شکل ۴-۱۸- نمایی از یک دره خشک کارستی در حوضه آبگیر چشمه خورخوری..... ۷۲
- شکل ۴-۱۹- نمایی از اپی کارست کم ضخامت در لایه‌های آهکی ارتفاعات منطقه..... ۷۳
- شکل ۴-۲۰- نقشه حوضه آبگیر مقدماتی چشمه‌های کارستی منطقه..... ۷۵
- شکل ۴-۲۱- منحنی ارتفاع بارش در منطقه مورد مطالعه..... ۷۷

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲- محدوده تغییرات جریان در آبخوان‌های کارستی..... ۲۱
- جدول ۱-۴- پارامترهای اندازه‌گیری شده در مظهر چشمه کارستی خورخوری..... ۴۹
- جدول ۲-۴- پارامترهای اندازه‌گیری شده در مظهر چشمه کارستی سیدلی..... ۴۹
- جدول ۳-۴- پارامترهای اندازه‌گیری شده در مظهر چشمه کارستی دهگاه..... ۵۰
- جدول ۴-۴- غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی چشمه کارستی خورخوری..... ۵۹
- جدول ۵-۴- غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی چشمه کارستی سیدلی..... ۵۹
- جدول ۶-۴- غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی چشمه کارستی دهگاه..... ۵۹
- جدول ۷-۴- غلظت عناصر فرعی در چشمه‌های کارستی منطقه..... ۶۰
- جدول ۸-۴- پارامترهای کیفی محاسبه شده برای نمونه‌های برداشت شده از چشمه خورخوری..... ۶۲
- جدول ۹-۴- پارامترهای کیفی محاسبه شده برای نمونه‌های برداشت شده از چشمه سیدلی..... ۶۲
- جدول ۱۰-۴- پارامترهای کیفی محاسبه شده برای نمونه‌های برداشت شده از چشمه دهگاه..... ۶۲
- جدول ۱۱-۴- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در اطراف حوضه آبریز چشمه‌های منطقه..... ۷۶

فصل اول: مقدمه

۱-۱- بیان مسئله و هدف از انجام تحقیق

کارست گستره‌ای با مورفولوژی خاص و یک سیستم زهکشی زیرزمینی بزرگ است که از انحلال سنگ‌های دارای قابلیت انحلال بالا در آب‌های طبیعی، مانند سنگ‌های کربناته و ژئوپس به وجود می‌آید. اشکال ژئومورفولوژیکی مانند مجاری انحلالی، گودی‌های مسدود، فروچاله‌ها، دره‌های خشک و غارها از ویژگی‌های خاص نواحی کارستی می‌باشند (Jenning 1985, White 1988). در برخی نواحی از کشورهایی مانند چین، ترکیه، ایران و ایالات متحده آمریکا آب‌های کارستی مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده آب مورد نیاز در مصارف گوناگون می‌باشند. سازندهای کربناته کارستی حدود یازده درصد از مساحت کل ایران (۱۸۵۰۰۰ کیلومتر مربع) را به خود اختصاص داده‌اند که این نسبت در رشته کوه‌های زاگرس به حدود پنجاه و پنج درصد می‌رسد (Raeisi 2004). آب‌های زیرزمینی موجود در آبخوان‌های کارستی، آب مورد نیاز یک چهارم جمعیت جهان را تأمین می‌کنند (Ford and Williams 2007).

چشمه‌های کارستی خورخوری و دهگاه در حدود ۲۰ کیلومتری جنوب غرب بجنورد و در جنوب بدرانلو واقع شده‌اند. نظر به این که چشمه خورخوری در بالادست چشمه دهگاه واقع شده است و قرار است که بخشی از آب این چشمه برای مصارف باغ‌ها به خارج از مسیر اصلی رودخانه منتقل شود، هدف اساسی از این تحقیق این است که ارتباط هیدرولیکی بین این دو چشمه مورد ارزیابی قرار گیرد. در این تحقیق سعی می‌شود که به سوالات اساسی زیر پاسخ داده شود.

۱- آیا حوضه‌های آبگیر چشمه‌های خورخوری و دهگاه با هم ارتباط هیدرولیکی دارند؟

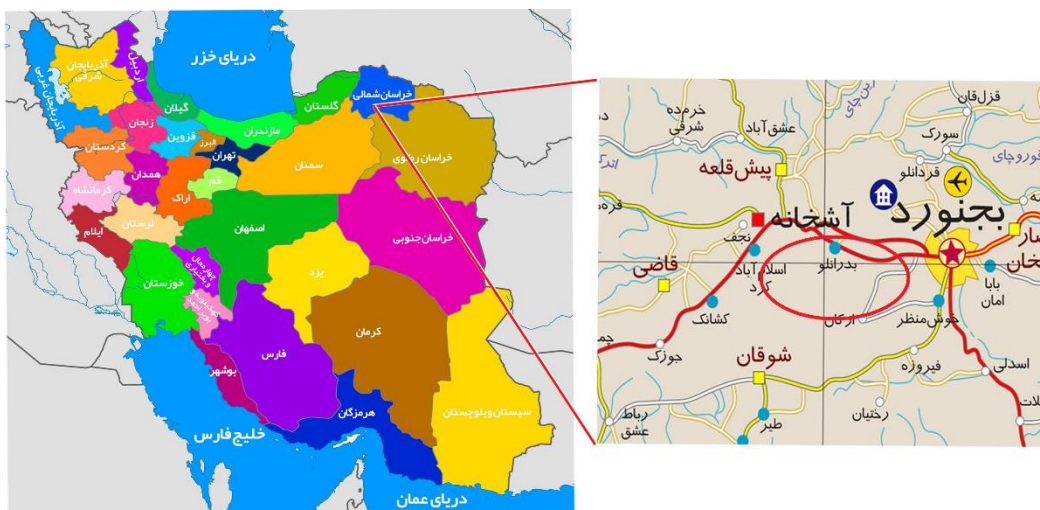
۲- آیا خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های خورخوری و دهگاه مشابهت دارند؟

ترکیب شیمیایی و همچنین وضعیت هیدروژئولوژیکی چشمه‌های خورخوری و دهگاه می‌تواند تأثیر جریان ایجاد شده از چشمه خورخوری بر چشمه دهگاه را نشان دهد. بنابراین، هدف اساسی از انجام این تحقیق ارزیابی ارتباط هیدرولیکی بین دو چشمه خورخوری و دهگاه در خراسان شمالی با استفاده از مطالعات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی می‌باشد.

۲-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه از لحاظ موقعیت جغرافیایی در استان خراسان شمالی و در جنوب غرب شهرستان بجنورد واقع شده است. شکل (۱-۱) موقعیت جغرافیایی و راههای دسترسی به چشمه‌های مورد نظر را نشان می‌دهد.

آشخانه در شمال غرب و بجنورد در شمال شرق، شهرهای منطقه می‌باشند. جاده بجنورد-آشخانه مسیر اصلی دسترسی به محدوده است و سایر راههای روستایی مسیرهای فرعی دسترسی به منطقه محسوب می‌شوند (شکل ۱-۱).



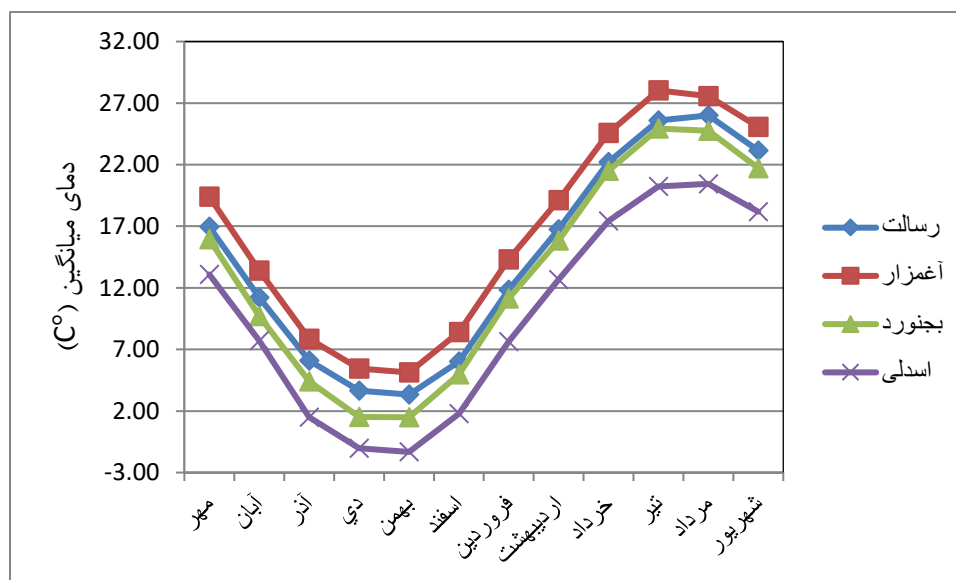
شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی و راههای دسترسی به منطقه مورد مطالعه.

منطقه مورد مطالعه در فاصله ۳۲ کیلومتری شهرستان بجنورد و در فاصله ۳۰ کیلومتری شهرستان آشخانه و در بین طولهای جغرافیایی ۵۷ درجه و ۳ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۴ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی قرار گرفته است. شهرستان بجنورد با مساحت ۳۶ کیلومتر مربع، در قسمت شمال شرق منطقه واقع شده است. این شهرستان از شمال به

کشور ترکمنستان، از شمال شرق تا جنوب شرق با شهر های شیروان و اسفراین و از جنوب غرب تا شمال غرب با جاجرم و راز همسایه است.

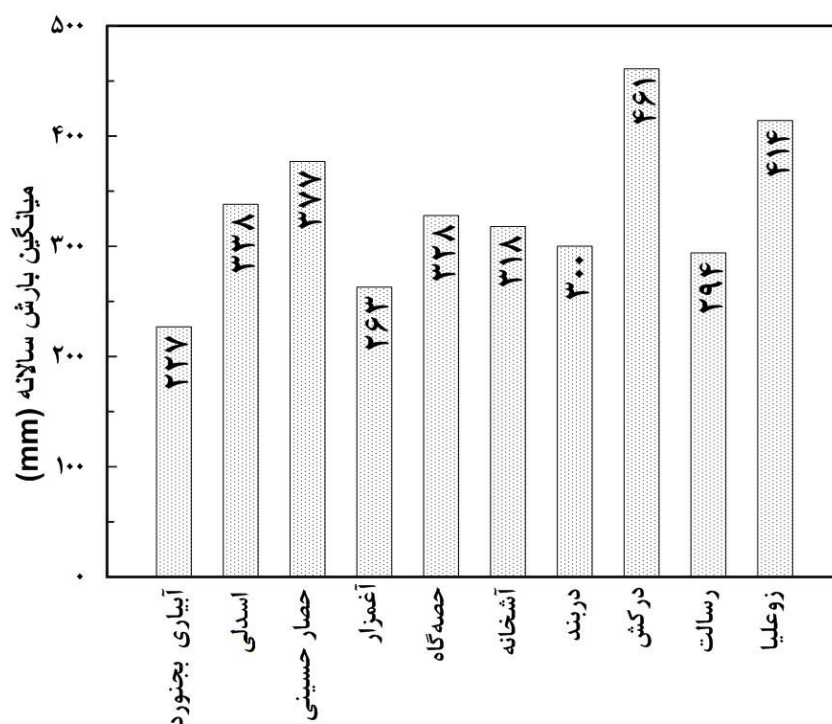
۳-۱- آب و هوای منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از نظر شرایط اقلیمی دارای آب و هوای معتدل کوهستانی می باشد و فصل بارش در اواخر پاییز، زمستان و اوایل بهار است. ولی نفوذ توده های جوی با شرایط متفاوت از شمال و غرب منطقه و وجود ارتفاعات، باعث تغییرات جزئی و محسوس آب و هوا در مناطق مختلف حوضه می شود. بنابر اطلاعات موجود در ایستگاه های هواشناسی آغمزار، اسدلی، بجنورد و رسالت، میانگین درازمدت بیشینه دما در این منطقه در ایستگاه های مذکور به ترتیب ۲۸، ۲۶/۵، ۲۶ و ۲۰ درجه سانتی گراد می باشد. میانگین درازمدت کمینه دما در این منطقه در ایستگاه های مذکور به ترتیب ۵/۳، ۳/۳، ۱/۴ و ۱/۴- درجه سانتی گراد می باشد. اسدلی سردترین ایستگاه و آغمزار گرم ترین ایستگاه می باشد.



شکل ۱-۲- متوسط دمای ماهانه دراز مدت ایستگاه های هواشناسی منطقه.

با توجه به شکل (۳-۱) که میانگین بارندگی درازمدت ایستگاه‌های هواشناسی منطقه را نشان می‌دهد، ایستگاه آبیاری بجنورد با ۲۲۷ میلی‌متر و ایستگاه درکش با ۴۶۱ میلی‌متر به ترتیب کمترین و بیشترین میزان بارندگی را به خود اختصاص داده‌اند. میانگین بارندگی در سال در ایستگاه‌های منطقه ۳۲۳ میلی‌متر می‌باشد. بارش‌های منطقه به صورت باران و برف (به ویژه در ارتفاعات) بوده که غالباً این دوره بارش در منطقه، از اواسط پاییز تا اواسط بهار است.

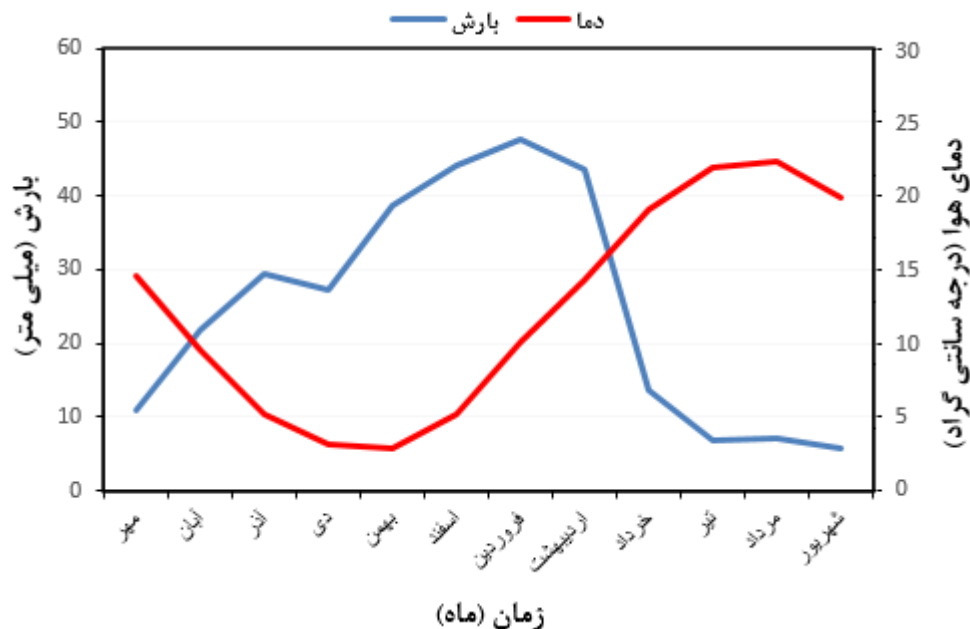


شکل ۳-۱- میانگین بارندگی درازمدت ایستگاه‌های هواشناسی منطقه.

۱-۳-۱- نمودار امبروترمیک

در این نمودار تغییرات ماهانه دمای هوا نسبت به تغییرات ماهانه بارندگی در طول یک سال مورد مقایسه قرار می‌گیرد (علیزاده، ۱۳۸۴). نمودار امبروترمیک منطقه بر اساس داده‌های ایستگاه رسالت رسم و در شکل (۴-۱) ارائه شده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که بین خردادماه تا مهرماه تغییرات دما بر

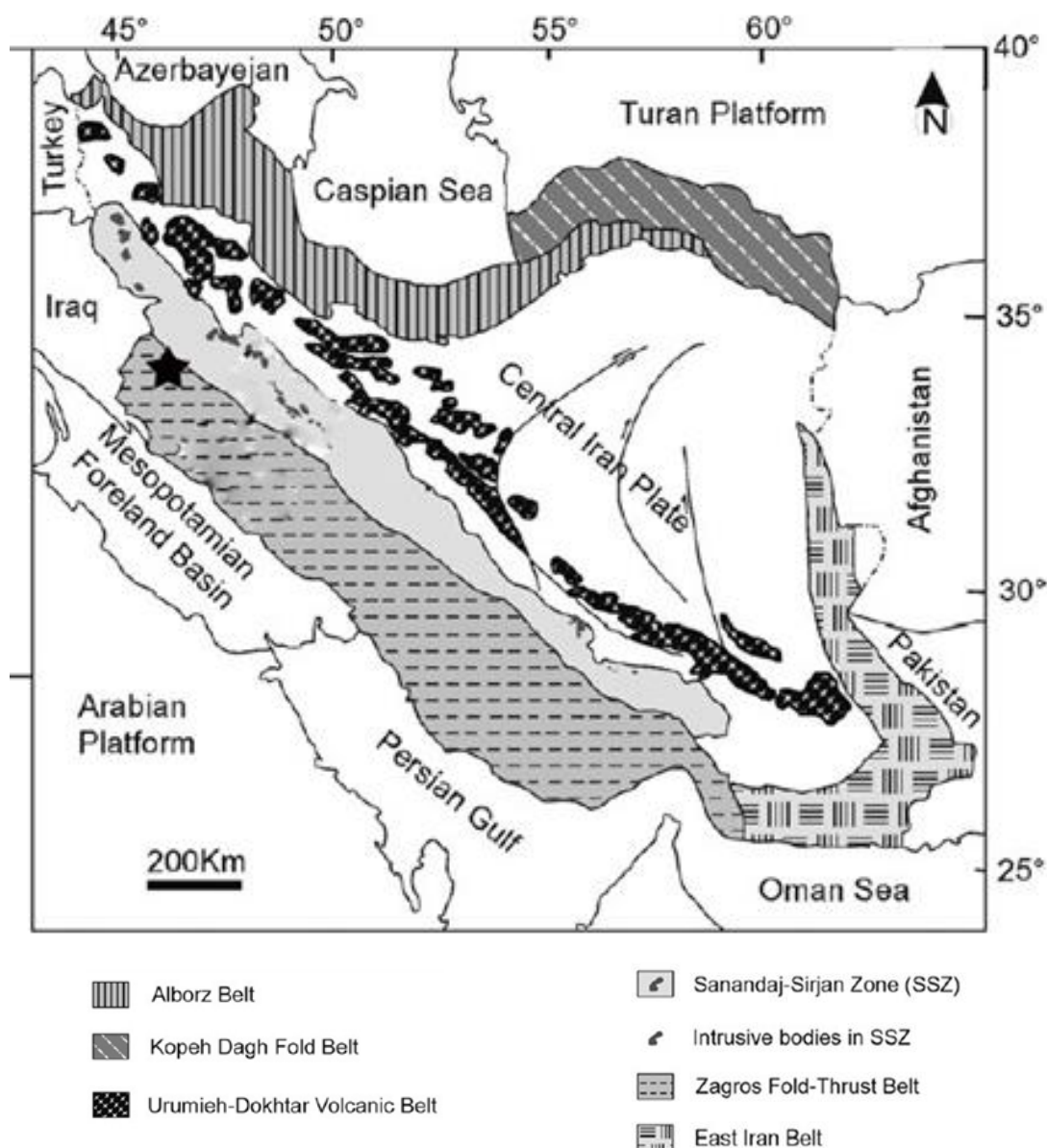
بارندگی فزونی دارد و این بازه دوره خشک محسوب می‌شود و بقیه ماه‌های سال جزو دوره مرطوب می‌باشند. با توجه به ارتفاع منطقه مورد مطالعه این انتظار وجود دارد که دوره خشک برای ارتفاعات منطقه از این میزان نیز کمتر باشد.



شکل ۱-۴- نمودار امپروترمیک منطقه مورد مطالعه

۱-۴- زمین‌شناسی عمومی منطقه

نقش زمین‌شناسی در ذخیره، هدایت و کنترل جریان‌های زیرزمینی به عنوان بستر اصلی شکل‌گیری آب‌های زیرزمینی بر کسی پوشیده نیست و بررسی‌های صحرایی و زمین‌شناسی، یکی از مبانی مطالعه آب‌های زیرزمینی هر منطقه می‌باشد. با مطالعات زمین‌شناسی می‌توان انواع آبخوان‌ها، منابع تغذیه و تخلیه و نحوه ارتباط بین آبخوان‌ها را تا حد زیادی مشخص نمود. منطقه مورد مطالعه در میان رشته کوه‌های جنوبی زون کپه‌داغ قرار گرفته و با ارتفاعات آهکی گسل خورده سازند تیرگان محصور شده است. حوضه رسوبی کپه‌داغ بخش زیادی از شمال شرق ایران و همچنین بخش‌های وسیعی از ترکمنستان و شمال افغانستان را در بر می‌گیرد (شکل ۱-۵).



شکل ۱-۵- نقشه کلی تکتونیک ایران (اقتباس از Ruttner and Stocklin 1967).

کپه‌داغ در ایران شامل دو رشته کوه بلند شمالی و جنوبی می‌باشد. رشته کوه شمالی را کوه‌های کپه‌داغ و هزار مسجد و رشته کوه جنوبی را کوه‌های گلستان و آلا‌داغ تشکیل می‌دهند. وسعت این حوضه در ایران ۵۵ هزار کیلومتر مربع است که $\frac{3}{3}$ درصد از مساحت کل کشور را شامل می‌شود (افشارحرب، ۱۳۷۳). گسترش عرضی این منطقه بین ۳۰ تا ۷۰ کیلومتر و گسترش طولی آن حدود ۳۵۰ کیلومتر است که روند آن در بخش‌های شرقی حوضه، شمال غرب - جنوب شرق و در بخش‌های

غربی تقریباً شرقی - غربی است. حوضه کپه‌داغ به عنوان یک حوضه درون قاره‌ای بعد از بسته شدن اقیانوس ساب هرسینین در اثر کوهزایی سیمیرین پیشین در تریاس میانی به وجود آمده است (Berberian and King 1981). در ادامه به تفکیک چین‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۴-۱- چین‌شناسی منطقه

واحدهای سنگ‌شناسی منطقه رسوبی بوده و عموماً متعلق به دوران کرتاسه می‌باشند. در این منطقه رخنمون سازندهای شوريجه، تیرگان، سرچشمه و نهشته‌های کواترنری مشاهده می‌شود که در ادامه خصوصیات سنگ چین‌های سازندهای موجود در منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

الف- سازند شوريجه

نام این سازند از روستای شوريجه گرفته شده است ولی برش الگوی رسمی آن در دره خور در کنار جاده مشهد به کلات به ضخامت ۹۸۰ متر مطالعه شده است. سازند شوريجه بر روی واحد سنگ‌چینه‌ای مزدوران قرار گرفته و توسط سازند تیرگان پوشیده می‌شود. حد این سازند با سازند پایینی مزدوران به صورت تدریجی می‌باشد و حد بالایی آن با سازند تیرگان با تغییر ناگهانی رخساره همراه با یک گذر تدریجی است که گاه مرز بالایی به صورت سطحی فرسایشی است که گنگلومرای پلیوسن و در کوه ازون، سنگ آهک کلات (ماستریشتین) روی آن قرار می‌گیرد. این سازند متشکل از تناوبی از شیل و ماسه سنگ قهوه‌ای مایل به قرمز، ماسه سنگ‌های قهوه‌ای مایل به خاکستری، کنگلومرا، ژئوپس و میان لایه‌هایی از سنگ‌های کربناته است.

سازند شوريجه از نظر رخساره سنگی سه بخش دارد.

۱- بخش آواری تبخیری زیرین

۲- بخش کربناتی - تبخیری میانی

۳- بخش آواری بالایی

این مجموعه سه گانه در همه رخنمون‌ها یکسان نبوده و رخساره و ضخامت‌های متفاوتی دارند. به دلیل عدم وجود فسیل در این سازند، سن آن را بر اساس جای‌گیری بین سازند مزدوران و تیرگان به آشکوب‌های هوت‌ترین تا بارین نسبت داده‌اند. این واحد در این منطقه رخنمون بسیار محدود داشته و رخنمون آن محدود به بخش جنوب شرقی و جنوبی منطقه می‌باشد.

ب- سازند آهکی تیرگان

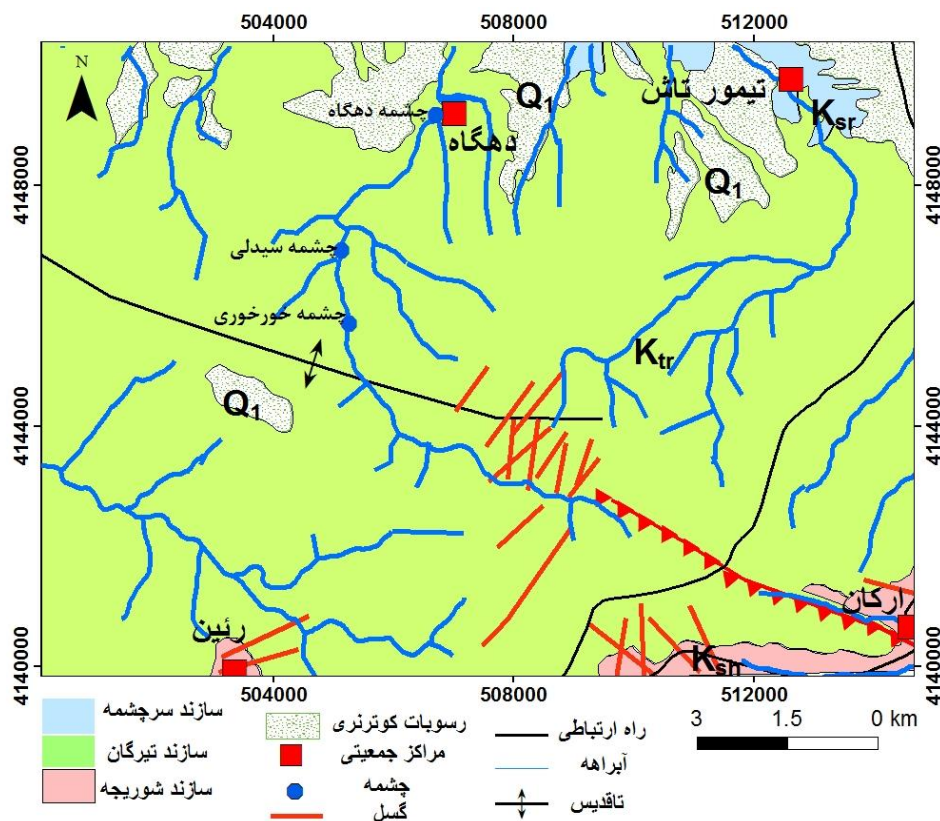
سازند تیرگان بر روی واحد لیتولوژیکی شوربچه به طور هم شیب قرار گرفته است و به صورت هم شیب توسط سازند سرچشمه پوشیده می‌شود. واحد لیتولوژیکی غالب در محدوده مورد مطالعه سازند تیرگان بوده که جنس غالب آن از آهک ضخیم لایه تا توده‌ای ائولیتی و زیست‌آواری با میان لایه‌های ناچیزی از سنگ آهک مارنی، مارن و شیل آهکی تشکیل شده است. ضخامت زیاد لایه‌ها و به ویژه تراکم و سختی سنگ آهک‌ها سبب شده تا این سازند از واحدهای صخره‌ساز بین ردیف‌های آواری سرخ رنگ سازند شوربچه و نهشته‌های شیلی - مارنی سازند سرچشمه باشد. به همین دلیل یکی از واحدهای فیزیوگرافیک کپه‌داغ را می‌سازد. شکل (۱-۶) نمایی از آهک‌های ضخیم لایه سازند تیرگان را نشان می‌دهد. اربیتولین شاخص‌ترین فسیل سازند تیرگان است که اغلب هسته‌ی ائولیت‌های آهکی را تشکیل می‌دهد. بر پایه سنگواره‌های موجود، سن سازند تیرگان نئوکومین (بارمین) تا آپتین است و همان‌طور که در نقشه زمین‌شناسی منطقه (شکل ۱-۷) مشاهده می‌شود حدود هفتاد درصد محدوده مورد مطالعه توسط این واحد لیتولوژیکی پوشیده شده است.



شکل ۱-۶- نمایی از آهک‌های ضخیم لایه سازند تیرگان.

ج- سازند سرچشمه

سازند سرچشمه به صورت هم شیب بر روی سازند تیرگان قرار گرفته است. این سازند در مقطع تیپ از دو بخش غیر رسمی و یک لایه کلیدی تشکیل شده است. بخش زیرین سازند، حدود ۱۷۸ متر مارن همگن به رنگ خاکستری مایل به آبی است. بخش بالایی سازند ۱۳۲ متر شیل آهکی خاکستری تیره است که میان لایه‌های نازکی از سنگ آهک‌های زیست آواری دارد. در برش‌های مختلف، تغییرات نسبت بخش مارنی پایینی به شیل بالایی زیاد است و گاهی ممکن است یکی از آن‌ها وجود نداشته باشد. تغییرات ضخامت این سازند در مناطق مختلف متغیر است. فسیل‌های موجود در این سازند شامل روزنه‌داران و آمونیت می‌باشد. مجموعه سنگواره‌های این سازند نشانگر سن بارمین پسین تا آپتین میانی است. گسترش جغرافیایی سازند سرچشمه در محدوده مورد مطالعه محدود می‌باشد.



شکل ۱-۷- واحدهای زمین‌شناسی منطقه دهگاه (اقتباس از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ بجنورد با انجام اصلاحات).

د- نهشته‌های کواترنری

نهشته‌های کواترنری با منشأ آبرفتی قدیمی و آبرفت و پادگانه‌های جدید می‌باشد که آبرفت‌های جدید به صورت محدود در قسمت شمالی منطقه رخنمون دارد.

۱-۴-۲- زمین‌شناسی ساختاری منطقه

زمین‌شناسی ساختمانی هر منطقه از مهم‌ترین عوامل شکل‌گیری، ذخیره، کنترل و هدایت جریان به ویژه در مناطق مرتفع و کوهستانی می‌باشد. به علاوه فعالیت‌های تکتونیکی بر تشکیل درز و شکستگی‌ها اثر مستقیم داشته که از این طریق در سنگ‌های کربناته، فرایند کارستی شدن را افزایش می‌دهد. از لحاظ ساختاری کپه‌داغ را می‌توان به دو زیر ناحیه کپه‌داغ شرقی و غربی تقسیم نمود که گستره مورد

بررسی در زون زمین‌ساختاری کپه‌داغ غربی واقع است. در ادامه به بررسی وضعیت چین‌خوردگی‌ها و گسلش در محدوده مورد مطالعه پرداخته می‌شود.

الف: چین‌خوردگی‌ها

در محدوده مورد مطالعه روند چین‌خوردگی‌های اصلی از روند کلی کپه‌داغ (شمال غرب - جنوب شرق) تبعیت می‌کند. در بررسی‌های صحرایی و مطالعه نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه مشخص گردید که در این بخش رخنمون یک تاقدیس با روند شمال غرب - جنوب شرق مشاهده می‌شود. تاقدیس مذکور نامتقارن بوده و در برخی از مناطق روند خود را به شرقی غربی و یا نزدیک به آن تغییر داده است.

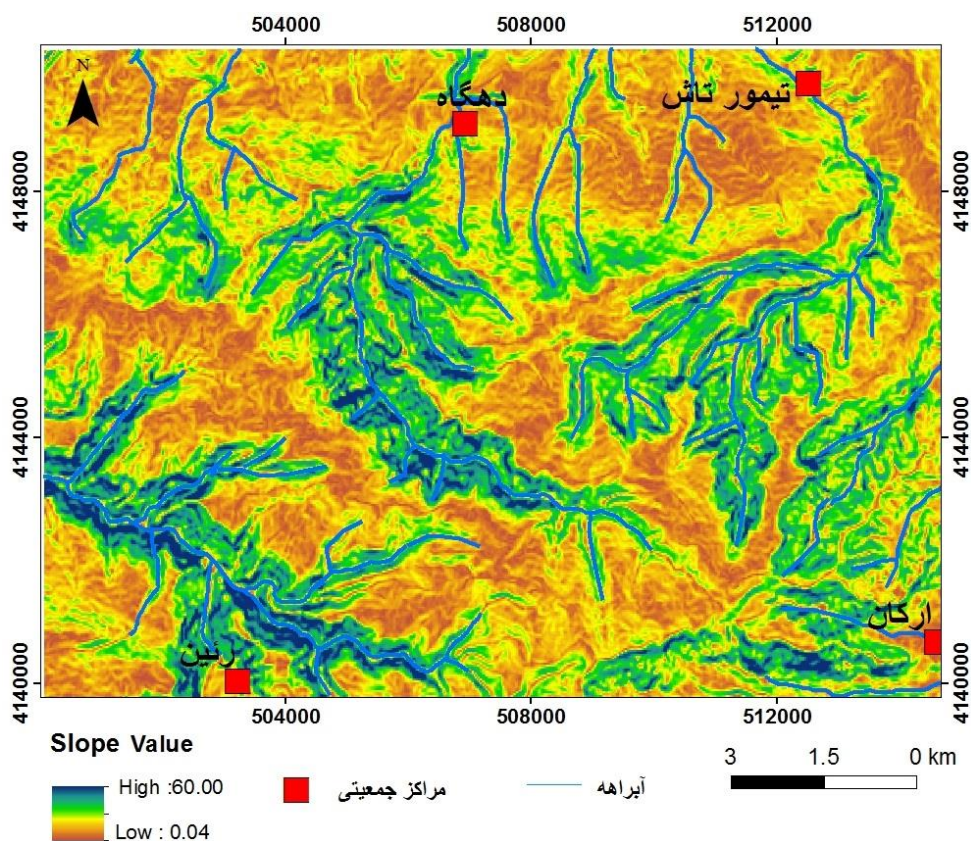
ب: گسل‌ها و شکستگی‌ها

در منطقه مورد مطالعه گسل تراستی ارکان مهم‌ترین گسل منطقه بوده که با روند شمال غرب - جنوب شرق در بخش جنوب شرقی محدوده رخنمون دارد. جابجایی گسل مذکور قابل توجه نمی‌باشد سایر گسل‌های موجود در منطقه، گسل‌های همراه با چین‌خوردگی بوده و در دو راستای عمومی شمال شرق جنوب غرب و شمال غرب جنوب شرق رخنمون یافته‌اند. در برخی از مناطق آثار تقاطع این گسل و شکستگی‌ها در سنگ‌های برهنه قابل مشاهده است.

۱-۵- ژئومورفولوژی محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از نظر ژئومورفولوژی از واحدهای کوهستان و تپه‌ماهور تشکیل شده است. ارتفاع متوسط منطقه ۱۶۳۱ متر می‌باشد. بلندترین بخش حوضه دارای ارتفاع ۲۱۸۱ متر و پست‌ترین نقطه دارای ارتفاع ۱۰۵۷ متر می‌باشد. مورفولوژی منطقه مورد مطالعه عموماً توسط عوامل تکتونیکی به ویژه

چین‌خوردگی‌ها کنترل می‌گردد. عملکرد عوامل فرسایش فیزیکی باعث به وجود آمدن پرتگاه‌های شدید در دره‌های کارستی شده است. مقدار شیب در منطقه از چند درصد تا ۶۰ درصد تغییر می‌کند. مقدار بیشینه شیب در مجاورت دره‌های کارستی و مقدار کمینه آن در مناطق هموار موجود در ارتفاعات و بخش‌های شمالی محدوده مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۸-۱).



شکل ۸-۱- نقشه طبقه‌بندی ارتفاعات منطقه مورد مطالعه.

۱-۶- هیدرولوژی منطقه

منطقه مورد مطالعه دارای الگوی زهکشی شاخه‌درختی می‌باشد و شیب متوسط حوضه آبریز حدود ۱۵/۵ درصد می‌باشد. مهم‌ترین رودخانه منطقه، رودخانه دهگاه است که در طول سال جریان داشته و چشمه‌های کارستی منطقه منشأ اصلی آن می‌باشند. جهت عمومی جریان سطحی در منطقه به

تبعیت از توپوگرافی و ساختار منطقه دارای روند جنوب به شمال و جنوب شرق به شمال غرب می‌باشد (شکل ۸-۱).

۷-۱- هیدروژئولوژی منطقه

بخش اعظم منطقه مورد مطالعه از سازند کربناته تیرگان تشکیل شده است و با توجه به خاصیت انحلال‌پذیری در سازندهای کربناته و کارستی شدن این واحدها، تقریباً اغلب منابع آب زیرزمینی منطقه در سازند تیرگان و به میزان بسیار ناچیزی در آبخوان‌های آبرفتی قرار می‌گیرد.

سازندهای شورجه و سرچشمه فاقد نفوذپذیری مناسب و دارای خواص هیدرودینامیکی ضعیفی بوده و امکان تشکیل آبخوان را ندارند. این سازندها در بخش شمالی و جنوب محدوده مورد مطالعه رخنمون محدود دارند و عملاً به عنوان مرزهای هیدروژئولوژیکی عمل کرده و سازند آهکی تیرگان را به ترتیب از پایین و بالا محدود می‌کنند. واحد تیرگان تنها واحد هیدرواستراتیگرافی است که قابلیت تشکیل آبخوان را دارد (شکل ۷-۱).

آبخوان‌های کارستی منطقه از طریق چشمه‌های خورخوری، سیدلی و دهگاه در رودخانه دهگاه تخلیه می‌شوند.

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته

کشور ما به دلیل واقع شدن روی کمربند خشک و نیمه خشک، همواره با مشکل کمبود آب مواجه بوده و هست. از طرفی دیگر به دلیل افزایش درجه حرارت زمین و تغییر اقلیم ناشی از آن وضعیت منابع آب بحرانی تر شده است. همچنین در سال‌های اخیر به دلیل توسعه کشاورزی غیراصولی و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، سطح تراز آب زیرزمینی در اکثر دشت‌ها پایین افتاده و با بحرانی شدن وضع در سال‌های اخیر مسائلی همچون مدیریت منابع آبی پایدار و یا در برخی موارد احیای منابع آب زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته‌اند.

یکی از مهم‌ترین منابع آبی پایدار سازندهای کربناته می‌باشند که با نام سیستم کارستی نیز شناخته می‌شوند. سیستم کارستی یک اکوسیستم نسبتاً شکننده است که بهره‌برداری غیراصولی از منابع آن و یا استفاده نامناسب از زمین آن منجر به بروز مشکلات زیست‌محیطی از قبیل آلودگی آب، فرونشست، جاری شدن سیل، تغییرات محیط‌های زیرزمینی و غیره می‌شود (Andreo et al, 2010).

چشمه‌های کارستی به دلیل ارتباط مستقیمی که با بارش دارند را می‌توان به عنوان منابع آبی پایدار، محسوب نمود که با توجه به خصوصیات کمی و کیفی در اکثر نقاط جهان از آن‌ها به منظور شرب، کشاورزی و غیره استفاده می‌شود. متأسفانه در سال‌های گذشته آبدهی برخی از چشمه‌ها به طور شدیدی کاهش پیدا کرده است از مهمترین عوامل تاثیرگذار در بروز این مسئله می‌توان به کاهش نزولات جوی و حفر چاه‌های غیرمجاز در حریم این چشمه‌ها اشاره نمود. از آنجایی که چشمه‌های کارستی در ارتباط مستقیم با بارش می‌باشند حساسیت بالایی به ورود آلاینده‌ها دارند به طوری که به سرعت موجب آلودگی آن شده و اثر آلودگی نیز می‌تواند معضلی برای آن‌ها محسوب شود (بهنیافر و قنبرزاده ۱۳۹۴). هدف از این فصل مروری بر مطالعات گذشته در زمینه بررسی ترکیب شیمیایی و همچنین وضعیت هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی جهت ارزیابی ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌ها می‌باشد. از این رو در این فصل، به مرور مطالعاتی در زمینه معرفی کارست، طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی، جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی، ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی، بررسی

خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی، تغذیه در کارست و حوضه آگیر چشمه‌های کارستی پرداخته شده است.

۲-۱- معرفی کارست

به طور کلی در تعریف اولیه، کارست به مجموعه نماهای انحلالی سطحی و زیر سطحی که در سنگ‌های (آهکی و دولومیتی) تشکیل می‌شود اطلاق می‌گردد و آن را می‌توان از دیدگاه‌های مختلف ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی، ترمودینامیک و مهندسی شهری بررسی و تعریف کرد.

به نظر فورد و ویلیامز (Ford and Williams 2007) کارست گستره‌ای با عوارض سطحی مشخص و سیستم زهکشی قوی آب زیرزمینی ناشی از انحلال سنگ‌های دارای قابلیت انحلال بالا از قبیل سنگ آهک، دولومیت، مارن و ژپس (به ویژه سنگ آهک) در آب‌های طبیعی است.

در تعریف دیگری کارست به گستره‌ای با موفولوژی مشخص و یک سیستم زهکشی زیرزمینی بزرگ که از حلالیت زیاد برخی از سنگ‌ها در آب طبیعی ایجاد شده، گفته می‌شود. نواحی کارستی عمدتاً بر روی سنگ‌های کربناته (به ویژه سنگ آهک) توسعه پیدا می‌کنند و علاوه بر این، بر روی سنگ‌هایی که قابلیت انحلال دارند (از قبیل سنگ گچ و نمک) نیز ایجاد می‌شوند (Karami 2002).

چشمه‌های کارستی محل تخلیه طبیعی آبخوان‌های کارستی می‌باشند که بهره‌برداری از آن‌ها در مقایسه با استحصال آب از طریق حفاری و پمپاژ به مراتب آسان‌تر و کم هزینه‌تر است. به لحاظ نقشی که چشمه‌ها از دیرباز در تامین آب شرب و کشاورزی داشته‌اند، اهمیت بالایی را شامل می‌شوند و در حال حاضر نیز آب مورد نیاز برخی از مناطق کشور از طریق چشمه‌ها تامین می‌گردد. از این رو مطالعه و شناخت سیستم‌های حاکم بر این چشمه‌ها و همچنین عوامل موثر بر کیفیت و کمیت آب آن‌ها نقش مهمی در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از این منابع طبیعی دارد (رضایی ۱۳۷۹).

به طور خلاصه، مطالعه‌ی کارست و منابع آب کارستی به ویژه در ایران به دلایل زیر حائز اهمیت می‌باشد (افراسیابیان ۱۳۷۷، کریمی وردنجان ۱۳۸۸).

الف- در بسیاری از بخش‌های ایران منابع آب آبرفتی از لحاظ کمی و کیفی محدودیت‌هایی دارند و معمولاً کیفیت آب کارستی بهتر از کیفیت آب‌های آبرفتی است. همچنین با توجه به سهولت حفر چاه در آبرفت، منابع آب آبرفتی معمولاً از دیر باز توسط بشر مورد برداشت قرار گرفته‌اند و در حال حاضر بیلان بسیاری از دشت‌های کشور منفی است.

ب- در بسیاری از مناطق منابع آب کارستی، آبخوان‌های آبرفتی را تغذیه می‌کنند.

ج- در حال حاضر اکثر فعالیت‌های انسانی و صنعتی در آبرفت‌ها متمرکز شده است و لذا منابع آب آبرفتی در معرض آلودگی می‌باشند، اما منابع آب کارستی چون در ارتفاعات و کوهستان‌ها قرار دارند از این لحاظ کمتر در معرض خطر می‌باشند.

د- استفاده از ذخایر آب کارست، عموماً از احداث سد و انتقال آب جهت مصارف آب شرب ارزان‌تر است. علاوه بر این، در روستاهای دور افتاده که امکان انتقال آب از لحاظ فنی و اقتصادی وجود ندارد، حفر چاه‌های کارستی تنها راه تأمین آب شرب می‌باشد.

و- با توجه به کم‌آبی ایران و لزوم احداث سد جهت تأمین آب و برق کشور و با توجه به قرارگیری محور و مخزن بسیاری از سدهای کشور در محیط‌های آهکی، اهمیت مطالعه کارست در کشور دو چندان می‌شود. این مسئله عموماً از لحاظ فرار آب دارای اهمیت است که مشکلات به وجود آمده در سدهای لار و مارون نشان دهنده این مسئله است.

ه- در مناطق کوهستانی کشور، به منظور انتقال آب و یا احداث جاده‌ها، در پاره‌ای اوقات سفره‌های کارستی قطع می‌گردند. بررسی خصوصیات این سفره‌ها به منظور طراحی دقیق‌تر چنین سازه‌هایی ضروری است. تونل سوم کوه‌رنگ که آب سرشاخه‌های کارون را به رودخانه زاینده‌رود منتقل می‌نماید، نمونه‌ای از این سازه‌هاست.

۲-۲- طبقه‌بندی آبخوان‌های کارستی

یکی از اولین طبقه‌بندی‌های کارست توسط سویچیک (Cvijic 1926) ارائه شد که این محقق کارست را بر اساس عامل مورفولوژی به سه دسته کارست کامل (Holo karst)، کارست ناقص (Mero karst) و کارست انتقالی (Transitional karst) تقسیم بندی نمود (Milanovic 1981).

کارست کامل به گستره‌های کارستی اطلاق می‌شود که کاملاً از سنگ‌های کربناته قابل حل تشکیل یافته باشند. این نوع کارست توسط وجود پدیده‌های کارستی سطحی و زیرزمینی و ایجاد پدیده‌های کارستی جدید مشخص می‌شود. سرزمین‌های سنگی فاقد اپی کارست و عدم وجود گیاهان، چهره‌های بسیار خاصی به نواحی کارست کامل می‌دهند.

کارست‌های ناقص به نواحی کارستی گفته می‌شود که در آن پدیده‌های کارست کم و عمق کارستی شدن محدود است. رسوبات کربناته با خاک‌های قابل کشت و گیاهان پوشیده شده و سطوح سنگی برهنه عملاً دیده نمی‌شوند. حفره‌های فروکش غیرمتداول بوده و پلایه‌های کارستی وجود ندارند. این نوع کارست معمولاً کارست پوشیده نیز نامیده می‌شود.

کارست‌های انتقالی در حد واسط کارست‌های کامل و ناقص قرار می‌گیرند. این نوع کارست عمدتاً در سنگ‌های آهکی یافت می‌شوند که توسط رسوبات ناتراوا و با قابلیت انحلال کم از هم تفکیک شده‌اند. اشکال زیرزمینی کارست به خوبی توسعه داشته ولی پلایه‌های کارستی وجود ندارند.

مانژین (Mangin 1975) یک سیستم طبقه بندی بر اساس ضریب ماندگاری (K) و ضریب نفوذ (I) برای سیستم های کارستی معرفی کرده است. به این ترتیب سیستم های کارستی به پنج گروه تقسیم شده‌اند (به نقل از Gilli 2015). این گروه‌ها شامل موارد زیر می‌شوند.

نوع ۱: شبکه کاملاً توسعه یافته با زون اشباع کوچک

نوع ۲: شبکه خوب توسعه یافته با عمده سیستم کارستی در زون اشباع

نوع ۳: سیستم کارستی که به دلیل تأخیر، پایین دست بهتر از بالا دست توسعه یافته است

نوع ۴: سیستم‌های کارستی پیچیده

نوع ۵: سیستم‌های کارستی با توسعه یافتگی ضعیف یا بیشتر با سیستم کارستی غیرفعال

۲-۳- جریان آب زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی

در آبخوان‌های کارستی جریان آب زیرزمینی از طریق فضاهای خالی، درزه، شکستگی، مجاری لوله مانند و دیگر کانال‌های بزرگ انحلالی انتقال می‌یابد. از آنجایی که مجاری انتقال دهنده جریان به طور یکسان توزیع نشده‌اند، آبخوان‌های کارستی به طور کلی ناهمگن (Heterogeneous) و ناهمسانگرد (Anisotropic) هستند. لذا توزیع فضایی تخلخل و تراوایی متفاوت روی ناهمگنی و خصوصیات سیستم جریان تأثیر می‌گذارد. بنابراین، ناهمگنی و سیستم جریان، معیار مهمی را برای تعیین جریان آب زیرزمینی و چگونگی انتقال آلودگی در آبخوان‌های کارستی فراهم می‌کند (Karami 2002).

با توجه به ناهمگنی محیط‌های کارستی، مدل مفهومی از آبخوان‌های کارستی که امروزه مورد قبول قرار گرفته است، شامل یک الگوی سه‌گانه متخلخل و نفوذپذیر ناشی از وجود یک ماتریس با درزه و شکاف اولیه، یک شبکه از خطوط لوله مانند و یک لایه اپی‌کارست (Epikarst) دارای سطحی با نفوذپذیری و تخلخل بالا می‌باشد. پذیرش این مدل دلالت بر وجود درجه بالایی از عدم یکنواختی در مناطق کارستی می‌باشد (Moral et al. 2008).

در طول دهه‌های گذشته مطالعاتی روی تغییرات خواص فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی انجام گرفته است. شروع این مطالعات به طور کلی با کار گارلس و کریست (Garrels and Christ 1965) که جریان آب زیرزمینی را در سنگ‌های کربناته به جریان باز و بسته تقسیم نمودند، آغاز شده است. محققین دیگر با بررسی تغییرات زمانی خصوصیات هیدروشیمیایی (Shuster and White 1971)، آنالیز هیدروگراف (Atkinson 1977) و آزمون پمپاژ (Karami 2002) جریان در محیط‌های کارستی را به طور عمده به دو دسته افشان (Diffuse) و مجرای (Conduit) دسته بندی نموده‌اند (به نقل از کرمی ۱۳۸۱).

اتکینسون (Atkinson 1977) طبق بررسی‌های خود در منطقه‌ی مندپ هیلز (Mendip Hills) در کشور انگلستان به این نتیجه رسید که جریان در بیشتر آبخوان‌های کارستی ترکیبی از سیستم‌های جریان مجرای و افشان است و در سیستم جریان افشان آب در مجاری، شکستگی‌ها و فضاهای بسیار

کوچک جریان می‌یابد. رئیسی و کرمی (Raeisi and Karami 1997) نیز در بررسی چشمه کارستی برغان با بررسی ویژگی‌های مورفولوژیکی و زمین‌شناسی، به نتایج مشابه دست یافتند.

در سیستم جریان افشان، آب چشمه از طریق شبکه‌ای از درز و شکاف‌های کوچک که میزان بازشدگی آن‌ها کمتر از یک سانتی‌متر است تأمین می‌شود. در این نوع جریان تغییرات پارامترهای فیزیکوشیمیایی بسیار کم است و تخلیه طبیعی این سیستم‌ها به وسیله چشمه‌های کوچک و متعدد صورت می‌گیرد. در سیستم جریان مجرای تغذیه سیستم کارستی از طریق درزه‌های باز و یا فروچاله‌ها (Sinkhole) صورت می‌گیرد. بنابراین جریان در این چشمه‌ها از نوع متلاطم (Turbulent) بوده و نوسانات شدیدی در خواص فیزیکوشیمیایی آن‌ها مشاهده می‌شود. در چنین سیستم‌هایی معمولاً تخلیه از طریق یک چشمه بزرگ صورت می‌گیرد (Raeisi and Karami 1997).

اگرچه در بیشتر آبخوان‌های کارستی هر دو جریان افشان و مجرای مشاهده می‌شوند؛ در برخی، سیستم جریان افشان و در برخی دیگر سیستم جریان مجرای، سیستم غالب جریان را تشکیل می‌دهند (Karami 1997).

به طور کلی با توجه به موارد ذکر شده، جریان در محیط‌های کارستی بین محدوده کاملاً مجرای تا کاملاً افشان دسته‌بندی می‌شود و یک سیستم کارستی می‌تواند از ترکیبی از این دو جریان تشکیل شود به طوری که یکی از این دو جریان در آن غالب‌تر باشد.

جدول ۲-۱- محدوده تغییرات جریان در آبخوان‌های کارستی

Full Diffuse Flow System	Conduit- Diffuse Flow System	Diffuse - Conduit Flow System	Full Conduit Flow System
-----------------------------	---------------------------------	----------------------------------	-----------------------------

۲-۴- ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی

خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های کارستی شامل مواردی از قبیل مرزهای هیدروژئولوژیکی آبخوان، میزان توسعه کارست، مقادیر ضرایب هیدرودینامیکی، نوع سیستم ورودی و تغذیه به آبخوان،

وضعیت سازند کارستی نسبت به سازندهای مجاور خود و شیب هیدرولیکی در بخش‌های مختلف آبخوان، عوامل مهم تعیین کننده جهت، سرعت و نوع جریان غالب در آبخوان‌های کارستی می‌باشند. مطالعه‌ی هیدروژئولوژی آبخوان‌های کارستی به دلیل ناهمگنی بسیار در خصوصیات هیدرودینامیکی و محدود بودن چاه‌های قابل دسترس جهت انجام مشاهدات هیدروژئولوژی در این آبخوان‌ها دشوار می‌نماید (Romanov 2003, Mohammadi and Field 2009).

برای ارزیابی خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های کارستی روش‌های مختلفی ممکن است مورد استفاده قرار بگیرد. بررسی توأم تغییرات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی در یک دوره زمانی (مانند یک سال آبی) یکی از روش‌های رایج، نسبتاً کم هزینه و مطمئن ارزیابی هیدروژئولوژیکی آبخوان-های کارستی می‌باشد.

مطالعه آبخوان‌های کارستی بر اساس روش‌هایی که مبنای آن‌ها بررسی هیدروگراف چشمه‌های کارستی می‌باشد، به این جهت که هیدروگراف چشمه بیانگر پاسخ تمام اجزای آبخوان (با خواص هیدرودینامیکی بسیار متفاوت) به فرآیندهای هیدرولیکی مختلف (مانند تغذیه و یا تخلیه که در آبخوان کارستی اتفاق می‌افتد و در تغییرات زمانی آبدهی چشمه نمود می‌یابند) می‌باشد، بر سایر روش‌های شناسایی آبخوان-های کارستی مانند آزمون پمپاژ که فقط حجم کوچکی از سفره نا همگن را در بر می‌گیرند، ارجحیت دارند (Jeannin and Sauter 1998, Kovacs *et al.* 2005).

تغییرات آبدهی چشمه‌ها معمولاً با تغییر در مقدار یون‌های محلول در آب، هدایت الکتریکی، دما، نسبت‌های ایزوتوپی و مقدار مواد معلق موجود در آب (کدورت) همراه می‌باشند. مطالعات سیستماتیک آبخوان‌های کارستی بر اساس تغییرات زمانی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی از حدود پنج دهه‌ی قبل آغاز شده است و زمینه‌های متعددی توسط محققین مختلف ارائه شده است. از میان مطالعات انجام شده یکی از کارهای جالب توجهی که بعداً توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است تقسیم‌بندی جریان در آبخوان‌های کارستی به دو سیستم مجرای و افشان می‌باشد توسط شاستر و وایت (Shuster and White 1971) ارائه شده است.

رئیزی و همکاران (Raeisi et al. 2006) نشان دادند که در چشمه‌های کارستی با سیستم غالب افشان همزمان با تغییرات زمانی آبدی چشمه کارستی در فصول مختلف سال، تغییرات اندکی در خواص شیمیایی آب‌های خروجی از چشمه مشاهده می‌شود. در مقابل در خواص شیمیایی آب خروجی از چشمه‌های کارستی مجرای تغییرات زیادی مشاهده می‌شود. زیرا در آبخوان‌های با جریان غالب مجرای زمان ماندگاری آب کوتاه (حدود چند ساعت یا چند روز) می‌باشد و برای اینکه آب‌های جدید وارد شده به آبخوان و سنگ‌های تشکیل دهنده آبخوان کارستی از نظر شیمیایی به تعادل برسند، کافی نمی‌باشد. در این میان نظرات مخالف و نیز متناقضی وجود دارد که قابل توجه می‌باشند. برای مثال باکالوویکز (Bakalowickz 1977) استفاده از ضریب تغییرات متغیرهای شیمیایی برای تعیین سیستم جریان در آبخوان کارستی را ناکارآمد دانسته است. اسکانلون و تراکیل (Scanlon and Thrailkill 1987) با استفاده از معیارهای پژوهشگران قبلی خود و با بررسی سیستم‌های جریانی در منطقه کنتاکی مرکزی (Central Kentucky)، به این نتیجه رسیدند که ارتباطی میان خصوصیات شیمیایی آب چشمه و خصوصیات فیزیکی آبخوان کارستی وجود ندارد. رئیزی (Raeisi et al. 1993) با استفاده از معیارهای ارائه شده توسط پژوهشگران قبل از خود به مطالعه‌ی سیستم جریان چشمه‌ی کارستی شش‌پیر در استان فارس پرداخت اما نتایج متناقضی بدست آورد.

تعیین مسیرهای جریان و منشأ تغذیه از طریق بررسی تغییرات زمانی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و ایزوتوپی چشمه‌های کارستی رواج بسیاری داشته است. در این مطالعات معمولاً از تغییرات شیمیایی و ایزوتوپی برای جداسازی جریان پایه از جریان سریع و یا سیلابی در چشمه‌های کارستی استفاده می‌شود. بخشی از آبدی چشمه که از نفوذ سریع تغذیه از طریق مجاری انحلالی و درز و شکاف‌های بزرگ به آبخوان تامین می‌شود، اصطلاحاً جریان سریع (Quick flow) نامیده می‌شود. همچنین بخشی از آبدی چشمه که از خروج آب‌های کارستی ذخیره شده در فضاها متن سنگ تأمین می‌شود، جریان پایه (Base flow) نامیده می‌شود (Lakey and Krothe 1996).

تغییرپذیری خواص شیمیایی و فیزیکی چشمه‌های کارستی به نحوه‌ی تغذیه چشمه بستگی دارد. تغذیه می‌تواند به صورت متمرکز از طریق آب‌های ورودی به فروچاله‌ها و یا به صورت افشان از سطح آبخوان انجام شود. به طور مثال ورسینگتون و همکاران (Worthington *et al.* 1992) با بررسی تغییرات پارامتر سختی (Hardness) سی و نه چشمه کارستی در شش کشور مختلف به این نتیجه رسیدند که هفتاد و پنج درصد تغییرات این پارامتر به وسیله انواع تغذیه (افشان و یا متمرکز) قابل توجیه و تفسیر است. رئیسی و کرمی (Raeisi and Karami 1997) پیشنهاد کرده‌اند که با استفاده از خصوصیات فیزیکوشیمیایی چشمه‌های کارستی جهت تعیین خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان کارستی ابتدا باید تأثیر عوامل خارجی موثر بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی چشمه حذف شوند و سپس عوامل داخلی تأثیرگذار بر خصوصیات آبخوان کارستی مورد بررسی قرار گیرند.

۲-۵- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی

بررسی هیدروژئوشیمیایی آبخوان‌های کارستی به جهت ارزیابی جریان غالب، زمان ماندگاری آب در بخش‌های مختلف آبخوان، رابطه‌ی میان بخش‌های مختلف آبخوان با یکدیگر، رابطه‌ی آبخوان با منابع آب سطحی و زیرزمینی مجاور خود، مکانیسم تخلیه و تغذیه و نیز انتقال آلودگی انجام می‌شوند (نقل از خسروی سوداجانی ۱۳۹۰).

ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی تحت تأثیر سه عامل اصلی شامل الف- نوع و جنس سنگ‌هایی که آب در حین جریان با آنها در تماس است، ب- شرایط محیطی (دما و فشار) و ج- شرایط جریان (سرعت جریان) می‌باشند (Bakalowicz 1997). تأثیر عوامل مذکور در درجات مختلف، انواع آب‌ها را که در زمان و مکان از نظر خواص هیدروژئوشیمیایی متغیر هستند به وجود می‌آورند (Mohammadi 2009). کیفیت اولیه‌ی آب تغذیه شده به آبخوان کارستی، نفوذ آب‌هایی که برای آبیاری زمین‌های کشاورزی استفاده شده اند به داخل آبخوان‌های کارستی و اختلاط آب‌های سطحی و زیرزمینی از عوامل موثر بر ترکیب و تکامل هیدروژئوشیمیایی آبخوان‌های کارستی می‌باشند (Kattan 2001, Wu *et al.* 2009).

ترکیب شیمیایی آب‌های کارستی عموماً وابسته به انحلال کانی‌های کربناته شامل کلسیت، آراگونیت و دولومیت می‌باشد. نرخ انحلال دولومیت به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از کلسیت است. به طور مثال تحقیقات آپلو و پوستما (Appelo and Postma 2005) نشان می‌دهد که در شرایط یکسان جهت رسیدن به شرایط اشباع ۹۵ درصد از دولومیت، ۱۰۰ برابر زمان بیشتر نسبت به کلسیت لازم است. به دلیل مقدار کم انحلال دولومیت، مقادیر بالای غلظت منیزیم به عنوان شاخصی جهت بیان زمان ماندگاری آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چند به سختی می‌توان زمان دقیقی را جهت این امر مشخص نمود، زیرا نرخ انحلال توسط عوامل متعددی تحت تأثیر قرار می‌گیرد؛ پس می‌توان بیان نمود که در شرایط یکسان آب خروجی از چشمه‌های کارستی نسبت به کلسیت اشباع بوده در حالی که نسبت به دولومیت تحت اشباع می‌باشند (کریمی وردنجان ۱۳۸۹).

مورال و همکاران (Moral et al. 2008) طی بررسی آبخوان‌های سیرا و سگورا (Sierra and Segura) در کشور اسپانیا فرآیندهای شیمیایی در این آبخوان‌ها را به ترتیب وقوع، انحلال دی‌اکسیدکربن، انحلال کلسیت، انحلال نامتجانس دولومیت (Incongruent dissolution) خروج دی‌اکسیدکربن محلول از آب و رسوب کلسیت تشخیص دادند. همچنین آن‌ها طی این بررسی به این نتیجه رسیدند که بین درجه حرارت آب و غلظت Mg/Ca یک همبستگی خوبی وجود دارد. به نظر آن‌ها آب‌های تکامل یافته دارای محتوای منیزیم بیشتر، نسبت Mg/Ca بیشتری دارند. آن‌ها از این شاخص برای تعیین درجه توسعه یافتگی هیدروژئوشیمیایی استفاده نمودند.

به طور کلی با تغییرات آبدی چشمه‌های کارستی، برخی خصوصیات هیدرووشیمیایی نیز تغییر می‌کنند. در واقع تغییرات در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در چشمه‌های کارستی به نوع سیستم آبخوان و نوع تغذیه آن وابسته است.

محققان چون (Shuster and White 1971, Jacobson and Langmuir 1974, Atkinson 1977) به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی، از تغییرات خصوصیات فیزیکی و

شیمیایی از قبیل تغییرات آبدی، هدایت الکتریکی، تغییرات درجه حرارت، کل جامدات محلول، اسیدیته، پارامتر سختی، تغییرات یون‌های اصلی و ضرایب اشباع استفاده نمودند.

جاکوبسون و لانگمویر (Jacobson and Langmuir 1974) طی مطالعات خود ضریب تغییرات پارامتر-های فیزیکی و شیمیایی چشمه‌های کارستی را ارائه نمودند که مهم‌ترین این پارامترها دبی، هدایت الکتریکی و درجه حرارت آب چشمه می‌باشند به این ترتیب که ضریب تغییرات این سه پارامتر برای چشمه‌های کارستی با سیستم جریان مجرای به ترتیب برابر با ۱۷۵، ۲۳ و ۲۶ درصد و برای سیستم جریان افشان به ترتیب برابر با ۲۶، ۶/۲ و ۱/۴ می‌باشند.

افتیم و بندرو (Eftimi and Benderev 2007) در مطالعاتی تحت عنوان استفاده از داده‌های هیدروشیمیایی جهت شناسایی سیستم جریان چشمه کارستی اسکرت (Iskrets) در کشور بلغارستان و مقایسه داده‌های هیدروشیمیایی این چشمه با چشمه‌های مشابه با استفاده از غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی، سیستم جریان این چشمه را از نوع مجرای تشخیص دادند. نتایج این محققین نشان داد که آب به طور کلی در شبکه‌ای از شکستگی‌های بزرگ حرکت کرده و آن‌ها را انحلال می‌دهد که تغذیه چشمه از طریق نفوذ بارش در سطح حوضه و از طریق دولین‌ها صورت می‌گیرد.

جانگ و گو (Jiang and Guo 2010) ضمن مطالعه هیدرولوژیکی، هیدروشیمیایی و ایزوتوپی روی چشمه کارستی لینگسوی (Lingshui) و با فرض اینکه آلاینده‌های انسان زاد از قبیل Cl^- ، Na^+ ، K^+ ، NO_3^- و SO_4^{2-} در آبخوان‌های کم عمق بیشتر از آبخوان‌های عمیق می‌باشند به این نتیجه رسیدند که آب این چشمه از عمق آبخوان منشأ می‌گیرد و هیچ منبع آلوتنیکی ندارد و همچنین آنالیزهای ایزوتوپی نیز موارد ذکر شده را تأیید نمودند (نقل از ابراهیمی ۱۳۹۶).

شکری و همکاران (۱۳۹۰)، با استفاده از بررسی‌های سطحی عوارض کارستی از طریق سنجش از دور و بررسی‌های زیرسطحی از طریق تحلیل خصوصیات فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها به ارزیابی توسعه کارست در حوضه آبرگیر چشمه علی دامغان پرداختند؛ آن‌ها در نتایج خود بیان داشتند که هر دو روش

سطحی و زیرسطحی قابلیت بیان توسعه کارست را دارد، اما نمی‌توان صرفاً به برداشت‌های سطحی اکتفا کرد و از تجزیه و تحلیل هیدروگراف و نمودارهای هیدروشیمیایی صرف نظر نمود.

دمیرگلو (Demiroglu 2016) به منظور طبقه‌بندی آبخوان از نظر پاسخ به وقایع بارش و ارزیابی سیل خیزی آن یک مطالعه با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمیایی بر روی چشمه‌های کربناته مختلف در غرب ترکیه انجام داد و به این نتیجه رسید که نفوذپذیری شکستگی‌ها در منطقه عمدتاً توسط سیستم جریان افشان با ذخیره بالا و نفوذپذیری مجاری با ذخیره پایین کنترل می‌شود. همچنین عنوان نمود که تغییرپذیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در سیستم مجرای با قدرت ذخیره‌سازی کم، بالاتر است و این نوع از سفره‌ها با قابلیت انتقال بالا، عمدتاً توسط جریان متلاطم کنترل و بر سیل خیزی منطقه موثر می‌باشند.

با توجه به مطالعات صورت گرفته می‌توان نتیجه‌گیری نمود که تغییرات پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و در رأس آن بررسی پارامترهای دبی، هدایت الکتریکی و درجه حرارت آب چشمه به عنوان مهم‌ترین شاخص‌ها در ارزیابی سیستم جریان در چشمه‌های کارستی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۶- تغذیه در کارست

بوردن و پاپاکیس (Burdon and Papakis 1963) دو نوع تغذیه را در مناطق کارستی تشخیص دادند: یکی نفوذ اولیه که نفوذی عادی است در مقابل دیگری که نفوذی ثانویه می‌باشد. نفوذ ثانویه وقتی است که آب‌های جاری به سرعت از روی ناحیه‌ای با سنگ‌های ناتراوا عبور کرده و مجدداً نفوذ می‌نماید (Milanovic 1981).

کرمی (۱۳۷۲) عنوان نمود که نفوذ آب به داخل کارست و تغذیه لایه آبدار کارستی به سه طریق نفوذ به داخل خاک، نفوذ از طریق درزه و شکاف‌ها و نفوذ از طریق مجاری فروچاله‌ها، صورت می‌گیرد. بخش عمده نفوذ در سنگ‌های آهکی از طریق مجاری انحلالی و درزه و شکاف‌ها صورت می‌گیرد. شرایط تغذیه در لایه‌های آبدار کارستی به مراتب مساعدتر از لایه‌های آبدار واقع در پهنه‌های دیگر زمین‌شناسی

است. نفوذ به طور مستقیم از طریق تعدادی پانور، استاول و به وسیله فرونشست مستقیم باران و ذوب برف از طریق شبکه‌ای از درزه و شکاف صورت می‌گیرد (نقل از آغاسی ۱۳۷۸).

از دیدگاه فورد و ویلیامز (Ford and Williams 1989) تغذیه آبخوان کارستی به رژیم بارش و کمیت آن در طول یک سال بستگی دارد و مساعدترین اثرات تغذیه یک آبخوان در حالی است که یک بارش کم، ذخیره سازی مهمی را تولید نماید. آب‌های ورودی به کارست به سه دسته خودزا (Authogenic)، دگرزا (Alogenic) و مختلط (Mixed) تقسیم می‌شوند (نقل از آغاسی ۱۳۷۸).

تغذیه در مناطق کارستی از نظر کمیت و توزیع فضایی ناهمگنی به عوامل طبیعی مختلف مانند: آب و هوا، توپوگرافی، پوشش گیاهی و خاک، زمین‌شناسی و غیره بستگی دارد. ارزیابی تغذیه در مناطق کارستی یکی از دشوارترین کارها است و اغلب کارشناسان در مورد آن اختلاف نظر دارند. با توجه به توسعه روش‌های چند پارامتری در محیط (GIS) برای سنجش توزیع فضایی تغذیه، روش ARSTLOP یکی از روش‌هایی است که برای ارزیابی تغذیه متوسط در حوضه آبگیر چند چشمه در جنوب اسپانیا مورد استفاده قرار گرفته و توانسته با اختلاف ۵ درصد تغذیه در این نواحی کارستی را محاسبه نماید (Aadulovic et al. 2010).

رایسچ و تورن (Reisch and Toran 2013) در مقاله‌ای تحت عنوان "ناهنجاری ذوب برف بر روی نمودار هیدروشیمیایی چشمه‌های کارستی در پنسیلوانیا" رسانایی، دمای هوا، سطح آب و عمق برف را در یک دوره ۲۶ روزه برای توصیف خصوصیات داخلی جریان و نفوذ افشان تحت نظر قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که تغذیه افشان در منطقه همراه با ذوب برف بر اساس هدایت و سطح آب پایدار و سرعت جابجایی کندتر مشاهده می‌شود در صورتی که رواناب‌های داخلی با ضرایب هدایت بالا، رسانایی بالا و حرکت سریع در فواصل زمانی مشاهده می‌شود.

باربرا و اندرو (Barbera and Andreo 2015) جهت پی بردن به منشأ سیستم تغذیه چشمه کارستی تورروکس (Torrox) در جنوب اسپانیا، با استفاده از آنالیز خصوصیات گرمایی، ایزوتوپی و شیمیایی به این نتیجه رسیدند که آب زیرزمینی زهکشی شده توسط چشمه کارستی از اختلاط سه نوع آب با منشأ

متفاوت است. نوع اول، مربوط به تغذیه افشان از طریق رخنمون‌های کربناته نماینده آب‌هایی با مواد معدنی پایین و فقیر در اکثر پارامترهای شیمیایی و ایزوتوپی، نوع دوم شامل آب آلوزنیک با دمای پایین و هدایت الکتریکی زیاد و غنی شده از یون‌های (No_3^- , Cl^- , Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , So_4^{-2}) و نوع سوم که از اختلاط آب‌های بسیار عمیق و معدنی با حرارت بالا تشکیل شده است.

بر اساس مطالعات انجام شده شرایط تغذیه در لایه‌های آبدار کارستی به مراتب مساعدتر از لایه‌های آبدار واقع در پهنه‌های دیگر زمین‌شناسی است. عموماً تغذیه در این مناطق به سه طریق، نفوذ به داخل خاک، نفوذ از طریق درزه و شکاف‌ها و نفوذ نقطه‌ای از طریق مجاری فروچاله‌ها، صورت می‌گیرد و به عوامل طبیعی مختلفی مانند: آب و هوا، توپوگرافی، پوشش گیاهی، خاک، زمین‌شناسی و غیره بستگی دارد. آب‌های ورودی به کارست به سه دسته خودزا، دگرزا و مختلط تقسیم می‌شوند. در سیستم ورودی خودزا، منطقه به طور کامل از سنگ‌های کارستی تشکیل شده و به وسیله آب‌های بارندگی تغذیه می‌شود، در حالی که در سیستم دگرزا آب‌های مناطق کارستی مجاور هستند که باعث تغذیه سیستم می‌شوند. در طبیعت اغلب ترکیبی از هر دو مورد مشاهده می‌شود (نقل از ابراهیمی ۱۳۹۶).

۲-۷- حوضه آبگیر چشمه‌های کارستی

بسیاری از کارشناسان به این عقیده هستند که شناسایی منشأ تغذیه احتمالی هر چشمه کارستی مستلزم تعیین پارامتر مهمی به نام حوضه آبگیر (Catchment area) می‌باشد. منظور از مرزهای حوضه، ناحیه‌ای به نام حوضه آبگیر می‌باشد که تمام نقاط روی این حوضه در رساندن آب به نقطه خروجی یا چشمه سهیم می‌باشند. مساحت حوضه آبگیر و وضعیت هندسی آبخوان کارستی عواملی هستند که نسبت به زمان و مکان تغییر می‌کنند و به شرایط هیدروژئولوژیکی بستگی دارند. تعیین حوضه آبگیر یک نقطه آغاز برای همه آنالیزهای هیدورژئولوژیکی و همین طور به عنوان یک پایه و اساس برای حفاظت از ذخایر آبی، مدیریت و درک مدل‌سازی چرخه آب در توده‌های کارستی می‌باشد (Bonacci 2006).

2015). روش های متفاوتی برای تعیین حوضه آبرگیر استفاده می شوند که از مهم ترین آن ها می توان به روش های بیلان هیدرولوژیکی، روش های مدل سازی، سنجش از دور و ترکیبی اشاره نمود.

۲-۷-۱- روش بیلان هیدرولوژیکی

بناچی (Bonacci 1993) ضمن بررسی و تعیین حوضه آبرگیر چشمه کارستی سواون (Sv.Ivan) در کرواسی، از طریق روش های زمین شناسی، هیدرئولوژیکی و هیدرولوژیکی، به این نتیجه دست یافت که روش بیلان هیدرولوژیکی مناسب ترین روش برای تعیین حوضه آبرگیر در نواحی کارستی با داده های محدود می باشد. وی کاربرد تنوعی از تکنیک ها را در تعیین حوضه آبرگیر بخصوص در نواحی کارستی را مفید می داند. همچنین او برای اطمینان از درستی نتایج، از روش های ردیابی رادیواکتیو، بیولوژیکی و شیمیایی بهره گرفته است.

بناچی (Bonacci 1993) از روش هیدروگراف آب زیرزمینی برای تخمین حوضه آبرگیر در چشمه سادرو استفاده نمود. این روش شامل محاسبه هیدروگراف چشمه توسط بیلان ریاضی و مقایسه آن با هیدروگراف مشاهده ای و تلاش برای به حداقل رساندن اختلاف آن دو با تغییر مساحت حوضه آبرگیر می باشد. نتایج این مطالعه گویای این است که نرخ های تغذیه سالیانه و ماهانه آب زیرزمینی محاسبه شده توسط مدل ریاضی برای تخمین رفتار هیدرولوژیکی حوضه می تواند با زمان متغیر باشد. این مسئله برای حوضه های کارستی که مرزهای آن تابع زمان می باشد بسیار مهم و حیاتی است. این موضوع نشانگر این است که مقادیر حوضه آبرگیر برای حوضه کارستی نمی تواند همواره ثابت باشد بلکه با زمان می تواند تغییر کند (Bonacci et al. 2006).

خسروی سوداجانی و کرمی (۱۳۹۰) در مطالعه ای تحت عنوان بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی چشمه کارستی امام قیس با منابع آب مجاور از روش بیلان هیدرولوژیکی معکوس جهت تعیین حوضه آبرگیر چشمه استفاده نمودند.

بناچی (Bonacci 2016) در مطالعه‌ای تحت عنوان تعیین حوزه آبخیز چشمه کارستی، مطالعه موردی در کارست دیناریک (Dinaric) بیان می‌کند که مسئله حل نشده در کارست، عدم انطباق حوزه آبخیز توپوگرافی با حوزه آبخیز هیدرولوژیکی می‌باشد. وی دو روش هیدرولوژیکی ساده را برای محاسبه حوزه آبخیز پیشنهاد کرد. روش اول تعیین ارتباط بین میانگین سالیانه تخلیه با بارندگی سالیانه روی حوزه و روش دوم استفاده از فرمول ترک (Turc) می‌باشد.

۲-۷-۲- سایر روش‌ها

در تعیین حوزه آبخیز نیاز به اطلاعات جامع و گسترده‌ای از وضعیت زمین‌شناسی (لیتولوژی)، هیدروژئولوژی (منشأ جریان آب زیرزمینی و جهت جریان)، هیدرولوژی و تکتونیک منطقه می‌باشد. دو نوع حوزه آبخیز برای آب‌های سطحی و زیرزمینی تعریف می‌شود.

حوزه آبخیز برای آب‌های سطحی بیشتر متأثر از توپوگرافی بوده و در برخی نوشته‌ها به نام حوزه آبخیز توپوگرافی (Topographic catchment Area) معرفی می‌شود که ساده‌ترین راه برای تخمین اولیه آن استفاده از نقشه‌های توپوگرافی می‌باشد. از طرفی دیگر حوزه آبخیز برای آب‌های زیرزمینی متأثر از مرزهای هیدرولیکی و یا مرزهای نامرئی می‌باشد که با نام حوزه آبخیز هیدرولوژیکی (Hydrological catchment area) معرفی می‌گردد. در شرایطی که مرزهای توپوگرافی و هیدرولیکی بر هم منطبق باشند می‌توان گفت دو حوزه آبخیز سطحی و زیرزمینی نیز بر هم منطبق هستند. زمانی که مرزها بر هم منطبق نباشند و یا در محیط‌های ناهمگن (Heterogenous) مثل کارست به دلیل مورفولوژی نامشخص عوارض کارستی و وجود اتصالات زیرزمینی نمی‌توان حوزه آبخیز توپوگرافی را با حوزه آبخیز هیدرولوژیکی منطبق دانست. مسئله با در نظر گرفتن مرزهای هیدرولوژیکی که وابسته به زمان می‌باشند، پیچیده تر هم می‌شود. لذا به منظور تعیین مرزهای هیدروژئولوژیکی بایستی بررسی‌های جامع‌تری از نظر زمین‌شناسی، هیدرولیکی و هیدرولوژیکی انجام شود (Bonacci 2006). دگریرمنس (Degirmenci 1993) در پژوهشی تحت عنوان تعیین حوزه آبخیز چشمه‌های کارستی اوکوپور

(Olukkopru) در ترکیه، از تکنیک‌های سنجش از دور و آنالیزهای هیدروشیمیایی و آنالیزهای ایزوتوپ محیطی به منظور تعیین سیستم‌های تغذیه و تخلیه و بررسی ارتباط بین چشمه‌ها و حوضه‌های آبریز چشمه‌های مجاور استفاده نمود.

موسسه تحقیقات مدل سازی محیط زیست (Enviromental Modeling Research Laboratory) در سال (2002) اقدام به ساخت سیستم مدل سازی حوضه آبریز (Watershed Modeling System) نمود. این سیستم با کمک داده‌های ورودی مدل مفهومی را در روی بستر رقومی TIN تهیه کرده و سپس اقدام به پردازش‌های اولیه می‌نماید و بعد نرم افزار با دریافت آبراهه‌ها و محل‌های خروجی اقدام به تهیه مرزهای حوضه آبریز و زیر حوضه‌ها می‌کند. از مزایای این سیستم می‌توان به استخراج آبراهه‌ها و نمایش مسیرهای جریان، حوضه‌بندی بر مبنای مدل رقومی و آبراهه‌ها، برآورد ضریب رواناب، محاسبه زمان تمرکز و غیره اشاره نمود.

بونچی (Bonacci 2006) در مطالعه‌ای تحت عنوان تعیین حوضه آبریز در کارست، مطالعه موردی روی رودخانه‌های کرکیک و کراکا (Krcic, Krka) در فاز مقدماتی، از روش‌های تجربی مانند روش تورک (Turc)، کاتاجن (Catagne) و سربرنووچ (Srebrenovic) برای تخمین اولیه حوضه آبریز استفاده نمود. سپس این مساحت با مساحت حوضه آبریز توپوگرافی مورد مقایسه قرار گرفت و پس از آن برای اعتبار سنجی روش‌های گفته شده اقدام به محاسبه نرخ تغذیه سالانه و ماهانه آب زیرزمینی با کمک مدل ریاضی نمود.

بوسچر و هگنبرگر (Butscher and Huggenberge, 2007) در تحقیقی تحت عنوان مفاهیمی برای هیدرولوژی کارست با استفاده از مدل سازی سه بعدی جغرافیایی از روش گرادیان کف آبخوان (Aquifer Base Gradeint) برای شناسایی نواحی تغذیه و تخلیه استفاده نمودند. این روش شامل دو مرحله اساسی می‌باشد: مرحله اول توسعه مدل سه بعدی زمین شناسی (3D Geological) از منطقه مورد مطالعه می‌باشد که با استفاده از نرم افزار GOCAD انجام گرفته است، این مرحله برای توصیف و آنالیز هندسه آبخوان، لایه‌های ناتراوا و مورفولوژی لایه‌ها و گسل‌ها بوده که به عنوان لایه‌های ورودی در

مدل به کار گرفته شده‌اند و در مرحله دوم توسعه مدل هیدرولوژیکی بر اساس مدل سه بعدی جغرافیایی می‌باشد که نتیجه نهایی به صورت نمایش مسیرهای جریان زیرسطحی، تعیین حوضه آبرگیر زیرسطحی و نواحی تخلیه و تغذیه می‌باشد و در پایان این نتایج با محل های واقعی ظهور چشمه و با اتصالات هیدرولیکی به دست آمده از نتایج ردیابی مورد مقایسه قرار گرفت. نتیجه بیانگر توانایی مدل در تعریف حوضه‌های آبرگیر کارستی می‌باشد.

التنسوک (Altansukh, 2012) از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) که دارای یک ابزار الحاقی (Extension) به نام مدل هیدروژئولوژیکی (Hydrological Modeling) می‌باشد، با کمک داده‌های ورودی بارندگی، تبخیر، رطوبت خاک و تصویر مدل رقومی ارتفاعی (DEM) اقدام به شبیه‌سازی جهت جریان احتمالی در منطقه نموده و نهایتاً لایه پلی‌گون از مرزهای حوضه آبرگیر و لایه خطی مسیر آبراهه‌ها را ترسیم کرد.

فصل سوم: روش انجام کار

به منظور بررسی ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه، در این پژوهش مطالعاتی به شرح ذیل صورت گرفته است.

۱- جمع‌آوری آمار و اطلاعات هواشناسی، نقشه‌های زمین‌شناسی و عکس‌های هوایی، مطالعات پیشین در مورد موضوع پژوهش

۲- بازدیدهای صحرایی و زمین‌شناسی به منظور بررسی ژئومورفولوژی کارست، بررسی توالی چینه‌شناسی، تهیه و تکمیل نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

۳- نمونه‌برداری ماهیانه از چشمه‌های کارستی دهگاه، سیدلی و خورخوری از تیرماه ۱۳۹۸ تا مرداد ماه ۱۳۹۹ و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه و همچنین ثبت برخی خصوصیات فیزیکی در محل نمونه‌برداری

۴- آنالیز عناصر اصلی مانند کاتیون‌ها و آنیون‌ها در آزمایشگاه آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود و ارسال یک نوبت نمونه‌ها به موسسه مطالعاتی معدنی زراژما شعبه مشهد

۵- تجزیه و تحلیل آمار و اطلاعات به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی منطقه

۶- ترسیم و محاسبه حوضه آبریز احتمالی چشمه‌های کارستی منطقه

۷- ارزیابی بیلان هیدروژئولوژیکی در منطقه

۸- بررسی وجود و یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه در ادامه مراحل انجام شده در بالا به طور مختصر توضیح داده می‌شود.

۳-۱- جمع‌آوری آمار و اطلاعات مرتبط با تحقیق

همان‌طور که در بخش قبل مطرح گردید سعی بر این شد تا با جمع‌آوری داده‌ها و بررسی مطالعات انجام گرفته در منطقه مورد مطالعه، مطالعات مشابه در سایر نقاط و همچنین تهیه نقشه زمین‌شناسی، توپوگرافی، عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، شناخت کلی از منطقه و روش صحیح انجام پژوهش حاصل شود تا بتوان با یک دید دقیق در مطالعات میدانی به نتیجه مطلوبی دست یافت.

به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی منطقه اطلاعات زیر جمع‌آوری شد.

الف- جمع‌آوری آمار بارش و دمای مربوط به شهرستان بجنورد از سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان شمالی و در ادامه انتخاب ایستگاه‌های آغمزار، حصه‌گاه، آشخانه، دربند و حصار حسینی که در نزدیک منطقه مورد مطالعه قرار گرفته بودند به منظور ترسیم نمودار ارتفاع-بارش منطقه

ب- مراجعه به سایت USGS و دریافت مدل رقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک مکانی سی متر و ترسیم نقشه هیپسومتری و تخمین ارتفاع متوسط حوضه آبریز چشمه‌های کارستی منطقه

ج- مراجعه به سازمان زمین‌شناسی و دریافت نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰۰۰ بجنورد به منظور ترسیم نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

۳-۲- انجام بازدیدهای صحرایی

با وجود توسعه وسایل و امکانات سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای، بازدید صحرایی به عنوان بهترین روش جهت شناسایی و ارزیابی مناطق مختلف مطالعات زمین‌شناسی می‌باشد. طی دو مرحله بازدید از منطقه اقدام به بررسی سازندها و واحدهای سنگی جهت شناسایی این واحدها و بررسی خواص و خصوصیات کارستی شدن در آنها شده است. طی بازدیدهای صحرایی میزان دقت و صحت نقشه‌های مورد استفاده نیز ارزیابی شده است و در صورت مشاهده خطا و یا اشتباه اقدام به رفع آن شده است.

۳-۳- ترسیم نقشه زمین‌شناسی پایه منطقه

نقشه‌های زمین‌شناسی دارای دقت کافی، در زمین‌شناسی یکی از با اهمیت‌ترین عوامل در دقت نتایج حاصله می‌باشد. در نقشه‌های زمین‌شناسی، لیتولوژی و ساختارهای زمین‌شناسی از پارامترهای مهم موثر بر آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

پس از دو دوره بازدید صحرایی از منطقه و بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ بجنورد، نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در محیط GIS ترسیم گردید.

۳-۴- اندازه‌گیری‌های صحرایی

به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی، از چشمه‌های کارستی منطقه ۱۳ مرتبه (از تیرماه ۱۳۹۸ تا مردادماه ۱۳۹۹) بازدید به عمل آمده است و پارامترهای ذیل در محل مظهر چشمه‌ها اندازه‌گیری شده است.

۳-۴-۱- نمونه‌برداری هیدرووشیمیایی از چشمه‌ها

به منظور ارزیابی کیفی و کمی منابع آب زیرزمینی، از آن نمونه‌برداری به عمل می‌آید. استفاده از روش‌های نادرست در برداشت نمونه‌ها و همچنین روش‌های اندازه‌گیری غیر استاندارد در آزمایشگاه می‌تواند نتایج گمراه‌کننده و غلطی را در ارزیابی منابع آبی منطقه به همراه داشته باشد. فرآیند نمونه‌برداری از آب شامل مراحل نمونه‌گیری آب، ثبت و انتقال به آزمایشگاه است. برخی پارامترها مانند دما، pH، هدایت الکتریکی، اسیدیته و بو باید در محل نمونه‌برداری، اندازه‌گیری شوند زیرا این پارامترها پس از نمونه‌برداری پایداری خود را از دست می‌دهند.

نمونه‌برداری از چشمه‌های کارستی منطقه از تیرماه سال ۱۳۹۸ تا مردادماه ۱۳۹۹ بر اساس روش‌های استاندارد انجام شده است. جهت نمونه‌برداری از منابع آبی مذکور از ظروف پلی‌اتیلنی ۱۰۰۰ سی‌سی استفاده شد. قبل از نمونه‌برداری نیز ظروف پلی‌اتیلنی چندین بار با آب چشمه شستشو داده شد. علاوه بر آن سعی شد در هر بار نمونه‌گیری از چشمه‌ها، دو نمونه برداشته شود تا در صورت از بین رفتن یکی از نمونه‌ها، نمونه دیگری موجود باشد. در نهایت، نمونه‌ها در کوتاه‌ترین زمان ممکن برای آنالیز کیفی

به آزمایشگاه آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود منتقل گردیدند و آزمایش‌ها حداکثر تا زمان کوتاهی پس از نمونه‌برداری انجام شده‌اند.

برخی از پارامترهای کمی شامل آبدهی، درجه حرارت و برخی پارامترهای شیمیایی شامل هدایت الکتریکی و اسیدیته در محل نمونه‌برداری اندازه‌گیری شده‌اند.

۳-۴-۲- اندازه‌گیری دبی

دبی یکی از پارامترهای مهم در مطالعات آبهای سطحی و زیرزمینی (چشمه) است. منظور از دبی، حجمی از آب است که در واحد زمان از سطح مقطع عمود بر جریان عبور می‌کند. اگر سرعت متوسط جریان (v) و سطح مقطع عمود بر جریان (A) اندازه‌گیری شود، مقدار دبی (Q) را می‌توان از معادله زیر محاسبه نمود.

$$Q = A.v \quad \text{معادله (۳-۱)}$$

در این پژوهش برای اندازه‌گیری دبی آب چشمه‌های کارستی منطقه از دستگاه مولینه (سرعت‌سنج) استفاده شده است. فرمول محاسبه سرعت برای این مولینه به صورت ذیل می‌باشد.

$$v = (0.24121.N) + 0.0115414 \quad \text{معادله (۳-۲)}$$

در معادلات فوق N تعداد دور گردش پروانه دستگاه در واحد زمان (ثانیه) و v سرعت جریان آب زیرزمینی در مقطع مشخصی می‌باشد. دبی چشمه‌های کارستی منطقه، طی ۱۳ ماه به وسیله دستگاه مولینه اندازه‌گیری شده است.

۳-۴-۳- اندازه‌گیری هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی (EC) آب ارتباط مستقیم با مقدار مواد جامد محلول در آب دارد و مهم‌ترین پارامتر شیمیایی می‌باشد که بهتر است آن را در محل نمونه‌برداری اندازه‌گیری نمود. این پارامتر با املاح حل

شده (TDS) در آب رابطه مستقیم دارد. جهت اندازه‌گیری هدایت الکتریکی نمونه‌های آب در محل نمونه‌برداری، از دستگاه هدایت‌سنج (EC متر) مدل WP-84 استفاده شده است. دقت دستگاه برای اندازه‌گیری برابر با یک میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد.

۳-۴-۴- اندازه‌گیری pH

از دیگر پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل نمونه‌برداری، pH می‌باشد که مقدار آن به عواملی از قبیل مقدار دی‌اکسیدکربن محلول در آب، مقدار آنیون‌های بیکربنات و کربنات و همچنین درجه حرارت آب وابسته است. اندازه‌گیری مقدار آن به وسیله pH متر صورت می‌گیرد. مقادیر اندازه‌گیری شده برای pH در تجزیه و تحلیل داده‌ها و محاسبه اندیس اشباع کلسیت و دولومیت و غیره بسیار موثر می‌باشد. به همین علت pH آب چشمه‌ها در محل به وسیله دستگاه pH متر سانتکس (Suntex) مدل Sp-701 اندازه‌گیری شده است. دقت این دستگاه برای اندازه‌گیری pH برابر با یک صدم واحد می‌باشد. با توجه به تغییرات اندک این پارامتر در طی فصول، این پارامتر تنها برای برخی از نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است.

۳-۵- اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های برداشت شده از چشمه‌های کارستی منطقه به صورت ماهیانه جهت آنالیز عناصر اصلی (کاتیون‌ها و آنیون‌ها) به آزمایشگاه آب و محیط زیست دانشگاه صنعتی شاهرود و موسسه مطالعاتی معدنی زرآما شعبه مشهد منتقل شدند. آنالیز نمونه‌های کربنات، بی‌کربنات، منیزیم، کلسیم و کلر از طریق تیتراسیون (Titration) و آنالیز یون‌های سدیم، پتاسیم و سولفات توسط دستگاه‌های کانسرت و هانا (Hanna and Consort) صورت گرفت.

۳-۵-۱- اندازه‌گیری یون‌های اصلی

غلظت یون کلر از طریق تیتروسی با نیترات نقره ۰/۱ نرمال و شناساگر کرومات پتاسیم ۵ درصد انجام گردید. غلظت یون بی‌کربنات نیز به روش تیتروسی با اسید سولفوریک استاندارد ۰/۵ نرمال و شناساگر متیل اورانژ اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری یون سولفات از دستگاه Hanna مدل HI93751 استفاده شد. بدین صورت که پس از آماده‌سازی نمونه‌ها اقدام به اضافه نمودن پودر باریت (۰/۱۴۳ gr) شد. پس از به هم زدن محلول و صفر کردن دستگاه، نمونه در محفظه مخصوص قرار داده شد. در نهایت، پس از گذشت مدت زمان ۵ دقیقه مقدار سولفات نمونه قرائت گردید.

جهت اندازه‌گیری یون منیزیم، ابتدا مجموع یون‌های کلسیم و منیزیم نمونه با استفاده از روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد و سپس از مقدار کلسیم به دست آمده کم شد و نهایتاً میزان یون منیزیم محاسبه گردید. جهت اندازه‌گیری مجموع یون‌های کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون از اریوکروم به عنوان معرف، pH₁₀ (بافر آمونیاکی) جهت افزایش pH و محلول EDTA استفاده شد. یون کلسیم نیز با استفاده از روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد که در آن از مروکسید به عنوان معرف و چند قطره KOH نرمال جهت بالا بردن pH نمونه و محلول EDTA (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid) به عنوان تیترانت استفاده شد. جهت اندازه‌گیری یون‌های سدیم و پتاسیم از دستگاه (Consort) مدل C863 استفاده شد. برای اندازه‌گیری سدیم و پتاسیم ابتدا اقدام به کالیبره کردن دستگاه با محلول‌های استاندارد شد. با قرار دادن پروپ مخصوص غلظت هر یون اندازه‌گیری شد.

الف- محاسبه درصد خطای آزمایش

معمولاً اندازه‌گیری غلظت عناصر با استفاده از روش معمول آزمایشگاهی (تیتراسیون و نورسنجی) با خطا همراه است. این خطا ممکن است گاهی از حد مجاز فراتر رفته و منجر به اشتباهاتی در نتایج

تحلیل پارامتری و نموداری گردد. برای بررسی صحت نتایج، از معادله درصد خطای واکنش استفاده شده است.

$$\text{Error \%} = \left| \frac{\sum cat - \sum ani}{\frac{\sum cat + \sum ani}{2}} \right| \times 100 \quad \text{معادله (۳-۳)}$$

در معادله فوق $\sum cation - \sum anion$ به ترتیب مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر و Error % درصد خطای آزمایش می‌باشد.

ب- کل مواد محلول

جهت محاسبه کل جامدات محلول در آب زیرزمینی از معادله (۴-۳) استفاده شده است.

$$\text{TDS} = \sum \text{Ions} \quad \text{معادله (۴-۳)}$$

در این رابطه (TDS) کل جامدات محلول در آب بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و $\sum \text{Ions}$ مجموع یون‌ها در نمونه آب بر حسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد.

پ - محاسبه ضرایب اشباع

اندیس‌های اشباع کلسیت، دولومیت و هالیت سه پارامتر مهم در تفسیر شرایط هیدروشیمیایی آب‌های چشمه‌های کارستی و دیگر منابع آبی می‌باشند. محاسبه این پارامترها توسط نرم‌افزار phreeqc صورت گرفته است. مقادیر بالای صفر در اندیس‌های اشباع کلسیت و دولومیت نشان دهنده حالت فوق اشباع و مقادیر صفر بیانگر حالت اشباع و مقادیر منفی نشان دهنده حالت تحت اشباع می‌باشد.

۳-۵-۲- اندازه‌گیری عناصر فرعی

جهت اندازه‌گیری غلظت عناصر فرعی، نمونه آب چشمه‌های منطقه طی یک نوبت به موسسه مطالعات معدنی زرازا شعبه مشهد ارسال شدند و غلظت عناصر فرعی نقره، آرسنیک، باریم، برلیوم، بیسموت،

کادمیم، سریم، کبالت، کروم، سزیم، مس، دیسپروزیوم، یوروپیوم، گادولینیوم، ایندیم، لانتان، لیتیم، لوتیم، مولیبدن، نیوبیم، نئودیمیم، نیکل، سرب، برازئودییمیم، روییدیم، آنتیموان، اسکاندیم، سلنیم، ساماریوم، روی، استرانسیم، تانتال، تربیم، تلوریم، توریم، تیتانیوم، تالیم، اورانیوم، وانادیم، تنگستن، ایتریم، ایتربیوم و قلع به روش ICP اندازه گیری شد.

۳-۶- تعیین محدوده حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه

شناسایی حوضه آبرگیر به منظور تخمین منابع آب زیرزمینی، جهت و سرعت انتقال آلودگی اهمیت فراوانی دارد. در این تحقیق ابتدا با استفاده از تلفیق روش‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و مد نظر قرار دادن حوضه آبرگیر چشمه‌های مجاور، محدوده حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه به صورت مقدماتی ترسیم گردید و مساحت آن محاسبه شد. برای حوضه‌های آبرگیر مشخص شده، مقادیر بارش سالیانه از روش نمودار ارتفاع - بارش ایستگاه‌های مجاور تعیین گردید. همچنین با توجه به بازدهی‌های صحرایی به عمل آمده از محدوده، درصد تغذیه سالیانه برآورد شد. با داشتن مساحت حوضه آبرگیر و مقادیر بارش و درصد تغذیه سالیانه، حجم تغذیه سالیانه در حوضه آبرگیر مقدماتی با استفاده از معادله (۳-۵) به دست آمد. علاوه بر این، حجم تخلیه سالیانه از طریق هیدروگراف سالیانه چشمه‌ها نیز محاسبه شد. در انتها با مقایسه مقادیر حجم تغذیه و تخلیه سالیانه، دقت ترسیم حوضه آبرگیر مقدماتی بررسی و در صورت نیاز تصحیحاتی روی آن اعمال گردید.

$$A = \frac{V}{PR} \quad \text{معادله (۳-۵)}$$

در این معادله p میانگین سالیانه بارش در حوضه آبرگیر چشمه با واحد متر، R درصد نفوذ بارندگی بدون واحد، A مساحت حوضه آبرگیر با واحد متر مربع و در نهایت V میانگین تغذیه سالیانه چشمه با واحد متر مکعب می‌باشد.

فصل چهارم: بررسی وجود یا عدم وجود
ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های
کارستی منطقه

آبخوان‌های آبرفتی دارای ذخایر آب محدود هستند و برداشت بی‌رویه از این منابع در طی سال‌های گذشته باعث شده است که این آبخوان‌ها جواب‌گوی نیاز مصرفی نباشند، از این رو منابع آب موجود در سازندهای سخت مورد توجه قرار گرفته‌اند. در شمال شرق کشور بخش اعظمی از سازندهای زمین-شناسی را سازندهای کربناته تشکیل می‌دهند.

چشمه‌های کارستی خورخوری و دهگاه در حدود ۲۰ کیلومتری جنوب غرب بجنورد، و در جنوب بدرانلو واقع شده‌اند. نظر به این که چشمه خورخوری در بالادست چشمه دهگاه واقع شده است و قرار است که بخشی از آب این چشمه برای مصارف باغات به خارج از مسیر اصلی رودخانه منتقل شود، به همین منظور در این تحقیق، ارتباط هیدرولیکی بین این دو چشمه مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی منطقه، ارزیابی توسعه کارست در محدوده مورد مطالعه و تعیین حوضه‌های آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه، می‌تواند وجود و یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین چشمه خورخوری و دهگاه را نشان دهد.

۴-۱- بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی چشمه‌های کارستی منطقه

به ظهور طبیعی و متمرکز آب‌های زیرزمینی در سطح زمین، چشمه می‌گویند. یکی از مهم‌ترین عوارض هیدروژئولوژیکی مناطق کارستی، چشمه‌های کارستی می‌باشند. جهت ارزیابی ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه بر اساس خصوصیات هیدروژئولوژیکی به بررسی هیدروگراف و منحنی فرود چشمه‌های کارستی پرداخته شده است که نتایج آن در ادامه مطالب ارائه خواهد شد.

۴-۱-۱- بررسی هیدروگراف چشمه‌های کارستی منطقه

آبدهی چشمه یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد سنجش در مظهر چشمه می‌باشد که می‌توان نرخ تغییرات آن را به عنوان اولویت نخست، جهت تحلیل و ارزیابی رفتار هیدروژئولوژیکی آبخوانی که چشمه از آن تخلیه می‌شود در نظر گرفت. به طور کلی هیدروگراف چشمه نتیجه نهایی تحولات بارش و انتقال

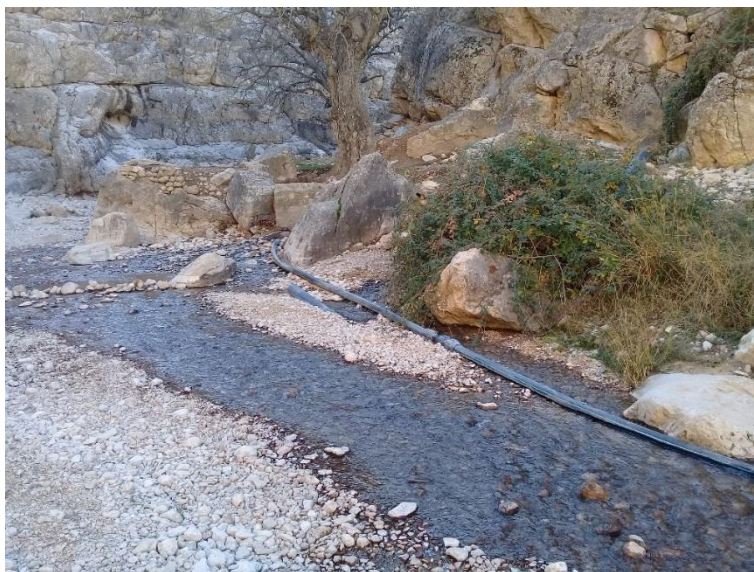
دیگر ورودی‌ها از مناطق زهکشی، به صورت یک خروجی واحد از طریق چشمه می‌باشد. شکل‌های (۱-۴)، (۲-۴) و (۳-۴) به ترتیب نمایی از چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱- نمایی از چشمه کارستی خورخوری



شکل ۴-۲- نمایی از چشمه کارستی سیدلی



شکل ۴-۳- نمایی از چشمه کارستی دهگاه

همان‌طور که اشاره شد در این مطالعه به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی از یک سری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب چشمه‌های کارستی منطقه که از تیرماه ۱۳۹۸ تا مردادماه ۱۳۹۹ اندازه‌گیری شده‌اند استفاده شده است. در فاصله زمانی مذکور، سیزده مرتبه از چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه نمونه‌برداری شد که با توجه به تغییرات اندک میزان هدایت الکتریکی، دو نمونه برای تعیین غلظت یون‌های اصلی به آزمایشگاه فرستاده شدند. جداول (۴-۱)، (۴-۲) و (۴-۳) به ترتیب مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در محل چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه را نشان می‌دهند. در این قسمت از دو پارامتر مهم (آبدهی و هدایت الکتریکی) به منظور تفسیر و تحلیل خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان کارستی منطقه استفاده شده است.

جدول ۴-۱- پارامترهای اندازه گیری شده در مظهر چشمه کارستی خورخوری

تاریخ نمونه برداری	دبی چشمه (lit/sec)	هدایت الکتریکی (μmhos/cm)	pH
۹۸/۰۴/۲۱	۱۳۵	۳۶۴	۷/۹
۹۸/۰۵/۱۸	۱۲۰	۳۶۷	-
۹۸/۰۶/۲۷	۱۰۰	۳۷۰	-
۹۸/۰۷/۲۷	۸۰	۳۷۵	۷/۹۲
۹۸/۰۸/۲۵	۶۰	۳۷۷	-
۹۸/۰۹/۲۹	۵۰	۳۸۴	-
۹۸/۱۰/۲۴	۵۵	۳۸۶	-
۹۸/۱۱/۲۶	۶۰	۳۸۲	-
۹۸/۱۲/۲۵	۷۵	۳۷۷	-
۹۹/۰۱/۲۴	۱۰۰	۳۷۴	-
۹۹/۰۲/۲۷	۱۲۰	۳۶۸	-
۹۹/۰۳/۲۴	۱۳۵	۳۶۲	-
۹۹/۰۴/۲۶	۱۳۳	۳۶۰	-
انحراف معیار	۳۳	۸/۴	۰/۰۱۴
میانگین	۹۴	۳۷۳	۷/۹۱
ضریب تغییرات (/.)	۳۵	۲/۲	۰/۱۷

جدول ۴-۲- پارامترهای اندازه گیری شده در مظهر چشمه کارستی سیدلی

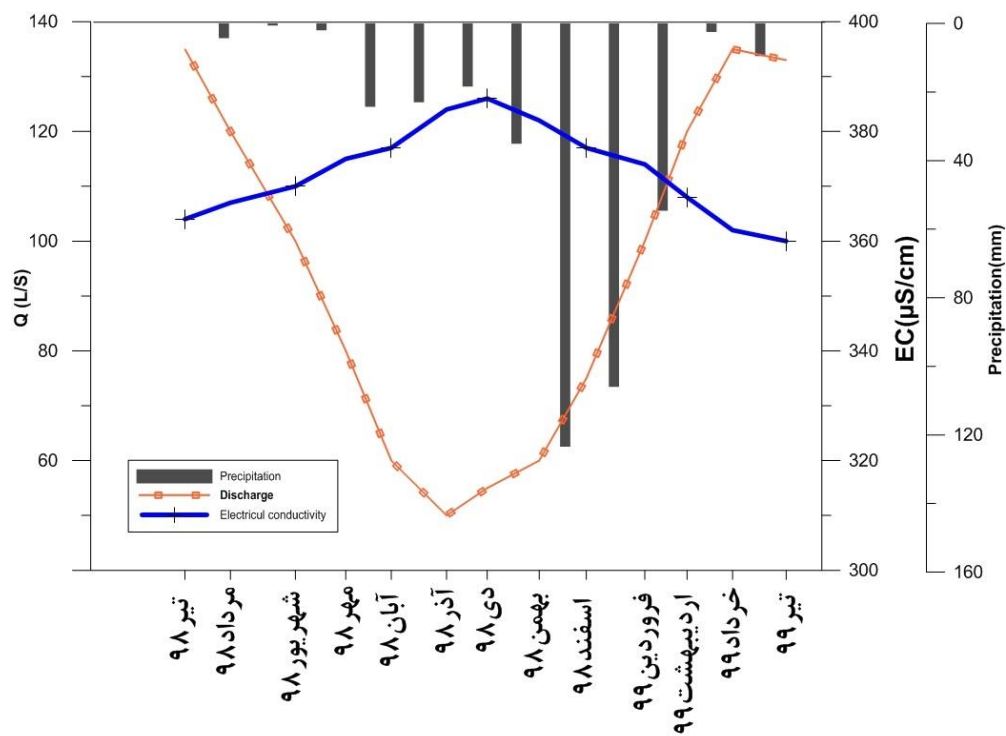
تاریخ نمونه برداری	دبی چشمه (lit/sec)	هدایت الکتریکی (μmhos/cm)	pH
۹۸/۰۴/۲۱	۸۴	۳۶۵	۷/۹۷
۹۸/۰۵/۱۸	۷۰	۳۷۳	-
۹۸/۰۶/۲۷	۵۸	۳۷۵	-
۹۸/۰۷/۲۷	۴۷	۳۸۰	۷/۹۸
۹۸/۰۸/۲۵	۴۲	۳۸۲	-
۹۸/۰۹/۲۹	۴۰	۳۸۵	-
۹۸/۱۰/۲۴	۴۳	۳۸۵	-
۹۸/۱۱/۲۶	۴۷	۳۸۰	-
۹۸/۱۲/۲۵	۵۱	۳۷۴	-
۹۹/۰۱/۲۴	۵۸	۳۷۰	-
۹۹/۰۲/۲۷	۶۸	۳۶۵	-
۹۹/۰۳/۲۴	۸۲	۳۶۸	-
۹۹/۰۴/۲۶	۸۰	۳۶۰	-
انحراف معیار	۱۶	۸/۱	۰/۰۰۷
میانگین	۵۹	۳۷۴	۷/۹۷
ضریب تغییرات	۲۷	۲/۲	۰/۰۸

جدول ۴-۳- پارامترهای اندازه گیری شده در مظهر چشمه کارستی دهگاه

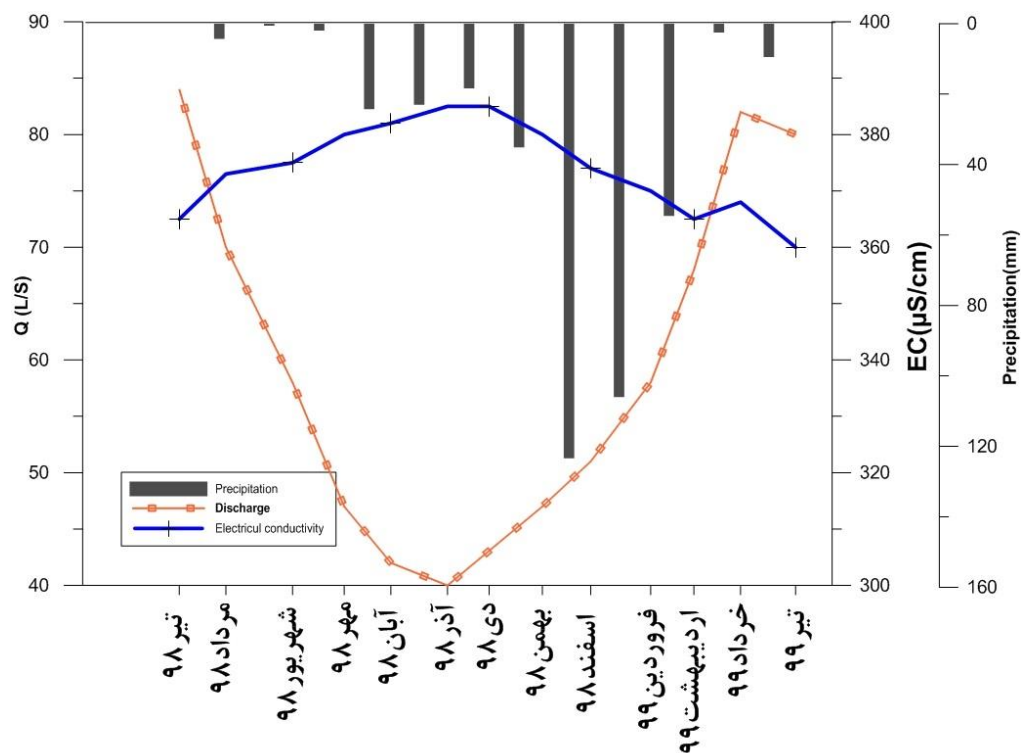
تاریخ نمونه برداری	دبی چشمه (lit/sec)	هدایت الکتریکی ($\mu\text{mhos/cm}$)	pH
۹۸/۰۴/۲۱	۲۳۵	۳۷۰	۸
۹۸/۰۵/۱۸	۲۰۰	۳۷۸	-
۹۸/۰۶/۲۷	۱۷۰	۳۸۲	-
۹۸/۰۷/۲۷	۱۳۰	۳۸۵	۸/۰۵
۹۸/۰۸/۲۵	۱۰۶	۳۸۵	-
۹۸/۰۹/۲۹	۸۴	۳۹۰	-
۹۸/۱۰/۲۴	۹۶	۳۸۸	-
۹۸/۱۱/۲۶	۱۱۰	۳۸۲	-
۹۸/۱۲/۲۵	۱۴۰	۳۷۵	-
۹۹/۰۱/۲۴	۱۸۰	۳۷۶	-
۹۹/۰۲/۲۷	۲۱۵	۳۷۰	-
۹۹/۰۳/۲۴	۲۳۰	۳۶۵	-
۹۹/۰۴/۲۶	۲۳۴	۳۵۸	-
انحراف معیار	۵۶	۹/۴	۰/۰۳۵
میانگین	۱۶۳	۳۷۷	۸/۰۲
ضریب تغییرات (/.)	۳۴	۲/۵	۰/۴۴

اشکال (۴-۴)، (۴-۵) و (۴-۶) به ترتیب هیدروگراف چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه را که بر اساس داده‌های جداول (۴-۱)، (۴-۲) و (۴-۳) ترسیم شده‌اند را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود میزان آبدهی چشمه خورخوری از ۵۰ لیتر بر ثانیه در اواخر آذرماه تا ۱۳۵ لیتر بر ثانیه در اواخر خردادماه ۱۳۹۹ تغییر می‌کند، میزان آبدهی چشمه سیدلی از ۴۰ لیتر بر ثانیه در اواخر آذرماه تا ۸۲ لیتر بر ثانیه در اواخر خردادماه ۱۳۹۹ تغییر می‌کند و میزان آبدهی چشمه دهگاه از ۸۴ لیتر بر ثانیه در اواخر آذرماه تا ۲۳۴ لیتر بر ثانیه در اواخر تیرماه ۱۳۹۹ تغییر می‌کند. از آنجایی که حداکثر تخلیه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان و فیزیوگرافی حوضه آبرگیر بستگی دارد و برای هر چشمه منحصر به فرد می‌باشد، مشاهده می‌شود که شاخه صعودی نمودار آبدهی (Rising limb) هر سه چشمه از اواخر آذر شروع شده و در اواخر خردادماه و اوایل تیرماه به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

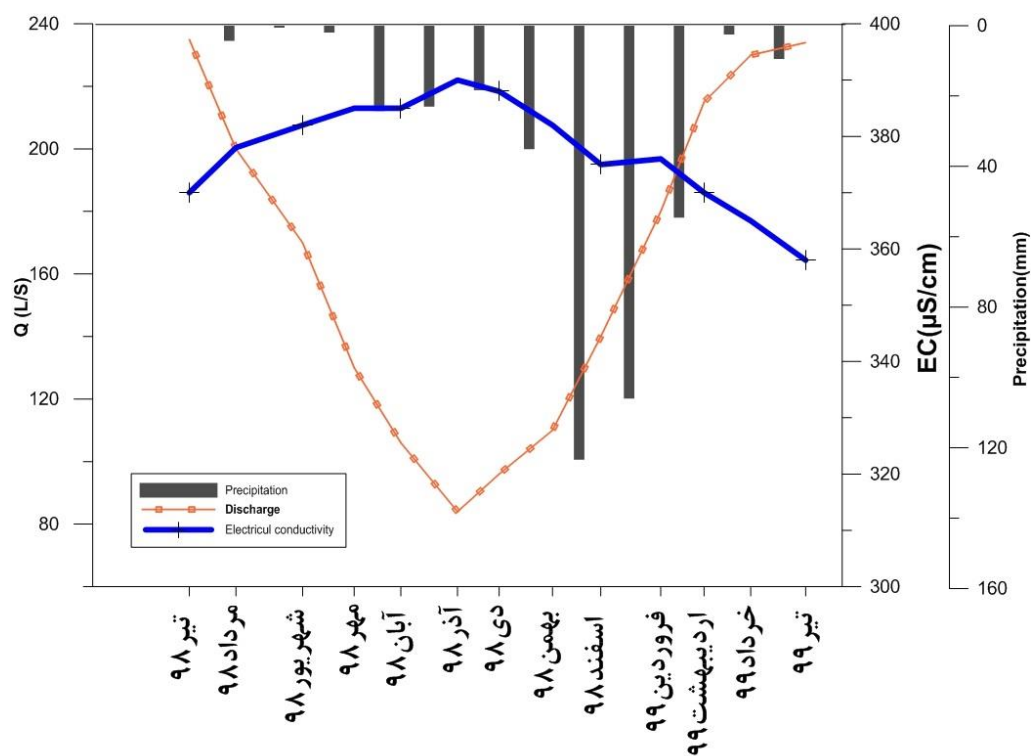
همچنین شاخه فروکش نمودارهای آبدهی (Falling limb) از اواخر خرداد تا اواخر آذرماه ادامه می‌یابد. از آنجایی که حوضه آبرگیر چشمه‌ها تا حدودی کشیده می‌باشند لذا همه مجاری فرعی انتقال دهنده جریان در آبخوان چشمه‌ها در یک زمان به مسیر اصلی تخلیه نمی‌شوند، از این رو آبدهی چشمه‌ها با یک روند منظمی کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۴- هیدروگراف چشمه کارستی خورخوری برای سال آبی ۹۸-۹۹



شکل ۴-۵- هیدروگراف چشمه کارستی سیدلی برای سال آبی ۹۸-۹۹



شکل ۴-۶- هیدروگراف چشمه کارستی دهگاه برای سال آبی ۹۸-۹۹

از دیگر کاربردهای ثبت تغییرات آبدی چشمه‌های کارستی، تعیین ارتباط بین تخلیه (آبدی) و تغذیه (بارش) می‌باشد. از آنجایی که بارندگی‌های دی‌ماه تا اسفندماه به صورت برف می‌باشند لذا با ذوب شدن برف فصل زمستان و همراه شدن آن با بارندگی‌های فروردین و اردیبهشت‌ماه، دبی چشمه‌ها افزایش یافته و در اواخر خردادماه به بیشترین مقدار خود در طول سال می‌رسد. فیزیوگرافی حوضه‌ها و در رأس آن کشیدگی آبخوان و وجود لایه‌هایی با تراوایی اندک (سازند تیرگان) عواملی هستند که زمان تمرکز آب در آبخوان و زمان بیشینه آبدی را کنترل می‌کنند.

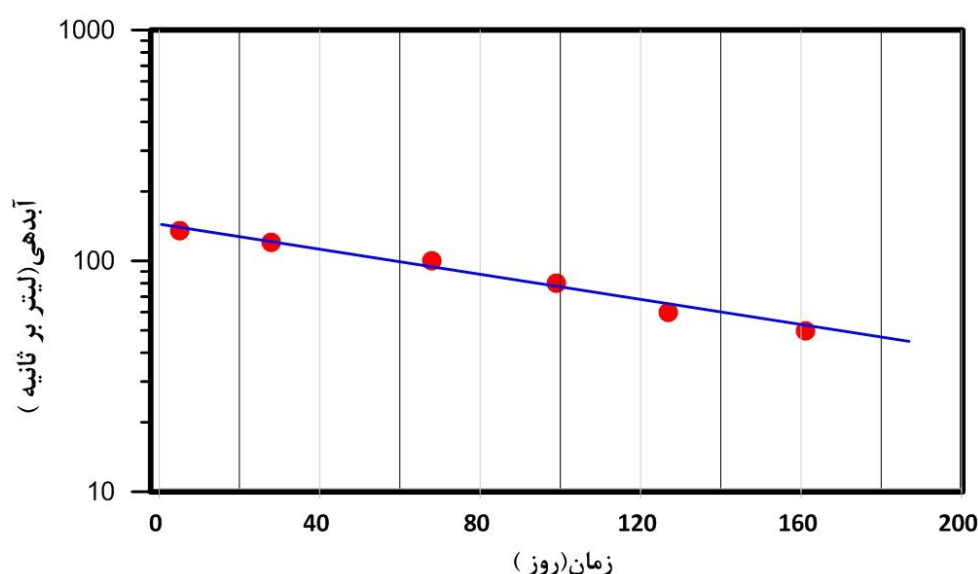
همچنین با توجه به نتایج مندرج در جداول (۱-۴)، (۲-۴) و (۳-۴) مشاهده می‌شود که میزان ضریب تغییرات آبدی این چشمه‌ها چندان بالا نبوده و برابر با ۳۵ درصد برای چشمه خورخوری، ۲۷ درصد برای چشمه سیدلی و ۳۴ درصد برای چشمه دهگاه است. با مقایسه ضریب تغییرات آبدی چشمه‌های کارستی منطقه با دیگر چشمه‌های کارستی و همچنین نتایج کارهای جاکوبسون و لانگمویر (Jacobson and Langmuir, 1974) که ضریب تغییرات دبی را برای چشمه‌های کارستی با سیستم جریان مجرای برابر با ۱۷۵ درصد و برای سیستم جریان افشان برابر با ۲۶ درصد ارائه نمودند؛ مشاهده می‌شود که این ضریب تغییرات تا حدودی بیانگر توسعه مجاری کم در توده کارستی می‌باشد. ولی با تمامی توصیفات و با در نظر گرفتن شکل حوضه‌ها و ارزیابی عوارض کارستی در حوضه‌های آبگیر چشمه‌ها، ضریب تغییرات حاصله بیانگر سیستم غالب جریان افشان - مجرای در آبخوان چشمه‌ها می‌باشد.

۴-۱-۲- بررسی منحنی فرود چشمه‌های کارستی منطقه

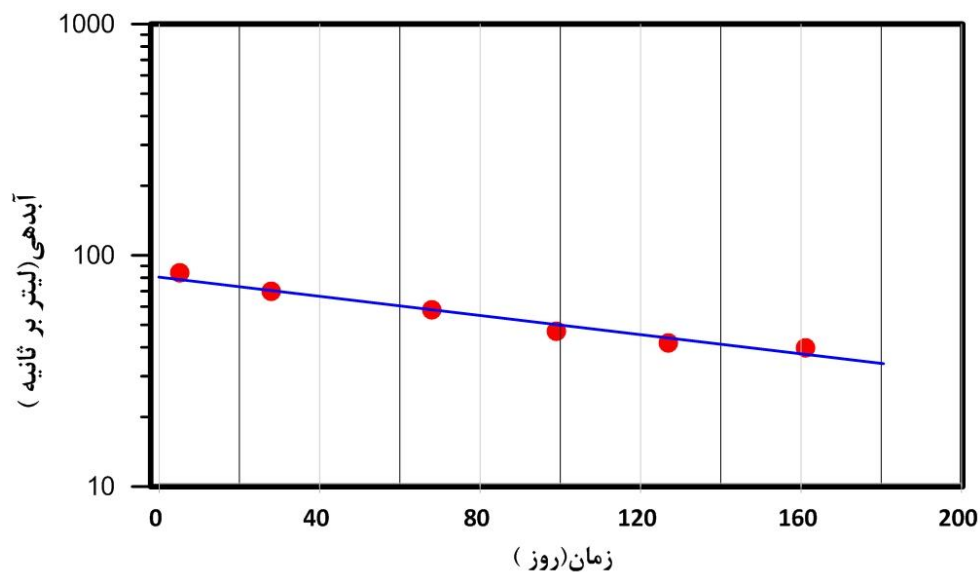
تجزیه و تحلیل منحنی فروکش یک ابزار اولیه در تحقیقات هیدروژئولوژیکی است. اگرچه استفاده از این روش به بیش از یک قرن می‌رسد، اما دائماً در حال تغییر و گسترش می‌باشد. از بخش فروکش هیدروگراف که فاقد آشفتگی‌های ناشی از ورود جریان‌های سریع به درون آبخوان است به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان دربردارنده چشمه‌های کارستی منطقه و در رأس آن ارزیابی

خصوصیات هیدروژئولوژیکی ساختاری آبخوان و محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان استفاده شده است.

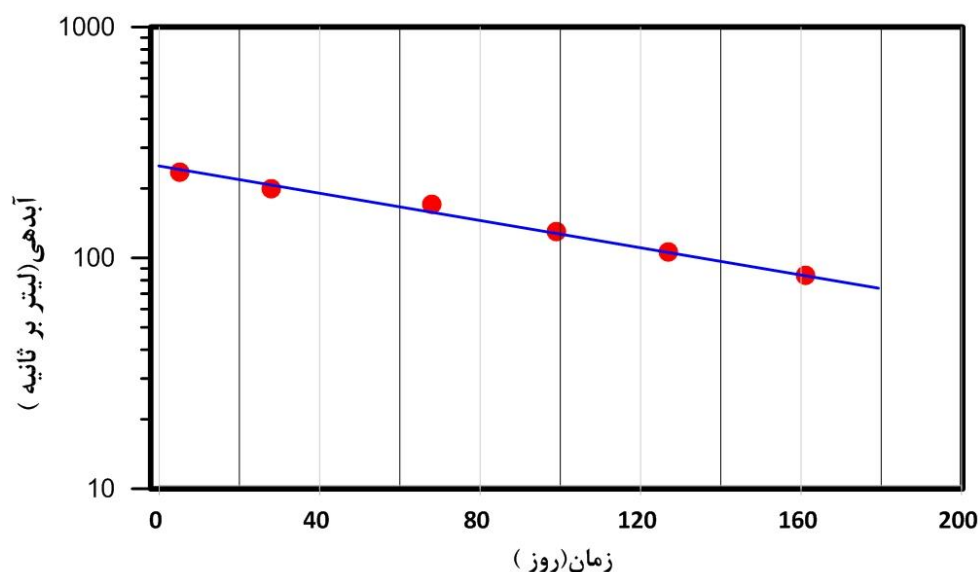
بر اساس هیدروگراف چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه و با شناسایی ابتدا و انتهای دوره فروکش (Recession) منحنی فرود یا منحنی تقلیل (Recession curve or depletion curve) چشمه‌ها ترسیم گردیده است. اشکال (۷-۴)، (۸-۴) و (۹-۴) به ترتیب منحنی فرود چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه را نشان می‌دهد. ابتدای دوره فروکش تیر ماه سال ۹۸ و انتهای دوره فروکش آذر ماه ۹۸ در نظر گرفته شده است. تخلیه در قسمت‌های اولیه منحنی فرود عمدتاً تحت تأثیر مجاری با جریان متلاطم که دارای قابلیت انتقال بالا و ذخیره پایین می‌باشند انجام می‌شود. جریان متلاطم عموماً قسمت‌های اولیه منحنی فروکش را تحت تأثیر قرار می‌دهد و تأثیرات آن با تخلیه چشمه‌ها کاهش می‌یابد. آب قسمت‌های بعدی منحنی فرود چشمه‌ها، عمدتاً تحت تأثیر خلل و فرج کوچکتر از یک میلی‌متر با جریان آرام که دارای قابلیت انتقال اندک ولی ذخیره‌سازی نسبتاً بالا می‌باشند تأمین می‌شود. از عوامل موثر بر منحنی فرود چشمه‌ها می‌توان به باقی ماندن برف در انتهای حوضه تا زمان طولانی، وجود سازند تیرگان با تراوایی کم و همچنین به کشیدگی حوضه آبگیر چشمه‌ها اشاره نمود.



شکل ۷-۴- منحنی فرود چشمه کارستی خورخوری در سال آبی ۹۸



شکل ۸-۴- منحنی فرود چشمه کارستی سیدلی در سال آبی ۹۸



شکل ۹-۴- منحنی فرود چشمه کارستی دهگاه در سال آبی ۹۸

به منظور محاسبه ضریب فرود چشمه‌های کارستی منطقه از معادله (۴-۱)، که بر اساس مطالعات مایلت و بوسینگ (Maillet, 1905, Boussinesq, 1903 and 1904) حاصل شده، استفاده گردیده است. این محققین با فرض بر این که تخلیه چشمه، تابعی از حجم آب ذخیره شده در مخزن است (جریان ورودی صفر است) آن را به شکل معادله نمایی نشان دادند (Ford and Wolliams, 2007).

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad \text{معادله (۱-۴)}$$

در این معادله Q_t آبدهی در زمان (t) ، Q_0 آبدهی در زمان صفر (t_0) ، e پایه لگاریتم طبیعی (نپرین) و α ضریب فروکش می‌باشد. شکل لگاریتمی معادله (۱-۴) به صورت زیر می‌باشد.

$$\alpha = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{0.4343(t_2 - t_1)} \quad \text{معادله (۲-۴)}$$

ضریب فروکش میزان توانایی آبخوان در ذخیره‌سازی آب را نشان می‌دهد و تابع تخلخل موثر، قابلیت انتقال، شکل حوضه آگیر، وضعیت سطح پتانسیومتری و تغذیه از آبخوان‌های دیگر می‌باشد. بر اساس دیدگاه میلانویچ (Milanovic, 1981) هنگامی که منحنی فروکش دارای شیب کم باشد، این حالت می‌تواند بر ذخیره دینامیکی زیاد آبخوان دلالت نماید که چشمه‌ها در این نوع آبخوان‌ها اکثراً دائمی هستند. بر عکس وقتی که ضریب α زیاد باشد، منحنی فرود دارای شیب تند بوده و ذخایر دینامیکی در این حالت موقتی بوده و چشمه خیلی سریع تخلیه می‌شود. به طور کلی، هنگامی که ضریب فروکش مرتبه 10^{-2} داشته باشد، نشان دهنده‌ی زهکشی سریع شکستگی‌ها و مجاری کارستی می‌باشد و هنگامی که این ضریب کوچکتر باشد (مرتبه 10^{-3}) نشان دهنده‌ی تخلیه حفرات و دررزه و شکستگی‌های ریز می‌باشد. به طور کلی بهتر است تحلیل ضرایب فروکش همراه با در نظر گرفتن شرایط فیزیوگرافی حوضه آگیر (شکل و شیب حوضه) و تراوایی لایه‌های کربناته آبخوان بررسی شود چرا که زمان انتقال آب در حوضه‌های کشیده، لایه‌های کم تراوا و تغذیه از آبخوان‌های مجاور می‌تواند ضرایب فروکشی با مرتبه کوچکتر و در حوضه‌های گرد و با تراوایی بالا عکس این حالت را ایجاد نماید.

بر اساس محاسبات انجام شده، ضریب فرود چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه در طول فروکش ۱۶۱ روزه به ترتیب برابر با ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶ می‌باشد و از عوامل موثر بر آن می‌توان همان دلایل قبلی را که برای منحنی فرود گفته شد را مطرح نمود.

۴-۲- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی چشمه‌های کارستی منطقه

آب زیرزمینی در آبخوان‌های مرتفع کارستی از آب‌های بارن و برفی که به درون آن نفوذ کرده، به وجود می‌آیند. خصوصیات هیدروژئوشیمیایی آب‌های کارستی عموماً وابسته به انحلال کانی‌های کربناته شامل کلسیت، دولومیت و آراگونیت می‌باشد. با افزایش زمان ماندگاری آب در آبخوان و در امتداد خطوط جریان از منطقه تغذیه به سمت منطقه تخلیه، شیمی آن توسط انواع گوناگونی از فرایندهای ژئوشیمیایی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین لازم است جهت انجام مطالعات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی، ویژگی‌های شیمیایی منابع آب نیز مورد مطالعه قرار گیرند. همچنین مطالعات نمودارهای کیفی می‌تواند به عنوان مکمل و در کنار پارامترهای کمی (آبدهی) به منظور تحلیل و ارزیابی بهتر آبخوان مورد استفاده قرار گیرند. در این قسمت تغییرات کمی آب (هیدروگراف) چشمه‌های کارستی منطقه، همزمان با تغییرات کیفی آن به منظور تشخیص منشأ تغذیه، تشخیص رژیم جریان و کیفیت هیدروژئوشیمیایی آب چشمه‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۴-۲-۱- بررسی تغییرات زمانی هدایت الکتریکی چشمه‌های کارستی

هدایت الکتریکی (EC) و روند تغییرات آن همواره نشان دهنده زمان ماندگاری آب در آبخوان و جنس سازند دربرگیرنده آن می‌باشد که میزان آن به غلظت، نوع یون‌های محلول و دما بستگی دارد و با افزایش زمان ماندگاری، غلظت یون‌های دربردارنده آب و در پی آن هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. هدایت الکتریکی نماینده‌ای از کل املاح محلول بوده و یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفی در مطالعات منابع آب به شمار می‌رود. آبدهی از جمله پارامترهایی است که معمولاً تغییرات آن را با روند تغییرات هدایت الکتریکی مقایسه می‌کنند.

با توجه به نتایج مندرج در جداول (۴-۱)، (۴-۲) و (۴-۳) مشاهده می‌شود که میزان ضریب تغییرات هدایت الکتریکی بسیار ناچیز است. به طور کلی تغییرات هدایت الکتریکی در بسیاری از چشمه‌های کارستی، حتی چشمه‌های کارستی که سیستم غالب جریان مجرای است، بسیار ناچیز است. پس این

چنین می‌توان گفت که ضریب تغییرات هدایت الکتریکی چشمه‌های کارستی منطقه بیانگر سیستم غالب جریان افشان - مجرای در آبخوان چشمه‌ها می‌باشد.

به طور کلی در سیستم‌های کارستی تغییرات هدایت الکتریکی نسبت به آبدی دو حالت می‌تواند داشته باشد؛ در اولین حالت دبی پس از یک بارش شدید در یک دوره کوتاه افزایش یافته و پس از رسیدن به اوج، به آرامی کاهش می‌یابد. در این دوره هدایت الکتریکی آب چشمه بعد از بارندگی به دلیل رانده شدن آب‌های قبلی موجود در ناحیه اشباع و مجاری کارستی که زمان ماندگاری زیاد داشته افزایش می‌یابد (Flashing period)، سپس هدایت الکتریکی شروع به کاهش نموده و به حداقل می‌رسد در نهایت به تدریج هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد زیرا آب ورودی بارندگی در سیستم کارستی فرصت کافی برای رسیدن به تعادل با سفره را داشته و به شرایط قبل از بارندگی نزدیک می‌گردد. این حالت نشانگر مشارکت آب بارش در آبدی چشمه است (Dilution period). در دومین حالت با رسیدن دبی به اوج، هدایت الکتریکی آب چشمه به دلیل مشارکت آب بارندگی که به سرعت از طریق مجاری توسعه یافته با زمان ماندگاری کم انتقال می‌یابد کاهش یافته و با کاهش آبدی هدایت الکتریکی دوباره به حالت اولیه باز می‌گردد. با استفاده از اطلاعات مندرج در جداول (۱-۴)، (۲-۴) و (۳-۴) نمودار تغییرات هدایت الکتریکی و آبدی چشمه‌های کارستی منطقه برای سال آبی ۹۸-۹۹ ترسیم شده است (اشکال ۴-۴، ۵-۴ و ۶-۴).

در نمودارهای نمایش داده شده به روشنی مشاهده می‌شود که هدایت الکتریکی با آبدی رابطه عکس داشته به طوری که با کاهش آبدی، هدایت الکتریکی روند افزایشی از خود نشان می‌دهد و با افزایش آبدی، هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد. با افزایش آبدی و رسیدن دبی به اوج، هدایت الکتریکی آب چشمه‌ها به دلیل مشارکت آب بارندگی که با سرعت بیشتری از طریق مجاری توسعه یافته با زمان ماندگاری کم انتقال می‌یابد، کاهش یافته و با کاهش آبدی، هدایت الکتریکی دوباره به حالت اولیه خود باز می‌گردد.

۴-۲-۲- بررسی غلظت یون‌های اصلی در چشمه‌های کارستی

غلظت یون‌های محلول (کاتیون‌ها و آنیون‌ها) در آب‌های زیرزمینی به زمان ماندگاری آب در بخش‌های مختلف آبخوان، جنس آبخوان، نوع سیستم جریان و مسافتی که آب از محل تغذیه تا محل تخلیه طی می‌کند بستگی دارد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در فاصله زمانی تیرماه ۱۳۹۸ تا مردادماه ۱۳۹۹، سیزده مرتبه از چشمه‌های کارستی منطقه نمونه‌برداری شده است و با توجه به تغییرات بسیار اندک EC اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها لذا تنها یک نمونه از فصل تر و یک نمونه از فصل خشک، برای تعیین مقادیر غلظت یون‌های اصلی به آزمایشگاه انتقال داده شده‌اند. روند تغییرات زمانی یون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر و خطای آزمایش برای هر نمونه در جداول (۴-۴، ۴-۵ و ۴-۶) ارائه شده است.

جدول ۴-۴- غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی چشمه کارستی خورخوری (بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر)

تاریخ نمونه‌برداری	غلظت آنیون‌ها (meq/lit)			غلظت کاتیون‌ها (meq/lit)				خطای آزمایش (%)
	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	
۹۸/۰۴/۲۱	۰/۲	۰/۱۸	۳/۱	۰/۰۱	۰/۲۱	۰/۶	۲/۶	۱/۷
۹۸/۰۷/۲۷	۰/۲۱	۰/۲۱	۳/۴	۰/۰۱	۰/۲۳	۰/۷	۲/۸	۲/۱

جدول ۴-۵- غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی چشمه کارستی سیدلی (بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر)

تاریخ نمونه‌برداری	غلظت آنیون‌ها (meq/lit)			غلظت کاتیون‌ها (meq/lit)				خطای آزمایش (%)
	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	
۹۸/۰۴/۲۱	۰/۲۱	۰/۲	۳/۱	۰/۰۱	۰/۲۱	۰/۶	۲/۶	۲/۶
۹۸/۰۷/۲۷	۰/۲۲	۰/۲۲	۳/۴	۰/۰۱	۰/۲۴	۰/۷	۲/۹	۰/۲۶

جدول ۴-۶- غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های اصلی چشمه کارستی دهگاه (بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر)

تاریخ نمونه‌برداری	غلظت آنیون‌ها (meq/lit)			غلظت کاتیون‌ها (meq/lit)				خطای آزمایش (%)
	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	
۹۸/۰۴/۲۱	۰/۲۲	۰/۲۲	۳/۲	۰/۰۱	۰/۲۱	۰/۷	۲/۶	۳/۳۵
۹۸/۰۷/۲۷	۰/۲۲	۰/۲۳	۳/۵	۰/۰۱	۰/۲۵	۰/۸	۲/۸	۲/۳

همان طور که در جداول دیده می شود تغییرات غلظت یون ها در نمونه ها بسیار اندک می باشد به طوری که کم ترین تغییرات در یون های سولفات، پتاسیم و کلسیم و بیشترین تغییرات در یون های منیزیم، کالر، بی کربنات و سدیم مشاهده می شود همچنین لازم به ذکر است که یون های کلسیم، منیزیم و بی کربنات بیشتر از ۹۰ درصد از غلظت یون های هر نمونه را به خود اختصاص داده اند. البته از دلایل تغییرات زیاد یون کالر می توان به ناچیز بودن غلظت آن اشاره نمود که در محاسبات خطای بیشتری از خود نشان می دهد.

۴-۲-۳- بررسی غلظت عناصر فرعی در چشمه های کارستی

جهت اندازه گیری عناصر فرعی، نمونه آب چشمه های منطقه طی یک نوبت به موسسه مطالعات معدنی زرآما شعبه مشهد ارسال شدند و غلظت عناصر فرعی مختلف به روش ICP اندازه گیری شد. در جدول ۴-۷ غلظت عناصر فرعی نمونه آب چشمه های خورخوری، سیدلی و دهگاه بر حسب میکروگرم بر لیتر ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود غلظت عناصر فرعی در نمونه آب چشمه های کارستی منطقه بسیار اندک می باشد.

جدول ۴-۷- غلظت عناصر فرعی در چشمه های کارستی منطقه (بر حسب میکروگرم بر لیتر)

عنصر	Ag	As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
دهگاه	<۰/۵	<۱	۵/۴۸	<۰/۲	<۰/۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۰/۱	<۱	<۰/۱
خورخوری	<۰/۵	<۱	۶/۰۳	<۰/۲	<۰/۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۰/۱	<۱	<۰/۱
سیدلی	<۰/۵	<۱	۵/۷۵	<۰/۲	<۰/۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۰/۱	<۱	<۰/۱

عنصر	Eu	Gd	In	La	Li	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Pr
دهگاه	<۰/۱	<۰/۵	<۰/۵	<۱	<۱	<۰/۱	<۱	۰/۱	<۰/۵	۱/۳۲	<۱	<۰/۱
خورخوری	<۰/۱	<۰/۵	<۰/۵	<۱	<۱	<۰/۱	<۱	<۰/۱	<۰/۵	۰/۹۴	<۱	<۰/۱
سیدلی	<۰/۱	<۰/۵	<۰/۵	<۱	<۱	<۰/۱	<۱	<۰/۱	<۰/۵	۱/۱۲	<۱	<۰/۱

عنصر	Rb	Sb	Sc	Se	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Te	Th	Ti
دهگاه	<۱	<۱	<۱	<۱	<۰/۱	<۱	۰/۳۳	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۱	<۰/۰/۱
خورخوری	<۱	<۱	<۱	<۱	<۰/۱	<۱	۰/۳۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۱	<۰/۰/۱
سیدلی	<۱	<۱	<۱	<۱	<۰/۱	<۱	۰/۳۱	<۰/۱	<۰/۱	<۰/۱	<۱	<۰/۰/۱

عنصر	Tl	U	V	W	Y	Yb	Zn
دهگاه	<۰/۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱
خورخوری	<۰/۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱
سیدلی	<۰/۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱	<۱

۴-۲-۴ پارامترهای محاسباتی کیفی در چشمه‌های کارستی

با توجه به غلظت یون‌های اصلی (کاتیون‌ها و آنیون‌ها) برخی پارامترهای کیفی ثانویه از قبیل کل جامدات محلول (TDS)، درصد سدیم (%Na)، درصد جذب سدیم (SAR)، نسبت کلسیم به منیزیم (Ca/Mg) و شاخص‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژپس و هالیت برای نمونه‌های برداشت شده از چشمه‌های کارستی منطقه محاسبه و نتایج حاصله در جدول (۴-۸، ۴-۹ و ۴-۱۰) ارائه شده است.

جدول ۴-۸- پارامترهای کیفی محاسبه شده برای نمونه‌های برداشته شده از چشمه خورخوری

شاخص‌های اشباع				$\frac{Ca}{Mg}$	SAR	درصد سدیم	کل مواد جامد محلول (mg/L)	تاریخ نمونه‌برداری
کلسیم	سدیم	کل	مجموعه					
-۲/۴۹	-۵/۲۶	-۵/۳۴	-۱۱/۹۳	۲/۶۲۸	۰/۱۶	۶/۴۳	۷	۹۸/۰۴/۲۱
-۲/۴۵	-۵/۱۵	-۵/۲۹	-۱۱/۸۲	۲/۴۲۶	۰/۱۷	۶/۴۱	۸	۹۸/۰۷/۲۷

جدول ۴-۹- پارامترهای کیفی محاسبه شده برای نمونه‌های برداشته شده از چشمه سیدلی

شاخص‌های اشباع				$\frac{Ca}{Mg}$	SAR	درصد سدیم	کل مواد جامد محلول (mg/L)	تاریخ نمونه‌برداری
کلسیم	سدیم	کل	مجموعه					
-۲/۴۵	-۵/۱۸	-۵/۳۲	-۱۱/۸۸	۲/۶۲۸	۰/۱۶	۶/۴۳	۷	۹۸/۰۴/۲۱
-۲/۳۶	-۴/۹۹	-۵/۲۶	-۱۱/۷۹	۲/۵۱۲	۰/۱۷	۶/۴۹	۸	۹۸/۰۷/۲۷

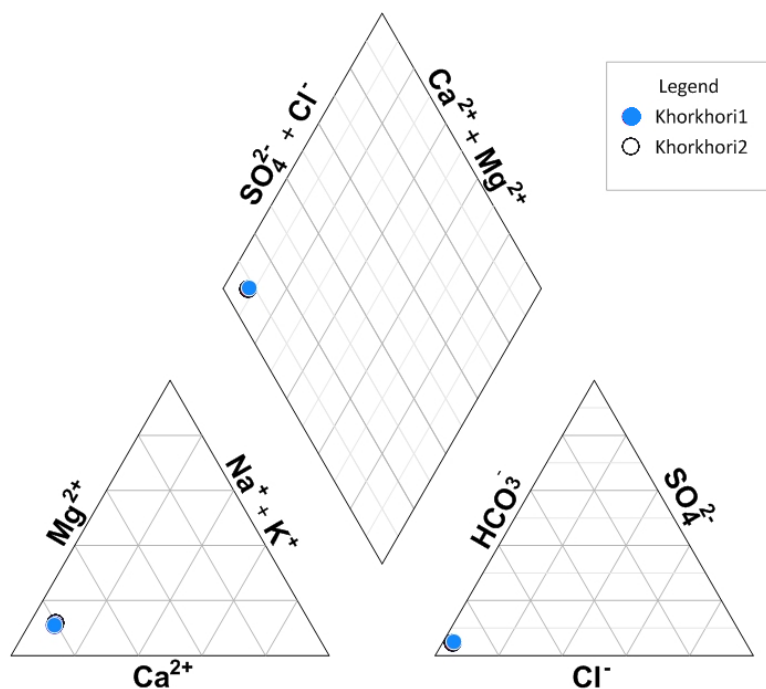
جدول ۴-۱۰- پارامترهای کیفی محاسبه شده برای نمونه‌های برداشته شده از چشمه دهگاه

شاخص‌های اشباع				$\frac{Ca}{Mg}$	SAR	درصد سدیم	کل مواد جامد محلول (mg/L)	تاریخ نمونه‌برداری
کلسیم	سدیم	کل	مجموعه					
-۲/۴۲	-۵/۰۷	-۵/۳	-۱۱/۸۴	۲/۲۵۲	۰/۱۶	۶/۲۵	۷	۹۸/۰۴/۲۱
-۲/۳۹	-۴/۹۸	-۵/۲۷	-۱۱/۷۵	۲/۱۲۲	۰/۱۸	۶/۷۳	۸	۹۸/۰۷/۲۷

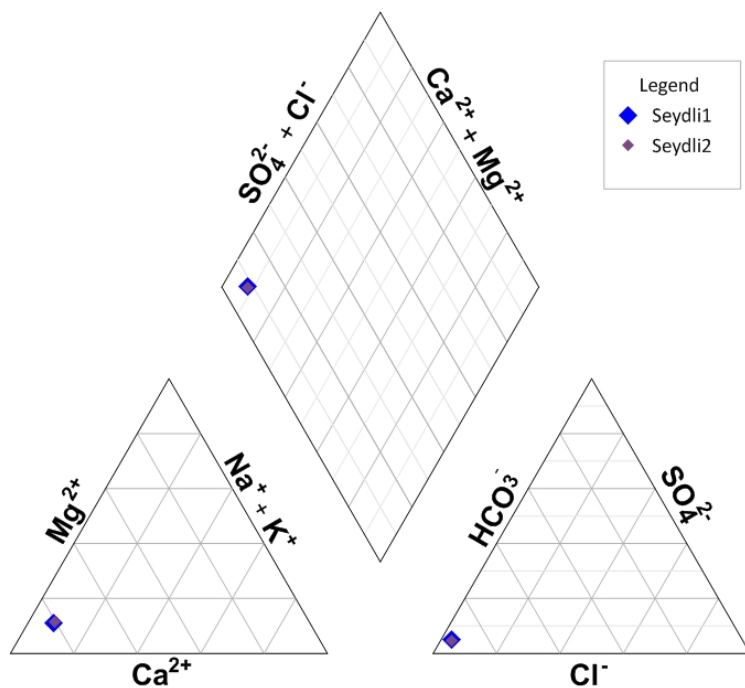
۴-۲-۵- ارزیابی رخصاره‌های هیدروژئوشیمیایی در چشمه‌های کارستی

یکی از کاربردی‌ترین نمودارهای گرافیکی که به منظور ارزیابی کیفی آب مورد استفاده قرار می‌گیرد نمودار پایپر (Piper) است. نمودار پایپر به منظور تعیین نوع آب، رسوب‌گذاری یا انحلال، تبادل یونی، بررسی زون‌های غالب کاتیونی و آنیونی و همچنین تفاوت و شباهت بین نمونه‌ها استفاده می‌شود.

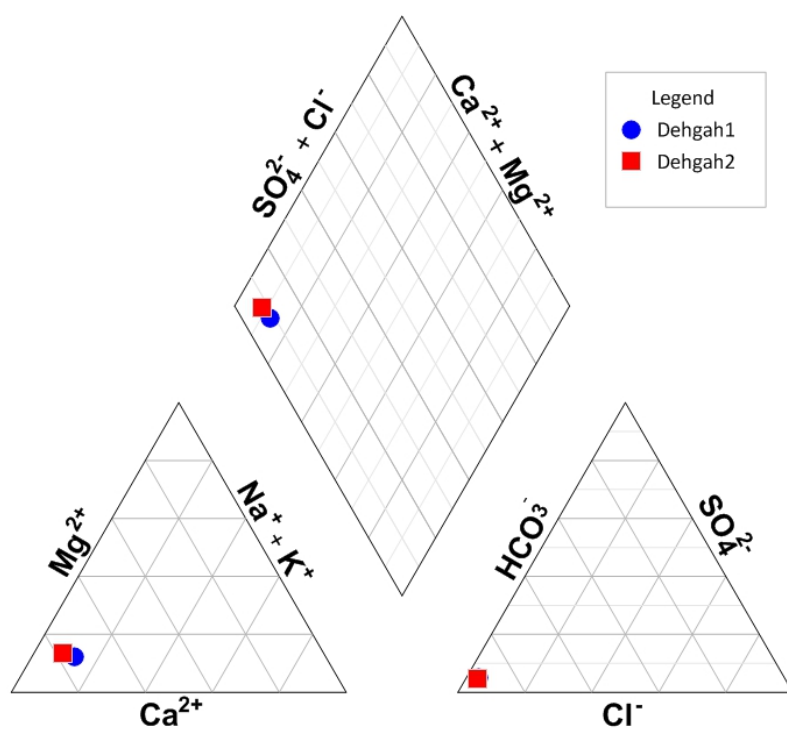
بدین منظور، نمودار پایپر برای نمونه‌های آب برداشت شده از چشمه‌ها ترسیم گردید. اشکال (۴-۱۰، ۴-۱۱ و ۴-۱۲) به ترتیب نمودار پایپر ترسیم شده برای چشمه‌های خورخوری، سیدلی و دهگاه را نشان می‌دهند. شماره ۱ مربوط به نمونه تیرماه ۹۸ و شماره ۲ مربوط به نمونه مهرماه ۹۸ می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌ها مشهود است تغییرات غلظت همه کاتیون‌ها و آنیون‌ها در نمودارهای ترسیم شده بسیار ناچیز است، که تیپ آب چشمه‌ها را در رده رخساره غالب بی‌کربنات کلسیک قرار می‌دهد. به طور کلی آب‌هایی که در این بخش از نمودار پایپر، قرار می‌گیرند غنی از $\text{Ca} + \text{Mg}$ و HCO_3 می‌باشند و محدوده‌ای با سختی موقت را به وجود می‌آورند. همچنین موقعیت قرار گیری کاتیون منیزیم در مثلث سمت چپ به وضوح نشان دهنده سنگ منشأ آهکی چشمه‌های کارستی منطقه می‌باشد.



شکل ۴-۱۰- نمودار پایپر مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه خورخوری



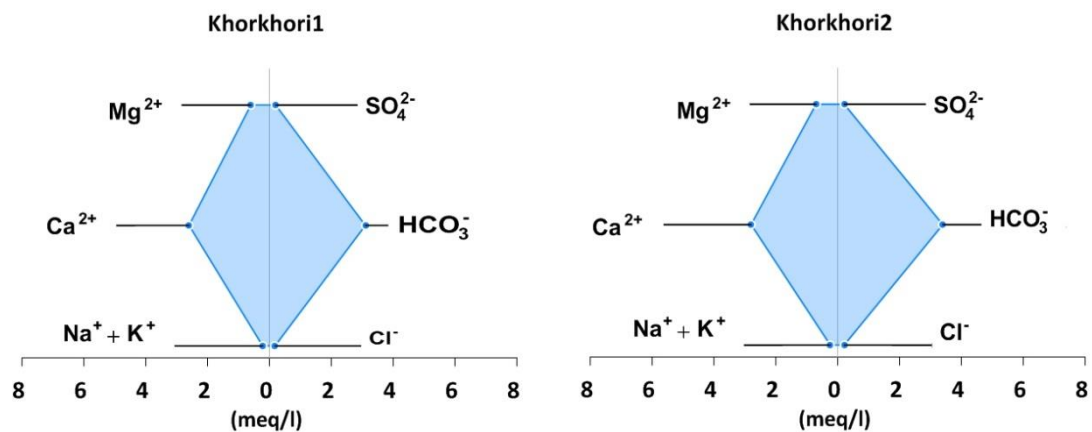
شکل ۴-۱۱- نمودار پایپر مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه سیدلی



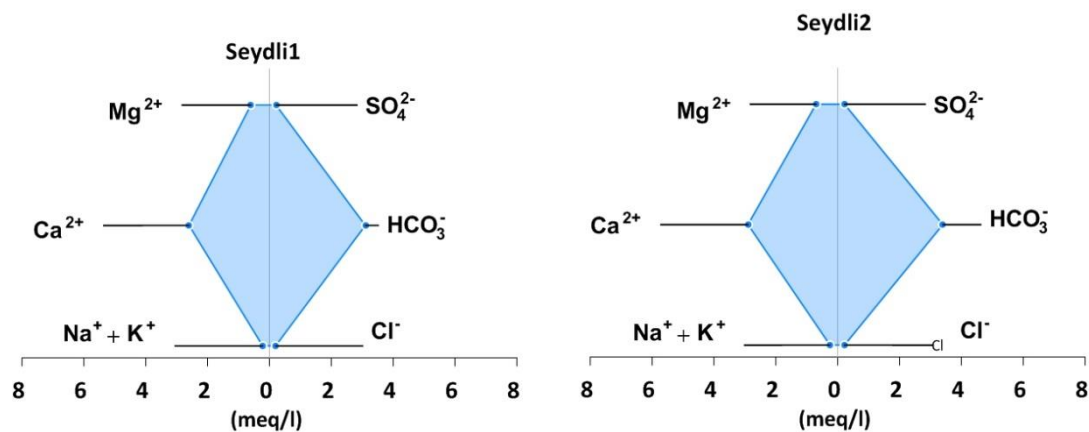
شکل ۴-۱۲- نمودار پایپر مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه دهگاه

در ادامه به منظور بررسی هرچه بهتر تیپ نمونه آب چشمه‌ها، از نمودار استیف (Stiff) نیز استفاده شده است. در این نمودار، هر نمونه آب به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد و در آن غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر بر روی محور افقی رسم می‌گردد. اشکال (۴-۱۳، ۴-۱۴ و ۴-۱۵) به ترتیب نمودار استیف ترسیم شده با استفاده از نرم‌افزار Grapher برای چشمه‌های خورخوری، سیدلی و دهگاه را نشان می‌دهند. شماره ۱ مربوط به نمونه تیرماه ۹۸ و شماره ۲ مربوط به نمونه مهرماه ۹۸ می‌باشد.

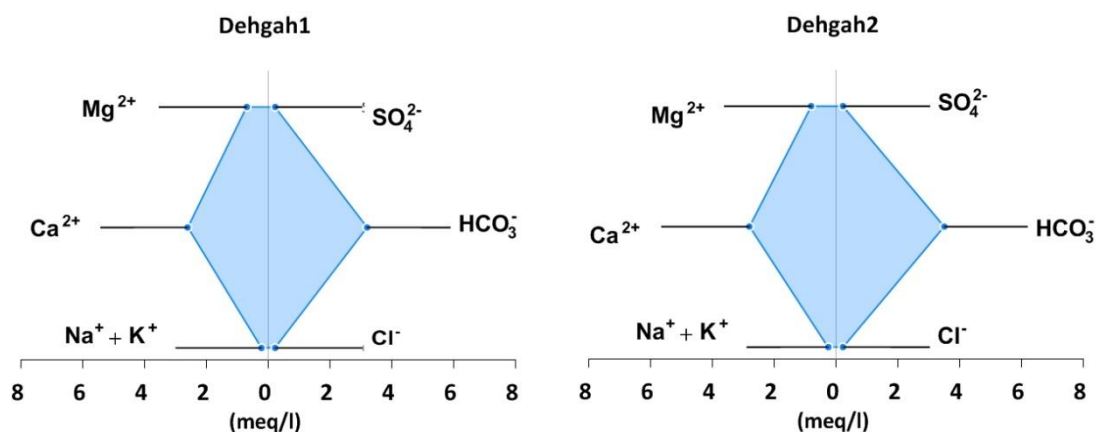
همان‌طور که در نمودارهای استیف مشخص است بیشتر نمونه‌ها دارای آنیون غالب بی‌کربنات و کاتیون غالب کلسیم می‌باشند و به عبارتی تیپ آب چشمه‌های منطقه بیکربنات کلسیک است. همچنین نمودارهای ترسیم شده به نوعی نشان دهنده‌ی آبخوانی با لیتولوژی آهکی برای چشمه‌های کارستی منطقه هستند.



شکل ۴-۱۳- نمودار استیف مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه خورخوری



شکل ۴-۱۴- نمودار استیف مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه سیدلی

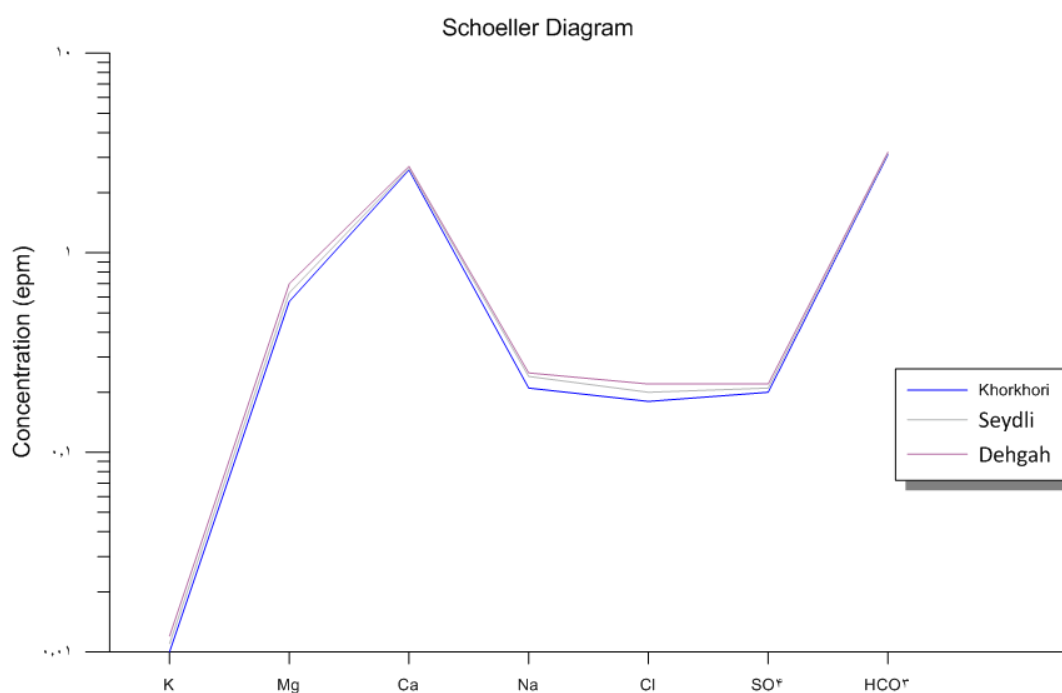


شکل ۴-۱۵- نمودار استیف مربوط به نمونه‌های تیرماه (۱) و مهرماه (۲)، سال ۹۸ چشمه دهگاه

نمودار شولر به منظور بررسی یکسان بودن یا نبودن منشأ نمونه‌ها، بررسی روند تغییرات مقادیر یون‌های اصلی موجود در نمونه‌های آب‌یرزمینی و نیز مقایسه تعداد زیادی نمونه آب مورد استفاده قرار می‌گیرد. آنیون‌ها (سولفات، کلر و بی‌کربنات) و کاتیون‌های اصلی (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم) بر

روی محور افقی نمودار قرار می‌گیرند و غلظت هر کدام از یون‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر روی محور لگاریتمی نمایش داده می‌شود.

با توجه به نیمه‌لگاریتمی بودن نمودار شولر، خطوط موازی در این نمودار نمایانگر داشتن روند مشابه و در نتیجه یکسان بودن منشأ آب مربوط به نمونه‌های برداشت شده است (Todd and Mays, 2005). شکل (۴-۱۶) نمودار شولر نمونه آب چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶- نمودار شولر نمونه‌های چشمه‌های کارستی منطقه

بر اساس نمودار شولر ترسیم شده مشاهده می‌شود که تغییرات یون‌های اصلی در نمونه‌های برداشت شده از هر سه چشمه روند مشابهی را نشان می‌دهد، که این روند یکسان می‌تواند ناشی از منشأ یکسان نمونه‌ها و وسعت کم آبخوان‌های موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه باشد. کاتیون کلسیم و آنیون بی‌کربنات، یون‌های غالب موجود در نمونه آب چشمه‌ها می‌باشند.

۴-۲-۶- ارزیابی فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان

به منظور بررسی فرآیندهای ژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان چشمه‌های کارستی منطقه، از نمایه‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت استفاده شده است.

برای محاسبه این نمایه‌ها از نرم‌افزار Phree qc استفاده شده است. به طور کلی رابطه بین شاخص اشباع و اکتیویته یون‌ها به صورت معادله (۳-۴) است.

$$SI = \text{Log}\left[\frac{IAP}{K_{SP}}\right] \quad \text{معادله (۳-۴)}$$

در رابطه فوق SI نمایه اشباع و K_{SP} حاصل ضرب انحلال نامیده می‌شود و در حالت تعادل IAP برابر با K_{SP} بوده و نمایه اشباع (SI) برابر با صفر می‌باشد. نمایه اشباع منفی و مثبت به ترتیب برای حالتی است که محلول تحت اشباع و فوق اشباع باشد. مقادیر نمایه‌های اشباع کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت نمونه‌های آب چشمه‌های کارستی منطقه برای نمونه‌های برداشتی تیرماه و مهرماه ۱۳۹۸ در جداول (۷-۴، ۸-۴ و ۹-۴) ارائه شده است.

همان‌طور که در جداول مذکور ملاحظه می‌شود نمایه‌های اشباع همه نمونه‌های برداشتی از چشمه‌های منطقه نسبت به کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت تحت اشباع می‌باشند. حداقل نمایه‌های اشباع مربوط به نمونه‌های مهرماه و حداکثر مقادیر برای نمونه‌های تیرماه می‌باشند.

همان‌طور که در فصل‌های قبل اشاره شد آبخوان چشمه‌های کارستی منطقه به طور غالب از سازنده‌های آهکی تریاس میانی و سازند آهکی تیرگان تشکیل شده است. بنابراین می‌توان استنباط نمود که در این آبخوان تا حدودی انحلال کانی کلسیت صورت گرفته است. همچنین از دلایل تحت اشباع بودن نمونه‌ها نسبت به کانی‌های دولومیت، هالیت و ژیپس عدم وجود سازندهایی از این نوع کانی‌ها و ثابت تعادلی بسیار بالای آنها می‌باشد.

۴-۳- ارزیابی توسعه کارست در منطقه مورد مطالعه

ژئومورفولوژی آبخوان کارستی طیف وسیعی از لندفرم‌ها (Landform) را شامل می‌شود که از ساده‌ترین و سطحی‌ترین آن‌ها مانند کارن تا تحول یافته‌ترین آن‌ها که غارها و پلیه‌ها هستند را در بر می‌گیرد (Coper et al. 2011). با توجه به اهمیت بسیار بالای منابع آب کارستی در کشور، شناخت پدیده‌های ژئومورفولوژیکی کارست به منظور تشخیص میزان توسعه کارست بسیار ضروری می‌باشد. مطالعه پدیده‌های ژئومورفولوژیکی مناطق کارستی، در شناخت وضعیت هیدروژئولوژیکی سنگ‌های کربناته و تبخیری و نیز نقش آن‌ها در ارتباط با تغذیه و تخلیه حوضه‌های کارستی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (کریمی وردنجان‌ی ۱۳۸۹). بارزترین نتیجه پدیده کارستی شدن، مورفولوژی خاصی است که مناطق کارستی را از نواحی دیگر کاملاً متمایز می‌سازد. از آنجایی که اشکال کارستی و تکامل تدریجی آن‌ها نتیجه مستقیم عمل انحلال آب در محیط‌های کربناته انحلال‌پذیر می‌باشد لذا درک کامل مورفولوژی این مناطق پیش‌نیازی برای حل یک‌سری از مسائل هیدروژئولوژیکی است (Millanovic 1981).

انحلال سنگ‌ها، پدیده‌های مورفولوژیکی خاصی را با ابعاد کمتر از یک میلی‌متر (میکروکارن‌های کوچک) تا بیش از چندین کیلومتر (پلیه‌ها) ایجاد می‌نماید. به طور کلی انحلال در سطح، با سرعت و شدت بیشتری رخ می‌دهد، اما این پدیده‌ها می‌توانند از طریق توسعه درز و شکاف‌ها به زیر سطح نیز انتقال یافته و باعث تشکیل کارست زیرسطحی نیز شوند (Ford and Williams 2007).

توسعه کارست به معنی تمرکز فضا‌های انحلالی در مناطق یا مسیرهای خاصی از سازندهای کارستی است. از مهم‌ترین شواهد توسعه کارست می‌توان به عوارض مورفولوژیکی از قبیل کارن‌های عمیق، فروچاله‌ها، گودی‌های مسدود، پلیه‌ها و پانرها، غارها، چاه‌های کارستی (Shaft) و دره‌های خشک اشاره کرد. وجود تعدادی از این عوارض می‌تواند دلیل محکمی بر توسعه‌یافتگی کارست، در مناطقی که این عوارض وجود دارند، باشد. لازم به ذکر است که عدم حضور چنین عوارضی در یک منطقه، دلیلی بر عدم توسعه کارست در آن منطقه نیست (کریمی ۱۳۹۴).

۴-۳-۱- ارزیابی توسعه کارست با استفاده از عوارض مورفولوژیکی

به منظور ارزیابی دقیق توسعه کارست در ارتفاعات کارستی موجود در منطقه مورد مطالعه ابتدا با بررسی دقیق تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی، محدوده‌های با توسعه یافتگی مختلف مورد شناسایی قرار گرفتند، سپس با انجام بازدیدهای صحرایی نتایج به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی به طور دقیق مورد ارزیابی قرار گرفتند.

همان طور که در فصل اول به آن اشاره گردید در منطقه مورد مطالعه، سازند آهکی تیرگان عمده‌ترین سازند آهکی کربناته می‌باشد که در منطقه رخنمون دارد. بخش‌هایی از منطقه مورد مطالعه را سنگ‌های برهنه فاقد اپی کارست (Epikarst) تشکیل می‌دهند و در بخش‌هایی از منطقه اپی کارست مشاهده می‌شود در واقع اختلاف در میزان تشکیل اپی کارست به وضوح در ارتفاعات مختلف مشاهده می‌شود. در ادامه به بررسی پدیده‌ها و عوارض مورفولوژیکی کارست موجود در منطقه پرداخته شده است.

الف- کارنها

کارن (Karren) یا لاپیه (Lapies) به همه اشکال کوچک مقیاس (میلی‌متری تا چند متری) که در اثر عملکرد آب در سطح توده یا در خاک پوشاننده لایه‌های آهکی مشاهده می‌شود اطلاق می‌گردد. شکل‌های حاصله تا حدود زیادی متفاوت هستند. همچنین در اثر رواناب‌های ورقه‌ای و کانالی ناشی از آن بر روی سنگ‌های با درزه و شکاف یا بدون درزه و شکاف ایجاد می‌شوند. عموماً به آن دسته از کارنها که در امتداد درزه و شکاف سنگ ایجاد می‌شوند گرایک (Grikes) گفته می‌شود. کارنها در منطقه به طور فراوان دیده می‌شوند. هر جا که سازند آهکی تیرگان رخنمون دارد می‌توان به وفور این اشکال را در سنگ‌های برهنه مشاهده نمود. نمونه‌هایی از کارنها در حوضه آبگیر چشمه کارستی دهگاه در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۷- نمایی از کارن‌های موجود در حوضه آبگیر چشمه کارستی دهگاه

به عبارتی کارن‌ها شکل‌های ویژه‌ای از کارست هستند که بهترین نشانه برای فرآیند کارستی شدن می‌باشند. از عوامل موثر در توسعه کارن‌ها، عوامل ساختاری نظیر درزه‌ها، صفحات لایه‌بندی و دیگر گسستگی‌های ساختاری می‌باشند. همچنین از عوامل موثر بر شکل کارن‌ها می‌توان آب و هوای منطقه، نوع پوشش، شیب زمین و لیتولوژی اشاره نمود. برای مثال در نواحی پر شیب کارن‌ها از نوع شیاری بوده و در نواحی کم شیب از نوع کندویی و حفره‌ای هستند. معمولاً کارن‌ها در آهک‌های خالص و توده‌ای مشاهده شده و در آهک‌های مارنی و شیلی دیده نمی‌شوند. بهترین توسعه کارن‌ها در سنگ آهک‌های توده‌ای، خالص و با لایه بندی ضخیم است.

ب- دره‌های خشک

یکی از مشخصه‌های اصلی ارتفاعات بالا در حوضه‌های آبگیر چشمه‌های منطقه دره‌های خشک و عمیق با دامنه‌های پرشیب می‌باشد. به نظر محققین در این دره‌ها جریان آب سطحی دائم وجود ندارد ولی اغلب آن‌ها مسیرهای عبور جریان زیر سطحی هستند. منشاء این دره‌ها به طور مستقیم به

تشکیل و تکامل کارست مربوط می‌شود. بدین صورت که، در مسیر این دره‌ها نرخ فرسایش در مقابل با نرخ کارستی شدن کمتر است بنابراین آب ترجیح می‌دهد از مسیرهای زیرسطحی که در اثر توسعه کارست ایجاد شده عبور کند.

پس از بازدیدها و بررسی‌های صحرایی صورت گرفته از منطقه مورد مطالعه مشاهده شد که، دره‌های خشک و کارنها از جمله عوارضی هستند که در حوضه آبگیر چشمه‌های کارستی منطقه گسترش زیادی داشته و در بخش‌هایی از محدوده مطالعاتی مشاهده می‌شوند. شکل (۴-۱۸) نمایی از یک دره خشک کارستی در حوضه آبگیر چشمه خورخوری را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۸- نمایی از یک دره خشک کارستی در حوضه آبگیر چشمه خورخوری

پ- اپی کارست در منطقه

سنگ‌های برهنه و بدون پوشش گیاهی یکی از پدیده‌های مهم نواحی کارستی هستند که سیمای این مناطق را از سایر مناطق تفکیک می‌کند. از عوامل موثر بر آن می‌توان به اقلیم و شیب توپوگرافی اشاره نمود. بازدیدهای صحرایی از منطقه مطالعاتی نشان می‌دهد که در شیب‌های توپوگرافی زیاد

اپی کارست (Epikarst) بر روی سطوح سنگی مشاهده نمی‌شود ولی در ارتفاعات مسطح منطقه با ضخامت اندک بر روی سطوح مشاهده می‌شود (شکل ۴-۱۹). بر روی سنگ‌های برهنه منطقه می‌توان آثار انحلالی نظیر کارنها را مشاهده نمود که باعث افزایش تغذیه از سطح توده کارستی گردیده است.



شکل ۴-۱۹- نمایی از اپی کارست کم ضخامت در لایه‌های آهکی ارتفاعات منطقه

۴-۳-۲- ارزیابی توسعه کارست با استفاده از خصوصیات هیدروژئولوژیکی

در منطقه مورد مطالعه تعدادی چشمه با آبدهی نسبی کم تا متوسط و تغییرات آبدهی کم وجود دارند. ضریب تغییرات آبدهی چشمه‌های خورخوری، سیدلی و دهگاه به ترتیب برابر ۳۵ درصد، ۲۷ درصد و ۳۴ درصد است. میزان ضریب تغییرات هدایت الکتریکی چشمه‌های منطقه نیز بسیار ناچیز است. همچنین بر اساس محاسبات انجام شده، ضریب فرود چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه در طول فروکش ۱۶۱ روزه به ترتیب برابر با ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶ می‌باشد. که این ضریب فروکش (مرتبه 10^{-3}) نشان دهنده‌ی تخلیه حفرات و دررزه و شکستگی‌های ریز می‌باشد. از این رو با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی مذکور می‌توان نتیجه گرفت که آبخوان کارستی موجود در منطقه مورد

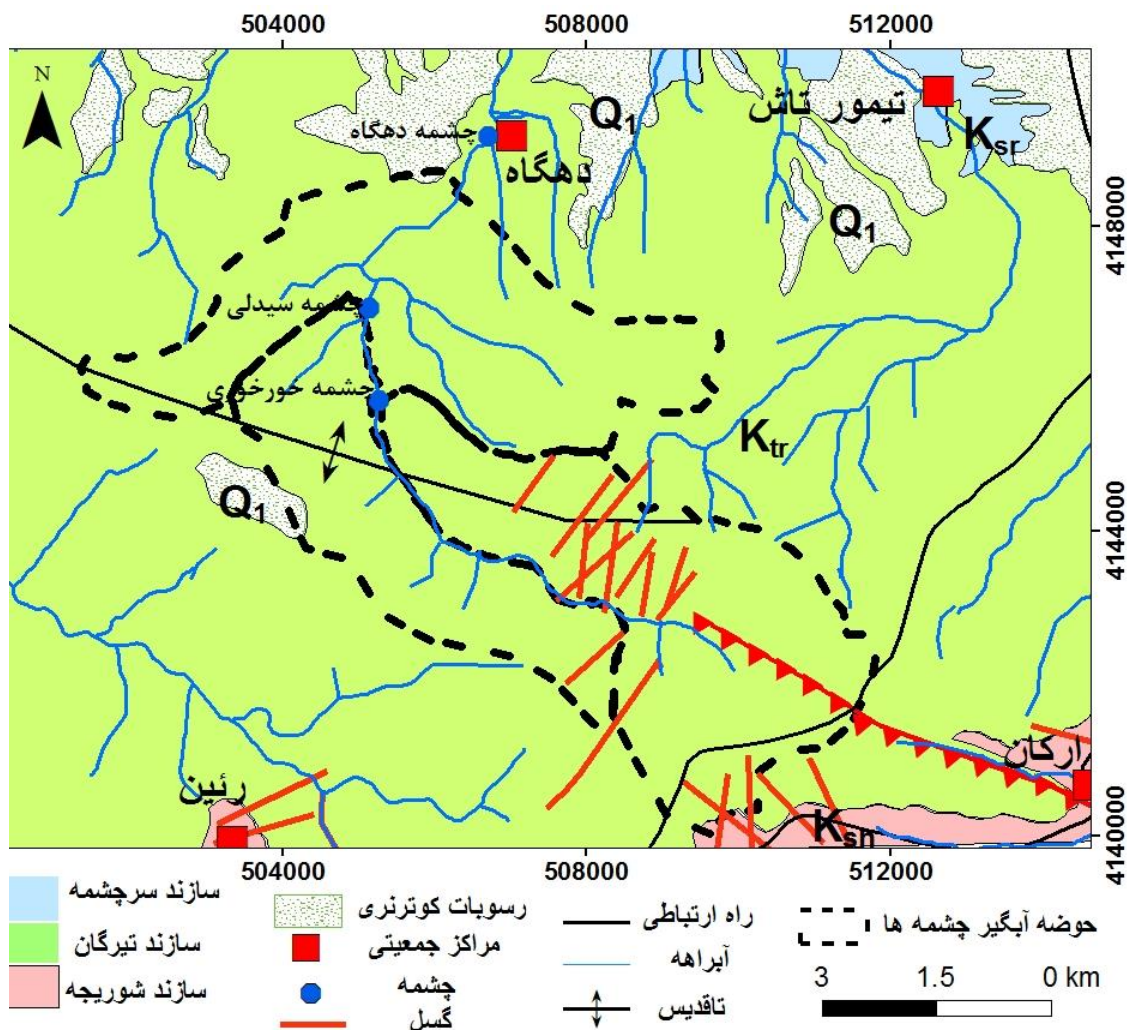
مطالعه چندان توسعه یافته نیست و سیستم غالب جریان در این آبخوان از نوع افشان - مجرای می باشد.

۴-۴- تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه

بسیاری از کارشناسان بر این عقیده هستند که شناسایی منشأ تغذیه احتمالی هر چشمه کارستی مستلزم تعیین پارامتر مهمی به نام حوضه آبرگیر (Catchment area) می باشد. منظور از مرزهای حوضه، ناحیه‌ای است که تمام نقاط روی این حوضه در رساندن آب به نقطه خروجی یا چشمه سهیم می باشند. مساحت حوضه آبرگیر و وضعیت هندسی آبخوان کارستی عواملی هستند که نسبت به زمان و مکان تغییر می کنند و به شرایط هیدروژئولوژیکی بستگی دارند. تعیین حوضه آبرگیر یک منطقه آغازی برای همه آنالیزهای هیدروژئولوژیکی و همین طور به عنوان یک پایه و اساس برای حفاظت از ذخایر آبی، مدیریت و مدل سازی مفهومی چرخه آب در توده‌های کارستی می باشد. روش‌های متفاوتی جهت تعیین حوضه آبرگیر استفاده می شوند که در این مطالعه با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده، از روش بیلان هیدروژئولوژیکی (مقایسه حجم تغذیه و تخلیه سالانه) استفاده شده است. به منظور تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه به ترتیب مراحل زیر انجام شده است.

۴-۴-۱- ترسیم حوضه‌های آبرگیر مقدماتی

به منظور ترسیم حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه ابتدا با استفاده از تلفیق روش‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و مد نظر قرار دادن حوضه آبرگیر چشمه‌های مجاور، محدوده حوضه‌های آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه به صورت مقدماتی ترسیم گردید. شکل (۴-۲۰) نقشه حوضه آبرگیر مقدماتی چشمه‌های کارستی منطقه را نشان می دهد.



شکل ۴-۲۰- نقشه حوضه آبریز مقدماتی چشمه‌های کارستی منطقه

۴-۲- تهیه نمودار ارتفاع - بارش منطقه

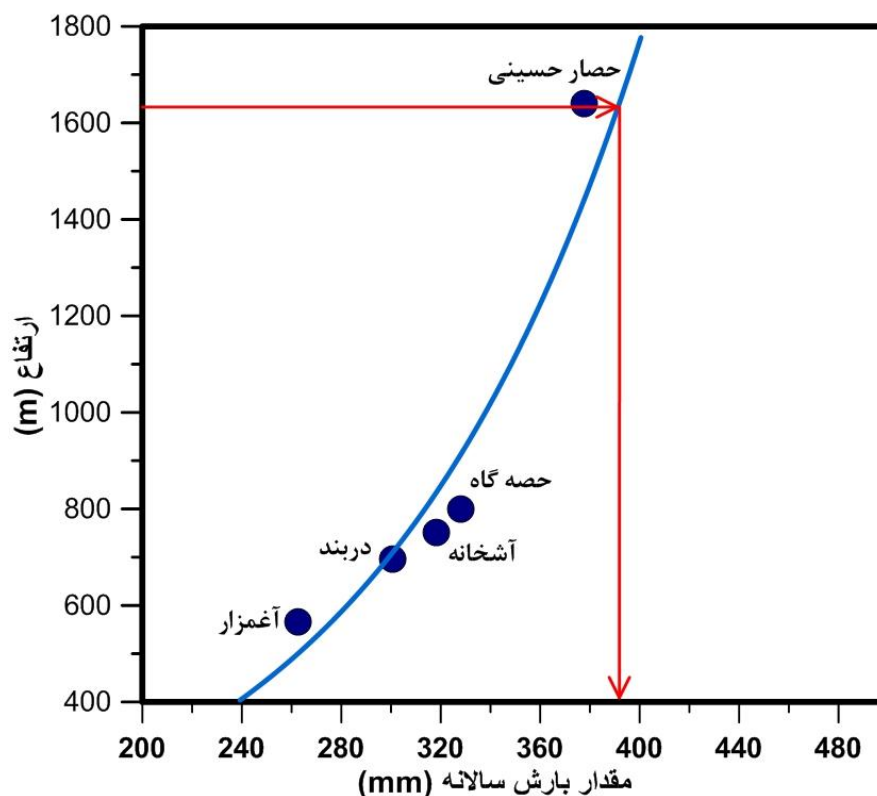
میزان نزولات جوی به ارتفاع منطقه بستگی دارد و در یک محدوده معین با افزایش ارتفاع میزان بارش بیشتر خواهد شد. با توجه به اهمیت ارتفاع حوضه آبریز در میزان نزولات جوی، به منظور تعیین ارتفاع متوسط در حوضه‌های آبریز چشمه‌های منطقه از تصاویر ماهواره لندست، مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، با تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده گردید. از روی مدل رقومی حداقل ارتفاع در منطقه ۱۰۵۷ متر، حداکثر ارتفاع ۲۱۸۱ متر و ارتفاع متوسط منطقه مورد مطالعه برابر با ۱۶۳۰ متر برآورد گردید.

به منظور تعیین وضعیت بارش در حوضه آبرگیر چشمه‌های منطقه، از آمار و اطلاعات ایستگاه‌های باران سنجی حصار حسینی، آغمزار، حصه‌گاه، آشخانه و دربندسملقان در موقعیت نزدیک نسبت به محدوده مورد مطالعه استفاده شده است. جدول (۴-۱۱) مشخصات ایستگاه‌های باران سنجی منطقه را نشان می‌دهد. با استفاده از مقادیر بارندگی در ایستگاه‌ها و ارتفاع آن‌ها منحنی ارتفاع بارش منطقه مورد مطالعه ترسیم شده است (شکل ۴-۲۱).

جدول (۴-۱۱) مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در اطراف حوضه آبرگیر چشمه‌های منطقه

ردیف	نام ایستگاه	ارتفاع	میانگین بارندگی	مختصات جغرافیایی	
				عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	آغمزار	۵۶۷	۲۶۳	۴۱۷۰۴۹۳	۴۹۲۸۷۳
۲	حصه‌گاه	۸۰۰	۳۲۸	۴۱۶۸۸۰۸	۵۰۳۱۳۲
۳	آشخانه	۷۵۱	۳۱۹	۴۱۵۷۰۵۲	۴۹۲۹۲۰
۴	دربندسملقان	۶۹۵	۳۰۰	۴۱۶۱۵۸۷	۴۹۸۴۷۳
۵	حصار حسینی	۱۶۴۱	۳۷۸	۴۱۲۹۳۷۶	۵۱۳۶۵۰

همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود همبستگی بسیار بالایی بین میانگین بارش سالیانه و ارتفاع در چهار ایستگاه آغمزار، دربند، آشخانه و حصه‌گاه که در ارتفاعات پائین قرار دارند، وجود دارد ولی ایستگاه حصار حسینی که در ارتفاعات بالا قرار دارد همبستگی بسیار کمی با سایر ایستگاه‌ها نشان می‌دهد از این رو جهت ترسیم نمودار ارتفاع بارش از منحنی استفاده شده تا مقدار بارش محاسبه شده از این روش به واقعیت نزدیک‌تر باشد.



شکل ۴-۲۱- منحنی ارتفاع بارش در منطقه مورد مطالعه

۴-۳-۴- برآورد میانگین بارش سالانه در محدوده حوضه‌های آبخیز مقدماتی

تعیین میانگین بارش سالانه در محدوده تعیین شده از نظر هیدروژئولوژیکی اهمیت بالایی دارد. به منظور برآورد میانگین بارش سالانه در محدوده مورد مطالعه از منحنی ارتفاع بارش شکل (۴-۲۱) استفاده شده است. با توجه به آن و نیز ارتفاع متوسط حوضه آبخیز چشمه‌های منطقه، میزان متوسط بارش در ناحیه تعیین شده که به طور متوسط ۳۹۵ میلیمتر در سال در کل منطقه می‌باشد. ولی از آنجا که میانگین درازمدت میزان بارش در ایستگاه آشخانه که نزدیک‌ترین ایستگاه منطقه می‌باشد، ۳۱۸ میلی‌متر بوده ولی مقدار بارش در این ایستگاه در سال آبی ۹۸-۹۹ به میزان ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد، از این رو جهت دستیابی به مقدار واقعی بارش در منطقه مورد مطالعه در سال آبی ۹۸-۹۹، با تقسیم نمودن عدد ۴۰۰ (بارندگی ایستگاه آشخانه در سال آبی ۹۸-۹۹) بر عدد ۳۱۸ (میانگین بارندگی دراز مدت ایستگاه آشخانه)، ضریب ۱/۲۶ حاصل می‌گردد که با ضرب نمودن این ضریب در

عدد ۳۹۵، لذا میزان بارندگی در سال آبی ۹۸-۹۹ در محدوده مورد مطالعه ۴۹۸ میلی متر محاسبه گردید.

۴-۴-۴- تعیین درصد تغذیه سالیانه در محدوده‌های حوضه آبرگیر مقدماتی

درصد تغذیه سالیانه به عوامل متعددی از قبیل درصد پوشش خاک، توسعه فضاهای انحلالی، میزان نزولات جوی و سایر عوارض مورفولوژیکی کارست بستگی دارد. در بسیاری از موارد بهتر است از نظر کارشناسی و مقایسه منطقه با مناطق مشابه نسبت به تخمین درصد تغذیه سالانه اقدام نمود. به منظور تخمین درصد نفوذ در حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه بازدیدهای صحرایی از منطقه به عمل آمد. با توجه به درصد پوشش خاک، توسعه فضاهای انحلالی، مشاهده عوارض کارستی و شیب زیاد ارتفاعات، درصد نفوذ در محدوده مورد مطالعه ۴۳ درصد برآورد شد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که حدود ۴۳ درصد از کل بارش‌های (برف و باران) صورت گرفته در منطقه به درون آبخوان نفوذ می‌یابند؛ بنابراین در محدوده حوضه‌های آبرگیر چشمه‌های منطقه حدود ۲۱۴ میلی متر از کل بارش‌های منطقه (۴۹۸ میلی متر) به درون آبخوان نفوذ یافته است.

۴-۴-۵- ارزیابی بیلان هیدروژئولوژیکی در منطقه

معادله بیلان از جمله روش‌هایی است که در ارزیابی وضعیت کلی آبخوان‌ها کارآیی دارد. جهت بیلان هیدروژئولوژیکی منطقه بایستی ورودی‌ها و خروجی‌ها مشخص شوند. بدین منظور بایستی بارش، نفوذ، حوضه آبرگیر و خروجی سالانه از چشمه‌ها مشخص شوند.

با استفاده از آمار ایستگاه‌های موجود در منطقه و نواحی اطراف اقدام به تهیه نمودار ارتفاع بارش شده (شکل ۴-۲۱) و با توجه به آن و نیز ارتفاع متوسط حوضه آبرگیر چشمه‌های منطقه، و اصلاح انجام شده

بر اساس میزان بارش نزدیک‌ترین ایستگاه منطقه (ایستگاه آشخانه) در سال آبی ۹۸-۹۹، میزان متوسط بارش در هر ناحیه تعیین شده که به طور متوسط ۴۹۸ میلی‌متر در سال در کل منطقه می‌باشد. میزان حجم تغذیه سالیانه در حوضه‌های آبرگیر مقدماتی با استفاده از معادله (۴-۴) محاسبه شده است.

$$A = \frac{V}{PR} \quad \text{معادله (۴-۴)}$$

که در این معادله P میانگین سالیانه بارش در حوضه آبرگیر چشمه‌ها با واحد متر، R درصد نفوذ بارندگی بدون واحد، A مساحت حوضه آبرگیر با واحد متر مربع و در نهایت V حجم تغذیه سالیانه چشمه‌ها با واحد مترمکعب می‌باشد. برای چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه حجم تغذیه سالیانه به ترتیب حدود ۳/۲، ۱/۸ و ۳ میلیون متر مکعب در سال برآورد شده است.

به منظور محاسبه حجم تخلیه سالیانه از هیدروگراف چشمه‌ها استفاده شده است. مساحت زیر منحنی هیدروگراف برابر با حجم تخلیه می‌باشد. مساحت زیر منحنی توسط نرم‌افزار Grapher محاسبه گردید. حجم تخلیه سالیانه برای حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه در طول سال آبی ۱۳۹۸ به ترتیب حدود ۳، ۱/۸ و ۵ میلیون متر مکعب محاسبه شده است.

۴-۴-۶- صحت سنجی حوضه‌های آبرگیر مقدماتی و اصلاح آن‌ها

با استفاده از مقادیر بارش، درصد تغذیه سالیانه و مساحت حوضه‌های آبرگیر مقدماتی؛ حجم تغذیه سالیانه آبخوان منطقه برای چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه به ترتیب برابر با حدود ۳/۲، ۱/۸ و ۳ میلیون متر مکعب برآورد شد و همچنین بر اساس نتایج آبدهی چشمه‌ها حجم تخلیه سالیانه از طریق چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه به ترتیب برابر با حدود ۳، ۱/۸ و ۵ میلیون مترمکعب در سال محاسبه گردید. با توجه به عدم پیچیدگی زمین‌شناسی و همچنین خطای نسبی ناچیز بین مقادیر تغذیه و تخلیه سالیانه چشمه‌های خورخوری و سیدلی می‌توان نتیجه گرفت که حوضه آبرگیر مقدماتی ترسیم شده برای چشمه‌های موصوف از دقت مناسبی برخوردار بوده و می‌توان محدوده‌های تعیین شده را به عنوان حوضه‌های آبرگیر چشمه‌ها محسوب نمود.

میزان تخلیه چشمه دهگاه حدود ۲ میلیون متر مکعب در سال بیشتر از میزان تغذیه محاسبه شده برای حوضه آبرگیر این چشمه می‌باشد. از آنجا مطابق شکل (۴-۲۰) حوضه آبرگیر ترسیم شده برای چشمه دهگاه؛ در قسمت جنوب به حوضه آبرگیر چشمه‌های سیدلی و خورخوری محدود شده و در قسمت‌های شمالی منطقه، به دامنه ارتفاعات محدود شده و از لحاظ فیزیوگرافی و هیدروژئولوژی امکان اینکه این قسمت‌ها در محدوده حوضه آبرگیر چشمه قرار گیرند وجود ندارد؛ ازاین رو می‌توان نتیجه گرفت که حوضه آبرگیر مقدماتی ترسیم شده برای چشمه دهگاه نیز از دقت مناسبی برخوردار بوده و می‌توان محدوده تعیین شده را به عنوان حوضه آبرگیر این چشمه محسوب نمود.

۴-۵- بررسی ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه

همان‌طور که در مباحث قبلی این فصل مشاهده شد، به منظور بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها و ژئومورفولوژی کارست در حوضه آبرگیر چشمه‌ها مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. از مهم‌ترین مباحث مطرح شده می‌توان به ارزیابی بیلان هیدروژئولوژیکی منطقه و بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی اشاره نمود که نتایج آن در دو بند زیر ارائه خواهد شد.

۴-۵-۱- استفاده از بیلان هیدروژئولوژیکی منطقه

همان‌گونه که در مباحث قبلی مطرح شد حجم تغذیه سالیانه آبخوان منطقه برای چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه به ترتیب برابر با حدود ۳/۲، ۱/۸ و ۳ میلیون متر مکعب برآورد شد و همچنین حجم تخلیه سالیانه از طریق چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه به ترتیب برابر با حدود ۳، ۱/۸ و ۵ میلیون مترمکعب در سال محاسبه گردید. تفاوت فاحش میان مقدار تغذیه (حدود ۳ میلیون متر مکعب در سال) و میزان تخلیه (حدود ۵ میلیون متر مکعب در سال) برای چشمه دهگاه را این گونه می‌توان تفسیر کرد: از آنجا که دو چشمه خورخوری و سیدلی در بالا دست چشمه دهگاه

قرار دارند و آب آن‌ها از طریق رودخانه جریان یافته و در محل چشمه دهگاه با آب این چشمه مخلوط می‌شود لذا بخشی از آب چشمه‌های خورخوری و سیدلی در طول مسیر به داخل شن و ماسه درشت رودخانه‌ای نفوذ می‌کند و در محل چشمه دهگاه با توجه به بالا بودن سنگ کف و ضخامت بسیار کم رسوبات، با آب این چشمه مخلوط شده و از این محل تخلیه می‌شوند. لذا این امر موجب شده تا میزان تخلیه این چشمه با مقدار تغذیه محاسبه شده هم‌خوانی نداشته باشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که بین چشمه کارستی دهگاه و چشمه‌های کارستی سیدلی و خورخوری ارتباط هیدرولیکی وجود داشته و بخشی از آب چشمه‌های خورخوری و سیدلی که در بالا دست چشمه دهگاه قرار دارند پس از نفوذ در شن و ماسه درشت کف رودخانه، در محل ظهور چشمه دهگاه تخلیه می‌شوند.

۴-۵-۲- استفاده از خصوصیات هیدروژئوشیمیایی

همان‌طور که در نقشه حوضه آبرگیر مقدماتی چشمه‌های کارستی منطقه (شکل ۴-۲۰) مشاهده می‌شود چشمه کارستی خورخوری در بالادست منطقه جای دارد، چشمه کارستی دهگاه در پایین دست قرار گرفته و چشمه کارستی سیدلی در وسط این دو چشمه واقع شده است. با توجه به نمودار شولر ترسیم شده (شکل ۴-۱۶)، مشاهده می‌شود که غلظت یون‌های اصلی از چشمه بالادست یعنی خورخوری به سمت چشمه پایین دست یعنی دهگاه افزایش ناچیزی را نشان می‌دهد. این موضوع در شاخص اشباع این چشمه‌ها هم دیده می‌شود به نحوی که شاخص اشباع کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت، از چشمه خورخوری به سمت چشمه دهگاه روند کاهشی نشان می‌دهند. با توجه به اینکه دو چشمه خورخوری و سیدلی در بالا دست چشمه دهگاه قرار دارند و آب آن‌ها از طریق رودخانه جریان یافته و در محل چشمه دهگاه با آب این چشمه مخلوط می‌شود، از این رو در طول مسیر جریان، آب این چشمه‌ها در معرض هوا قرار گرفته و باعث افزایش CO_2 محلول در آب و به تبع آن افزایش پدیده انحلال شده و این امر موجب افزایش غلظت یون‌های محلول در آب در چشمه دهگاه می‌گردد. از آنجا که دبی چشمه دهگاه بالا بوده و بخش زیادی از آبدهی این چشمه نتیجه تخلیه مستقیم از سفره کارستی می‌باشد و

قسمت کمی از آبدهی چشمه از زهکشی رودخانه ناشی می‌شود بنابراین این امر موجب شده تا غلظت یون‌های اصلی در چشمه‌های کارستی منطقه بسیار شبیه هم بوده و غلظت این یون‌ها در چشمه دهگاه به مقدار ناچیزی بیشتر از دو چشمه بالادست یعنی خورخوری و سیدلی باشد.

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این فصل نتایج حاصله از این پژوهش با عنوان بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه به طور مختصر آورده شده است و در انتها سعی شده برای انجام مطالعات تکمیلی و پژوهش‌های بعدی بر روی چشمه‌های منطقه پیشنهادهایی ارائه شود.

۵-۱- نتیجه‌گیری

همان‌طور که در فصل‌های قبلی این پژوهش مشاهده شد، به منظور بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه پارامترهای فیزیکی و شیمیایی چشمه‌ها و ژئومورفولوژی کارست در حوضه آبگیر چشمه‌ها مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. در زیر نتایج حاصل از این مطالعه در چهار بند شامل: ارزیابی سیستم غالب جریان در آبخوان‌های کارستی منطقه، بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی غالب، تعیین حوضه آبگیر چشمه‌های کارستی منطقه و بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه ارائه می‌شود.

۵-۱-۱- ارزیابی سیستم غالب جریان در آبخوان‌های کارستی منطقه

سازند آهکی تیرگان عمده‌ترین سازند آهکی کربناته می‌باشد که در منطقه رخنمون دارد. بخش‌هایی از منطقه مورد مطالعه را سنگ‌های برهنه فاقد اپی‌کارست (Epikarst) تشکیل می‌دهند (دامنه‌های پرشیب) و در بخش‌هایی از منطقه اپی‌کارست مشاهده می‌شود (مناطق هموار موجود در ارتفاعات). مطابق بازدیدها و بررسی‌های صحرایی صورت گرفته از منطقه مورد مطالعه مشاهده شد که، دره‌های خشک و کارنها از جمله عوارضی هستند که در حوضه آبگیر چشمه‌های کارستی منطقه گسترش زیادی داشته و در بخش‌هایی از محدوده مطالعاتی مشاهده می‌شوند.

میزان اندک ضریب تغییرات آبدهی چشمه‌های منطقه که برابر با ۳۵ درصد برای چشمه خورخوری، ۲۷ درصد برای چشمه سیدلی و ۳۴ درصد برای چشمه دهگاه است؛ تا حدودی بیانگر توسعه کم مجاری

در توده کارستی می‌باشند. از سوی دیگر میزان ضریب تغییرات هدایت الکتریکی چشمه‌های منطقه نیز بسیار ناچیز است. همچنین بر اساس محاسبات انجام شده، ضریب فرود چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه در طول فروکش ۱۶۱ روزه به ترتیب برابر با ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۶ می‌باشد. که این ضریب فروکش (مرتبه 10^{-3}) نشان دهنده‌ی تخلیه حفرات و دررزه و شکستگی‌های ریز می‌باشد. با تمامی توصیفات و با در نظر گرفتن شکل حوضه‌ها و ارزیابی عوارض کارستی در حوضه‌های آبگیر چشمه‌ها، تحلیل ضرایب فروکش همراه با در نظر گرفتن شرایط فیزیوگرافی حوضه آبگیر (شکل و شیب حوضه) و تراوایی اندک لایه‌های کربناته آبخوان، زمان انتقال آب در حوضه‌های کشیده و ضریب اشباع کانی کلسیت (۲/۴-) بیانگر سیستم غالب جریان افشان - مجرای در آبخوان چشمه‌ها می‌باشند.

۵-۱-۲- بررسی خصوصیات هیدروژئوشیمیایی غالب

تغییرات زمانی هدایت الکتریکی و غلظت یون‌های اصلی در چشمه‌های کارستی منطقه بسیار ناچیز می‌باشد. میانگین هدایت الکتریکی در چشمه‌های منطقه حدود ۳۷۴ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد. هدایت الکتریکی چشمه‌ها با آبدهی رابطه عکس داشته به طوری که با کاهش آبدهی، هدایت الکتریکی روند افزایشی از خود نشان می‌دهد. با افزایش آبدهی و رسیدن دبی به اوج، هدایت الکتریکی آب چشمه‌ها به دلیل مشارکت آب بارندگی که با سرعت بیشتری از طریق مجاری توسعه یافته با زمان ماندگاری کم انتقال می‌یابد، کاهش یافته و با کاهش آبدهی، هدایت الکتریکی دوباره به حالت اولیه باز می‌گردد. ضریب تغییرات هدایت الکتریکی اندک چشمه‌های کارستی منطقه بیانگر سیستم غالب جریان افشان - مجرای در آبخوان چشمه‌ها می‌باشد.

در نمونه‌های آب چشمه‌ها یون‌های کلسیم و بی‌کربنات بیشترین غلظت را در میان یون‌های اصلی به خود اختصاص می‌دهند. تیپ آب در چشمه‌های کارستی منطقه از نوع بی‌کربنات کلسیک می‌باشد. چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه نسبت به کلسیت، دولومیت، ژپس و هالیت تحت

اشباع می‌باشند و با توجه به ضریب اشباع کانی کلسیت ($2/4$ -) در نمونه‌های آب مربوط به چشمه‌ها می‌توان گفت تا حدودی انحلال کانی کلسیت صورت گرفته است.

۵-۱-۳- تعیین حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه

حوضه آبرگیر چشمه‌های کارستی منطقه با استفاده از تلفیق روش‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، هیدروژئولوژی و لحاظ نمودن حوضه آبرگیر چشمه‌های مجاور، ترسیم گردید. بر اساس محدوده‌های مشخص شده، مساحت حوضه آبرگیر چشمه کارستی خورخوری حدود $14/9$ کیلومترمربع، چشمه کارستی سیدلی حدود $8/78$ کیلومترمربع و چشمه کارستی دهگاه حدود $14/2$ کیلومترمربع برآورد شد. برای محدوده حوضه‌های آبرگیر مشخص شده برای چشمه‌ها ارتفاع متوسط از طریق تصاویر ماهواره لندست، مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، با تفکیک مکانی 30 متر استفاده گردید. از روی مدل رقومی حداقل ارتفاع در منطقه 1057 متر، حداکثر ارتفاع 2181 متر و ارتفاع متوسط منطقه مورد مطالعه برابر با 1630 متر برآورد گردید.

برای ارتفاع متوسط حوضه‌های مشخص شده میانگین بارش سالیانه از روش نمودار ارتفاع - بارش ایستگاه‌های مجاور و اصلاحات انجام شده بر اساس میزان بارش نزدیک‌ترین ایستگاه منطقه (ایستگاه آشخانه) در سال آبی $98-99$ ، برابر با 498 میلی‌متر تعیین گردید. با توجه به بازدیدهای صحرایی و ارزیابی درصد پوشش خاک، توسعه فضاها، انحلالی و سایر عوارض ژئومورفولوژیکی کارست، درصد تغذیه سالیانه در محدوده مورد نظر برابر با 43 درصد برآورد شد.

حجم تغذیه سالیانه در حوضه آبرگیر مشخص شده برای چشمه‌های خورخوری، سیدلی و دهگاه به ترتیب برابر با حدود $3/2$ ، $1/8$ و 3 میلیون متر مکعب در سال برآورد شد. علاوه بر این حجم تخلیه سالیانه چشمه‌ها از طریق هیدروگراف سالیانه چشمه‌های خورخوری، سیدلی و دهگاه به ترتیب برابر با حدود 3 ، $1/8$ و 5 میلیون متر مکعب در سال محاسبه گردید. مقایسه حجم تغذیه و تخلیه سالیانه برای

چشمه‌های خورخوری و سیدلی بیانگر خطای نسبی ناچیز می‌باشد. عدم پیچیدگی زمین‌شناسی همچنین خطای بسیار کم بین تغذیه و تخلیه سالیانه موید این است که حوضه‌های آبگیر ترسیم شده برای این دو چشمه از دقت مناسبی برخوردار بوده است و می‌توان محدوده‌های تعیین شده را به عنوان حوضه‌های آبگیر چشمه‌ها محسوب نمود.

میزان تخلیه چشمه دهگاه حدود ۲ میلیون متر مکعب در سال بیشتر از میزان تغذیه محاسبه شده برای حوضه آبگیر این چشمه می‌باشد. از آنجا مطابق شکل (۴-۲۰) حوضه آبگیر ترسیم شده برای چشمه دهگاه؛ در قسمت جنوب منطقه توسط حوضه آبگیر چشمه‌های سیدلی و خورخوری محدود شده و در قسمت‌های شمالی منطقه، به دامنه ارتفاعات محدود شده و از لحاظ فیزیوگرافی و هیدروژئولوژی امکان اینکه این قسمت‌ها در محدوده حوضه آبگیر چشمه قرار گیرند وجود ندارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حوضه آبگیر مقدماتی ترسیم شده برای چشمه دهگاه نیز از دقت مناسبی برخوردار بوده و می‌توان محدوده تعیین شده را به عنوان حوضه آبگیر این چشمه محسوب نمود.

۵-۱-۴- بررسی وجود یا عدم وجود ارتباط هیدرولیکی بین چشمه‌های کارستی منطقه

با توجه به معادله بیلان منطقه، مقدار تخلیه از طریق چشمه کارستی دهگاه به میزان ۲ میلیون متر مکعب در سال بیشتر از مقدار تغذیه‌ای است که برای حوضه آبگیر این چشمه محاسبه شده است و از آنجا که به دلیل محدودیت‌های ذکر شده در بند ۵-۱-۳ امکان افزایش مساحت حوضه آبگیر برای این چشمه وجود ندارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بخشی از آب چشمه‌های خورخوری و سیدلی در طول مسیر جریان، به داخل شن و ماسه درشت کف رودخانه نفوذ می‌کند و در محل چشمه دهگاه با توجه به بالا بودن سنگ کف، با آب این چشمه مخلوط شده و از این محل تخلیه می‌شوند. این امر موجب شده تا میزان تخلیه این چشمه با مقدار تغذیه محاسبه شده در حوضه آبگیر آن هم‌خوانی نداشته باشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که بین چشمه‌های کارستی سیدلی و خورخوری با چشمه دهگاه ارتباط هیدرولیکی وجود داشته و بخشی از آب چشمه‌های خورخوری و سیدلی که در بالا دست

چشمه دهگاه قرار دارند پس از نفوذ در شن و ماسه درشت کف رودخانه، در محل ظهور چشمه دهگاه تخلیه می‌شوند. این امر در بازدیدهای صحرایی که جهت اندازه‌گیری دبی چشمه‌ها از منطقه انجام شده نیز کاملاً مشهود بوده به نحوی که در دوره خشک سال که آبدهی چشمه‌ها تقلیل یافته، آب چشمه‌های خورخوری و سیدلی در محل ظهور چشمه‌ها و تا فاصله کمی از آن‌ها در داخل رودخانه جریان داشته و به تدریج دبی عبوری از رودخانه کاهش یافته به طوری که در پائین دست، رودخانه کاملاً خشک می‌شود و این اختلاف بسیار فاحش دبی رودخانه در بالادست و پایین دست موید این مطلب بوده که آب این دو چشمه در داخل شن و ماسه درشت کف رودخانه نفوذ می‌نماید و از آنجا که حجم آب خروجی از چشمه دهگاه بسیار بیشتر از میزان تغذیه‌ای است که برای حوضه آبرگیر آن محاسبه شده است بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که آب چشمه‌های خورخوری و سیدلی در طول مسیر رودخانه به داخل درز و شکستگی‌ها نفوذ یافته و در محل چشمه دهگاه با توجه به بالا بودن سنگ کف تخلیه می‌شوند.

همان‌طور که در نقشه حوضه آبرگیر مقدماتی چشمه‌های کارستی منطقه (شکل ۴-۲۰) مشاهده می‌شود چشمه کارستی خورخوری در بالادست منطقه جای دارد، چشمه کارستی دهگاه در پایین دست قرار گرفته و چشمه کارستی سیدلی در وسط این دو چشمه واقع شده است. با توجه به نمودار شولر ترسیم شده (شکل ۴-۱۶)، مشاهده می‌شود که غلظت یون‌های اصلی از چشمه بالادست یعنی خورخوری به سمت چشمه پایین دست یعنی دهگاه افزایش ناچیزی را نشان می‌دهد. این موضوع در شاخص اشباع این چشمه‌ها هم دیده می‌شود به نحوی که شاخص اشباع کلسیت، دولومیت، ژیپس و هالیت، از چشمه خورخوری به سمت چشمه دهگاه روند کاهشی نشان می‌دهند. با توجه به اینکه دو چشمه خورخوری و سیدلی در بالا دست چشمه دهگاه قرار دارند و آب آن‌ها از طریق رودخانه جریان یافته و در محل چشمه دهگاه با آب این چشمه مخلوط می‌شود، از این رو در طول مسیر جریان، آب این چشمه‌ها در معرض هوا قرار گرفته و باعث افزایش CO_2 محلول در آب و به تبع آن افزایش پدیده انحلال شده و این امر موجب افزایش غلظت یون‌های محلول در آب در چشمه دهگاه می‌گردد. از آنجا که دبی چشمه

دهگاه بالا بوده و بخش زیادی از آبدهی این چشمه نتیجه تخلیه مستقیم از سفره کارستی می‌باشد و قسمت کمی از آبدهی چشمه از زهکشی رودخانه ناشی می‌شود بنابراین این امر موجب شده تا غلظت یون‌های اصلی در چشمه‌های کارستی منطقه بسیار شبیه هم بوده و غلظت این یون‌ها در چشمه دهگاه به مقدار ناچیزی بیشتر از دو چشمه بالادست یعنی خورخوری و سیدلی باشد.

لازم به ذکر است که با توجه به بالا بودن سنگ کف درون رودخانه، شیب زیاد آبرفت کف رودخانه، دانه درشت بودن آبرفت و نیز از آنجا که سالیان متمادی آب چشمه‌های خورخوری و سیدلی از طریق نفوذ در شن و ماسه درشت کف رودخانه با سرعت زیاد انتقال یافته‌اند و همچنین از آنجا که دبی چشمه دهگاه بالا بوده و بخش زیادی از آبدهی این چشمه نتیجه تخلیه مستقیم از سفره کارستی منطقه بوده و تنها قسمت کمی از آبدهی این چشمه از زهکشی رودخانه ناشی می‌شود؛ بنابراین عوامل مذکور موجب شده تا غلظت یون‌های اصلی در چشمه‌های کارستی منطقه بسیار شبیه هم بوده و غلظت این یون‌ها در چشمه دهگاه به مقدار ناچیزی بیشتر از دو چشمه بالادست یعنی خورخوری و سیدلی باشد. لذا تغییرات اندک هدایت الکتریکی و غلظت یون‌های اصلی چشمه دهگاه با چشمه‌های خورخوری و سیدلی قابل توجیه بوده و خللی در تفسیر انجام شده در خصوص ارتباط هیدرولیکی این چشمه‌ها از طریق رودخانه وارد نمی‌کند.

۵-۲- پیشنهادها

برای هرچه بهتر انجام شدن مطالعات تکمیلی و پژوهش‌های بعدی بر روی چشمه‌های کارستی خورخوری، سیدلی و دهگاه پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود.

۱- نصب باران‌سنج ذخیره‌ای در ارتفاعات برای برآورد دقیق‌تر بارش سالیانه منطقه

۲- اندازه‌گیری غلظت ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در چشمه‌های منطقه

۳- بستر سازی محل خروج آب چشمه‌ها و نصب اشل برای اندازه‌گیری دقیق آبدهی چشمه‌ها

منابع مورد استفاده

- ابراهیمی ح. (۱۳۹۶)، پایان نامه ارشد، "بررسی خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروژئوشیمیایی چشمه کارستی ورسخواران، فیروزکوه"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- افشار حرب، ع. (۱۳۷۳). زمین شناسی ایران: زمین شناسی کپه داغ. تهران: سازمان زمین شناسی کشور.
- بهنیافر، ا.، قنبرزاده، ه.، (۱۳۹۴)، "کتاب ژئومورفولوژی کارست"، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا.
- سلیم ق.، (۱۳۸۹)، پایان نامه ارشد "بررسی ارتباط هیدرولیکی آبخوان‌های آبرفتی با آبخوان‌های کارستی در استان کرمانشاه"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- شرکت مهندسین مشاور سیمای آب خاوران. (۱۳۹۳). پروژه مطالعات شناسایی سازند سخت و کارست محدوده مطالعاتی سملقان (جلد اول). خراسان شمالی: سازمان آب منطقه ای.
- شرکت مهندسین مشاور سیمای آب خاوران. (۱۳۹۴). پروژه مطالعات شناسایی سازند سخت و کارست محدوده مطالعاتی سملقان (جلد دوم). خراسان شمالی: سازمان آب منطقه ای.
- شمسی ع.، (۱۳۹۰)، پایان نامه ارشد، "ارزیابی مناطق مناسب جهت بهره‌برداری از منابع آب کارست در شمال غرب اسلام آباد، کرمانشاه"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- زند وکیلی ز.، (۱۳۹۵)، پایان نامه ارشد، "بررسی نقش ساختارهای زمین‌شناسی منطقه قوری میدان بر چشمه دشتک و برآورد بیلان اجمالی سازندهای سخت"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- زند وکیلی، ز.، محمدزاده، ح. و رحیمی، ب. (۱۳۹۵). بررسی ساختار نفوذپذیری مرتبط با معماری زون گسلی در منطقه قوری میدان خراسان شمالی: نهمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و زیست محیطی. تهران.
- کریمی، غ. (۱۳۹۲). ارزیابی حجم آب‌های زیرزمینی آبخوان‌های کارستی در منطقه شمال استان خراسان شمالی. خراسان شمالی: سازمان آب منطقه ای خراسان شمالی
- کریمی ح. (۱۳۸۹) "هیدروژئولوژی کارست (مفاهیم و روش‌ها)"، انتشارات ارم، ۴۱۴ص.
- مینویی ا.، (۱۳۸۸)، پایان نامه ارشد، "نقش شکستگی‌ها در جریان آب‌زیرزمینی در منطقه شاهو، کردستان"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- نجفی، ز. و کریمی، غ. و طاهری، ع. (۱۳۹۱). ارزیابی میزان نفوذ در آهک کارستی بیستون در شرق و جنوب شرق روانسر: اولین همایش زمین‌شناسی فلات ایران. کرمان.
- نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ بجنورد (۱۳۶۵)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی
- نیک‌پیمان ی.، (۱۳۸۸)، پایان نامه ارشد، "بررسی تأثیر خطواره‌ها بر روی نوع جریان آب‌زیرزمینی در آبخوان‌های کارستی"، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.

- Altansukh, O., (2012) "Tuul River and Its Catchment Area Delineation from Satellite Image" *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 2012, 1, 9-23
- Andrew, A, et al., (2010), *Karst Management: Department of Geograpy, Environment and Planning*, University of South Florida.
- Appelo CAJ, Postma D (2005) *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2nd edn. A.A, Balkema, Rotterdam.
- Atkinson, T.C., (1977). Diffuse Flow and Conduit Flow in Limeston Terrain in the Mendip Hills, Somerset (Grea Britain). *J. Hydrol.*, 35:93--110.
- Bakalowicz M, (2005), "Karst groundwater: a challenge for new resources". *Hydrogeology Journal*, 13, 148–60.
- Bakalowicz M., (1977), "Etude du degra d'organisation des coulements souterrains dans les aquifers carbonates par une methode hydrogeochimique novella" *Compte Rendus Academie des Sciences Paris, Series D.*, 284, p. 24636.
- Barbera, J.A., Andreo, B., (2015) "Chemical, Thermal and Isotopic Evidences of Water Mixing in the Discharge Area of Torrox Karst Spring (Southern Spain)" *Department of Geology and Centre of Hydrogeology, Univercity of Malaga (Cehiuma)*, 29071 Malaga, Spain
- Bonacci, O., Andric, I., (2016) "Karst Spring Catchment: An Example Dinaric Karst" *Environ Earth Sci*, Doi 10.1007/S12665-015-4644-8.
- Bonacci, O., Jukic, D., Ljubenkovic, I., (2006) "Definition of Catchment Area in Karst: Case of the Rivers Krcic and Krka, Croatia" *Hydrological Sciences Journal, Jaornal*, 51:4, 682-699, Dio: 10.1623/Hysj.51.4.682
- Bonacci, O., Magdenic, A., (1993) "The Catchment area of The Spring Sv. Ivan Karst" *Ground Water*. August, Impact Factor: 2.31, Doi: 10.1111/J.1745-6584. 1993.Tb00849. X.
- Butscher, C., Huggenberger, P., (2007) "Implications for Karst Hydrology from 3D Geological Modeling Using the Aquifer Base Gradient Approach" *Journal of Hydrlogy*, 342, 184—198.
- Cowel, D.W. and Ford, D.C., (1983), *Karst Hydrology of the Bruce Peninsula, Ontario, Canada*, in: Back, W., La Moreaux, P.E. (Guest-Eds) *V.T. Stringfield Symposium Processes in Karst Hydrology: Journal of Hydrology*, 61, p. 163-168.
- Degirmenci, D., Gunay, G., (1993) "Origin and Catchment area of the Olukkaopru Karst Springs" *Hydrogeological Processes in Karst Terranes*, IAHS Publ. no. 207.

Demiroglu, M., (2016), Classification of Karst Spring for Flash-Flood-Prone Areas in Western Turkey: Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 1473-1486, 2016

Eftim, R., Benderev, A., (2007) "Utilization of Hydrochemical Data for Characterization of the Karst System & Example of Iskrets Springs, Bulgaria" Review of the Bulgarian Geological Society, Vol. 68, Part 1—3, 2007, P. 167—174

Environmental Modeling Research Laboratory, (2002) "Watershed Modeling System"

Ford D.C, Williams P.W, (2007), Karst Hydrology and Geomorphology. Wiley Chichester, 2nd ed., p. 576.

Ford, D. C., and Williams, P. W., (1989). Karst Geomorphology and Hydrology. Chapman and Hall, London.

Jacobson R.L., Langmuir D., (1974), "Controls on the quality variations of some carbonate spring waters" Journal of Hydrology 23: 247-265.

Jeannin P.Y., Sauter M., (1998), "Analysis of karst hydrodynamic behavior using global approaches" A review. Bulletin d'Hydrogéologie (Neuchatel), 16: 31-48.

Jiang, G., Guo, F., (2010) "Interpreting Source of Lingshui Spring By Hydrogeological, Chemical and Isotopic Methods" Advances in Research in Karst Media, Key Laboratory of Karst Dynamics, Institute of Karst Geology, Doi 10.1007/978-3-642-12486-0.

Karami G.H., (2002) "Assessment of Heterogeneity and Flow System In Karstic Aquifers Using Pumping Test Data" Ph.D. thesis, School of Civil Engineering and Geosciences University of Newcastle Upon Tyne, P180.

Milaanovic, P.T. (1981), Karst Hydrology WRP, Colorado, U.S.A, 434pp.

Milanovic P., (1981) "Karst Hydrogeology" Water Resources Pubns, P434

Mohammadi Z., (2009), "Assessing hydrochemical evolution of groundwater in limestone terrain via principal component analysis", Environ Earth Sci (2009) 59:429–439.

Mohammadi Z., Field, M., (2009) "On the Temporal Behavior of Karst, Aquifers Zagros Region, Iran: A Geostatistical Approach" Journal of Cave and Karst Studies, 71(3): 210–226.

Moral F., Cruz-Sanjulian J.J., Olias M., (2008), "Geochemical evolution of groundwater in the carbonate aquifers of Sierra de Segura (Betic Cordillera, Southern Spain)" Journal of Hydrology, 360: 281-296, Doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.012.

- Raeisi E., Pezeshkpoor P., and Moor F., (1993), "Characteristics of karst aquifer as indicated by temporal changes of the springs physicochemical parameters" *Iranian Journal of Science and Technology*, vol. 17, p. 17-28.
- Raeisi, E., (2002), Carbonate Karst Caves in Iran. In: Kranjc A (Ed) *Evolution of Karst: From Prekarst to Cessation*, Ljubljana-Postojna. 339-344
- Raeisi, E., Karami, G.H., (1997) "Evaluation of Moisture Factors of the Physic-Chemical Characteristics of Sheshpir Karst Spring" *Carbonates and Evaporates* 11, Pp.162-169.
- Reisch, C.H., Toran, L., (2013) "Characterizing Snowmelt Anomalies in Hydrochemographs of a Karst Spring, Cumberland Valley, Pennsylvania (Usa) Evidence for Multiple Recharge Pathways" *Environ Earth Sci*, Doi 10.1007/S12665-013-2935-5
- Romanov D., Gabrovsek F., Dreybrodt W., (2003), "The impact of hydrochemical boundary conditions on the evolution of limestone karst aquifers" *Journal of Hydrology*, 272: 240-253, DOI:10.1016/S0022-1694(03)00058-1.
- Scanlon B.R., Thraikill J., (1987), "Chemical similarities among physically distinct spring types in a karst terrain" *Journal Hydrology*, 89: 259-279.
- Shuster, E.T., White, W., (1971) "Seasonal Fluctuations in the Chemistry of Li Springs: A Possible Means for Characterizing Carbonate Aquifers" *Journal of Hydrology* 14 (1971) 93-128
- White W.B., Schmidt V.A., (1966), "Hydrology of a karst area in East-Central West-Virginia" *Water Resour-Res.*, v. 2: 549-560.
- Worthington S.R.H., Davies G.J. and Quinlan J.F., (1992), "Geochemistry of Springs in temperate carbonate aquifers: recharge type explains most of the variation" *Colloque d'Hydrologie en Pays Calcaire et en Milieu Fissure* (5th, Neuchatel, Switzerland), *Proceedings, Annales Scientifiques de l'Universite de Besancon, Geology-Memoires Hors Serie*, 11: 341-347.

Abstract

Dehgah and Khorkhori karst springs are situated about 20 kilometers south west of Bojnord and south of the Badranlo. Karst springs aquifers mainly composed of Tirgan limestone. To investigate the hydraulic connection in-between Khorkhori, Syedli and Dehgah Karst springs, physical and chemical parameters of discharging water from springs has been monitored for 13 months. Lower variances of the discharge, Electrical Conductivity (EC) and main ions, one recession slope of the karst springs of the study area and low development karstification features in the study area indicates a dominance of conduit - diffuse conduit flow in the study area. In this research springs catchment area delineated in preliminary basis. In delineated catchment of spring the average amount of precipitation based on the precipitation- elevation relation of neighboring stations with some corrections anticipated around 498 mm on annual basis. Regarding to the field observations and evaluation of soil cover percentile, development of the solutional structures and other karst geomorphologic features the amount of recharge in the study area were estimated to be 43% of the precipitation on annual scale. The preliminary annual amount of recharges evaluated using the precipitation amount and recharge fraction which is 3.2, 1.8 and 3 million m³ for Khorkhori, Syedli and Dehgah karst springs respectively. Calculated annual volume of discharges from Khorkhori, Syedli and Dehgah karst springs using springs hydrograph are 3, 1.8 and 5 million m³ respectively. Comparison of the estimated recharge volume and calculated discharges in Khorkhori and Syedli karst springs shows a 7% of proportional error. Such negligible error indicates an appropriate precision of the catchment delineation and the delineated area may be considered as springs catchments. Significant difference between the calculated volume of recharge and discharging volume from Dehgah karst spring may be interpreted in this way: since the delineated preliminary catchment of Dehgah spring is situated in southern parts is limited by Khorkhori and Syedli catchments and in Northern part is limited by mountainous part and from the physiographic and hydrologic points of the view there is no possibility for correction of the catchment and increasing the delineated area so it could be concluded that there is a hydraulic connection between Khorkhori and Syedli with Dehgah and some portion of the discharging water from Khorkhori and Syedli which are situated in upstream of the Dehgah, after penetration in river bed materials remerge in Dehgah spring.

Key words: Hydraulic connection, Catchment area, Dehgah and Khorkhori Karst springs



Shahrood University of Technology
Faculty of Earth Sciences
Hydrogeology- Environmental geology group

**Investigation of hydraulic connection between Khurkhuri and Dehgah
Springs, Northarn Khorasan**

By:

Mehdi Tavakolian Moghadam

Supervisor:

Dr. Gholam Hossein Karami

January 2021